

鱼道：

生物学依据、
设计标准及监测



 中国农业出版社

鱼道：生物学依据、 设计标准及监测

主 编：E.VIGNEUX(法)

翻 译：王 珂 李志华 刘明典
刘绍平 段辛斌 罗宏伟
徐树英 吴 强 杨青瑞

审 校：陈大庆 昌永华（特邀） 王瑞雯

中国农业出版社
联合国粮食及农业组织
法国国家水资源与水源环境办公室
2011·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

鱼道：生物学依据、设计标准及监测 / 联合国粮食及农业组织编；王珂等译. —北京：中国农业出版社，2011. 10

ISBN 978-7-109-16113-9

I. ①鱼… II. ①联… ②王… III. ①鱼道—研究
IV. ①S956.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 205559 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

责任编辑 刘爱芳

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月北京第 1 次印刷

开本：889mm×1194mm 1/16 印张：10.5

字数：286 千字

定价：80.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误，请向出版社发行部调换)

02—CPP10/11

本出版物的原版系法文。此中文翻译则基于联合国粮食及农业组织、法国农业及环境工程研究所 (Cemagref) 和法国渔业高级理事会于 2002 年联合出版的英文版 (即 LARINIER M., TRAVADE F., PORCHER J. P., 2002: Fishways: Biological Basis, Design Criteria and Monitoring, *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 364 *supp.*, 208 *p.*), 由中国水产科学院长江水产研究所安排并对翻译的准确性及质量负全部责任。如有出入, 应以英文版为准。

ISBN 978-7-109-16113-9

本信息产品中使用的名称和介绍的材料, 并不意味着联合国粮食及农业组织 (粮农组织) 或法国国家水产资源与水资源环境办公室 (ONEMA) 对任何国家、领地、城市、地区或其当局的法律或发展状态、或对其国界或边界的划分表示任何意见。提及具体的公司或厂商产品, 无论是否含有专利, 并不意味着这些公司或产品得到粮农组织或 ONEMA 的认可或推荐, 优于未提及的其他类似公司或产品。本出版物中表达的观点系作者的观点, 并不一定反映粮农组织或 ONEMA 的观点。

版权所有。粮农组织鼓励对本信息产品中的材料进行复制和传播。申请非商业性使用将获免费授权。为转售或包括教育在内的其他商业性用途而复制材料, 均可产生费用。如需申请复制或传播粮农组织版权材料或征询有关权利和许可的所有其他事宜, 请发送电子邮件致: copyright@fao.org, 或致函粮农组织知识交流、研究及推广办公室出版政策及支持科科长: Chief, Publishing Policy and Support Branch, Office of Knowledge Exchange, Research and Extension, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy。

© ONEMA 1992 和 1994 年 (法文版)

© ONEMA 2002 年 (英文版)

© ONEMA 和粮农组织 2011 (中文版)

法文版出版者：G. SIMMON，渔业高级理事会理事长（巴黎）

主编：E. VIGNEUX，教育局长（博沃）

编辑委员会：

- P. ALEXANDRINO，波尔图大学（葡萄牙）
- J. ALLARDI，环境部，巴黎（法国）
- J. L. BAGLINIÈRE，全国农艺研究所，雷恩（法国）
- P. BERREBI，全国科学研究中心，蒙彼利埃（法国）
- R. BILLARD，国家自然博物馆，巴黎（法国）
- Ph. BOET，内陆水生生物资源科学单位科技信息处（法国）
- G. BOEUF，法国海洋开发研究所普卢赞（法国）
- B. CHEVASSUS，全国农艺研究所（法国）
- P. DE KINKELIN，全国农艺研究所，茹伊昂若萨（法国）
- J. DODSON，拉瓦勒大学，魁北克（加拿大）
- M. DORSON，全国农艺研究所，茹伊昂若萨（法国）
- S. DUFOUR，国家自然博物馆，巴黎（法国）
- P. S. ECONOMIDIS，亚里士多德大学（希腊）
- J. C. EIRAS，科学院，波尔图（葡萄牙）
- P. ELIE，内陆水生生物资源科学单位科技信息处，波尔多（法国）
- D. GERDEAUX，全国农艺研究所，托农莱班（法国）
- B. GONCHAROV，科学院，莫斯科（俄国）
- J. HAURY，国立雷恩高等农业学校—全国农艺研究所，雷恩（法国）
- B. JALABERT，全国农艺研究所，雷恩（法国）
- Ph. KEITH，国家自然博物馆/渔业最高委员会，巴黎（法国）
- C. LÉVÊQUE，全国科学研究中心，巴黎（法国）
- J. C. LEFEUVRE，国家自然博物馆，巴黎/雷恩大学（法国）
- J. LOBÓN CERVIÁ，科学研究高级理事会，马德里（西班牙）
- A. NEVEU，全国农艺研究所，雷恩（法国）
- J. C. PHILIPPART，动物研究所，烈日（比利时）
- P. RAB，动物生理与遗传研究所，利贝乔夫（捷克共和国）
- C. RUHLÉ，野生动物与鱼类处，圣加仑（瑞士）
- J. A. SANCHEZ PRADO，奥维耶多大学（西班牙）
- L. THALER，蒙彼利埃第二大学，蒙彼利埃（法国）

致 读 者^{*}

多年来, *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 学报鼓励高质量科学论文的发表, 这些论文涵盖了大部分对淡水生态系统管理至关重要的学科。

读者的反应鼓励我们在覆盖多种学科的传统文章和只针对特殊主题的文章之间进行选择。这个文献与 1992 年在法国出版的 (326/327) 关于如何改善鱼类溯河或降河洄游顺利通过障碍物这一问题的译本不同。文章包括一些可以单独参考的补充论文。环保部门的同事 (以前的国家河流机构) 已经认识到了这项工作的意义, 并于几年前就开始了翻译工作, 我们希望成为它的一部分。

自从最初的法语版本出版到现在已经将近十年了。在这期间我们接受的反馈和这些年的发展, 使我们不得不针对某些部分做一更新。尽管大部分是从原始的出版物直译过来, 但是随着一些充实的研究和在这段时间 (特别是在法国) 工作的进展, 一些文章被略微修改了, 其他有的则完全被重写了 (例如与降河洄游相关的最后一个问题)。

我们相信, 这本著作可以为管理者提供技术指南, 为专家更新基础知识, 并且可以使读者认识到以生物学家、水力工程师和土木工程师的经验为基础的多重交叉学科的重要性, 意识到对于自己目前岗位知识更新的需要。

进一步来说, 洄游鱼类的溯 (降) 河通道的保留要求在所有合作伙伴之间公开对话 (产业公司、地方当局、行政部门、科研家和用户)。我们相信, 这个特殊出版物将对洄游鱼类中受威胁种类的保护提供具体解决方法。

我们非常感谢启动本书翻译的环境部门, 特别是我们的同事 Greg AMSTRONG, 渔业官员, 他为保证翻译的质量花费了很多时间和精力。

我们也非常感谢粮农组织 (内陆水域资源和水产养殖部), 他们对启动本书的出版工作表现了巨大的兴趣, 并对它的出版和发行做出了巨大贡献。

最后, 我们也对 Cemagref 致以崇高的谢意 (科技信息服务处—DICOVA—和内陆水生生物资源科学部), 它为新版的出版发行提供了可靠的后勤保障。

Erick VIGNEUX
Michel LARINIER

* 即致英文版的读者。

英文版序一

内陆渔业长期为人类提供重要的食物来源。为了充分利用资源，改进食物安全和生活水平，联合国粮农组织数十年来一直通过各种各样的区域性活动和日常程序来关注内陆渔业问题。实现这一目标的一个途径是通过开展可持续渔业管理实践，这不仅对于发展中国家的渔业管理有很大的重要性，对于渔业资源丰富的国家也同样适用。

内陆渔业，一般来讲，其特征是与水生资源的其他用途之间有很密切的关系。全世界的多数国家和地区，对渔业的主要冲击并非源于渔业本身，而是源于外部因素，对于内陆渔业更是如此。结果，对于资源的保护和可持续利用的大部分方面受到了经察觉到的社会优越性和财政的重要性的影响。避免或减轻负面影响是一个与其他人交涉和咨询的问题。渔业必须在由外部因素引起的限制之内管理，并且在有为渔场的常规管理的空间时，需要对外在冲击的缓和或修复技术上给予注意。

人类活动譬如沼泽地开垦对水生环境的变动逐渐加大。对于农业、都市化、废物处置、水提取和调动、以及航海和为灌溉和水力发电建坝，这些导致了内陆水域栖息环境的重大变化，对渔业储备有着显著的影响。从可信赖渔业的管理方法和相关的技术指南一致的角度来看，粮食与农业组织的渔场部门，通过它们的主要工作，通过提倡水生环境的修复作为渔业内陆水域管理的一个适当的工具，旨在提高可信赖渔业的充分发展。

《鱼道：生物学依据、设计标准及监测》这本书是关于鱼道的规划、建设和效率监测所有方面知识的汇编。强调必须考虑种群的生物学和行为特征，它从工程学的角度对过鱼措施进行了详细描述。因此本书有助于提高关于缓和措施重要性的认识。这本书法语版已经出版很多年，但将其翻译成英文并出版可以使它的信息在更加宽广的人群中推广。与粮食和农业组织联合出版，可以使本书得到最大范围的发行，有助于使更多人认识到缓和措施的重要性。因此，本书也更加容易地传播到那些频繁修建水坝和那些急需把缓和和设备整合进入大坝的发展中国家。

粮农组织（FAO）非常欣赏作者在鱼道设计和评估领域中的丰富经验以及他们在处理信息方面的专业水平，这本书将在全球范围内被充分认可，内陆水域资源和水产养殖部门（FIRD）为本书英语版本的出版提供了资金。特此感谢 FAO 出版和多媒体服务的友好合作。

粮农组织渔业及水产养殖部
内陆水资源及水产养殖处处长
贾建三

英文版序二

在英国和威尔士的河道中有很多影响过鱼的障碍。这些障碍对当地鱼群的生态效应存在着不利的影响，尤其是对于那些迁移鱼类譬如鲑鱼和海鳟鱼，这些鱼都有很高的经济价值和娱乐价值。

由于许多不同的因素，在最近二十年，鲑鱼种群的数量明显下降。这些因素与海洋环境的联系，现在还不是很了解，更不用说在我们的控制之内了。因此，为了使成年鲑鱼产品产出最大化，必须确保去除这种鱼在生命周期的淡水阶段中的限制，使这个阶段很好地被了解并且处于我们的控制范围之内，以便使成年鲑鱼产品最大化。对上游和下游迁移来说，拆除或绕过阻碍是达到这个目标的一个极其重要的部份。

迁移中障碍的拆除和减少也是粗放式渔业储备得以成功管理的一个重要元素，即便不以像鲑鱼种群那样如此壮观的方式，这些鱼也需要自由地迁移。另外，我们需要确保保护价值高的稀有鱼种类能自由通过，譬如美洲河鲑，为未来子孙保护鱼类种群。的确，所有鱼类种类都从能够充分利用其最佳生境获益是一个事实，特别对于那些生命周期的不同阶段而言，最佳生境在时间和空间上几乎总是分开的。

过去四十年里，英国和威尔士采取了很多措施来去除对鱼类种群的首要限制——低劣水质，低劣水质是工业化的遗产。即使这个限制被去除了，还有其他遗患，如河道中的工业测流堰，限制了鱼类充分利用栖息的潜在范围。

鱼道是补偿障碍不利影响的一个重要手段。因此，英国和威尔士环境机构很高兴通过与我们的法国同事合作，将1992年首次出版的这本学报翻译成英语，把对鱼道的知识和经验的重要贡献带给更广大的读者。希望通过这种做法，我们能为在法国更加广泛的利用鱼道铺平道路。

David CLARKE
Head of Fisheries
Environmental Agency,
England & Wales

摘 要

作者在本文里概述了一些基本原理，这可以用作在水坝或阻碍规划过鱼设施的方针指南。第一部分主要介绍跨河障碍对于自然鱼群的消极作用，主要导致了鱼群丰度的减少甚至种群灭绝。法国给出了在障碍处过鱼设施的法律规定。第二部分描述了不同过鱼设施的功能特点和设计参数，主要集中于优势，极限和各种类型的费用：水池类型鱼道，挡板鱼道，鱼锁，升鱼机，自然旁路渠道，前堰坝。重点在于鱼道位置，入口的水流条件以及泄流量。一些过鱼设施必须对美洲河鲱、年轻鳗鱼和幼鳗特别注意。提出各种各样的监视技术来评估过鱼设施的效率（诱捕，自动计数，录影记录，遥感监测）。通过管道、岩石测流堰和河口处障碍的鱼道也涉及了。最后部分讨论了在水利电站处降河洄游问题：估计在泄洪道和水力涡轮机处鱼的死亡率，鱼类遮蔽物设计和防止降河洄游鱼类进入进水闸的牵制技术的选择。特别提及在法国普遍应用的技术，例如，下游旁路表面聚集平常的垃圾，集中他们的设计标准，优势和极限。

目 录

致读者	v
英文版序一	vi
英文版序二	vii
摘要	viii
第一章 鱼道：生物学依据、限制及法律问题	1
1. 洄游性鱼类：若干定义	1
2. 自由洄游的障碍：洄游性鱼类衰退的主要历史因素	1
3. 自由迁移的必要条件	2
4. 重建自由洄游通道：方法、困难和局限	4
5. 法规	5
6. 鱼类洄游设施的效率	8
第二章 鱼道概况	9
1. 过鱼设施的原理	9
2. 鱼道的不同类型	9
3. 鱼道选择的标准	10
4. 鱼类通过设施故障的主要原因	11
第三章 设计鱼道时需要考虑的生物学因子，溯河洄游障碍的概念	15
1. 鱼类的游泳能力及鱼类通过设施中水的流速	15
2. 鱼道设施中的照明	20
3. 洄游障碍的概念	21
第四章 鱼道的位置	23
1. 鱼类通过设施的吸引力	23
2. 影响鱼道位置选择的因素	23
3. 鱼道入口处的水力条件	27
4. 鱼道设施的保护措施	31
第五章 水池型鱼道、前拦河坝及自然旁路水道	35
1. 水池型鱼道的原理	35
2. 水池间落差和水池内流态	35
3. 水池尺寸	36
4. 槽孔、潜孔和竖缝的最小尺寸	37
5. 水池式鱼道流量的估计	37
6. 水池型鱼道的规格	39
7. 水池型鱼道对上、下游水位变动的适应	40
8. 水流控制断面	41
9. 水池鱼道的有效性	42
10. 水池鱼道的例子	43

11. 前拦河堰	49
12. 近自然旁路通道	50
第六章 挡板鱼道	58
1. 原理	58
2. 特征和运行	58
3. 游动区段和休息池的长度	59
4. 挡板鱼道的利用与限制	60
5. 平面挡板鱼道或丹尼尔鱼道	60
6. FATOU 鱼道	61
7. 超高效底部挡板鱼道	65
8. 既可以过鱼又可过船的 V 型挡板鱼道	67
9. 阿拉斯加陡峭鱼道	69
第七章 鱼闸和升鱼机	74
1. 鱼闸	74
2. 升鱼机	77
第八章 通过涵洞、岩堰及河口障碍物的过鱼通道	88
1. 通过涵洞的过鱼通道	88
2. 通过岩石堰的过鱼通道	93
3. 在海岸和河口障碍处的过鱼设施	94
第九章 西鲱鱼道的设计	100
1. 引言	100
2. 西鲱的游泳能力和洄游行为	100
3. 水池型鱼道	101
4. 挡板鱼道	103
5. 升鱼机和鱼闸	104
6. 西鲱鱼道的吸引力和设置	104
7. 西鲱鱼道的效率	104
第十章 鳗鱼道	109
1. 生物学要素	109
2. 通过障碍的不同方式	110
3. 幼鳗和黄鳗过鱼设施的设计	111
第十一章 鱼道设计、施工监理、成本、水工模型研究	117
1. 鱼道设计	117
2. 施工	120
3. 鱼类通过设施的造价	121
4. 水工模型研究	122
第十二章 鱼道监测技术	123
1. 鱼道监测	123
2. 监测水力和机械运转状况	123
3. 收集定性生物学信息	124
4. 计数鱼道中鱼的数量	124
5. 鱼道真实效率的评价	130

第十三章 降河洄游：问题与设施	135
1. 概要.....	135
2. 降河洄游涉及的种类和生命周期阶段	135
3. 人工治理河流对降河洄游鱼类造成的问题	135
4. 降河洄游设施	138

第一章 鱼道：生物学依据、限制及法律问题

J. P. PORCHER^① F. TRAVADE^②

1. 洄游性鱼类：若干定义

鱼类的种群非常密切地依赖于其生活并支持其所有生物功能（生殖、营养、运动等）的特定水生环境的特征。

这种依赖性在洄游性鱼类中是非常明显的，在它们生命周期的主要阶段如产卵、幼鱼发育、成鱼和性成熟过程需要不同的环境，而在不同的环境之间移动是此类鱼类生存所必需的。

洄游性鱼类主要分为两种：

河湖间洄游性（Potamodromous）种类，这种鱼整个生命周期在淡水中完成，且它的繁殖和觅食区域可能被或大或小的距离所隔断。

所有鱼类都在河流集水区四处活动，但这种迁移行为对它们生命周期的成功完成是重要的。有些种类譬如白斑狗鱼（*Esox lucius*）、鳟（*Salmo trutta fario*）、湖鳟（*Salmo trutta trutta*），生命周期的连续阶段所必需的区域划分非常不同，并且经常相隔甚远。为了维持健康和成功的种群，有强烈的洄游需求。这些需求在其他种类中较不明显，如欧白鱼和拟鲤。然而为了避免生殖隔离，有必要维持河段之间个体的循环交流。

淡海水间洄游（Diadromous）种类，在他们的生命周期过程中必须改变生活环境，部分发生在淡水中，部分在海水中，生殖区和索饵区之间距离可达数千公里。

随着栖息地的每一次变动，淡海水间洄游鱼类在外形和生理上的变化使它们容易受到伤害。对于迁移中的年幼鲑科鱼类，这种变动叫做幼鲑初次降海，可以使它们适应海洋阶段的生活。

淡海水间洄游种类又可分为两种类群：

溯河产卵（Anadromous）种类，如大西洋鲑鱼（*Salmo salar*）、美洲河鲱（*Alosa alosa*）、海七鳃鳗（*Petromyzon Marinus*）、鲟鱼（*Sturio sturio*）等，在淡水中繁殖，在海水中生长。这种鱼类洄游到淡水是出于繁殖的目的。溯河产卵的种类可以准确的识别并回到它们出生的河流集水区域，误差率非常低。这种返回到它们诞生河（“回家”）的现象主要依赖于嗅觉对水流的识别。因此，各江河流域都有属于它自己并且构成独特的种群群落。

降河产卵（Catadromous）种类，如鳗鲡（*Anguilla anguilla*），具有相反的生活周期。洄游返回到淡水是出于索饵的目的。对于欧洲鳗鲡，亲鱼会聚集于马尾藻海。从任何一个地方或流域而来的亲鱼并不会发生种群的隔离现象，因此欧洲大西洋海岸只有一种鳗鲡种群的存在。

2. 自由洄游的障碍：洄游性鱼类衰退的主要历史因素

据观测，在过去的两个世纪，法国洄游性鱼类的地理范围在不断缩小，并且近期减少的趋势有所增大。

① Conseil Supérieur de la Pêche, DR 2, 84 Rue de Rennes, 35510 CESSON SÉVIGNÉ - France.

② Electricité de France, Research and Development, 6 Quai Watier, 78401 CHATOU Cedex - France.

洄游种类的衰退尤其以淡水水间洄游种类最为明显。在大多数情况下，其衰落的主要原因在于河道建筑阻止了鱼类的自由迁移。直到现在这一原因对鱼群衰退的影响超过了水污染或过度捕捞。河道阻碍是鱼群完全消失（莱茵河、塞纳河和加仑河的鲑鱼等）或某些种类被限制在河流某个有限河段的原因（卢瓦尔河的鲑，加仑河和罗讷河的西鲱）。

直到 20 世纪 70 年代期间，由于科技的进步，迁移种群衰落的趋向得到扭转，人们才开始考虑将一些鱼类向他们的原产地迁移。从而启动了洄游种群恢复的繁育计划。

3. 自由迁移的必要条件

3.1 迁移必要条件的种间差异

表 1 列出了主要淡水水间洄游种类的生物学特征。溯河产卵的种类其繁殖区域分布在整个河系，上游和中游为鲑科鱼类，中游和下游为七鳃鳗，鳗鱼倾向分布于整条河流。

表 1 大部分迁徙种类的生命周期特征

鳗鲡	生活周期的特征		鲑 (<i>Salmo salar</i>)	海鳟 (<i>Salmo trutta</i>)	阿勒斯西鲱 (<i>A. alosa</i>) 芬塔西鲱 (<i>A. fallax</i>)	七鳃鳗 (<i>Petromyzon marinus</i> <i>Lampetra fluviatilis</i>)	鳟 (<i>Acipenser</i> <i>sturio</i>)
	马尾藻海	生殖场点	生殖场所的位置	上、中区	上、中区	中、下区	上、中区
		生殖场所的特征	砾石床水流	砾石床水流	卵石床水流-浮性卵	砾石床(鲑)	水流深沟
3月~7月	日期	日期	11月至次年元月	11月至次年元月	5~7月	海七鳃鳗: 3~6月 温度>8~10℃, 七鳃鳗: 5~6月 温度>15℃	5~6月
	孵化期	孵化期	孵化和再吸收 大约3个月	孵化+再吸收 约3个月	孵化: 18℃ 7天, 22℃ 4天	孵化: 海七鳃鳗: 18.5℃, 10~13天	孵化: 19℃ 3 天, 14℃ 7天
假定: 1年	海水中迁徙期	淡水中生活的时间	1~2年	1~2年	3~6个月	未成熟生活: 约4~5年	约6个月+数月 河口生活
夏季一些阶段	移居淡水区	降河洄游	3~6月	3~6月	夏、秋季-河口生活期	海七鳃鳗: 10月~2月 七鳃鳗: 10月~4月	冬季
3~10年	淡水中生活时间	海水中生活时间	1~3年	1个夏季至2年	3至5年	海七鳃鳗: 20~31个月 七鳃鳗: 17~29个月	寿命>60年, 未成熟鱼返回 至河口
5~12年	初次成熟最小年龄	初次成熟最小年龄	约3年	约3年	雄性: 3年 雌性: 4年	6~7年	约10年
秋、冬季 (流量增加达峰值)	生殖洄游期(降河)	生殖洄游期(溯河)	依鱼群数目而变, 一整年数次	一个峰值在6月~7月, 一个峰值在秋季	3月~7月	海七鳃鳗: 12月~5月 七鳃鳗: 10月~4月	3月~6月
否	多次产卵	多次产卵	很少 (<10%)	很频繁	阿勒斯西鲱 罕, 芬塔西鲱 很常见	否	是
降河产卵种类	溯河产卵种类						

大西洋沿海的流域可能在它们的整个流域长度中皆提供无论哪种洄游鱼类不同生命阶段所需的生境。

只有当所有合适的生境对洄游性鱼类而言都容易抵达，才可能繁育或恢复其数量。管理策略必须考虑到所有河道中障碍物的本质和位置地点以及该处的鱼群种类。

在下游的河道中，必需在所有障碍物间维持永久且完整的自由通道。所有障碍物都必须是鱼类能够通过通过的，并且每个障碍物对洄游造成的时间延迟应尽可能减到最小。

当障碍位于生长区或生殖区中部时，在最下游的障碍物上修建鱼道可以直接增加鱼类数量。鳗鲡和美洲河鲑就是例证。使这些种类在通过障碍时的时间延迟减到最低同样是必要的，因为它们活跃的迁移时期是有限的，且对于西鲑来说，这个时期离它们的繁殖期非常近。

对于比淡海水间洄游 (Diadromous) 种类有更多限制要求的河湖间洄游种类 (Potamodromous) 来说，在河段间保持联系是很有必要的，而完成迁移过程的鱼类数目较不重要。如果仅仅考虑这一种鱼类，虽然鱼道中的水力条件必须细心设计，但可以接受鱼道吸引力水平稍微弱弱的情况。

3.2 自由迁移几乎是一个固定的必要条件

在大型河流中由于许多鱼类洄游期在时间上的重叠，所以必须保证河道障碍物上可提供永久的通道。图 1 说明了这一点，该图显示了 Dordogne 河 Bergerac 鱼道每月平均通过的鱼的数量。春天 (4~6月) 洄游高峰显示了西鲑的产卵洄游及河湖间洄游种群的迁移达到顶峰。除了在这个时期外，特定种类的鱼在特殊期间也出现相对集中的连续运动 (例如鲑和海鲱的洄游峰值期在年末，即 10 月到 12 月)。值得注意的是，Bergerac 诱捕笼的结构不能监测七鳃鳗和鳗鱼的通过，这会增加春夏两季记录的鱼的总数。

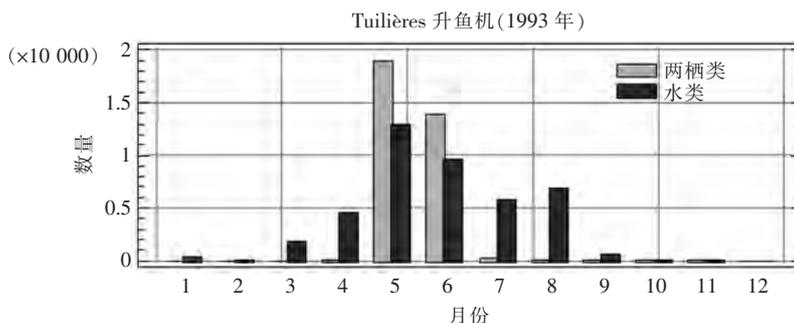


图 1 Dordogne 河 Tuiliere 升鱼机每月平均洄游鱼量

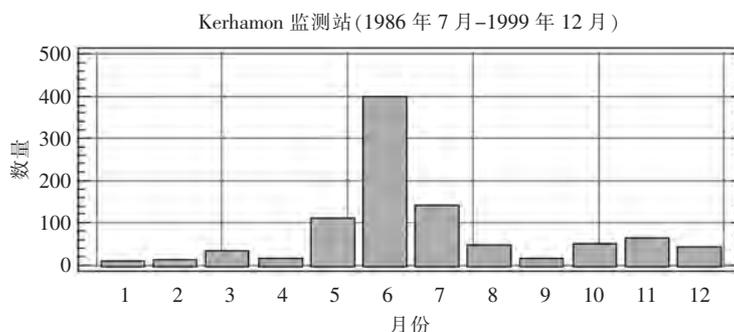


图 2 Elorn 河 Kerhamon 监测站每月平均洄游鱼量

在鲑鱼出现的河中连续监测数年便可得知一整年中什么样的水文气候条件对迁移有利。图 2 显示

了在 Kerhamon 站捕捞鲑鱼的月平均数量（法国，Elorn 河）。5、6、7 三个月的显著峰值与首次从海洋返回至淡水的幼鲑（仅在具有 Armorican 丘陵的河流特征的海洋中短暂逗留的鲑）的到达时间相符。然而，洄游活动在整年都在持续，只是强度上有一些波动。

由于现在存在很多鱼类种群，所以鱼道只在非常短的时期可以空闲，不用运转。例如，这也许发生在某些河流集水区上部区域，鲑科鱼类产卵期开始前的一小段时间。但是，不论什么原因，当鱼类到达河流的障碍处迁移开始时，必须保证鱼道的畅通。在没有鱼道的情况下（或鱼道设计的非常不合理），迁移鱼群在通过阻碍时可能受到伤害或出现死亡。在幼鳗和小鳗鱼被阻拦于水坝下游时，它们也可能因遇到掠食性动物而使死亡率增加。

3.3 无法永远保证无障碍的自由通道

简单地提供一种过鱼设施本质上不能解决鱼群洄游的问题，必须不断的维护设施，并且不断地核实它的效率，因为任一环境变动都能影响它的最适性能：由于渠道施工或河床的不稳定性造成河流障碍处上游或下游的水位有所变动；在站点水力操作的变动（装备的变动、涡轮安装或拆除、新的操作步骤）。

在洄游路线上只要有一个鱼道运作不佳便足以完全毁掉其他对鱼类的生存和发展所做的努力。因此在其上重建自由洄游通道的水体必须永久地严密监测。它不再被视为一个自然系统，而必须灵活处理。

4. 重建自由洄游通道：方法、困难和局限

4.1 设计鱼道需要生物学和水力学两种技能

洄游种类的生物学要求是鱼道设计的依据。鱼道这个术语掩饰了一些环境情况多样性。它们实际上应该叫做鲑科鱼类鱼道、西鲱鱼道、鲤科鱼类鱼道或鳗鲡道。通过对迁移种群游泳或飞跃能力以及面对障碍时它们的行为反应的认识，才得以建立某一鱼种过鱼设施大小要求的设计标准，将来设计鱼道时不应该忽略这些标准。设计阶段必须考虑到有关站点信息。并且为了保证在迁移季节期间的河流正常流量下设施能够正常运转，必须应用水利和土木工程的必要技能。

4.2 在河道障碍处提供一种过鱼设施不能完全补偿对洄游鱼类造成的伤害

为迁移鱼类建立鱼道并不意味着可以无限制的在河流上修建大坝。首先，在河道中修建大坝会使育幼和产卵地河流水体理化性质或者水力特征改变，例如产卵和育幼地区的淹没，从而会对洄游鱼类造成某些无法挽回的损害。第二，即使是最佳设计并且对鱼有很大吸引力的鱼道设施也必然会延迟鱼类的迁移过程，并且障碍物在河道上的累积作用也可能会迅速达到一个与维持洄游鱼类数量比例不相容的值。这对于一些要求比较苛刻的种类（美洲河鲑）来说是很根本的问题，而对降河洄游的迁移种类，可能伴随着由于无法通过涡轮机和泄洪道而造成的死亡率。

4.3 自由通过只是洄游鱼类资源管理的一个方面

自由通道是洄游鱼类数量的维护或恢复的一个必要前提。在过去，这一因素是某些种类衰退或灭绝的主要原因，而将来它只是未来鱼群管理方针中的一项因素。

迁移种群的数量也受其他许多因素调控，且最近一些因素已经出现：

- ①水质的恶化以及水体中天然流量的改变；
- ②与洄游鱼类有关的疾病或寄生生物的进入或传播；
- ③与河流水体（抽水设施、防洪设施）、局部环境（排水湿地，洪水平原）或流域之间的物理性

冲突引起的生境品质的改变；

④新渔场面积的增加（鲑鱼喂食的面积）或鱼捕力的增加。

在对所有这些因素进行仔细评估以后，方可能制定迁移鱼类鱼群数量管理的政策。此外，必须同时应付所有的问题，否则也许会发现总会有某项因素限制了或甚至破坏了其他的努力成果。

4.4 鱼类通过设施必须根据其生物学价值和经济价值及其成本来评价

处理障碍设施以维持自由通道的目的是：

以维持或增加洄游种群数量为目标，而将障碍物与洄游物种之生命周期的冲突减至最小；

在少数情况下，如果以提供和鱼群数量维持相当的开发范围，可以考虑增加渔场面积；

在所有案例中都应该比较过鱼设施的效益和费用。以下简单介绍几种方法：

(a) 评价经营的“效益—成本”，特别取决于水利设施在洄游种类活动范围的位置。在所有产卵场下游的位置，建立一个过鱼措施是必不可少的，当部分产卵场在下游时，情况就未必是这样了。在下一情况下，当位于下游的幼鱼生成区没有充分利用，或者当下游洄游鱼类的幼鱼在没有死亡的情况下还没有完成生活史时，你或许会怀疑在障碍之上建立过鱼措施的必要性。

(b) 整个集水区或亚集水区都必须装配许多鱼道时，应确定工程进度的先后顺序。

(c) 根据不同类型过鱼设施所提供的“生物效益”及其费用，决定在同一个站点选用哪一类鱼道。

应考虑到的主要标准如下：

在障碍物上游区域产卵和幼鱼生成的潜力；

如能应用，在障碍物下游区域是否具备育幼，其饱和度如何；

降河洄游鱼类的需求和保证降河洄游鱼类顺利通过障碍物的能力；

溯河洄游和降河洄游鱼类通过设施的成本；

是否具有替代方案，其费用如何（增殖及放流、废弃陈旧障碍物拆除，以及原繁殖场恢复等）。

图3的流程图总结了溯河洄游鱼类的洄游过程。

对某些种类（鲑鱼和部分海鳟）而言，已有足够的技术评估不同的标准并做出合理的决定：

根据鱼类生境的定量描述估计生产能力；

通过计算洄游鱼类的数量、产卵场上的产卵坑、电捕的幼鱼或其他方法对幼鱼数量进行调查来评估现状；

评估降河洄游的问题及通过水轮机或越过溢洪道时可能造成的死亡率；

估计为重建鱼道而建设不同设施的费用（溯河和降河洄游）或选择补偿措施的解决方案。

另一方面，对于其他种类（例如美洲河鲑，七腮鳗）的了解尚且不多，还无法制定满意的长期对策。

5. 法规

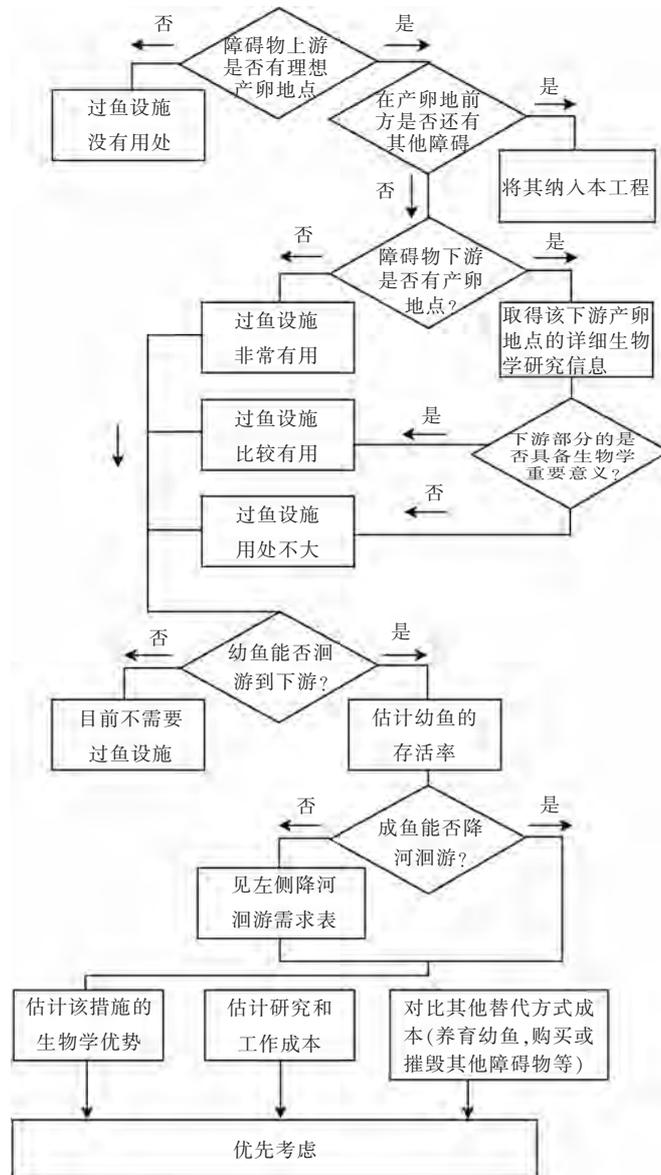
5.1 概要

环境法典 L. 432 - 5 至 L. 432 - 8 条款（见下文）规定了洄游鱼类通过执照持有者的义务，也规定了对违犯者的处罚。

水权：执照持有者必须强制执行法规，以保证：

其负责区域上鱼群经常性地出现、自由迁移及繁殖。应考量的种类定义为“在障碍物建立之时居住于该处水域之鱼种”；

任何或部分水体中的障碍物，鱼类洄游设施所包含的项目是遵守国家法律规定设计，并针对法令



降河洄游的必要性

1. 必不可少；2. 重要；3. 有利；4. 不需要

种类	幼鱼	成鱼
鲑鱼	1	3
海鲱	1	2
七鳃鳗	1	4
河鲱	1	4
西鲱	1	2
鳗鱼	—	1—3 (*)
褐鳟	1	1—2
河鳟	1	1—2
梭子鱼	1—3 (**)	1—3 (**)

(*) 取决于河道的位置 (**) 取决于设施条件

图 3 评估重建河川洄游鱼类以及海河洄游鱼类自由通道的过鱼设施需求流程图

所指定的鱼种。

现有的障碍物有一个五年限期的规定，在期限公告需繁育的水体及鱼种清单之后须限期完成洄游改善。

法律规定，在河道中需要维持最小的水流量，并且强制执行。对于水力发电站可用流量或为满足法律的需要而采取的措施，无法据以申请补偿。

最后，关于这些文本应用的备忘录规定：

首先，没有现有法律登记以及那些正申请许可证或特许权更新的结构物被视为是新的开发而必须履行法律所规定的条件；

其次，有关当局可在新的水工结构物上建造鱼类洄游设施，以满足现存或即将出现的洄游鱼类需要，包括那些未指定洄游繁育的水体，以符合环境法第 L. 432 - 6 条。

5.2 正文

环境法

第三部分 淡水渔业与渔业资源管理

第二章 水生环境的保护与国家渔业权利的保护

第 3 节 水力发电计划相关义务

(农业法典原第二部分，第 3 节)

第 L. 432 - 5 条 (原农业法第 L. 232 - 5 条)

在河道修建任何水力发电站都必须包括一些设施来保证河流中的最小流量，以确保在水力发电站完成后原水体内的洄游鱼类仍能继续存在、自由通过和繁殖。若可能的话，也必须提供防止鱼进入入水口和排水渠道的设施。

这一最低流量不得少于水流在水电系统处的年平均日流量的 1/10 (根据至少连续 5 年数据的评估)，或不低于发电站临近上游端的流量，如后者较低。

然而，对于年均日流量大于 80 米³/秒的河流或河流的某一部分，国务院可以规定它们一个最小的固定流量，而其值不低于河历年均日流量的 1/20。

水力发电站的经营者必须保证设施的运行和维护，可确保水体中具有上述指定的两种最低流量。

上述的规定适用于 1984 年 6 月 30 日即已存在的水力发电站，而经营者的执照或特许权中所定义的实际值与年平均日流量的 1/10 值之间的差距亦逐步缩小。

除非设计使得技术上不可行，否则自 1984 年 6 月 30 日以来的发电计划，以达到本条文第二、三段规定值的 1/4，其最小流量必须在 3 年内增加。政府必须在 5 年后向国会报告实施状况的评估。

这些规定对于任何设施的特许权或经营权的更新亦立即且完全生效。

依据这项条款之规定所产生的施行计划不能构成申请补偿的法律基础。

本条款之规定也不适用于莱茵河和罗纳河这两条国际河流。

第 L. 432 - 6 条 (原农业法第 L. 232 - 6 条)

任何在法令公告的河道、运河或其中某部分上的水力发电计划必须在政府告知后的 6 个月内提供过鱼设施以保证洄游鱼类顺利通过。水力发电站的经营者有责任保证这些设施的运行和维护。

现有的水力发电站必须遵守本条文规定，在集水区或子集水区洄游鱼种清单公告五年之内无偿执行其义务，这个清单由负责淡水渔业的部门，以及若可能的话由负责海事的部门共同制定。

第 L. 432 - 7 条 (原农业法 L. 232 - 7 条)

在第 L. 232 - 6 条的第一段中所列，在 1986 年 1 月 1 日之前依鱼道管理条例下对水流或水流段及运河的分类规定依然有效。

第 L. 432 - 8 条 (原农业法 L. 232 - 8 条)

任何违反第 L. 432 - 5 条和 L. 432 - 6 条之规定的都会受到 1 000~80 000 法郎的罚款。如果有人由于本条款而被判刑，法院可以决定未依以上条文在限期内执行改善措施者，将承担依第 L. 438 - 7 条规定的罚款。

6. 鱼类洄游设施的效率

法律所规定保证鱼类自由通过的义务提高了重视鱼类洄游设施效率之观念，而对于效率目前的定义还很不完善。如果要看作某特定种类设计的鱼道是否有效，要看是对一个个体、种群的一部分还是现在种群中所有个体？是否应该考虑种群通过障碍洄游延迟所花费的时间？

定义效率并不简单，因为效率的概念必须与该种洄游设施上的生物需求（或需求水平）相关。因此过鱼设施效率取决于考察的鱼种，水体中阻碍物的数量，以及阻碍物在水体中的位置。

目标将制定为，使所有的洄游鱼类皆使用鲑鱼和海鳟建在产卵场下游的过鱼设施，如果该水体中阻碍物数量很多，为了使鱼类及时到达产卵场，一定要使它们通过障碍物的时间最短。另一方面，如果鱼道建在上游或者建在产卵场中间，那么它的效率就不那么重要了。

对美洲河鲑来说，它是一种洄游期很短的种类，过鱼设施的效率也须使它们通过障碍的时间最短。

最后，对于鲤科鱼类的过鱼设施来说，这些设施的主要目标是避免在不同河段中出现种群隔离，所以下游所有的鱼群是否都能游上来就不是很有必要了。因此，只要一部分（种群中合理的比例）的鱼群能顺利通过设施到达上游，那么这个设施就是有效的。

鱼类通过过鱼设施的成功率也取决于集水区中障碍物的数量。如果在鱼类洄游河道中有三个阻碍物，每个鱼道的效率只要为 60% 就能保证河流中 1/5 的鱼类能顺利通过。如果河道有 30 个阻碍物，那么鱼道的效率需要是 95% 的高效率才能获得同样结果。

这同样适用于降河洄游的过鱼设施效率，使幼鱼通过涡轮机和泄洪道时减少死亡率。河道中通过障碍时有一定的死亡率在生物学上是可以接受的，降河过鱼措施必须降低在涡轮机上发生的高死亡率时才是有效的。例如，如果每个水电站可接受的平均死亡率为 10%，而电站 A 通过死亡率是 20%，那么降河洄游的过鱼设施的效率必须是 50% 才行。电站 B，若通过死亡率为 60%，那么降河过鱼设施的效率必须是 83% 才行。

此外，为了限制整个流域的最大死亡率，降河过鱼措施的效率必须随着河流中障碍物的数量而增加。

一般而言，过鱼措施对于洄游鱼类的种群数量的潜在影响越往下游越大，也越关键。因此，对于河道较下游河段中的过鱼设施，无论是溯河或降河洄游，都要特别注意。

总之，一个指定站点效率的衡量标准一定要基于研究目标的生物学目的来确定，而且也非绝对值。因此，它必须考虑到过鱼设施在集水区中的位置、确保溯河或降河洄游的能力及其他障碍物的影响。只有通过过鱼设施的操作者和鱼群数量管理单位的通力合作才能使河道中规定的过鱼措施的目标得以实现。

第二章 鱼道概况

M. LARINIER*

1. 过鱼设施的原理

鱼道设施的目标是通过吸引障碍物下游的洄游鱼类至河流的某一指定点，引导致使他们到达上游。目标实现的方式可以是开辟水路（严格意义上的鱼道），或用一个水箱诱捕洄游鱼类，然后将它们提升到上游（升鱼机或运输系统如运输车）。

所谓有效的鱼道指的是，鱼应该能够顺利发现入口，并且在没有延迟、压力或受伤的情况下顺利地通过，因为这些伤害可能对鱼类成功向上迁移造成影响。

设计鱼道时，应考虑洄游种类的行为特点。特别是它的效率与设施中水的流速及流态密切相关。

鱼道中水的流速必须与洄游鱼类的游泳速度相符合，并且鱼道设计应该考虑所有个体，而不仅仅是体质较好的个体。

一些种类对特殊的水文变化或条件是非常敏感的。包括各水池间水位差太大，曝气过度或紊流太强，存在漩涡或流速太低等。以上所述皆可能成为使鱼顺利通过的障碍。

除水力因素之外，鱼对其他环境因素也是敏感的，如溶氧、温度、噪声、气味等，这些都会产生抑制作用。如果鱼道中的水质与坝前水质有很大差别时（如低溶氧量、水温的不同），这种抑制作用就更加明显。

鱼对周围环境的光强度也有要求或喜好。倘若鱼道入口和鱼道内部的光强度与障碍物附近的光强度明显不同（在入口处光强梯度太大，鱼道内部光照不够，或者对于畏光种类来说正相反的夜间照明），可能导致负面效果。

然而，关于这些参数中的大多数对洄游种类行为的影响，目前报导很少，而且大多数信息通常来自实地观察。这就是为什么对于工程师来说不容易规定设计标准的原因。

2. 鱼道的不同类型

无可置疑地，最常见的鱼道类型是水池型鱼道。这种类型的鱼道从障碍物底端到河流上游有一系列的水池。分隔水池的隔板有堰、槽口、垂直竖缝或者潜孔，这些都用来控制各个水池的水位和鱼道中的流量。水池有双重作用：一方面他们保证鱼道内的水流能够适当的消能，另一方面也为鱼提供休息的场所。两个相邻水池的水位差由经过鱼的种类决定。水池型鱼道的坡度依个案不同，但通常在10%~15%。

在挡板鱼道或“丹尼尔”鱼道（以其发明者的名字命名），将复杂程度不同的挡板装置在陡斜的水槽（高达20%）底部，或底部及两侧。挡板形成的螺旋流能消散水流的能量，从而降低鱼上溯处水流的流速。挡板鱼道中的水流比传统的水池型鱼道中水流曝气更充分且更紊乱。

* CSP - CEMAGREF, GHAAPE - Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE -France

鱼闸（或“Borland”闸）的操作原理与船闸相似：把鱼诱捕到闸室里，然后像小船一样将它们提升到上游。

其他装置如采用陷阱的形式，然后借助于水箱和升降机用机械的方法将捕获的鱼运到上游，或用卡车载运。

自然旁路水道，或分水渠式鱼道，是在河流的一岸从上游到下游挖掘的一条渠道。渠道表面很粗糙，并以人工或自然障碍物譬如堰、石块或河流冲积物来仿造一条自然河道。然而，这类设施的坡度不得高于几个百分比，而且由于它很长，因而这类设备的使用通常受到有限的可利用空间的限制。另一方面，它与当地环境通常融合的很好。

还有许多其他较不正式且较粗糙的方法可以使鱼通过，但通常仅限于中等高度的障碍物。其中一种是在坝下游修建一个或几个拦河堰形成“坝前堰”，形成一系列大水池以分散原有的水位落差。这些坝前堰可以是部分甚或障碍物下游的整个宽度。有时在下游为垂直墙壁时，会在顶部开一个简单的凹槽，或在有倾斜外围侧流堰处设置一对角障碍物，以充分保证鱼的自由通过。

最后一个解决办法，也是最根本有效的，是拆除障碍物。例如在一个不再使用的老磨房坝的情况下，这便是可行的。这个解决方法提供了机会以重建之前被淹没河段原有的环境条件，这些对自然产卵和幼鱼生长是有利的。

3. 鱼道选择的标准

除了移除阻碍物的这个解决方法，上述所有的过鱼设施中并没有所谓效率较高的“神奇”鱼道，经验表明，许多水池型鱼道、丹尼尔鱼道、升鱼机和自然旁路水道已证明是同样有效或无效的。

根据不同的标准（例如跨越的障碍物的高度）将障碍物分类列出，然后根据考虑的鱼种类不同为每一个障碍物提出适当的鱼道类型，这些都是很有吸引力的工作。但是由于要考虑的限制和因素较多（洄游鱼类的行为、水文、水力、站点的地势等），这就意味着每种过鱼措施都是独特的。的确，经验表示，强行分类可能要么导致严重的错误，要么导致过高的成本。

以下几点将有助于在任何特定情况下确定最适当的过鱼设施。

(1) 若同时有数种洄游鱼类（鲑、海鳟、西鲱、鳟、河流性种类等）使用鱼道时，水池型鱼道或自然旁路水道一般是最佳的方案，因为它们比隔板鱼道较不具鱼种选择性。鱼道将会根据要求条件最高的种类来设计（包括水池间落差、水池中的流速、湍流度及曝气等）。

有凹口的水池型鱼道，无论它们底部是否有孔口，都有很大的适用性。这种鱼道流量范围可从每秒几十升变化至每秒几立方米，而且，只要凹口足够深，上游不一定要安装调节设备（自动闸门、潜孔等），洄游鱼类也可适应上游水位的显著变动。

垂直竖缝鱼道特别适合于上游和（或）下游水位波动较大的情况。然而，对于大型洄游鱼类如鲑，鱼道必须考虑竖缝的最小宽度，这意味着要提供较大的水流，至少为 $0.75\text{m}^3/\text{s}$ 。

一般，有潜孔的水池型鱼道，除了上游水位变动显著时作为鱼道上游端的调节段外，几乎没有什么意义。此外，它们还有收集在水池表面累积、无法逃逸的漂浮残渣（木头、瓶子、聚苯乙烯等）的缺点。

在有可能带有大量底床质输沙的水体中，太深的水池可能使粗大的沉积物滞留其中，因此不应该修建这种水池。这些水池间的通道（如垂直的缝和潜孔）应该一直延伸到鱼道的基底，这样有利于沉积物的移除。

美洲河鲱对于水池式鱼道的设计来说是一个特殊问题。这种鱼比鲑科鱼类对于水池中水的流态更加敏感，因此必须采取必要的措施保证他们能顺利通过。在美国对美洲西鲱（*Alosa sapidissima*）及在法国对欧洲西鲱（*Alosa alosa*）的过鱼措施已经有了很好的结果，已经观察到了过鱼的特定条件，

这些条件包括水池中低水平湍流、凹口或与边墙邻近的竖缝足够宽 ($>0.45\text{m}$)、表流而非跌流及漩涡流的限制。有一、两个垂直竖缝的鱼道似乎有效, 尽管鱼道中鱼类显示出“后退”的行为, 但这似乎是该物种固有的。

(2) 挡板鱼道对鱼种有较强的选择性, 它们仅适用于那些游泳能力和耐力都强的鱼类 (鲑鱼、海鳟鱼、七鳃鳗、触须白鱼等)。通常, 它们对于体长小于 30cm 的鱼来说是不适当的。

虽然已经在几个挡板鱼道中监测到了美洲河鲱, 但是由于这种鱼道的水流流态主要是螺旋流, 因此已观察到这种鱼难以轻松地通过鱼道。此外, 可能由于水流的高通气量及紊流度, 这种鱼通过也相当勉强。

挡板鱼道对于一些小河尤其适合, 因为这些小河只能提供每秒几百升的流量, 且在那些高度较低, 具有向下游延伸斜坡的旧河堰或磨坊坝, 很容易并入其结构。

由于障碍物的高度越来越高, 这种鱼道也渐渐不再适用。由于此类鱼道需提供休息池 (约每 2m 落差), 使得过鱼设施的总长度增加, 致使水池型鱼道成为更合适的选择。

某些类型的挡板鱼道 (厚的, 人字型挡板式的鱼道) 在宽度 (至少为 1.40m) 满足时, 也可以在这种条件下应用。

挡板鱼道一般不安装在带有粗底床质的河道中, 因为像是大砾石或小卵石很可能会沉积在隔板间, 以致于降低鱼道的效率, 或甚至使其失效。另一方面, 在这种鱼道中产生的螺旋流可以冲刷掉泥沙、沙子和小石渣。

(3) 在水头较高时, 使用升鱼机或 Borland 闸比传统鱼道简易且一般花钱少。鱼闸的主要缺点是不能连续运转。在法国, 升鱼机的技术近几年已经有很大进步。但是, 对于中等高度的障碍物而言, 若坝体结构不适合传统鱼道时, 鱼闸可能是最适合的设计方案。

升鱼机的效率与拦污栅的净网目大小密切相关, 这些网目必须小到足以在体格上防止鱼通过。对于小的鱼种来说, 使用升鱼机会有困难, 因为小型种需要网目非常细的鱼栅, 这将导致过多的维护成本。

这两种过鱼设施的操作程序相对来说较复杂 (包括一些自动部件和活动部件, 例如水闸、水箱和格栅), 导致了设备可能失灵或周期性出现故障, 这些故障很可能会频繁出现并且持续很长时间。这两类设施的维护成本也比那些传统过鱼设施高。这就是为什么在法国更喜欢使用“静态” (即无任何活动部件) 鱼道的原因。虽然从土木工程观点来看静态鱼道造价更高, 但是它们较易维护且更可靠。

4. 鱼类通过设施故障的主要原因

当分析鱼类设施性能不良的原因时, 以下为常见的因素:

鱼道缺乏对鱼类的吸引力: 这是由于鱼道的位置不正确, 或者鱼道入口处的流量相对于河道中的流量不足引起。

不良设计的鱼道, 未适当考虑鱼类洄游期间上下游水位的变化, 导致了鱼道中的水流过大或者过小, 或是在鱼道入口有很大的水位落差。这可能是工程规划阶段对上游水位和 (或) 下游水位范围的估计有误, 或上、下游水位后来发生变动 (因水坝运行改变, 障碍物下游河床浸蚀等) 所致。

尺度不够: 水池的尺度不够, 会导致水池容量不足, 引起过多的湍流和曝气、水池间落差过大、对鱼来说水的深度不够、或水池中的流态不适合于目标种。

鱼道频繁的堵塞或阻塞, 这是因为河流中垃圾没有充分去除, 鱼道位置过于暴露, 或者操作者没有细心地维护。浮渣引起的阻塞能够导致鱼类通过设施中水流不足 (凹口或竖缝被堵塞, 辅助水流系统的栅栏被堵塞) 因而阻碍鱼类通过。在这方面, 挡板鱼道和有潜孔的水池型鱼道是特别容易损坏的。即使是部分阻塞 (对流动不引起任何明显干扰) 也有可能使鱼类不能顺利通过。

设施部件故障：调节流量、水池间落差（自动闸门等）的部件，或在升鱼机和鱼闸中维持功能运作的部件（自动闸门、水箱升降机、入口栅栏等）失灵。

与鱼类通过设施本身无关的外因也可能影响其效率。过鱼措施对鱼吸引力的改变是一个最普遍的问题，这涉及到水闸门的调整、涡轮机操作，或者更一般性的关于坝底的水流条件等，这些在工程计划阶段通常未被考虑进去。这些可能会干扰鱼道入口处的水力条件，或者导致鱼在离鱼道相对较远的地方被吸引而困住。

法国的经验表明，鱼道故障最通常的原因是维护不充分和设施缺乏吸引力而引起的性能不良。



照片 1 最佳鱼道



照片 2 Steir 河上的水池型鱼道 (法国菲尼斯泰尔省)



照片 3 Seine 河上的垂直竖缝鱼道



照片 4 Ardeche 河上的三角水池型鱼道



照片 5 Gave de pau 河上的自然旁路水道



照片 6 Evel 河上的平面挡板鱼道（布里塔尼）



图片 7 Trieux 河上的底部挡板鱼道（布里塔尼）



图片 8 Nivelle 河上涂有沥青的坝前堰（法国大西洋岸比利牛斯省）



图片 9 Loc'h 河上的升鱼机（布里塔尼）



图片 10 Tuileries 坝处的升鱼机（多尔多涅河）

第三章 设计鱼道时需要考虑的生物学因子， 溯河洄游障碍的概念

M. LARINIER*

1. 鱼类的游泳能力及鱼类通过设施中水的流速

1.1 不同水平的游泳活动

鱼类的游泳活动，通常可根据每种活动使用不同类型的肌肉分为几种不同的水平（BLAXTER, 1969; BELL, 1986; WEBB, 1975）。

巡航式活动 利用有氧肌肉活动（“红色”肌肉），可不引起鱼类任何较大的生理改变而保持数小时。

爆发式活动 需要持续而有力的活动，因此不能维持很长时间（从几秒到数十秒钟，视鱼类的体长和水温而定）。这一水平的活动与极限加速（“急飞”、“快速启动”和跳跃），即持续时间短的猛烈活动有关联。这些肌肉能量来自于厌氧机制（“白色”肌肉），使肌肉糖原转化形成乳酸。虽然厌氧反应可迅速产生相当大的肌肉力量，但是它们能够供应的能量是有限的，因为肌糖原储备有限，并且超过一定水平，乳酸富集往往抑制肌肉收缩。

持续式活动 能够维持数分钟，但会使鱼疲劳。这种游泳活动使用不同比例的有氧活动和无氧活动，而且力量越大，需要的无氧比例就越大。

1.2 游泳速度与耐力

设计鱼道设施时需要考虑的主要因素之一是有关洄游鱼类的游泳能力，游泳能力用游泳速度和耐力来表达，耐力指的是鱼能够保持这一游泳速度的时间。

躯体和尾鳍的摆动是大多数种类在洄游期活动期间的动力源（尤其在通过障碍时）。

试验表明，鱼类每次身体摆动后前进的距离（A）是它体长（L）的 0.6~0.8 倍（WARDLE, 1975）。因此游泳速度可表示如下：

$$V = A f$$

式中 f 是躯体和尾鳍摆动的频率（每秒摆动的次数）。

因此最大游泳速度可用尾鳍最大摆动频率的函数表示。这一最大频率受到保证鱼前行的肌肉两次收缩之间最少时间（t）的限制。WARDLE（1975）表达如下，他采用 0.7 作为 A 的平均值：

$$V = 0.7 L / 2t$$

试验表明（WARDLE, 1975）：在小型鱼类中，肌肉两次收缩的时间较短。另一方面，厌氧“白色”肌肉的收缩对温度非常敏感，肌肉两次收缩的最短时间随着温度上升而减少。

因此，最大游泳速度取决于鱼的体长和温度。

耐力取决于肌肉中储存的糖原的储备。鱼类一超过其巡航速度，就立即使用这种储备，并且消耗

* CSP - CEMAGREF, GHAAPE - Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France

速率随游泳速度和温度而增加。耐力也取决于鱼类的长度、形态（长度—重量关系，肌肉质量百分率）和温度。

在英国进行的试验（WARDLE, 1980; ZHOU, 1982; BEACH, 1984）取得了一些经验公式，这些经验公式定义了游泳速度、耐力、温度、鱼类个体大小和形态间的关系。

由这些方程能够得出，最大游泳速度和任一速度对不同温度和体长时的耐力，如图 1 和图 2 所示（依 BEACH, 1984）。图 3 显示的是不同温度下不同规格的鱼游泳速度和耐力之间的关系。

这提供了很好的证据表明温度和鱼的体长对于最大游泳速度的重要性，特别是体长对于耐力起着决定性作用。根据温度的不同，同一种鱼的最大游泳速度变化比率在 1 : 2 之间。

这些结果与不同学者（BELL, 1986）提出的在最适合温度条件下可能的最大游泳速度的数据完全一致。最大值对鲑鱼来说，约为 6m/s 至 8m/s 以上，对鳟为 3m/s 至 4m/s，对西鲱为 4m/s 至 5m/s。

VIDELER（1993）根据试验结果（对于体长 < 0.50m 的鱼获得的），提出了一个方程。该方程给出了相对于体长（m）的最大游泳速度

$$V_{max} = 0.4 + 7.4 L$$

必须指出，对于任一条给定体长的鱼，温度升高导致耐力显著下降。因为随着温度升高，最大游泳速度相对加快，伴随肌肉糖原储备消耗速率加快，因此耐力就降低了。

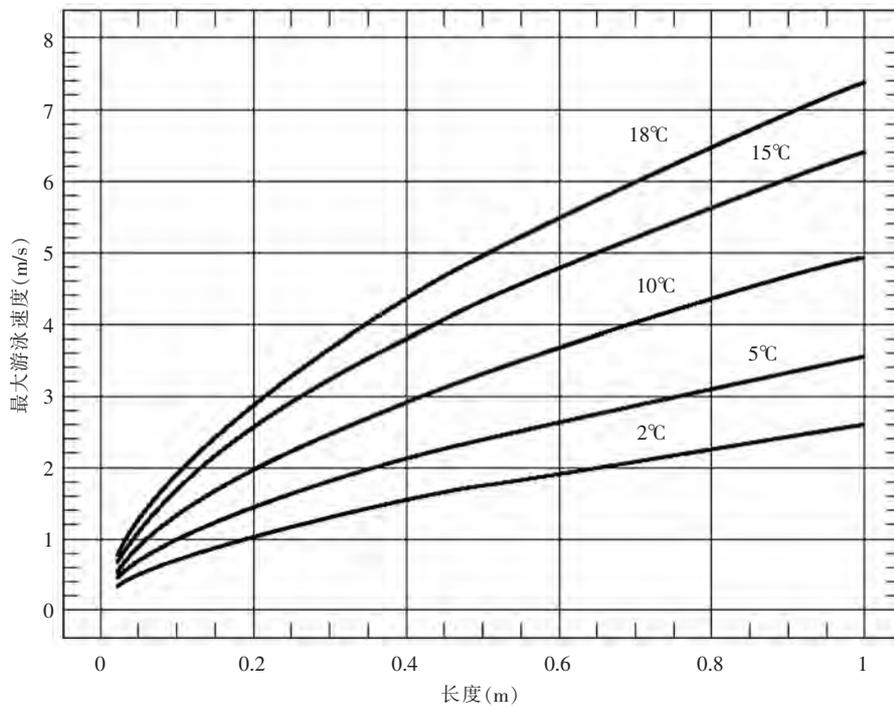


图 1 鲑科鱼类最大游泳速度和体长之间的关系（BEACH, 1984 年）

最大巡航速度（鱼类不显示任何疲劳迹象而能连续游泳的最大速度）随鱼类体长增加而迅速增加。VIDELER（1993）根据实验结果（对鱼类长度小于 0.55m 获得的）汇编提出了一个方程式，该方程根据体长 L（m）给出了最大巡航速度（m/s）：

$$V_{cr} = 0.15 + 2.4L$$

同样的试验结果亦能由下列方程描述：

$$V_{cr} = 2.3L^{0.8}$$

根据个体长度不同，鲑鱼的最大巡航速度约 1.7~2.5m/s，褐鳟约 0.60~1.3m/s，对于体长为 0.15~0.20cm 的大西洋幼鲑，其最大巡航速度约 0.50~0.60m/s。

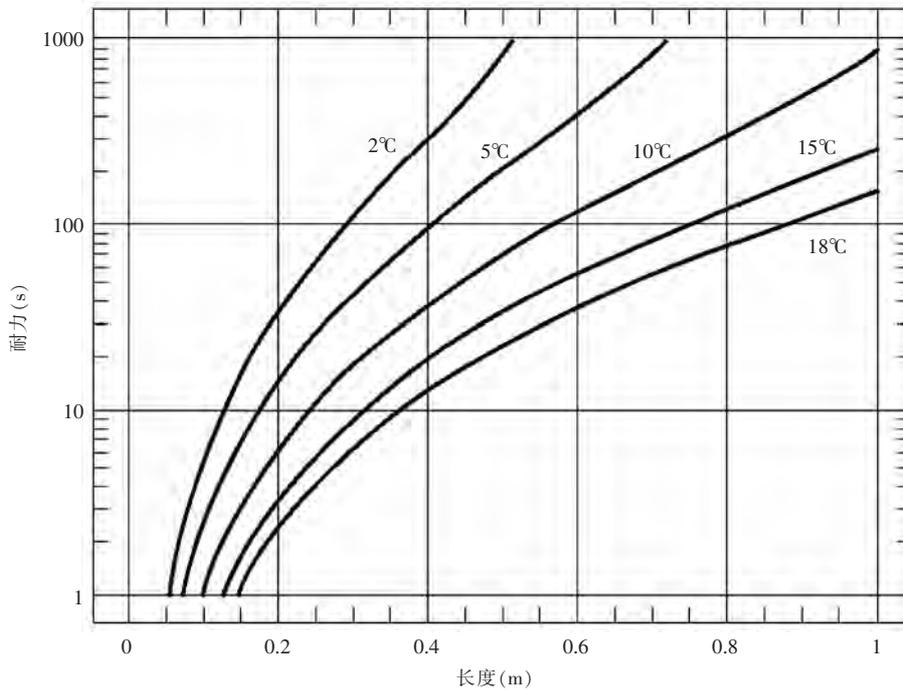


图 2 鲑科鱼类体长、温度与其在最大游泳速度时的耐力之间的关系 (BEACH, 1984 年)

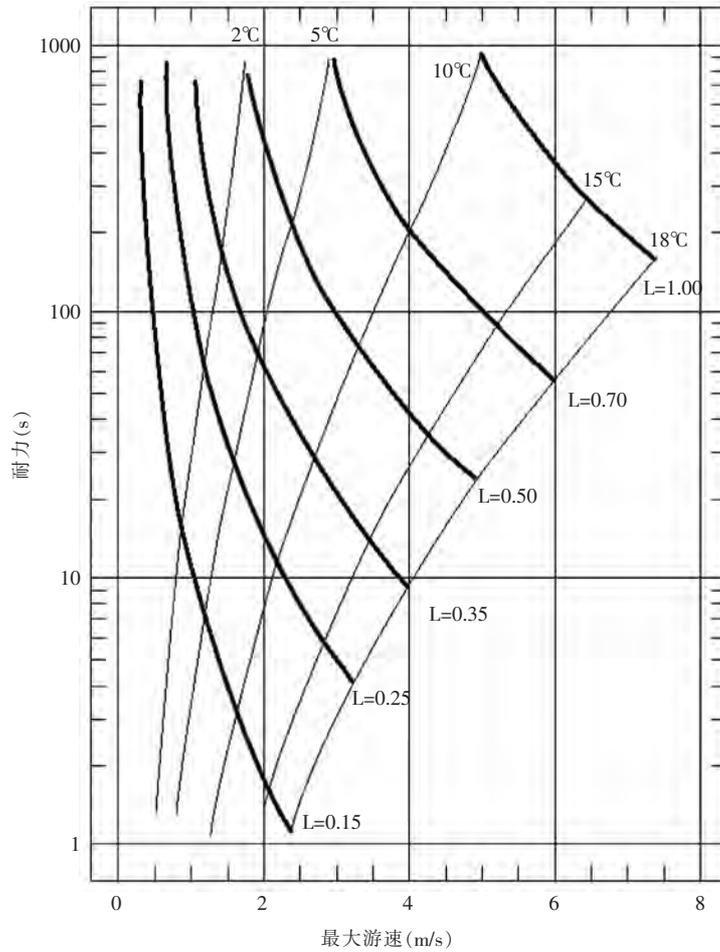


图 3 鲑科鱼类体长、温度与游泳速度和耐力之间的关系

1.3 给定流速的最大游动距离

由先前经验获得的关系式 (BEACH, 1984) 可确定鱼在已知速度 U 的水流中可巡游的最大距离 D 。

这一距离可表示为：

$$D = (V - U) T$$

式中 T 是以速度 V 游泳的单尾鱼的耐力 (用秒表示)。

这个公式可用来估计长度已知的鲑科鱼类可巡游的最大距离，并可用图表示。例如，图 4 显示体长为 0.35m 和 0.25m 的鲑科鱼类最大巡游距离。

这些曲线与图 5 中显示的、由 ZIEMER (1984)、EVANS 和 JOHNSTON (1980) 提出的半经验曲线比较接近，只是后者未考虑温度。

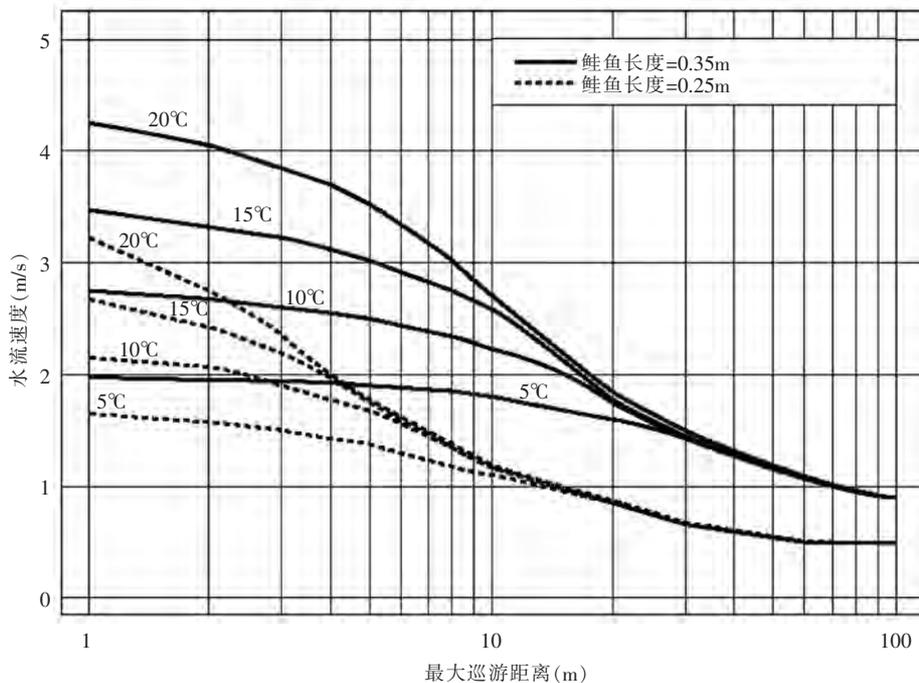


图 4 鲑科鱼类最大巡游距离和流速以及水温之间的关系

1.4 跳跃能力

某些种类，特别是鲑科鱼类，在障碍物脚下，当它们发现能够发挥跳跃能力的环境时，就会使用跳跃来通过障碍。

鱼的跳跃活动可以比喻为一个抛射物的弹道轨迹。轨迹的方程可表示为：

$$X = (V_0 \cos a) t \quad Y = (V_0 \sin a) t - 0.5 g t^2$$

式中 X 和 Y 是导弹 (本例中鱼) 达到的水平距离和垂直距离， V_0 是初始速度， a 是对水平平面的入射角， g 是重力加速度 (9.81 m/s^2)。鱼的轨迹是抛物线，鱼的弹跳高度视初始速度和从水中跃出的角度而定：

$$Y_{\max} = (V_0 \sin a)^2 / 2g$$

对应于最大高度的水平距离 X_{\max} 由下式给出：

$$X_{\max} = V_0^2 \cos a \cdot \sin a / g$$

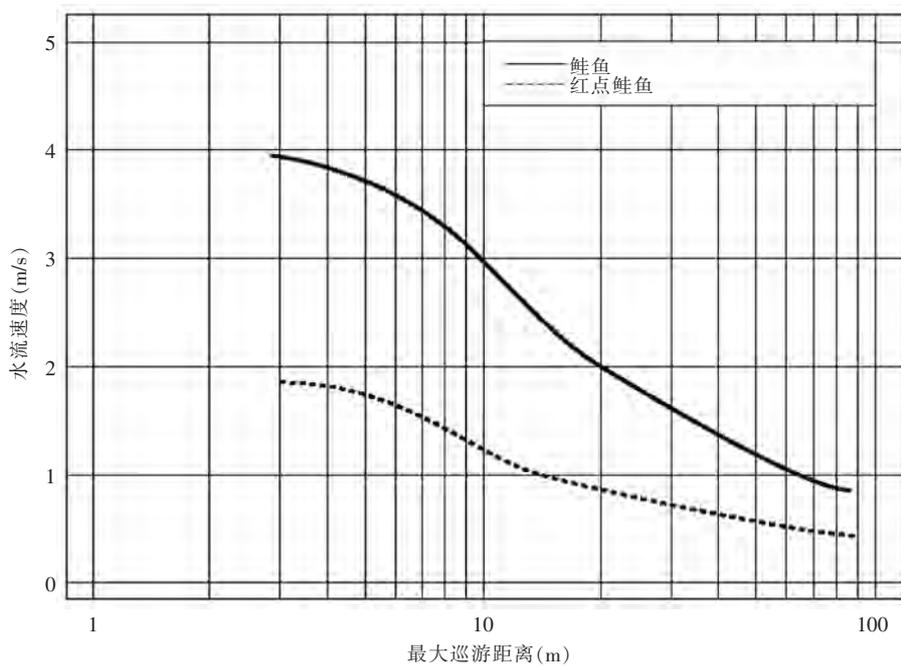


图 5 洄游性鲑鱼和鳟鱼的游泳能力 (ZIEMER, 1961; EVANS and JOHNSTON, 1980 年)

图 6 显示鲑鱼的理论跳跃曲线，随从水面跃出的角度和温度而改变。它清楚地表明温度对可跳过的障碍物的高度所起的重要作用。

然而，必须指出 (POWERS and OSBORN, 1985)，为了提高精确性，宜增加一个相当于鱼体长度的高度。这是因为直至鱼的尾鳍跃出水面之前，一直使用它的推进力。但是，前一方程未考虑现有的水流速，而这一速度可以帮助鱼跳跃障碍。因此，从上式得出的跳跃值会有些保守。

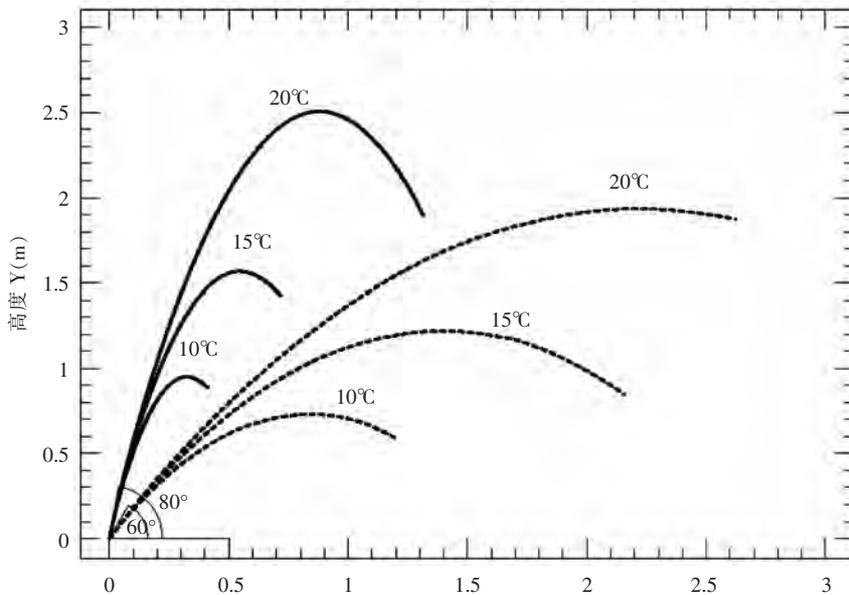


图 6 鲑鱼的理论跳跃曲线与温度及跃出水面的角度之间的关系 (体长 0.80m)

1.5 游泳能力和鱼道

上面提出的最大游泳速度与鱼良好的身体素质有很大关系（无损伤，在淡水中逗留时间较短，大个体洄游鱼类等）。此外，耐力可以认为是鱼达到精疲力尽阶段所花费的最大努力。实际上，在决定或估计迁移种群通过鱼道的效果时，这些限制是有必要考虑进去的。

用平均水速（流量除以与流向垂直的横截面面积）作为唯一的标准，来检验一个障碍物可通过性或确定鱼道尺寸是不太合适的。

首先，鱼能察觉流速上轻微的变化，并且通常利用最有利的区域帮助它们通过。例如它们可能利用表面附近边界层（壁或底板）的较低速度前进，或它们可能利用环流区（例如一个障碍物下游的涡流）休息。

另一方面，当流速在时间或空间上发生波动（例如湍流）时，和平均流速相同、具有水平流线的一般流态相比，鱼游动一定距离所需要的能量也许会大量增加。当水的最大流速与鱼的爆发速度相当接近时，这是相当关键的。

这尤其适用于曝气充分、三维流态、平均流速相对适中、伴随有非常高的湍流强度的丹尼尔鱼道。

图 6 表明，较小的种类爆发速度也相对较小，而且通常是它们仅能在极短暂时期（几秒钟）保持这种速度或略低的速度。

仅自然旁路水道和水池型鱼道适合于这些种类。在水池型鱼道中，鱼类只需努力通过不超过几十 cm 宽的凹口、竖缝或孔口。鱼类也可以利用边界层或环流区的较低速度，来避免喷射流中的高流速区。

底部挡板鱼道，在最好条件下，水的局部速度仍然在 1m/s 左右（小水流通过，高水力效率的挡板），并且对于上游水位变化相当敏感，因此可能只适用于大型鱼类（鲑鱼，海鳟）。

平板、FATOU 或阿拉斯加型挡板鱼道中，水流速度也许只有 0.7~0.8m/s，这样可以保证小型个体通过。这个前提是它们游动的距离少于 6~8m，并且挡板的大小与鱼的大小相适应。

2. 鱼道设施中的照明

如果鱼道上方必须加以覆盖，或者鱼道表现为其他如暗渠形式，此时是否为鱼道照明的的问题就出现了。

很多观察鲑鱼的资料显示，鱼可以在没有照明的情况下，穿越很长的鱼道或隧道（AITKEN et al., 1966; ROGERS and CANE, 1979）。

BELL（1986）指出，迁移过程不会因为黑暗而放慢。

在美国西海岸进行的试验表明（LONG, 1959），尽管一尾洄游鱼（硬头鳟）徘徊了较长时间才进入暗道，但是一旦进入，它通过暗道的速度比同一条暗道中有光亮快得多。硬头鳟通过黑暗鱼道的每个水池需 2 分钟，而通过照明鱼道每个水池需 8 分钟多。

已有许多实验想用光来刺激鱼类在夜间通过鱼道。然而所有试验都是无法下结论的。在 Dalles 坝（美国西海岸），不论鱼道是否有光亮，在夜间 20:00 点和 04:00 点之间使用鱼道的鱼类少于 10%；在姆克纳里水坝，试验表示，无论有没有照明条件，鱼在晚上不会进入鱼道。相反，光可以帮助那些在黑夜来临之前即进入鱼道的鱼通过鱼道（FIELDS, 1966）。

在一些电站（格兰德索托，马德莱娜河，魁北克）进行的观察也发现，大西洋鲑在通道突然由亮变暗的情况下，不会进入鱼道的地下段。除非加以照明，不然鱼道不会发挥作用。

在 Dordogne 河上的 Tuilieres 电站，升鱼机的出口包括 9 个地下水池。在升鱼机水箱中捕获的鱼被释放进入下游的加以覆盖的水池中。在这鱼道中人为照明设备证明了对于保证美洲河鲑成功通过是有必要的，否则它们倾向于停留在下游设施末端有自然光亮的水池中。

相反，鱼道中的照明也许会阻止一些畏光鱼类通过（如鳗鱼），可能使它们中的一部分或者全部

被阻止。

已有试验试图采用直径 0.6m 和 0.9m 的管道，测定照明对不同种的太平洋鲑和鳟通过率的影响。结果表明，所有的种类都可无照明通过管道。在受试的 4 种鱼（大鳞大马哈鱼、银大马哈鱼、红大马哈鱼和硬头鳟）中，仅硬头鳟似乎从管道照明受益显著（用完成通过的百分率表示）。然而，给管道照明后，硬头鳟、红大马哈鱼和银大马哈鱼的通过速度似乎较快，可是大鳞大马哈鱼的情况则相反。

结论是，如果鱼道被覆盖或被埋住，应避免通道内、外部光强的剧烈变化，而在鱼道最前段加上照明设施（人造光，窗口，加宽入口）。有些学者（METSKER, 1968）推荐在鱼道（暗渠）的入口和出口使用一些植物，这样为照明条件提供一个缓冲的梯度。

如果从经验来看，在鱼道中增加照明设备不是特别必要（除了某些种类譬如美洲河鲑），但是在鱼道设计中可能作为一个安全因素总被保留。

3. 洄游障碍的概念

通常我们倾向把洄游障碍的概念与落差的高度相联系，但是实际情况却更加复杂。是否可以顺利的通过障碍取决于障碍物下游的水力条件（流速、水深和喷射流的构成，含氧量和紊流等）与过鱼种类的游泳和飞跃能力之关系。

水力条件取决于障碍物的几何形状（高度和外形、坡度、长度等）和通过它的流量，而流量除与发电厂的运行有关外，还与洄游时的水文条件有关。

图 7 显示落差相同的几种障碍构造。如果鱼的游泳能力允许，障碍（a）是可通过的。在（b）中，下游水的深度不够，因此会阻止鱼的游动。在（c）中，坝址的消能平台较浅，使之缺乏适当的深度，因此，无论鱼的游泳能力多强，也通不过去。在（d）中，基石的出现提高了水头，从而在这一点上由于水流剖面发生了突然的变化而阻止鱼通过。

现在可以看出，鱼类的游泳和跳跃能力取决于个体的种类、大小以及生理情况和四周温度条件。

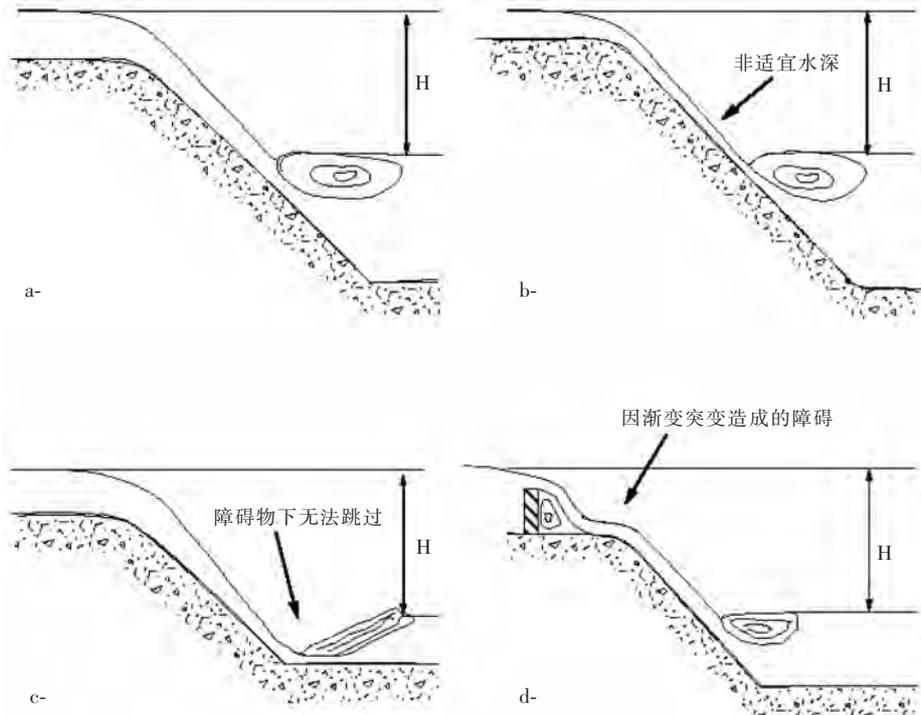


图 7 堤坝剖面对于鱼类通行的影响示意图

穿越障碍的难度取决于障碍的几何构造、过鱼的种类和洄游季节的水文条件以及水温。因为所有这些原因，多数作者认为大型洄游型鲑鱼也通不过一个不足 0.50~0.60m 的落差，并且对于游泳能力较低的其他种类可能也通不过更低的落差，比如鳗鱼。

障碍物是否可通过，必须考虑水体中出现的每一种洄游种类。对于任何特定的种类，河道中的一个障碍物可能就是全部，即对所有个体永远都是不可通过的。对于某些个体来说，是只能部分通过的，或者是临时的，如在一年中的某些时期（在某些水文期或温度条件下）是完全不可通过的。通常的情形是，低障碍物在枯水期间是不可通过的，因为护坡上的水太浅，不允许鱼游泳。若干低堰在低温时可能也很难通过，因为鱼在此时没有足够的游泳能力。

不应低估临时障碍物对鱼的负面影响。临时障碍物使鱼在洄游期间延迟，或可能导致鱼在河道下游部分的不适当区域逗留，或由于反复试图通过不成功引起伤害。

参考文献

- AITKEN P. L. , DICKERSON L. H. , MENZIES W. J. M. , 1966. Fish passes and screens at water power works. Proc. Inst. Civ. Eng. , 35: 29 - 57.
- BEACH M. H. , 1984. Fish pass design - criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, Fish. Res. Tech. Rep. 78, 45 p.
- BELL M. C. , 1986. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Fish. Eng. Res. Prog. , U. S. Army Corps of Eng. , North Pacific Div. , Portland, Oregon, 290 p.
- BLAXTER J. H. S. , 1969. Swimming speeds of fish. FAO Fish. Rep. , 62 (1): 69 - 100.
- DARTIGUELONGUE J. , LARINIER, M. , TRAVADE, F. 1992. *Etude du comportement de l'aloise dans la passe à poissons à l'usine de Tuilières sur la Dordogne.* (Study of the behaviour of shad in the fishway at the Tuilières power station on the Dordogne.), CSPIEDF Rep. 55 p.
- EVANS W. A. , JOHNSTON F. B. , 1980. Fish migration and fish passage: a practical guide to solving fish passage problems. USDA Forest Serv. , Region 5, 43 p.
- FIELDS P. E. , 1966. Final report on migrant salmon light guiding studies at Columbia rivers dams. Fish. Eng. Res. Prog. , U. S. Army Corps of Eng. , North Pacific Div. , Portland, Oregon, 266 p.
- LONG C. W. , 1959. Passage of salmonids through a darkened fishway. U. S. Fish and Wildlife Serv. , Spec. Sci. Rep. Fisheries 300, 9 p.
- METSKER H. E. , 1970. Fish versus culverts, some considerations for resource managers. USDA Forest Serv. , Ogden, Utah, Eng. Tech. Rep. ETR - 7700 - 5, 22 p.
- POWERS P. , OSBORN J. , 1985. Analysis of barriers to upstream fish migration. U. S. Dept. of Energy, Bonneville Power Adm. , Div. of Fish and Wildlife, Final Project Rep. , 120 p.
- ROGERS A. , CANE A. , 1979. Upstream passage of adult salmon through an unlit tunnel. Fish. Mgmt. , 10 (2): 87 - 92.
- SLATICK E. , 1970. Passage of adult salmon and trout through pipes. U. S. Fish and Wildlife Serv. , Spec. Sci. Rep. Fisheries 92, 18 p.
- VIDELER J. , 1993. Fish swimming. Chapman & Hall, Fish and fisheries series 10, 260 p.
- WARDLE C. S. , 1975. Limit of fish swimming speed. Nature, London, 225: 725 - 727.
- WARDLE C. S. , 1980. Effects of temperature on the maximum swimming speed of fishes, pp. 519 - 531. In "Environmental Physiology of Fishes", Plenum Press (ed.), New York and London, 723 p.
- WEBB P. W. , 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. Bull. Fish. Res. Bd. Can. , 190, 158 p.
- ZHOU Y. , 1982. The swimming speed of fish in towed gears, a reexamination of the principles. Dept. of Agriculture and Fisheries for Scotland, Work. Pap. 4, 55 p.
- ZIEMER G. L. , 1961. Fish transport in waterways. Alaska Dept. of Fish and Game, 10 p.

第四章 鱼道的位置

M. LARINIER*

1. 鱼类通过设施的吸引力

为了使鱼道更加有效，必须使鱼可以尽可能在没有洄游延误的情况下找到入口（鱼的入口，即鱼道的下游端）。入口的宽度比起障碍物的整个宽度很小，而且其流量仅是河流总流量的一个有限部分。唯一吸引鱼进入鱼道的是障碍物处水流的流态。

鱼道的吸引力与其相对于障碍物的位置，尤其是与其入口的位置及入口附近的水力状况（流量、流速和流态）有关。入口处必须不受涡轮机或溢洪道的水流影响，也不得在环流区或静水区附近。

鱼道的吸引力因所考虑的种类而不同。对于河海间洄游性种类，目的是吸引所有鱼类个体，或至少尽可能吸引大部分能到达障碍物的鱼，并且不能因为任何因素延迟它们通过的时间；对于河流性种类，如鲤科鱼类，在某种程度上重建河流的纵向连通性，保持上游群体和下游群体间的交流，避免种群隔离。在这种情况下，更多的是注意鱼在鱼道中的“舒适”程度（低速、低湍流水平），而非鱼道对鱼的吸引力（鱼道中的高流量）。

2. 影响鱼道位置选择的因素

障碍物的构造对于迁移来说是变化无穷的（泄洪道、电站和进水口的布局、发电厂的运行等）。下面典型的例子可以说明一些引导师在选择鱼道地点及其入口位置时的设计原则。

在现有水坝或自然阻碍处，譬如急流或瀑布所在仍有洄游鱼类的河中，可以在障碍物前观察和记录鱼类的行为。它们的迁移路线、聚集区域和试图通过水坝的地点都可以加以确定。这一信息将有助于设计者选择鱼道入口的位置。

在新的障碍设施已完成设计，或洄游鱼类已消失但复育计划已制定的河里，这时对鱼类的行为只能加以假设，而设计者的经验便会变得极为重要。

通常，鱼道修建在临近河岸处比在障碍物中间更加可取，因为鱼类（特别是鲑科鱼类和美洲河鲑）倾向于沿着河岸游动，而不是在河的中心游动。这种行为在流速较高时更加明显，因为此时在河岸附近的低流速区鱼类也可以利用。

一般来说，鱼类倾向于尽可能地逆流而上，直到遇到无法逾越的跌水或过高的流速、极度的紊流等。

因此，宜将鱼道入口设置在尽可能靠近洄游鱼类能到达的最上游处。

若障碍物本身与河流流向成一明显角度，鱼道应尽可能设置在障碍物处（图 1a）。

图 1b 和图 1c 中鱼道的位置是不正确的；前者因为鱼道入口离堰下游太远，后者因为鱼道入口位于河堰斜角的下游方。

* CSP - CEMAGREF, GHAAPE - Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France

对于 V 型河堰，从严格的生物学观点来看，将鱼道设置在河流中部的最上游端似乎最有利。然而，在某些情况下，这可能意味着设置通向鱼道的通道会很困难，甚至是不可能的，并且连带地影响了监测或维修工作。

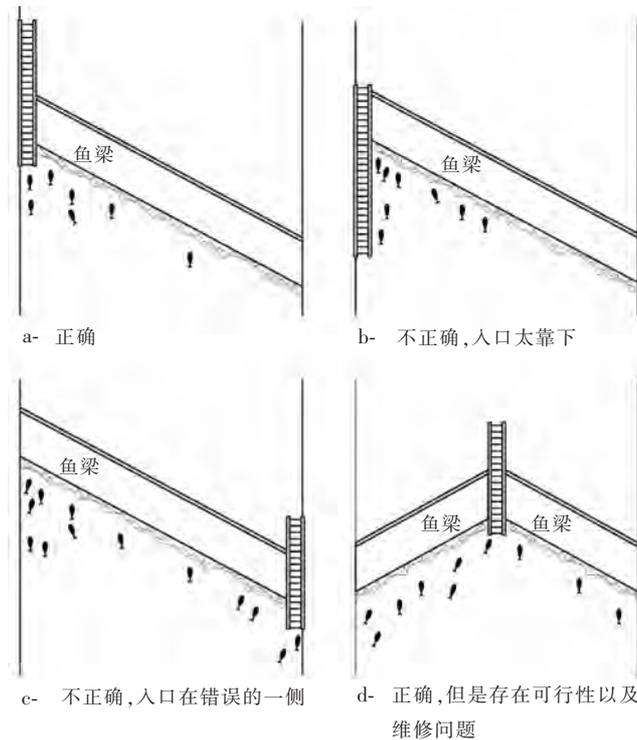


图 1 在斜堰修建鱼道的规划示意图

当障碍物与河岸成直角时，鱼道应安置在河流的其中一边。考虑站点位置的具体因素包括，流态、障碍物正下游方河床的地形，例如水池、主河道等（图 2a）。然而，对于宽障碍物，通常宜将鱼类通过设施设置在两侧（图 2b）。

在某些情况下，为了将鱼引向鱼道，可改变障碍物下游河床的地形。例如，在障碍设施下游一定距离处的河道中央可以铺设比较高的乱石堆进行加固，同时两侧会形成深的侧面渠道。这样，鱼就能顺利地沿侧渠道进入鱼道了（图 2c）。

站点原有的局限性可能导致只能将鱼道入口设置在离障碍物较远的下游（例如，在自然旁路水道非常长的情形下，图 2d）。在这种情况下，为了对入口的不利位置进行补偿，强烈建议增加通过设施内的流量，以形成一个和鱼类洄游期间河川中水流相比仍然相当显著的流量。

在水电站的案例中，由于所有的流量皆通过涡轮机，洄游鱼类通常皆被吸引到涡轮机下游方的尾水区，因此鱼道的入口必须设置在发电室附近，最好在靠岸边（图 3a 和图 3d）。

鱼道的入口必须设置于鱼类在障碍物下游聚集地的最上游处。鱼道入口不应该被安置在河的中心或者太下游的位置（图 3d）。

对于装备了数台涡轮机的大型电站，通过在涡轮机尾水管上方设置具有数个入口的集鱼廊道，可能可以在电站整个宽度收集鱼类。在修建新设施的地方必须这样做。在入口处一般需配备被当作泄洪堰使用的自动闸门。通过调节这个闸门来保持在集鱼廊道和尾水渠间有一定的水位差，这样不论下游水位如何变动，入口处的流速都会大致上维持不变。集鱼廊道主要的入口必须安置在发电室左右的其中一端（图 4），次要入口可以设置在涡轮机之间紊流度较低的地方。经验表明，集鱼廊道不宜有太多入口，因为鱼有可能从一个入口进入集鱼廊道，但是从另一个入口出来了。

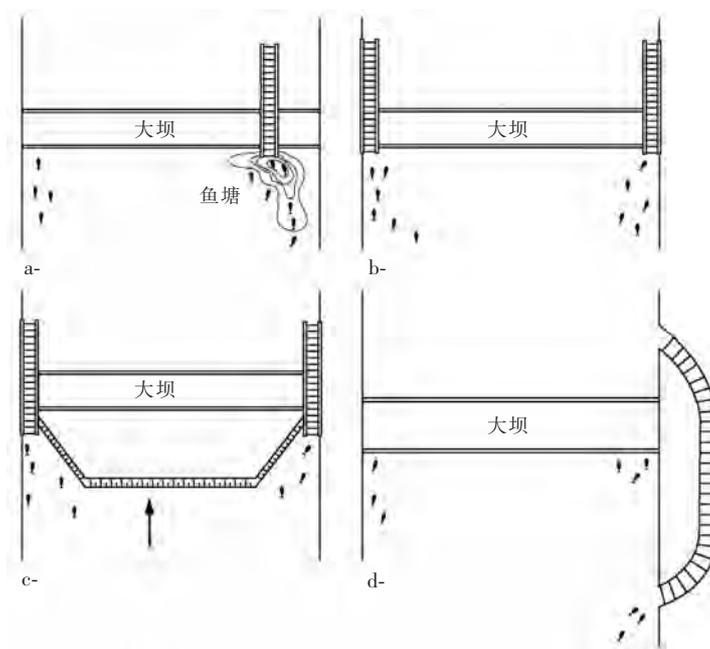


图 2 与水流方向垂直的大坝上鱼道的安装

如果河流很宽，那么需要的就不仅仅是多几个鱼道入口，还需要多修几个鱼道，因为一个鱼道不可能将很宽河流另一面的鱼吸引过来。洄游鱼类可能到达靠发电室的一侧，也有可能到达泄洪道放水的一侧，因此可建议设计两个独立的鱼道，且每个鱼道配置一个或几个入口（图 3c）。

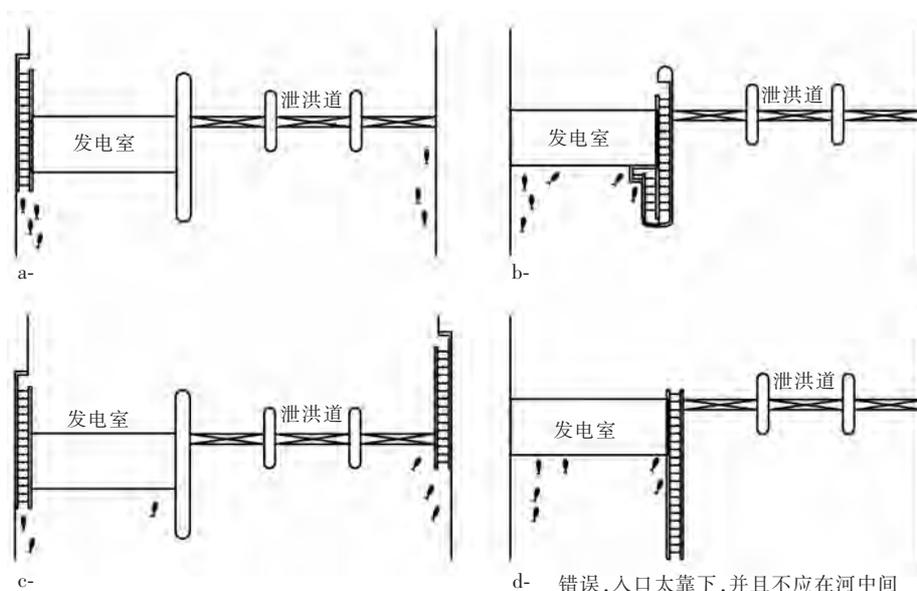


图 3 水电站上的鱼道配置

当水电站引水渠上时，就往往很难决定是将入口安装在大坝一侧较佳，还是靠发电室一侧较佳。所以，必须在鱼类洄游期间对各个入口定位下的流量的电站操作规程做一个仔细的调查。在迁移期间，鱼可能被发电所用的稳定流量所吸引，或者被大坝上频繁的泄洪水流所吸引。经验表明，提供两个分开的鱼道常常是很有必要的。在低水位时期，大部分鱼往往被吸引到涡轮机那去，但是在较高

水位时期，有一大部分的洄游鱼类往往聚集在大坝下方。如果引水渠道非常长，鱼类极有可能受困于尾水区或原河道的其中一段，很难有机会发现鱼道。

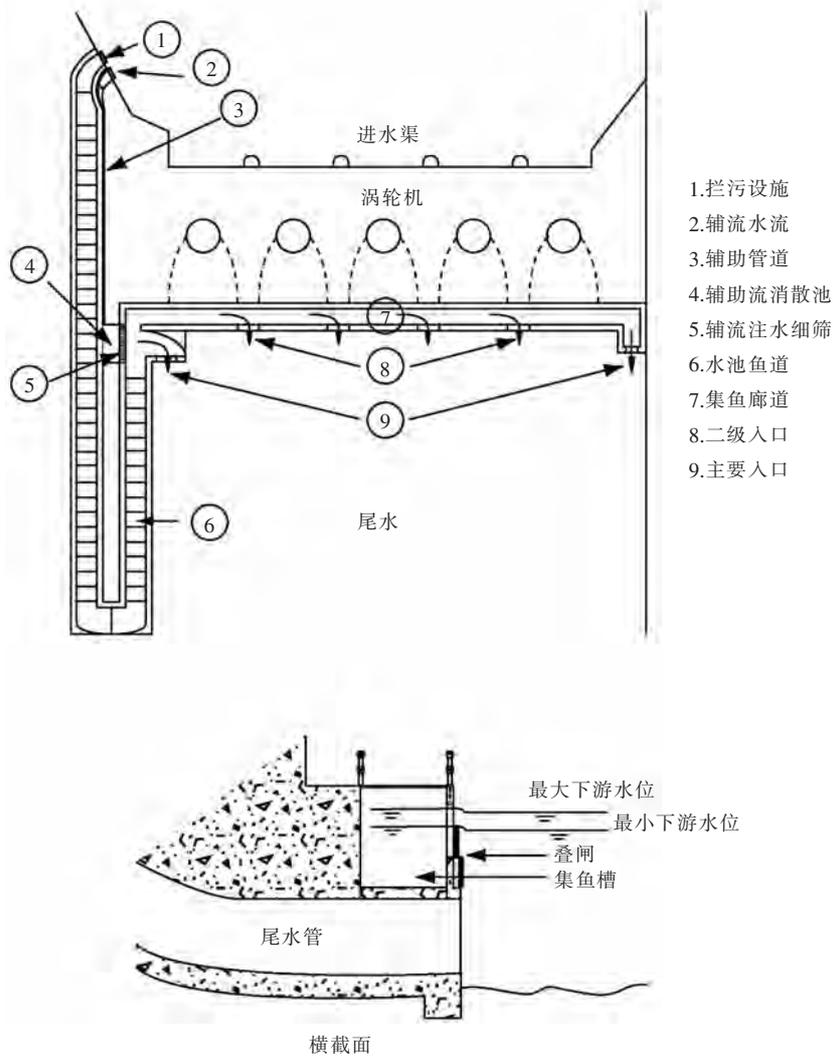


图 4 涡轮机尾水管上方的多入口集鱼廊道规划设计图

现在人们对电栅栏的作用逐渐正视起来。在法国，已经在水电站的鱼道中安装了一些电栅栏，用它们来防止鱼进入尾水区，保证鱼呆在原来的河道中。电栅栏的效率不是很明显，并且在短的尾水区它们被认为是弊大于利。这些护鱼屏障仍然处于实验阶段，而且在任何情况下，使用此类屏障并不会妨碍需设置鱼道的河川中施放可观的生态基流之需求。

在电站处修建鱼道并非总是可行的，尤其在需要用非常长的（例如数公里）加压水管或隧道来输送水时。坝上鱼类通过设施的有效性，在这样的情况下，完全取决于鱼所通过的河段中稳定充足的生态水流。在建立鱼道时，鱼道入口的选址并不是唯一要考虑的因素。鱼道的出口（鱼的出口，即鱼道的上游端）不应位于溢洪道、堰或水闸附近流速较快的区域。在那里鱼有被冲回下游的危险。此外，鱼道的出口不应位于静水区，或鱼能够被困住的环流区。出口最好位于具有中等的向下游方向的流速河岸附近。

鱼道安置在河岸附近往往比安置在障碍物中间更佳。不只是因为洄游鱼类一般倾向于沿着岸边移动，而且这样也可以方便鱼道的检查、监测和维护。

鱼道不应设置在自然淤积或沉积正在发生的区域，特别是在河道拐弯处的凸岸。

3. 鱼道入口处的水力条件

3.1 水流流态

从鱼道中流出的水应该在距离入口处尽可能最远的地方被鱼类察觉。鱼道的吸引力取决于入口处射流的方向和动量（流量×速度）。水流喷射动量越大，入口水流喷射进尾水区越远，鱼道入口就越有吸引力。

重要的是，离开鱼道的射流既不应被其他水流或横流覆盖，也不应被尾水区中与其无法竞争的水流（如水跃或漩涡）所覆盖。离开鱼道的射流必须在下游渠道中显得相当明显。

在涡轮机或泄洪道的下方，离开鱼道的水流流向不得与水道的纵向中轴垂直。这样的水流会立即被破坏，而且无法射向下游远处。相反，离开鱼道的水流的流向必须平行于主流的流向或与之仅成一个很小的夹角。如果由于某种原因，鱼道入口远离主流，或在低速区，应考虑出流方向与河流中轴形成直角。

在泄洪道，有时能够通过流量控制结构调节水流，以此来提高鱼道吸引力。

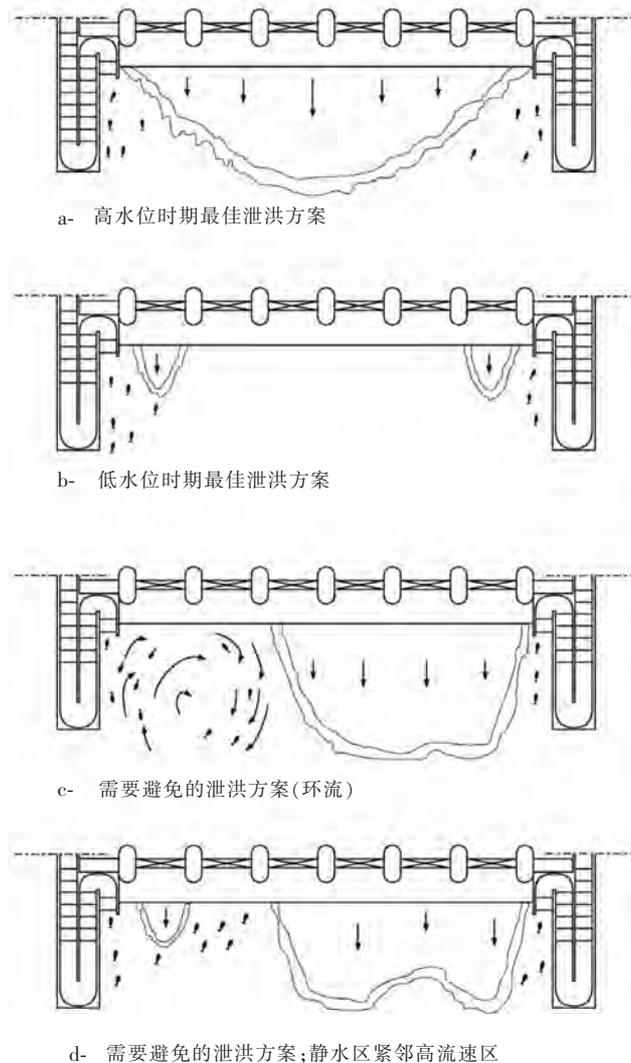


图5 调节障碍溢流量以改善过鱼设施基本方针

在不要求使用到泄洪道全部容量时，流量控制结构的开口可以从河道中央往岸边的方向渐减。这有助于制造紊流和和高速流的“屏障”，从而引导鱼进入鱼道（图 5a）。

当泄洪量比较低时，泄洪的水应该集中在靠近鱼道的一侧（图 5b）。因为使用中间的闸门会将鱼引离鱼道，故应该关闭。

在泄洪量较高时，在打开的闸门之间不应有关闭的水闸，因为这将形成一个静水区，从而使鱼容易被困住（图 5d），同样，不宜太多减少岸边泄水量，这样会在上游靠近入口的地方造成环流区域，从而完全遮掩了鱼道入口（图 5c）。

在有水轮机的情况下，确定鱼道入口的最佳位置并不是件简单明显的事。鱼的水力障碍可能在尾水管的出口，由涡轮机泄水所产生的大型漩涡造成的“沸腾”的区域。另一方面，当离开涡轮机的水的残余能量相当大时，鱼的水力障碍可能出现在更下游。最后，水力障碍可能在同一场地内变动，取决于哪些涡轮机在使用。离开鱼道的射流一定不可以射向从涡轮机流出的强大且不稳定的紊流区。这类流态可能掩蔽鱼道的出水。

在特殊地点，如障碍区不明确或可能随发电厂的运行状况而改变时，鱼道入口的正确位置就不是特别明显。在这样的情况下，在似乎最有利的点设置几个入口将大大提高鱼道效率。

为游泳能力和洄游行为特征明显不同，或甚至未知的鱼种设置过鱼设施，是一个非常复杂且难以解决的问题。如果鱼道主要是供洄游的鲑科鱼类使用，那么入口应尽可能在上游并较靠近涡轮机。另一方面，这对于那些生活在河中、游泳能力不强的种类来说，可能不是很有利。对于这些种类，最好将鱼道入口设置在更下游，相对平静且不太湍急的区域。这要求工程一开始就明确确定目标种。

鱼道入口应不被环流区所掩蔽，在环流区鱼可能被困住。如果情况是这样，应设置乱石堆来保护抑制环流区，或至少采用位置适当的丁坝降低其效果（图 6）。

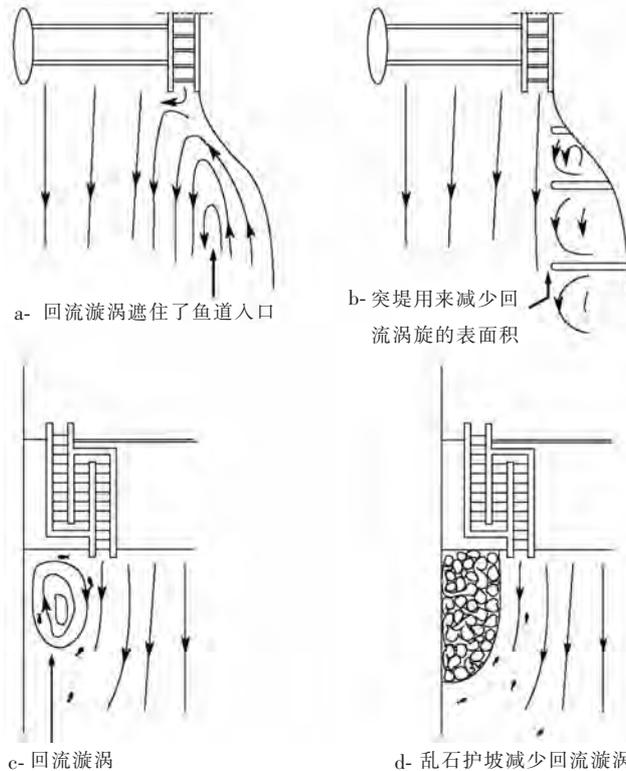


图 6 使用突堤和抛石堆降低涡流的原则示意

3.2 水流速度

必须在鱼道入口形成足够高的流速。然而，速度必须仍然适合于所有相关洄游种类通过。对于大多数种类，正常情况下，约 1m/s 的速度通常是鱼道入口处的最低流速。对鲑科和大型洄游鱼类，最适宜速度是约 2m/s 至 2.4m/s，相对应于入口处水位落差为 0.2~0.3m。

虽然入口处应该保持高流速，但也要防止水跃的出现。水流横截面的控制经常用来在入口处制造必要的加速度。在这方面，必须保证从入口处的正下游方有足够的深度。不论选择哪种类型的鱼道，在鱼道下游端都要设置一个水池，以保证鱼类能在里面自由的休息。

在项目计划阶段，便应该特别注意鱼道的入口设计，尤其对于较大的河流。必须确保在鱼类洄游期间（特别是在高水位期间），下游各种水位状况下，鱼道入口的流速足够高。

当下游水位抬高（是河道入口处的横断面流速增加的结果）时，那么除非鱼道中的水跟着显著增加，否则，入口处的流速将因而下降，导致鱼道入口的吸引力也跟着下降。

通常，在鱼道或者鱼道入口处通过操作，可以保证维持充分的流速。或者是入口处的横断面可以加以调整，依障碍物下游的水位改变鱼道中的流量。

在鱼道入口处安装的最普遍的装置是一个可移动的闸门板，这个门可以调节鱼道内外的水位，以保持恒定的或预定的水位差（图 7）。此外，还需要安装两个水位计，一个装在入口上游，另一个装在紧挨鱼道的入口下游。当水位变化比较大时，可以考虑安装可伸缩闸门。

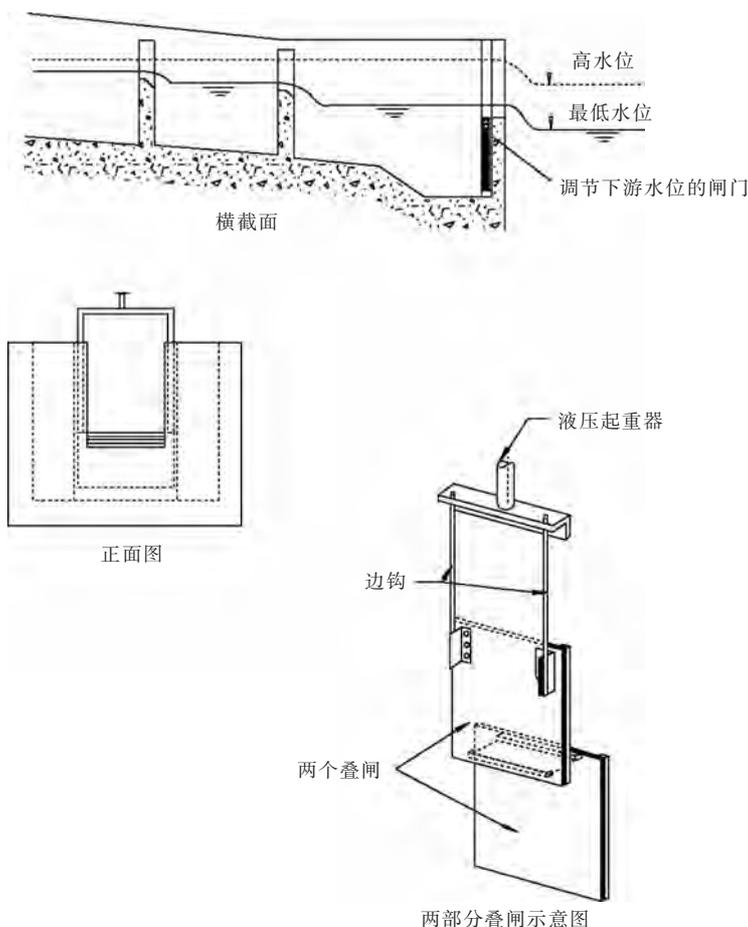


图 7 鱼道入口的调节闸门

在规模较适中的电站，或上、下游水位变动不怎么频繁的电站，流速的调节可借助于手动水闸门，或甚至更简单地在闸门的垂直狭缝上堆叠平板以调节。

另一个维持较高流速的方法是依下游水位而调节鱼道内的流量，这就没有必要在鱼道入口处建立一个活动门。

所有上面关于鱼道入口处水力条件重要性的评论证明，绝对必须充分注意在鱼类洄游期间障碍物上下游水位的变化范围。

3.3 流量

鱼道的流量必须足以与洄游期间河流中的流量相比。虽然很难给出精确的标准，但是一般通过鱼道的流量必须为河流流量的1%~5%。显然，鱼道中的百分流量越高，鱼道的吸引力将越大。如果鱼类通过设施所处的位置不正确，那么其运行可能需要更大的流量。

在小河中，控制河流流经鱼道流量的百分比（有时超过50%，或甚至整个流量）是很有可能的。然而，在平均流量可能超过每秒数百立方米的大河中，情况并非如此。就成本而论，保持通过设施的足够流量，尤其在河流的高流量期，变得非常难。在法国主要河流中，如Garonne河或Dordogne河（年均日流量约每秒数百立方米），吸引流用河流基流量的约10%作为最低设计流量。这些及最高设计流量的1%和1.5%间的流量（一般约年均日流量的2倍）似乎适宜于鱼道运行。

通常，虽然吸引水量的增加一般可以改善鱼道效率，但是在各个站址很难定量估计其效益，不论是根据洄游鱼类通过数量比例的增加，或者是根据通过鱼道延迟时间的减少。实际上以上两个条件都是必要的。显然，鱼道效率的提高也取决于较多的入口数量，而这本身取决于鱼道可获得流量增加的程度。

3.4 鱼道中辅助水流的引入

当需要大水流（每秒几立方米）来吸引鱼进入鱼道时，为了限制设施大小和减少设施费用，仅有一部分水会直接通过鱼道。这就需要引入辅助水流来吸引鱼类，这种水流速较低，含氧量很低，设置在鱼道下游段经由格栅引入，或者就直接引入入口处。拦鱼栅是为了防止鱼在辅助流中被困住而无法进入和使用鱼道。格栅的净网目必须小到足以防止鱼通过，并视最小目标种而定。

辅助水流（或补充吸引流）通常在水池或井中消能后，自流输送入鱼道。在大型设施中，使用水泵从尾水区抽水抬高至一定的水头以作为吸引水流，可能是较经济的做法，或者也可以从电站引水区引水后作为吸引流。

在格栅上游必须有一个水池，提供足够的容量来保证能量的散逸，以及在整个截面上尽可能均匀分布水流（横截面上死水区或反流向区减到最小）。按照水池单位容量的消能量 $1\ 000\sim 1\ 500\text{W}/\text{m}^3$ ，可以计算出每个水池的容量。这个水池一般被装备各种设备（混凝土挡板，垂直的横梁或钢条等），以保证水的动能或势能的散逸。同时必须保证水流在到达入射格栅前已除去气体。

辅助水流可以通过鱼道底部或侧面设施进入鱼道（图8）。一般最好在侧面喷射辅助水，以便于格栅的维修。经验表明，清洗设施下游的底部水平格栅并不容易。

相对于鱼道中水流的速度，通过安装在分散器出口的格栅的流速一般很小（小于 $0.30\sim 0.40\text{m}/\text{s}$ ），这样才不至于影响洄游鱼类的行为。此外，这些格栅也应该尽可能的作为鱼道入口的指引。在格栅上的金属条片之间的空隙取决于通过的鱼的大小（对鲑和西鲱距离为30mm，比鲑和西鲱小的鱼，距离不到30mm）。

务必牢记，尽管使用辅助流系统可显著降低鱼道的建造成本，但是因为格栅要保持清洁，同时增加了格栅的维修成本。可以通过安装垂直的小嵌板来保持格栅的清洁，这样就可以通过它们的转动和反向水流冲洗。由于格栅的维护可能会是一个大问题时（例如鱼道位于偏僻之地，或设备进出困难），

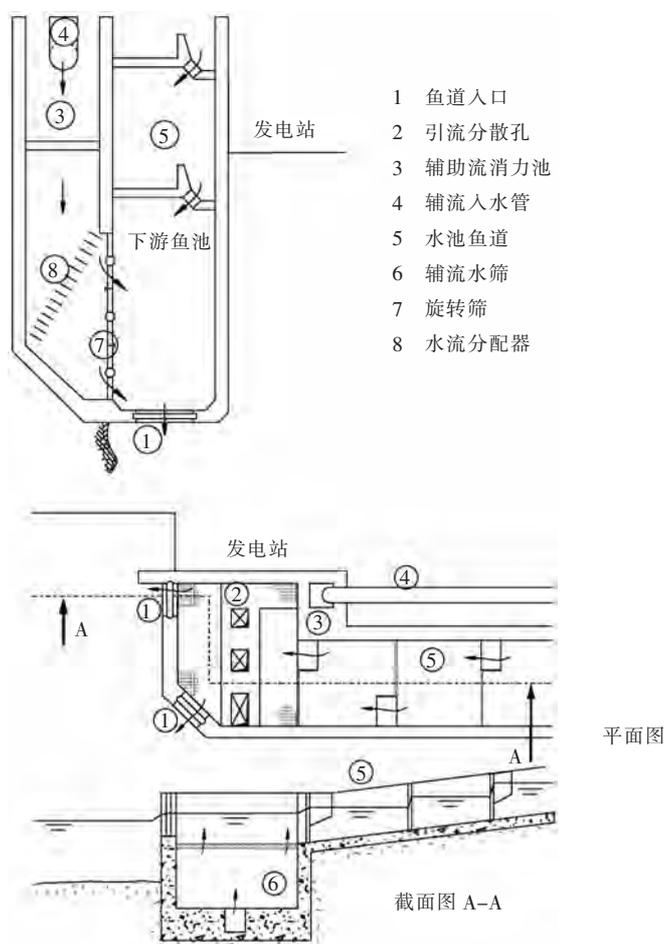


图8 鱼道入口处辅助水流的注射原理示意

应避免使用辅助水流作为解决方案，而是尽量加大鱼道中的水流。

辅助水流的上游进水口端一般也安装等距离的格栅，但是比下游安装的要小一些。在大型电站安装的格栅一般都装备有机械垃圾犁耙。

有时候因为出于特殊地点的限制，可能有必要把鱼道入口安装在距离电站出水口较远的地方。在这样的情况下，要提高鱼道吸引力，可以在消能之前，使用一些吸引水流，在鱼道入口附近制造高速的射流。

4. 鱼道设施的保护措施

鱼道通常可以采用一些设在水道入口处的保护措施来避免漂浮残渣的损害。这些措施包括拦污浮排、粗格拦污栅有足够宽的栅条间距（间隔 25~30cm，允许大型洄游鱼类通过），石头或者混凝土导流装置；甚至是一排横杆，或在鱼道上游的板桩或柱子。

保护格网应安装在通过其上的垂流速分量不超过 0.3~0.4m/s 的地方，以免注入的水流很快便使入口堵塞。这一般需要在第一个水池的上游（在水池型鱼道的情况下）或第一个挡板（在丹尼尔鱼道的情况下）的上游设置一个消力池。该区域亦可用来设置一个诱捕鱼类，以监测设施。

设计鱼道时，必须考虑鱼道出口附近的水力条件，因为这些可能在鱼道将来的维护中起决定作用。很明显，出口附近不应有环流区。清洗保护鱼道的拦废物栅时，必须将残渣（树叶、树枝）冲到

下游，以便残渣不再返回堵住栅栏。而这种情况有可能在有环流的情况下发生。

另一方面，出口不应在速度过高的区域，因为尽管这一情形有利于清除残渣，但这也可能造成鱼类处于风险中，当它们一离开鱼道，很可能又被冲到下游。

一般最好将鱼道出口侧向设在水电站上游方。图 9 显示对鱼类通过设施不同类型保护的例子。

不论拟采用何种类型的保护，必须确保鱼道易于进入，以利于维护和修理。在这一方面，如前所述，位于岸边的鱼道优于位于障碍物中间鱼道。

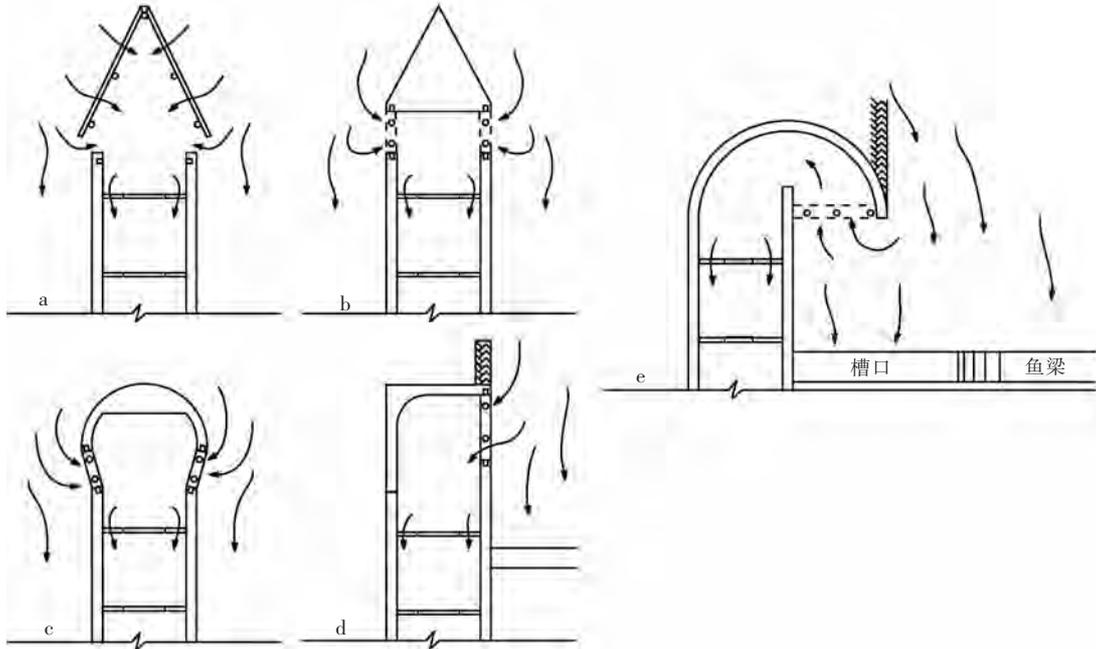


图 9 鱼道保护设施的规划示意图



照片 1 Léguer 河（布里塔利）卡佩凯恩处的丹尼尔鱼道，鱼道设置在堰的上游角



照片 2 Uxundoa 堰（尼夫勒河，大西洋岸—比利牛斯省）鱼道，鱼道水流由堰底排出，避开了堰底落水产生的紊流



照片 3 Vichy 坝（阿列河）上的鱼道，主入口靠近坝底，紧靠瀑布形成的湍流区下游



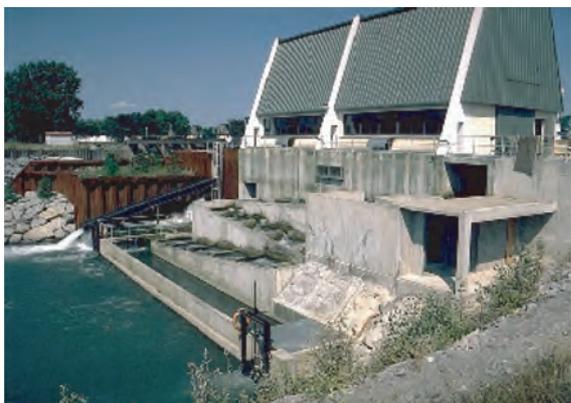
照片 4 Garonne 河潘蒂西纳尔小电站设置的鱼道，鱼道入口靠近涡轮机尾水管出口



照片 5 Chatillon sur lison 的自然旁路水道，鱼道入口位于堰上游角



照片 6 旧式鱼道位置错误的例子，鱼道入口离涡轮机下游太远；且鱼道的流量太小



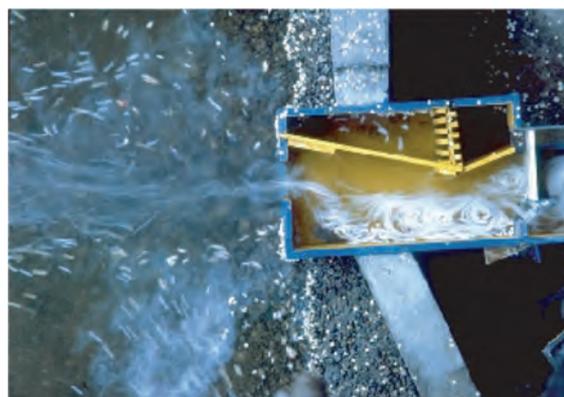
照片 7 小型电站设有两个入口的集鱼廊道（阿尔蒂，波河），垂直竖缝鱼建在涡轮机尾水管上



照片 8 St John 河上 Mactaquac（新不伦瑞克，加拿大）处有多个入口的集鱼廊道



照片 9 辅助水通过 Iffezheim 鱼道（莱茵河）处的侧向鱼栅引进，辅助水流从电站上游面经由一个特殊涡轮机引入。鱼道流量 $1.2\text{m}^3/\text{s}$ ，涡轮机流量 $11\text{m}^3/\text{s}$



照片 10 显示垂直竖缝鱼道入口处（加龙河，拉米耶尔电站）辅助流射入方式的水工模型



照片 11 水池型鱼道（波河博德雷堰）的上游保护设施，鱼道出口位于侧面，上游保护坡呈圆形



照片 12 水池型鱼道（比利牛斯，内斯塔河，萨朗科兰坝）进水口使漂浮垃圾转向的导流装置

第五章 水池型鱼道、前拦河坝及自然旁路水道

M. LARINIER*

1. 水池型鱼道的原理

应用广泛的水池型鱼道是一个非常古老的概念。200 多年前，在法国进行的一项官方研究（菲利普，1897）表明，当时已有 100 多座水池型鱼道。

水池鱼道的原理是，将待通过的高度分成几个小的落差，形成一系列水池。水从一个水池流到另一个水池，或借助于表面溢流流经一个或一个以上的槽孔或竖缝，或流经将两个水池隔开的墙上的一个或几个潜孔。常常可找到混合式水池型鱼道，例如流经槽孔、竖缝或溢过隔离墙的水流，与潜孔的一个或多个水流结合起来。溢流堰表面的断面一般为矩形，但在某些情况下可能为梯形、三角形或甚至半圆形。

一个水池鱼道的主要或关键参数是水池的尺寸和分隔水池的隔墙的几何特征（堰、凹槽、竖缝及潜孔的形状、尺寸和高度）。这些几何特征与设施上、下游的水位一起决定了鱼道的水力条件、亦即流量、从一个水池到另一个水池的水位差和水池内流态。

2. 水池间落差和水池内流态

两个水池间的水头差（或落差，DH）越小，鱼越容易通过。池间的落差也不能降得太低，否则所需修建的水池数量将多得负担不起。

由落差 DH 形成的最大流速可由下式近似求得：

$$V = (2g DH)^{0.5}$$

式中 g 是重力加速度 (9.81m/s²)

水池间 0.15m、0.30m 和 0.45m 的水头差分别与约 1.7m/s、2.4m/s 和 3.0m/s 的最大流速相对应。

可以根据过鱼种类不同的游泳能力和跳跃能力选择不同的池间落差。

水流可以是跌流，或为连续流。在“跌流”中，越过上游堰来的水直接冲向水池底（图 1）。其功率耗散于湍流扰动及跌水底的水跃中。每当下游水位低于堰顶时就有这类流动。

在下游水位明显低于隔离墙的有跌流的鱼道中，鱼不得不通过自由下落的水舌从一个水池跳跃到另一个水池。这类鱼道一般仅是为鲑科鱼类准备的。在大多数跌流型鱼道中，落差最好为约 0.30m。在某些情况下，对于大型鲑科鱼类（鲑鱼或海鳟），落差可增加至 0.6m；而对于鳟则增至 0.45m。然而，过分的增加落差没有好处，因为为了耗散多余的功率，水池的容积也要相应扩大。

* CSP - CEMAGREF, GHAAPPE - Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France

对西鲱应避免有“跌流”的鱼道，因为西鲱很难适应这种水流。

在有“连续流”的鱼道中，两个水池间隔离墙（槽孔、竖缝）处形成的水流喷射流保持在水表面处。其能量在下游水池中被大漩涡耗散。一般在隔离墙顶上的下游水位达到隔离墙顶上的上游水位0.5~0.6倍之上时，会出现这种类型的水流（图1）（LENNE，1990）。跌流和连续流间的转变不稳定，且有明显的滞后特征。

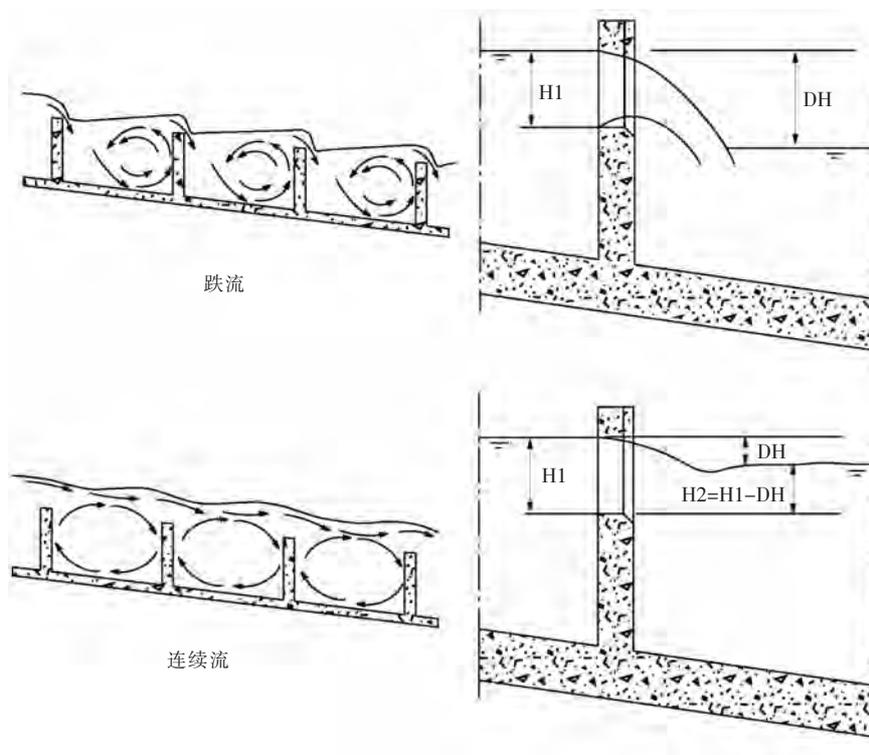


图1 鱼道中的跌流和连续流

在“连续流”鱼道中（深槽孔或垂直竖缝鱼道）或在有潜孔的鱼道中，水池间的落差对鲑和海鳟一般为0.30~0.40m，对鳟和泳速很快的鲤科鱼（雅罗鱼和鲃）落差约0.30m，对西鲱约0.20~0.30m（最好0.25m）。对多数鲤科鱼和食鱼的种类（鲈和白斑狗鱼）合适落差将在0.15m和0.25m之间，要求通过的个体或种类越小，落差越低。

3. 水池尺寸

洄游鱼类通过鱼道的困难随水池中湍流度和曝气的增加而增加。水池中湍流度和跃动水平的简单指标由单位水池容积耗散的功率（容积耗散功率）产生，容积耗散功率可表示为：

$$P_v = \rho g Q DH/V$$

式中 P_v ：容积耗散功率（ W/m^3 ）

ρ ：水的密度（ $1000kg/m^3$ ）

g ：重力加速度（ $9.81m/s^2$ ）

Q ：鱼道中的流动排水量（ m^3/s ）

DH ：水池间水头差（ m ）

V ：水池中水的体积（ m^3 ）

这一标准在确定了水池间水头差和鱼道中流量的地方可确定水池中水的最小体积，换言之，确定了水头差和水池容积能确定可通过的最大流量。

$200\text{W}/\text{m}^3$ 一般被视为鲑和海鲑鱼道容积耗散功率的上限。如果鱼道仅由几个水池组成，或对于泄流超过数 m^3/s 的非常大的鱼类设施，较高的容积耗散率则是可以接受的。

另一方面，对于小型鱼道和对于为西鲱和河流性种类设计的鱼道，较低水平是可行的（低于 $150\text{W}/\text{m}^3$ ）。

水池的最小容积由流量和水池间水位差确定。水池尺寸（长、宽、深）将视流态，即水流的性质和流向而定（水流的性质和流向取决于竖缝、潜孔或槽孔的形状和大小，以及各隔墙两侧的水位）。

水流的短路现象必须避免，即高速水流未充分耗散动能就从一个水池直接流到下一个水池。另一方面，水流不应该在高流速的情况下直冲侧壁，因为这样将会影响鱼类的行为和鱼道的效率。它可能导致鱼类出现跳跃行为因而受到伤害或者跃出鱼道的危险。

在考虑水池大小时，一般而言，建议不应该与现有鱼道的特征有太大的差异，因为现有鱼道已证实是 very 有效的。鱼道水池的长度一般是在 $7d$ 和 $12d$ 之间， d 是：

- 在有溢流堰的鱼道中，是堰上水头；
- 在有槽孔的鱼道中，是槽孔宽度或槽孔上水头的最小值；
- 在垂直竖缝鱼道中，是竖缝的宽度；
- 在潜水潜孔鱼道中，是潜孔的直径（圆形时）或潜孔的最小尺寸（矩形时）。

在跌流型鱼道中，紧靠跌水下的水池中水的最小深度必须是两个水池间落差的至少 2 倍时，才能使鱼容易通过。

显然，水池的最小长度随通过的鱼的大小而变。水池的最小长度可取通过的最大鱼的体长的 3 倍。

实际上，大型洄游鱼类的多数鱼道，其水池长度变动在 2.5m 和 3.5m 之间。

水池的最小深度视过鱼种类而定。对于洄游性大型鲑科鱼类，采用约 1m 的最小深度，而约 60cm 对于鳟鱼就够了。

尽管应牢记这些指标，但是实际上，决定水池大小的通常是水力状况（流量、水池间水头差、流态、容积耗散功率）而非鱼的大小。

4. 槽孔、潜孔和竖缝的最小尺寸

在“连续流”鱼道中，对于大型鲑鱼来说槽口和孔的宽度最小为 $0.30\sim 0.40\text{m}$ ，对于西鲱来说是 0.45m ，对于鳟鱼来说是 0.20m 。对于鲤科和其他淡水鱼类来说，槽孔的最小尺寸取决于鱼的大小。

对于“跃水流”鱼道来说，尤其是鱼不得不跳到上部水池的情况下，槽孔的尺寸应该大得多。

无论考虑哪种鱼，即使这种鱼很小，鱼道的最小宽度也应该是充分的（大于 $0.15\sim 0.20\text{m}$ ），这样才能保证鱼顺利通过垃圾阻塞。

对于大型洄游鱼类来说，潜孔的最小表面积应该是 $0.09\sim 0.10\text{m}^2$ ，对于鳟鱼和多数鲤科鱼以及其他小型鱼类来说应该是 0.04m^2 。

也许一些鱼道中有一些更小的潜孔，但是这些潜孔并非供鱼类通过用，确切地说是为了便于维修操作用来给鱼道排水的。

5. 水池式鱼道流量的估计

一般溢流堰或通过竖缝或潜孔的水力公式可用来估计鱼道中的流量，而以其几何特征的函数表示

之。这些几何特征包括堰、槽孔或竖缝的尺寸和堰顶高程；连续两个水池间的落差；及上游水位和下游水位。图 2 显示了各种不同的条件，下面简要描述。

通过潜孔的流量可用下式表示：

$$Q = C_d S (2g DH)^{0.5}$$

- 式中 Q: 流量 (m³/s)
- S: 潜孔面积 (m²)
- g: 重力加速度 (9.81m/s²)
- DH: 水池间落差 (m)
- Cd: 潜孔的流量系数

影响流量系数的主要因素是槽孔的形状（圆形，正方形，矩形……）和外形（具锐缘，斜切、圆上游缘）、潜孔所在隔离墙的厚度、以及潜孔在隔离墙上的位置。一般，成斜面或弧面的上游边缘，流量系数较大。这一系数的变化范围在 0.65 到 0.85 之间。

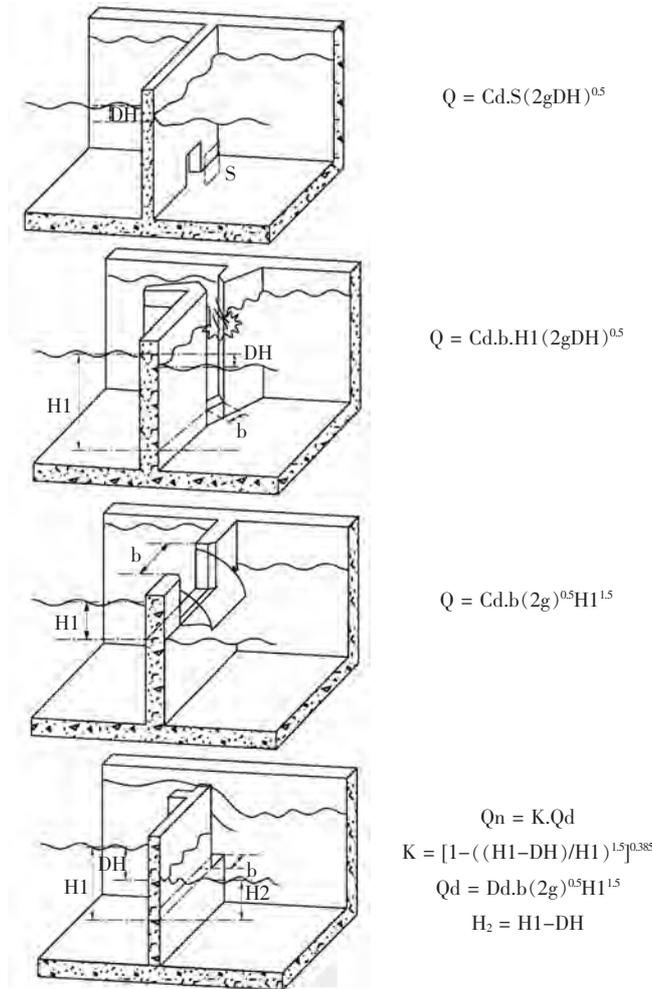


图 2 决定水池式鱼道流量的几何和水力参数

通过狭槽的流量可用下式表示

$$Q = C_d b H_1 (2g DH)^{0.5}$$

- 式中 Q: 流量 (m³/s)
- b: 竖缝的宽度 (m)

H_1 : 狭槽上水头高 (m), 即狭槽上游水位高程和狭槽上的槛顶高程差

g : 重力加速度 (9.81m/s^2)

DH : 两个水池间的落差 (m)

C_d : 竖缝的流量系数

影响流量系数的主要因素是竖缝的形状和结构。上游弧形边缘槽孔的流量系数大一些。这个系数的变化范围从锐缘槽孔的 0.65 到弧形切口的 0.85。

通过一个自由流动矩形槽孔, 即一个非潜堰的流量可用下式表示:

$$Q = C_d b (2g)^{0.5} H_1^{1.5}$$

式中 Q : 流量 (m^3/s)

b : 槽孔的宽度 (m)

H_1 : 槽孔处水头 (m), 即槽孔上游水位高程和槽孔顶高程间的差

g : 重力加速度 (9.81m/s^2)

C_d : 流量系数

影响流量系数的主要因素是槽孔的外形和槽孔所在隔离墙的厚度。正如潜孔和竖缝的情形一样, 成斜面或弧形的上游堰缘流量系数大一些。这个系数变化范围从一个宽缘堰槽口的 0.33 到槽孔形状符合水流弧形的 0.5。在多数情况下, 流量系数接近 0.4。

在矩形槽孔可被认为是一个矩形锐缘潜堰时 (即, 堰正下方的水位高于堰顶时), 在中等淹没的情况下, (隔离墙槽口顶部上下游的水头比例 $H_2/H_1 < 0.9$), 则流量 Q_n 可表示如下:

$$Q_n = K Q_d$$

$$\text{其中 } Q_d = C_d b (2g)^{0.5} H_1^{0.5}$$

$$K = [1 - ((H_1 - DH) / H_1)^{1.5}]^{0.385}$$

式中 Q_d : 在同一个堰同一水头的自由流的水流量 (m^3/s)

H_1 : 堰的上游水头 (m), 即堰上游侧的水位高程和堰顶的高程差

DH : 两个水池间的落差 (m)

K : 淹没引起的流量缩减系数 (< 1)

必须强调的是, 上述公式仅仅给出了近似的流量值, 因为流量的条件和隔离墙的特征不同, 和这些在实验室严格条件下得出的公式应用条件一般来说相差甚大。同样需要考虑的是隔离墙的厚度, 使得堰或槽口既非“锐缘堰”, 亦非“宽缘堰”, 比较合适的是将它们视为“短顶堰”, 且这种堰的流量系数随水头的变化比较剧烈。墙壁的粗糙度也可能对于流量系数的改变有很大作用, 对于粗糙度很高的墙壁可以降低水流的收缩从而增大流量系数。最后, 最上游的隔离墙的水流特征与那些随后的隔离墙的水流特征一般来说不太一样 (速度更低, 且较均匀)。

然而, 实际上, 以上所获得的精确度水平足以确定设施的恰当尺寸。然而, 若是鱼道本身同时输送全部的生态流量, 例如在绝大部分小型溪流上的水力发电站中, 评价鱼道中的流量就要求更高的精确性。在这种情况下, 宜提供清晰的断面图, 并仔细校准和测量鱼道最上游的几个槽孔或潜孔。

6. 水池型鱼道的规格

在河道障碍物处的水池鱼道的规格需要确定很多特征值。这些包括需要的水池数量、水池间联系的方式 (槽孔、竖缝和潜孔的位置和几何特征)、槽孔或竖缝顶部的高程、渠底高程及鱼道隔墙和边墙高程。其步骤如下:

① 决定水池间落差 (水头差), 而这一般视所考虑的种类而定。

② 由低流量期间, 在大多数情况下观察到的跨障碍物的最大水头差确定跌水数 (N), 从而决定

水池数 (N-1)。

③选择水池间的隔离墙类型 (槽孔、竖缝或潜孔的几何形状和尺寸), 主要取决于:

- 鱼类洄游期间上、下游水位的变动范围;
- 洄游种类 (根据鱼的大小确定最小尺寸)、特殊游泳行为 (表面通过和/或底部通过)、对某些种类应避免的流动类型。

④通过鱼道的流量对于低流量河流一般是固定的。它通常是根椐河流中的水流量和有关的洄游种类确定的。通常与法规规定的补偿 (生态) 流量部分或全部一致。水池的最小容积和尺寸取决于若干标准, 包括:

- 对容积耗散功率采用的值;
- 水池间联系方式 (水注的形态和形状);
- 洄游种类 (水池的最小长度、宽度和深度要求因鱼的种类和大小而异)。

⑤采用恰当的水力公式, 由对鱼道选择的流量并参照上游水位, 确定槽孔、竖缝、堰及潜孔的尺寸和高程。鱼道渠底高程由对每个水池规定的水深确定, 以满足容许最大容积耗散功率的标准。

⑥一旦相对于参考水位条件, 确定了鱼道的几何特征和高程, 设计者就应检查某些参数。水池间的水头差、水池中的紊流度及含氧量 (由容积耗散功率确定) 的情况必须维持在鱼类洄游期间各种不同上下游水位的需要。另外, 设计者必须检验在已考虑的极端水位条件下鱼道能够正常运行。

如果池间的最大落差或水池容积耗散功率不能满足标准, 那就要考虑改变池间连通装置 (孔、槽、缝等) 的几何特征, 以降低流量及紊流度, 增大水池的容量或者在鱼道上游修建一个控制装置。然而, 如果考虑的解决方式是降低鱼道中的流量, 必须保证该流量和河川中的水流相比仍有足够的吸引力。

⑦辅助水流 (通过格栅, 流速很低) 通常被引入下游水池来增加鱼道的吸引力, 但是水量必须控制。在这种情况下, 下游鱼道入口的设计 (宽度、堰高) 必须考虑到鱼道水流和辅助水流系统汇集后的流量。

⑧一旦鱼道的水力作用确定下来, 在上下游极端水位条件下的回水曲线 (即所有水池中的水位) 也就可以估计出来, 随之可确定水池间隔墙和边墙的高度。除鱼道功能以外的其他因素, 例如设施的抗洪保护或在拦河坝中的位置, 亦可影响侧墙的高度。

⑨如果鱼道不是直的且有大转弯 (例如, 180°弯), 那么必须保证在弯路和前面的隔离墙之间有至少与标准鱼池长度相同的长度。这能确保从竖缝或槽孔出来的水流不至于剧烈地冲击到对面墙上。

⑩在鱼道拐弯的地方, 必须斜切或弄圆直角, 以防止形成垂直水流, 因为这种水流可能促使洄游鱼类跳出鱼道。

7. 水池型鱼道对上、下游水位变动的适应

障碍上下游水位的变化, 可能影响水池型鱼道水力功能。

在大部分的情况下, 当河流的流量增加时, 下游水位的上升比上游要快的多, 这就导致上下游水位差距的缩小。而较不常见的是上下游水位变化相当。在障碍处若有控制流量的设施 (如水闸门), 当下游水位剧烈上升时, 上游水位可以保持几乎稳定。上游水位在高流量期甚至可能下落, 如在泰晤士河和塞纳河的航道中: 水位必须维持恒定的控制点位于距上游很远处, 在电站处的上游水位下降, 是因为高流量期间水位梯度增加所致。

水池型鱼道承受上下游水位变动的程度取决于池间连通装置的几何性质 (竖缝槽孔的深浅、溢流堰、潜孔等):

- 鱼道中水流流经占据整个隔离墙很大一部分的宽堰上方时, 上游水位的任何变化都将导致流量

的巨大变化。这还随后会影响池子的紊流程度和含氧量。

- 在垂直竖缝鱼道中，水池中水的流量和体积随上游水位几乎呈线性增加，而流速和紊流度几乎维持不变。

- 在有潜孔的鱼道中，从一孔到另一孔之间水平面没有显著变化，且流量也几乎保持稳定。

如果水流是经由较窄且深的池间连通装置，而有“被压缩”的情形，那么鱼道就能承受较大的上下游水位的变化。

如大多数障碍处的情况，当下游水位比上游水位明显增加地较快时，对于安装窄且深的连接装置鱼道的回水作用表现会更加明显，回水至鱼道更上游渠段。

对于宽槽孔的鱼道，下游水位变化的影响集中体现为入口处下游的落差。下游水位的增加将会导致入口处跌水突然被淹没，从而使水速迅速下降，使鱼道吸引力降低。下游水位的降低，会使入口处落差增大，导致鱼道通过的难度增加。

相反，在槽口或竖缝的稳流流态的鱼道中，下游水位变化的影响分散到数个水池，这类型池间的连通装置因此比较可能承受下游水位的变化。如果下游水位增加，此类鱼道的吸引力和前一种所述鱼道相比会维持得较好，因为入口处水头差减小的程度较不明显。另一方面，当下游水位降低时，入口处的水头差增加幅度也不显著。

当上游水位保持恒定时，可以为鱼类选择宽的鱼道（溢流堰或槽孔）。在这类情况下，水池间连通装置的最适宽度由下游水位的变化量来确定。当下游水位有巨大变化时，很有必要限制鱼道下游部分的淹没程度，通过使用较深且窄的连通装置来保证鱼道水池和入口处足够的流速。

在上游水位变化比较剧烈时，建议通过深的槽孔或竖缝来限制。对于大型设施来说，最佳的方案是安装垂直竖缝型的鱼道。当流经鱼道水的流量限制在 300~700L/s 时，最佳方案是安装深的槽孔和潜孔各在一边交错的水池型鱼道。

8. 水流控制断面

在上游水位变化的情况下，可以考虑在鱼道上游设置一个控制断面来控制通过鱼道的流量，以使得紊流度控制在可接受的水平。有几种类型的控制断面，包括静态的（借助于一系列垂直竖缝和潜孔）、机动的（借助于一系列可调节水闸或调节阀）或甚至更复杂的系统。下面的例子包括设置几个旁路的水池，或者在几个不同的上游水位处设置出口。图 3 说明控制断面的一些例子。

当水位变化比较剧烈时，必须通过几个水池来分散变化量以完成控制。这是为了避免产生局部水力变化（水池间水头差、速度差或紊流度），因为这能阻碍鱼类通过鱼道。仅使用单一一个水闸或门来限制水流可能会产生局部的流速加快和落差使鱼不能通过鱼道。因此，绝对有必要控制最大流速、最大落差和单位容积耗散功率在规范的标准之内。

一种解决方案是在设施上游安装一系列的水闸或门，随上游水位变化小心调整闸门位置（人工或自动控制）。这就保证了有稳定的水流经过电站，也保证了鱼能顺利通过鱼道（图 3a）。

对于小型设施而言（100~200L/s），通常使用“跌流”鱼道限制水池的长度并使高坡度的使用得以实现（在小规模电站针对鳟鱼设计鱼道时这种情况很多）。在上游水位抬高时，最常用来控制流量变化的限制手段是采用有多个潜孔的控制断面（图 3b）。潜孔的面积是有规定大小的，以保证在过鱼期间上游水位最高时，水池间落差不得超过约 0.3m。在上游水位低或适中间，控制段处的水位落差将低于 0.3m，即约 10~20cm。但要特别注意潜孔被水中的碎片阻塞。

当上游水位变化比下游水位变化剧烈时，一个解决方法是设计一个针对上游最高水位的鱼道（考虑落差和池子的数量）。为了保证在上游水位回落时，有足够的流量，可以通过打开上游池子隔离墙之间的闸门来使上游池间的落差降低或控制住（图 3c）。另一个选择是修建旁路以提供另外的通路，

例如上游侧墙多设置一个或几个出口（图 3d）。

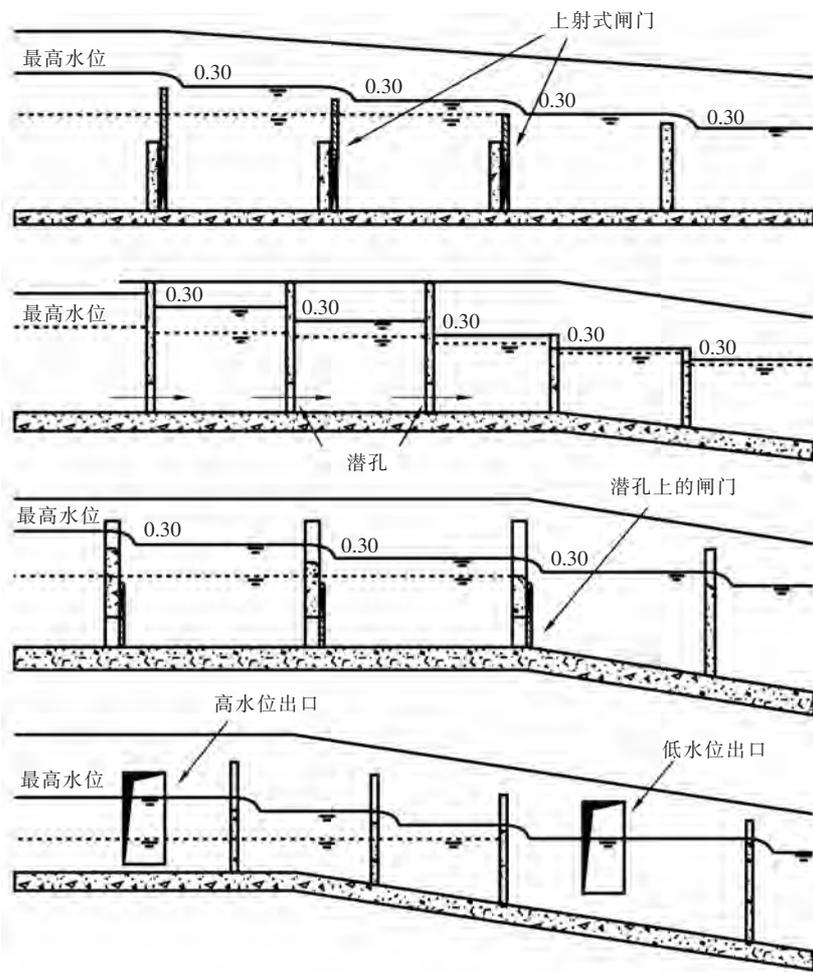


图 3 鱼道内流量控制段示意图

9. 水池鱼道的有效性

涉及数种洄游鱼类（鲑、海鳟、鳟、鲤科鱼类等）时，水池型鱼道似乎是最佳解决办法，因为其比挡板鱼道具有较低的鱼种选择性。尽管鱼道的坡度可能较为受限，但是它在结构配置上可以设计为多次转向（多个 180° 转弯），使这类鱼道较容易整合入通常在岸边的现有电站。

潜孔管型鱼道在实践中很少用。他们很难维护（潜孔经常被堵），并且在高水流期（障碍处的整个落差降低时），通过潜孔管的水流量有降低的趋势，这样就使鱼类很难找到位于池底的潜孔。他们不可能用于西鲱的鱼道。

垂直竖缝型鱼道有明显的优势，它们不需要控制段而能够承受上、下游水位的较大改变。然而，对于大型洄游鱼类，在可获得显著流量（大于 $0.7 \sim 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ）的地方才能使用这类鱼道，因为这样的鱼要求最小竖缝尺寸。垂直竖缝型鱼道使鱼能在任何深度通过。

槽孔型鱼道，不论它们在底部是否有潜孔，由于它们能适应许多情况，槽孔型鱼道目前是最普通的。它们接受宽范围的设计流量（每秒几十升到几立方米），而且如果槽孔足够深，它们不需要调节段即能适应上游水位相对显著的变动。

为了增加水池混凝土底部粗糙度，并且这更容易使小鱼通过，可在水池混凝土底部砌块。同样，为了形成小休息区，鱼道的边墙可以是不规则的；可采用混凝土桩或钢桩的特殊形状筑墙。

下面给出了法国和其他国家现在采用的几类水池型鱼道的几何特征，作为设计者的一个指南。

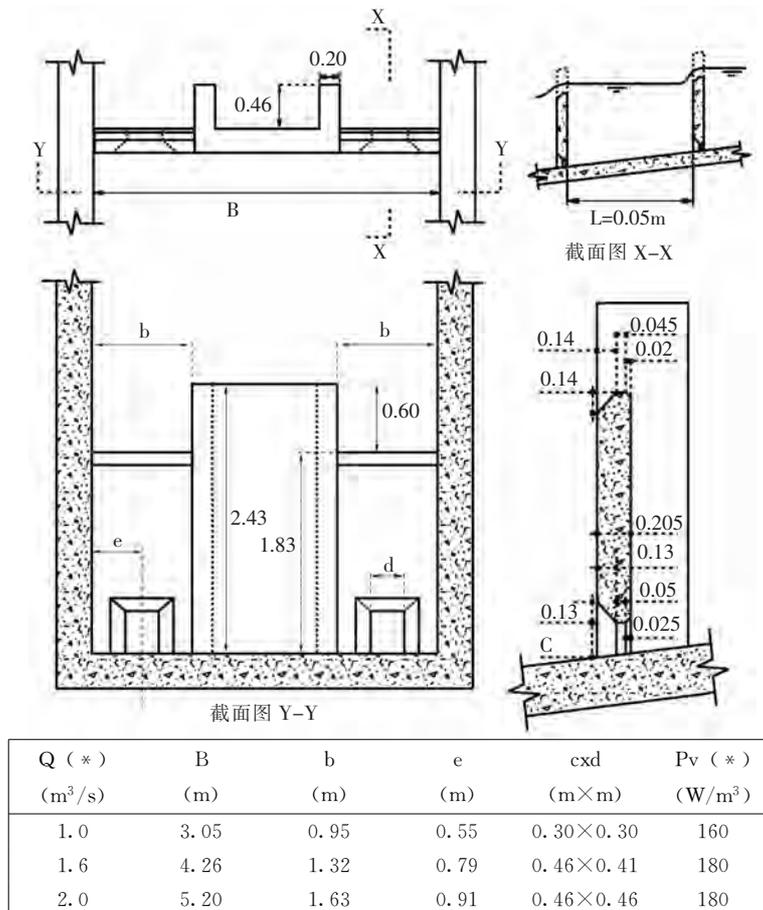
10. 水池鱼道的例子

10.1 Ice Harbor 型鱼道

这种类型的鱼道，是许多水力模型研究的对象，在美国西海岸（特别是在哥伦比亚河上的 Ice Harbor 坝）和东海岸用于鲑科鱼类（RIZZO, 1969; BELL, 1986）。水池最低长度约 3m，平均水深 2m，水池间水位差 0.3m，坡度一般接近 10%。水流经一、二个侧表面槽孔，槽孔的宽度视所要求的流量及一、二个槽孔而定。堰上水头约 0.3m。

这种类型鱼道的宽度变动于在小电站 2 米到在最大电站超过 10m 之间，流量为 $1\text{m}^3/\text{s}$ 到 $6\text{m}^3/\text{s}$ 。容积耗散功率大体上变动于 $150\text{W}/\text{m}^3$ 到 $200\text{W}/\text{m}^3$ 之间。RIZZO (1986) 确定了设计这类鱼道的若干标准。侧流溢流堰的流量系数约 0.45，而潜孔的流量系数约 0.85。每边溢流堰宽约 $0.312B$ ， B 是鱼道的宽度。潜孔的大小变动于流量 $1\text{m}^3/\text{s}$ 鱼道的 0.09m^2 ($0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$) 到流量大于 $2\text{m}^3/\text{s}$ 鱼道的 0.2m^2 ($0.46\text{m} \times 0.46\text{m}$) 之间。图 4 显示水池的特征。

其水流流态为落 downstream，并仅适应上游水位的微小变动。上游水位变动时，一般使用由垂直竖缝或伸缩闸构成的控制段以调节之。



(*) 标准落差为 0.30m 时的流量和体积耗散功率

图 4 “Ice Harbor” 型鱼道的特征

北美某些电站将这一类型的鱼道用于西鲑。然而，经验表明，设计水头为 0.3m 时，这类鱼道对西鲑会产生问题（由于跌流）。为了提高鱼类通过设施的效率，不得不做几项改进（RIDEOUT et al., 1985），包括：

- 增加横断物上的水头（0.40~0.45m）以形成更大的表面流。
 - 减少潜孔的横截面。
 - 交错关闭每第二个槽孔，防止表面流短路，降低水池中流量和湍流度。
- 经过这些改进，这一类型鱼道变得非常类似于下述的侧深、交替槽孔鱼道。

10.2 侧深槽孔和潜孔鱼道

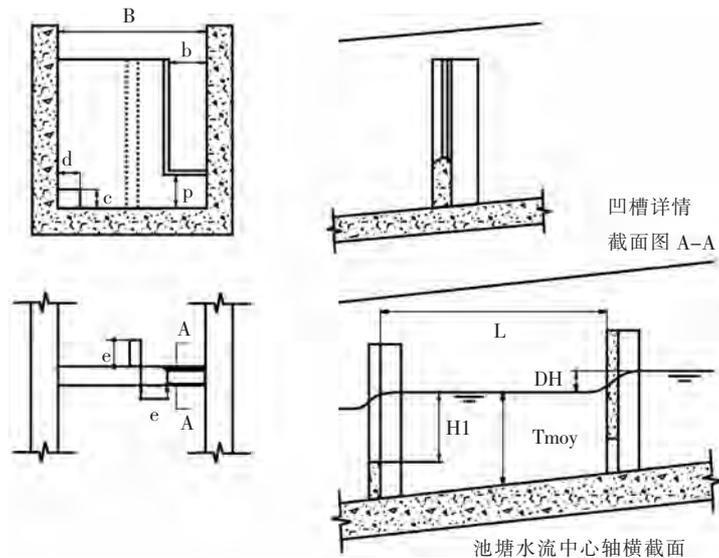
这一类型的鱼道在法国现在主要用于鲑科鱼类，它是根据几个模型研究产生的（图 5）。水池间横断物有侧槽孔，底潜孔位置完全相对。槽孔和潜孔在每道连续分隔墙的位置从一侧到另一侧交替。固定于隔墙上游面的一块挡板矫正并稳定水流，而且还减少槽孔处流动收缩。

由于有“连续流”，槽孔的宽度在某种程度上决定水池的尺寸（即其最小长度），但其最小容积视所要求的容积耗散功率密度而定。

然而，这一类型鱼道中的水力状况并非最佳的，因为水池中水的总体积未对消能起作用。从槽孔流出的水流仍然较致密，形成冲击隔墙上游面的管状流。主流侧和隔墙下游形成对功率消耗几乎没有影响的漩涡。

因此，重要的是，只要可能，就要使水池长度对槽孔宽度之比（L/b）最大化并降低水池宽度对槽孔宽度之比（B/b）。然而，这对设施的总坡度和长度不利。

图 5 显示为几种不同流量设计的水池的特征。水池间落差一般为 30cm。



Q (*) (m ³ /s)	L (m)	B (m)	Tmoy (m)	b (m)	cx d (m×m)	e (m)	P (m)	H1 (*) (m)
0.175	2.20	1.25	1.15	0.20	0.15×0.15	0.15	0.70	0.60
0.300	2.70	1.30	1.30	0.30	0.20×0.20	0.25	0.80	0.65
0.500	3.15	1.50	1.50	0.40	0.30×0.30	0.35	0.925	0.725
0.700	3.50	1.65	1.65	0.45	0.375×0.375	0.40	0.95	0.85

(*) 设计落差及其水流量

图 5 法国使用侧深凹槽和潜孔水池式鱼道

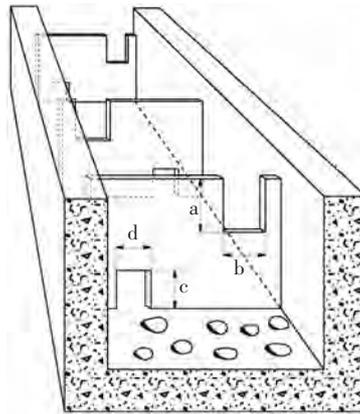
为了保证“连续流”，并且为了避免在“连续流”和“跌流”间出现的不稳定流动状态，槽孔处的最低水头必须比水池间水头落差的 2 倍略多（即对于 0.3m 的常见落差为 0.6m）。比例 (L/b) 通常变动于 8~10 之间，(B/b) 变动于 4~6 之间。

这一类有连续流的鱼道对于非常低的流量是很难设计的。考虑到对最低水头和最小竖缝宽度的需要（对鳟约为 0.2m），对于小于 150L/s 的流量，不能设计这种鱼道。在这样的情况下，采用水头较低、槽孔较宽的较典型的“跌流”鱼道。

这类鱼道的主要优点是易建造，且不需要另外控制即能适应上游水位的显著变动。

10.3 淡水鱼类和鳟鱼的鱼道（德国、瑞士）

德国和瑞士常常采用有表面槽孔和潜孔的水池组成的鱼道。图 6 显示 JENS (1982) 给出的二级水流中鳟和非鳟种类鱼道水池的特征。



	非鳟鳟鱼鱼道	鳟鱼道
最低深度	0.8m	0.6m
内长	>2m	>0.8m
内宽	>0.8m	>0.6m
落差	<0.25m	<0.3m
到边墙的净空间	>0.3m	>0.3m
槽孔	0.2m×0.25m	>0.2m×0.2m
(b×a)	0.25m×0.3m	
潜孔	0.25m×0.3m	无用

图 6 德国采用的非鳟鳟淡水鱼和鳟水池型鱼道的特征（源自 JENS, 1982）

水池间推荐的最大落差对于为鳟鱼而设的鱼道为 0.3m，对于为其他淡水鱼所设的鱼道为 0.25m。推荐的水池最低深度分别为 0.6m 和 0.8m，最低长度分别为 0.8m 和 2.0m。这一类鱼道中的流量一般低于 200L/s。尽管作者给出了水池、槽口和潜孔的最小尺寸，但并未提供其他标准，可以选定槽孔特征作为函数计算水池的大小。

作者建议，在鱼道底部放置一些直径 15~20cm 的方块，以提高鱼道的粗糙度，从而为较小的鱼类提供休息区。

这一类型的鱼道非常平静，适合于多数种类，甚至小型种类。然而，这一类型的鱼道由于其流量低，使这种鱼道若设置在大河上可能没有太大的吸引力。此外，这一类型的鱼道仅能经受上游水位的微小变动。

10.4 竖缝式鱼道

这一类型的鱼道是为了让鲑通过加拿大 Fraser 河上的 Hell 急流，经过几个模型研究后产生的 (CLAY, 1961)。最初的鱼道模型包含一系列巨大的水池，长 5.5m、宽 6.1m、且有两个宽 60cm 的竖缝。从竖缝流出的水流在渠道中央汇聚，有效的消散水能，并在鱼道两侧紧临隔墙堰下游处形成平稳的区域。全世界建造了许多基于相同原理，但通常仅有一个竖缝的鱼道 (CLAY, 1961; ANDREW, 1990)。

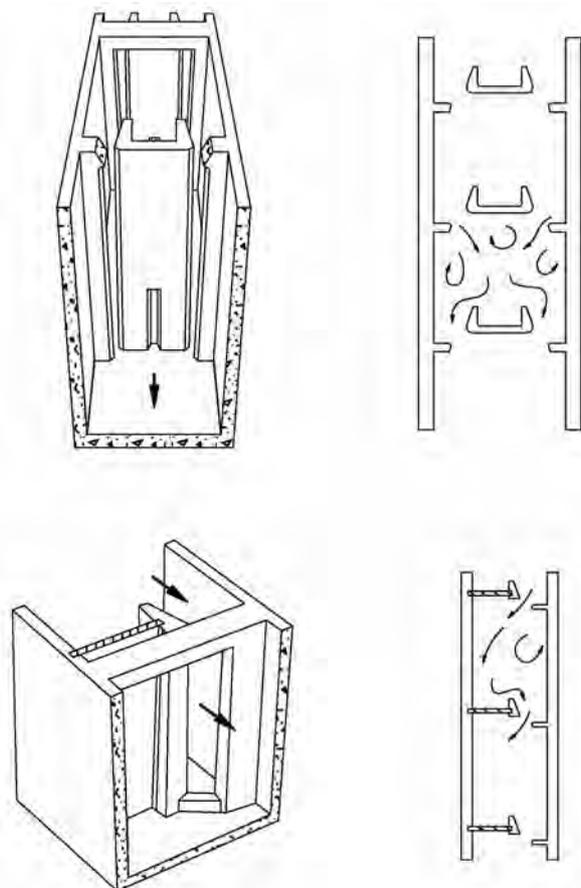


图7 单垂直竖缝和双垂直竖缝鱼道

一般，在竖缝基底会安装一个至少 20cm 高的底槛。该槛有两个用途：较好地引导并稳定对角水流以防止短路（或绕过消能池），限制鱼道中的流量。

竖缝出口处的水流流向往往与槛顶垂直。通常与水池流向成 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的角度。为防止水流短路，底槛的顶高越低，角度应该越大。另一方面，当底槛的高度越高，角度便应该越小，水流太过用力地冲击对面墙，可能会影响鱼类洄游。因此，最适宜角度随水池的尺寸，即长度对宽度的比值而改变。

流量系数受竖缝几何形状的影响。不论顶部是尖锐的还是圆的，宽度是大还是小，底槛的高度和竖缝处的水位都会影响流量系数 (PERKINS, 1973; RAJARATNAM et al., 1984; LENNE, 1990)，使系数在 0.65 与大于 0.85 之间变化 (CLAY, 1961)。

在法国，根据比例模型研究的垂直竖缝鱼道的流量系数约为 0.65~0.70。系数相对较低的原因是在法国竖缝的形状是尖锐边缘的，而在美国是圆弧形的 (RIZZO, 1986)。

对于大型鲑科洄游鱼类来说，池间落差一般大约是 30cm。鱼道之间竖缝的几何特征和池子的形

状则可能差异很大。

图 8 显示在法国建造的若干垂直竖缝鱼道的几何特征，其中大多数已经在比例模型中研究过 (I. M. F. T. , 1982, 1983, 1986, 1988; LENNE, 1990)。

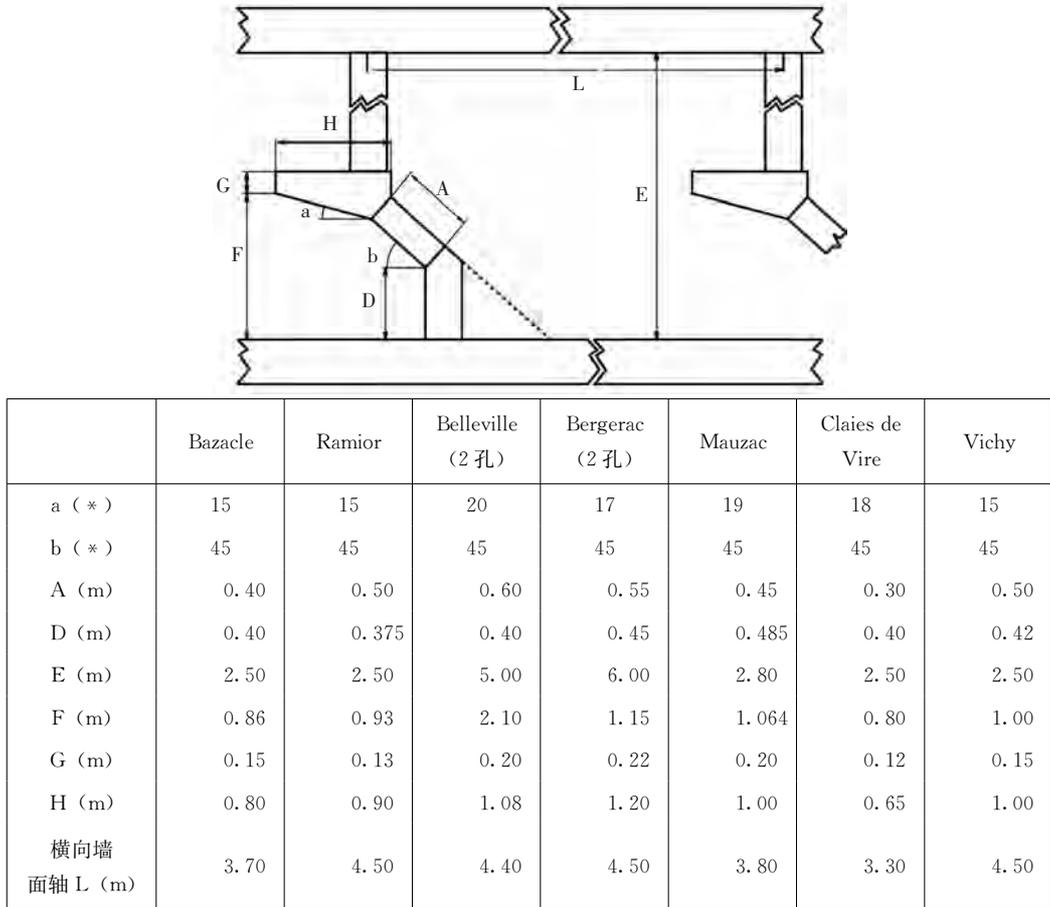


图 8 竖缝式鱼道的几何特征

水池长度相对于竖缝宽度之比变动于 8~10 之间。单垂直竖缝鱼道中，水池的宽度一般为竖缝宽度的 8~10 倍之间，在双垂直竖缝鱼道中约为竖缝宽度的 9~10 倍。

许多模型试验已进行 (LENNE, 1980) 以简化挡板和隔离墙的几何形状，以及提出以竖缝宽作为函数来计算特征的设计标准 (图 9)。

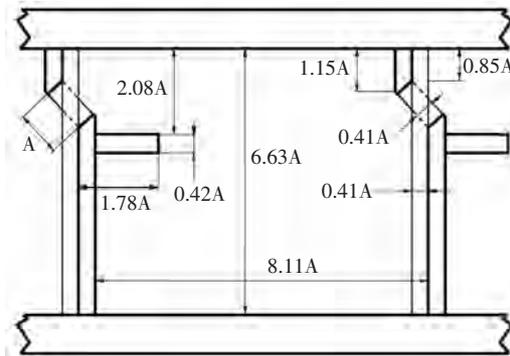


图 9 简化的竖缝式鱼道特征

垂直竖缝鱼道的好处是，当下游水位与上游水位变化相似时能承受明显的水位变化。

无论鱼道中水位如何，流速和紊流度都可以维持在比较稳定的情况，鱼类都能顺利通过鱼道，并在最适的深度游泳。

10.5 三角溢流堰型水池鱼道

美国西海岸改进了三角溢流堰型水池鱼道（或水池及滑道型鱼道）的设计（BATES, 1990）。这种鱼道设计的目的是在下游区段不需要辅助水流且上游不需要流量调节控制装置时，在大范围的流量和上游水位变化的河流上设置鱼类通过设施。在低水位时，这种鱼道的运行同有跌流的典型鱼道一样，能量在每个水池中消散。在高水位时，这种鱼道中的池壁处依然保持跌流流态和良好的过鱼条件，在鱼道中部同时形成高速连续流流态。因此，这种鱼道在低水流时充当水池型鱼道，而在高水流时则充当粗糙水渠。但是，使设计按照水池中最大容积耗散功率合理化没有意义。图 10 给出了 Yakima 河陶恩坝鱼道的特征。鱼道的坡度接近 10%，它能通过约 $10\text{m}^3/\text{s}$ 的流量，倾斜的溢流堰坡度设计为 $1/4$ 至 $1/3$ 。

这一类型的鱼道非常利于通过垃圾，因为它的开放设计使得垃圾可由堰顶冲洗下并冲出鱼道，而在高水位时，基本上是被淹没的。在未更充分地检验这一概念前，不应在总落差超过 2m 处使用这种鱼道（BATES, 1997）。

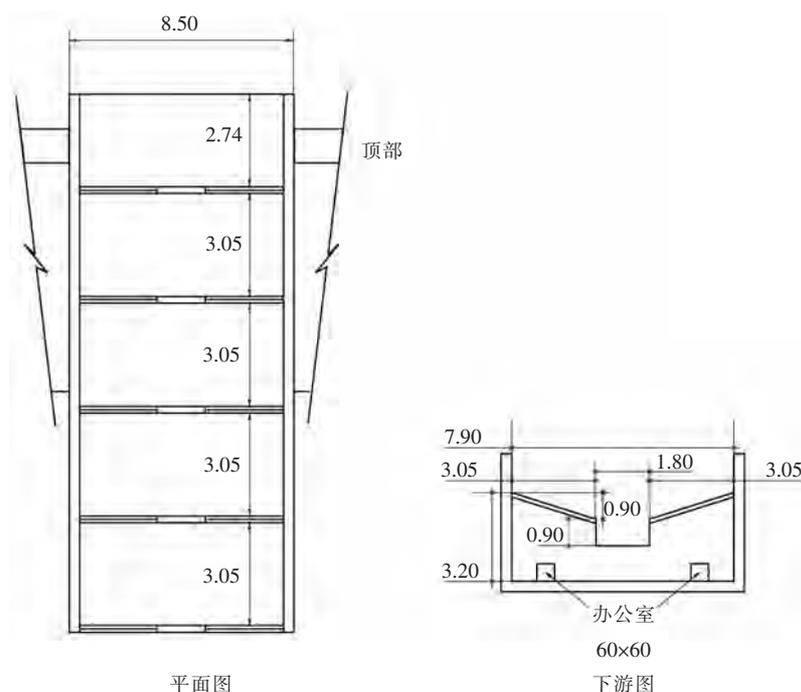


图 10 水池和滑道型鱼道（摘自 BATES, 1990）

随着法国图卢兹的水利工程研究所对不同比例模型进行的试验，在法国西南部（Adour 河、Salat 河、Neste 河及 Lot 河）建造了多条三角溢流堰型水池鱼道。这种鱼道设计最大不同处在于，对于可能在目标种洄游期间出现的所有上游水位状况，能量在每个水池内可以充分地消散。水池的长度相当于 V 型槽孔中心最大水头的 12 倍。

这类鱼道的设计标准尚未制定，主要是因为很难用简单的函数来定义设施中的水力状况。实际上，三角溢流堰型鱼道仅适用于中等水位落差且鱼类洄游期间上游水位变化不太剧烈的情况。在障碍物处修建这种类型的鱼道不仅可以过鱼，还可以使独木舟及皮舟通过。

11. 前拦河堰

前拦河堰是解决低障碍过鱼问题的适当方案。它由在障碍物下游形成多个宽水池的堰组成，水池分散待通过的水位落差。为便于维修，一般将这些堰建在靠河岸的一侧。在小河道中，前拦河堰还可能横跨整个河流宽度。图 11 展示不同类型的前拦河堰的构造。

这类结构的主要优点是其对鱼类的吸引力，因为可能通过设施的水流的流量百分率非常高。为了限制水池数，通常在前拦河堰处使用较高的水头落差，故这种吸引力往往破坏了鱼的舒适度。如果对于大型鲑科鱼类来说，水池间水头差通常是在 0.3~0.45m 的话，那么前拦河堰处的池间落差可能约为 0.45~0.6m。

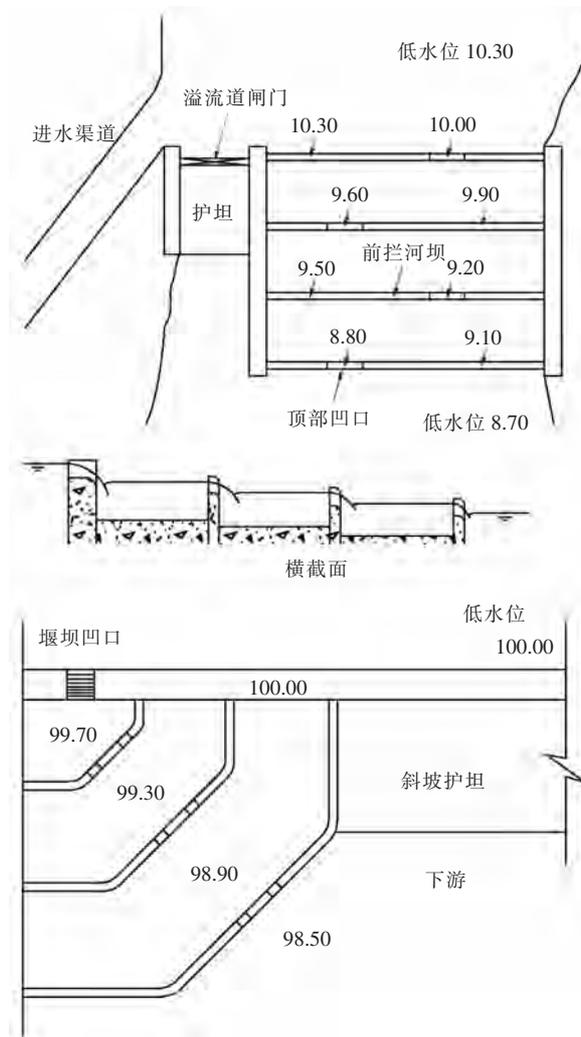


图 11 占据河流全部或部分宽度鱼道的连续前拦河堰示意图

当设计前拦河堰时，建议应考虑：

- 不论河道中的水量如何，必须确保有足够的水头经过连通装置，让鱼通过。在枯水期，水流一般应集中在槽孔，且最低水头约为 0.2~0.3m。

- 随着上游水位的升高，应该或多或少能维持池间恒定的落差。当前拦河堰修建在一侧的河岸时，设施必须吸收水流从上游水池到下游池子增加的流量。这些应该在决定围堰高程和不同的溢流堰

长度时加以考虑。

- 溢流堰应该设计成适当的形状，使鱼类能顺利通过池子。墙壁厚度应该为 0.20~0.30m，或者更厚一些，以保证墙壁结构的稳定性和可靠性。如果为了简单起见，而设计成矩形，这可能使其作用相当于宽顶堰，从而使鱼很难通过。因此建议使用穹顶堰，亦即使用圆形、光滑的、最起码斜切的剖面，以保证鱼顺利通过鱼道。对于所有鱼类可能需要通过的侧壁墙来说，也需要同样处理。应该特别注意最上游切在现有的河堰上的槽孔。因为它通常会形成比其他更宽的堰，而使鱼类通过出现问题。出于这种考虑，通常需要将上游端第一个堰的落差控制在 30cm 左右。另一方面，对于非常低的流量状况，特别是鱼类洄游主要发生在中高流量时期时，下游端第一个堰的落差有时候可以升高。随着流量增加，障碍物下游水位增加通常要比上游快，这就容易导致下游落差很快地被淹没。

- 为了保证鱼道设施的耐久性和防侵蚀性，可以通过保护水池的地板（以混凝土或大方块）或使墙壁尽量深植入地面来实现。

- 使水池足够深。在任何情况下，水池的深度应该是落差的两倍以上。

水池型鱼道中，水池的最小容量是流量和落差的函数。随着上游水位的增加，流量伴随着单位容积的功率耗散会迅速增加。

如果鱼只需通过几个水池，所采用的最大单位容积耗散功率标准可比平时水池型鱼道所采用的高一些。在低流量条件下，应设计采用单位容积消能量为 $50\text{W}/\text{m}^3$ 或甚至更低的标准，对于流量为每秒几立方米的前拦河堰来说，最大的消能量上限可采用接近 $500\text{W}/\text{m}^3$ 的水平。

前拦河堰通常用于有鲑科鱼类种群的河流。因为水流属“跌水式”，故这种设施应尽量避免用于通过多数河流性种和西鲱。

12. 近自然旁路通道

人造河流，或“近自然旁路水道”，是模仿自然河流修建的一种坡度平缓的渠道，以此来连接障碍物的前池与尾水池。这种渠道由于其粗糙的河底、河岸以及一系列渠道中或多或少规则或排列的方块、凸堤和堰，而使流速降低、水能消散。

倘在设计阶段考虑许多标准，这一类型的设施可以是多用途的。它可能成为洄游鱼类的通过设施，也可以当做独木舟、皮舟或木筏的水道。

相对于常见的水池型鱼道或挡板鱼道，法国现在几乎没有用于鱼类通过的自然旁路水道。但是，预计今后几年这类环境友好型通道的使用将增加。然而，这类通道的坡度太低（百分之几，从不到 2% 到最大 5%），使这种鱼道非常长，因此限制了这种鱼道的推广使用。

同其他任何鱼道的情形一样，建议旁路水道的入口应尽可能位于上游并非常靠近障碍物。由于这一类型的鱼道坡度很低，有时很难把入口直接设置在障碍物下，而不得不位于障碍物下游较远处，从而限制了这种鱼道的效率，也限制了这种鱼道在大河上的使用。另一方面，对于较小的河道，可以通过使总流量的一大部分通过设施，克服这一缺点。

河道中存在的特有种类的游泳能力和行为可以适应这类型鱼类通过设施中的流速、落差和紊流度。

原则上有两类自然旁路水道：

- 功率耗散集中在有规律的布置、有点“透水的”堰下的局部跌水处。这些堰形成了一系列足够大的水池来消散能量并控制湍流程度，因此流入下游水池的水没有多余的速度和紊流度。这种引水渠型的鱼道可以采用传统类型的水池型鱼道的设计标准。

- 功率耗散比较不集中且沿设施近乎规则发生的自然旁路水道。可以通过采用柱子、突堤、大石块等来使能量消散。为了避免产生影响鱼通过的局部困难点（局部落差、高速水流、水跃等），除非

在这一站点上已有现场经验，否则有必要通过水工模型来确定这种水道的几何特征。

这类鱼类设施中的流量由水道的坡度和宽度而定。当设施的坡度降低时，单位宽度的流量可以增加。通常，单位宽度的流量变动于不到每米 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 到超过 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 之间，视坡度而定。

在法国，由于河流上既要过鱼又要过船，所以使得这种鱼道时常有些应用上的限制。这就导致了使用潜没式的障碍（譬如石堰或突堤）以代替水力上较为有效的一系列蛮石槛。这导致粗糙度的下降因而有必要降低设施的斜度。如果没有特殊的调节设备（闸门），此类旁路不可能承受上游水位的剧烈变动。这些控制措施可能导致局部落差或流速过大，从而影响鱼类通过。因此，有必要设置一段小型的传统鱼道，以绕过控流设备从而使鱼能够离开鱼道。

荷兰在默兹河及其支流已使用了这种 V 型浅堰分隔的鱼道，由一系列水头差小的水池组成、用木条构筑的板桩建造（BOITEN, 1990）。其非常低的梯度（3.33%）使其更接近于旁路水道而非传统的水池型鱼道。

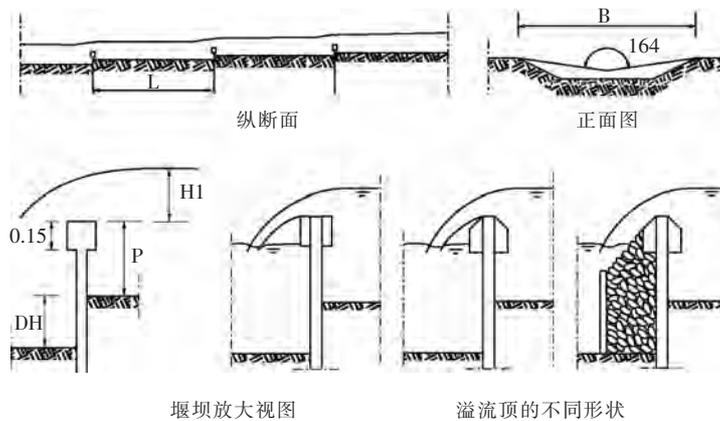
水池的长度大约是 14 个 H_1 ， H_1 是 V 型槽孔中间的水头。能量在设计水头 H_1 的 12 倍长度内，即可有良好的消散效果。

图 12 显示鱼道以 $0.5Q$ 和 Q 间的流量（即上游水头在 $0.75 H_1$ 和 H_1 之间）运行的条件下，几种设计流量 Q 的水池的特征。这种设施的运行范围非常有限。它对适合于 $2\text{m}^3/\text{s}$ 的鱼道约为 10 厘米，对适合于 $5\text{m}^3/\text{s}$ 的鱼道仍保持在 20cm 以下。设施中的容积功率耗散不会超过 $100\text{W}/\text{m}^3$ 。

作者提出的设计标准直接产生于水工模型的相似性定律。鱼道最初的实验结果提出了针对某种坡度（3.33%）和流量的最佳设计值。然后，采用外插的方式计算不同几何比例尺下，各种运行流量的鱼道尺寸。这种方法的限制是，池间的落差随着运行流量成比例增加。落差变动于 $Q=1.15\text{m}^3/\text{s}$ 时的 0.2m 和 $Q=5.5\text{m}^3/\text{s}$ 时的 0.375m 之间。从实用观点看，落差应仅因目标种而异，绝对不应随设计流量而变。

在新近出现的鱼道中，V 型堰是用大蛮石或用水泥喷浆的石笼铸成的。

这一类型的鱼道主要适用于坡度很缓的河流或者障碍物上游水位几乎保持恒定的情况。



流量 (m^3/s) $Q (9.8H_1^{2.5})$	落差 DH ($0.475 H_1$)	尺寸 (m)		P (m) ($0.76H_1$)	落差 H_1 (m)
		L	B		
		($14.2H_1$)	($18.8H_1$)		
1.14	0.20	6	8	0.32	0.42
2	0.25	7.5	10	0.40	0.53
3.15	0.30	9	12	0.48	0.63
5.51	0.375	11.25	15	0.60	0.79

图 12 荷兰使用的 V 型堰水池式鱼道的布置图（摘自 BOITEN, 1990）

图 13 显示 Adour 河上一种旁通道的特征，包括三角浅 V 型岩堰分隔的多个长 8 米的水池，梯度为 5%。5%被认为是这一类型设施坡度的上限。上游水头变动约 30cm 时，流量变动于 900L/s 到 3m³/s 之间。因此，容积功率耗散变动于 90W/m³ 到 250W/m³ 之间。水池间落差为 0.4m。这一类型的鱼道主要供鲑科鱼和泳速快的鲤科鱼使用。

上述旁路水道是消能集中在位置大体规则的溢流堰下的水道。

新近在 Gave de Pau 河的 Lac des Gaves 湖修建的旁路水道 (I. M. F. T. , 1991)，能量是部分通过局部跌水，部分由河床和河岸上的粗糙大卵石和大石块耗散的。该设施由长约 43m 的一系列梯形渠段 (最大宽度 1.20m 到 2.8m) 组成。其梯度为 0.3%，深约 0.8m。在每个梯形渠段中使用一个长 5m 的消能池用以消散 0.3m 的水头落差。消能池亦可作为鱼的休息池。设施的总坡度约为 0.9%，并且在增加辅助流后，流量变动于上游末端的 1.5m³/s 到下游末端的 4m³/s。鱼道中使用的材料是从 Gave de Pau 河冲击层的最粗糙颗粒中挑选出的 (砾石和大卵石)。旁通河道的流速随流量非常迅速地增加，因此有必要在设施上游端修建水闸，以保持相对稳定的流量。河流高流量期间，有潜孔的小型水池式鱼道可使鱼通过由于水闸关闭而形成的障碍。

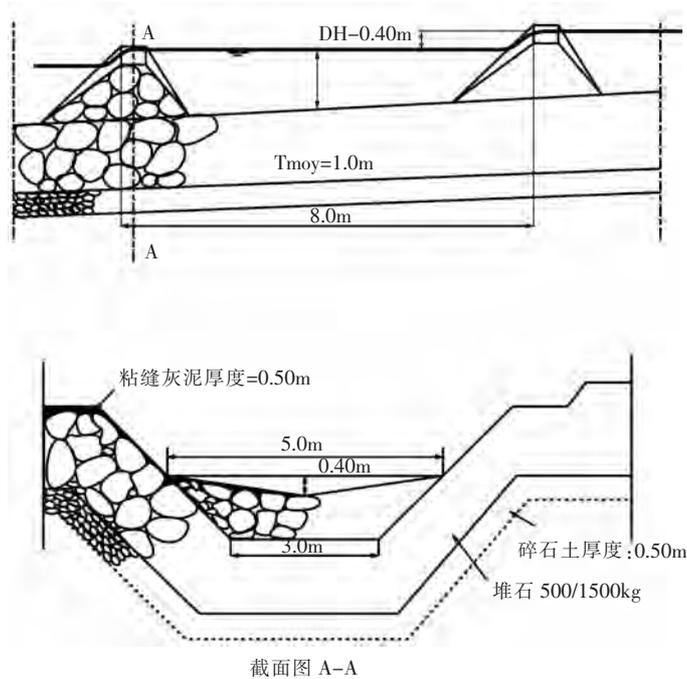


图 13 带有抛石堰的旁通道

丹麦采用一种坡度在 1%和 1.5%之间的旁路水道 (LONNEBJERG, 1990)。Holstrebro 处的设施长 665m，允许鱼通过 5m 的总落差。鱼道断面为梯形 (最大宽度 2.5m)，底部和墙壁铺设 15cm 到 20cm 的石块。将较大的方块 (50cm) 每隔一定的距离 (每 2m) 置于底部和两侧，以增加鱼道的粗糙度，同时也为鱼提供专用的休息区。适时调节流量，保证洄游期间流量在 0.4m³/s 和 1m³/s 之间。该设施有 6 个规则排列的休息水池。该鱼道中的大部分能量是由粗糙的底和边墙耗散的。

参考文献

- ANDREW F. J. , 1990. The use of vertical - slot fishways in British Columbia, Canada. Proc. Int. Symp. on fishways, Gifu, Japan, 267 - 274.
- BATES K. , 1990. Recent experience in cost efficient fish passage in Washington state. Proc. Int. Symp. on fishways, Gi-

- fu, Japan, 335 - 341.
- BATES K. , 1997. Fishway design guidelines for Pacific salmon. Working paper, 110 p.
- BELL M. C. , 1986. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Fish. Eng. Res. Prog. , U. S. Army Corps of Eng. , North Pacific Div. , Portland, Oregon, 290 p.
- BOITEN W. , 1990. Hydraulic design of the pool - type fishway with V - shaped overfalls. Proc. Int. Symp. on fishways, Gifu, Japan, 335 - 341.
- CLAY C. H. , 1961. Design of fishways and other fish facilities. Dept. of Fisheries, Ottawa, Canada, 301 p.
- I. M. F. T. , 1982. *Seuil de Belleville. Etude sur modèle réduit de la passe à poissons* (Belleville weir. Hydraulic model of the fishway.) . Rep. 391 - 3, 19 p.
- I. M. F. T. , 1983. *Barrage de Bergerac. Etude sur modèle réduit de l'échelle à poissons* (Bergerac dam. Hydraulic model investigation of the fishway) . Rep. 411, 109 p.
- I. M. F. T. , 1986. *Etude sur modèle réduit de la passe à poissons à l'usine du Pannier* (Hydraulic model investigation of the fishway at the Ramier hydro - electric scheme) . Rep. 427 - 1, 44 p.
- I. M. F. T. , 1991. *Etude hydraulique d'une rivière artificielle. Application au Lac des Gaves.* (Hydraulic study of an natural bypass channel. Applied to the Lac des Gaves.) Hydre Rep. 33, 9 p.
- JENS G. , 1982. *Der Bau von Fischwegen* (Constructing fishways) Hamburg and Berlin, P. Parey (ed.) 92 p.
- LENNE D. , 1990. *Circulation des poissons migrateurs : tranchissement des buses et étude hydraulique des passes à bassins successifs* (Movement of migratory fish: passage through culverts, and hydraulic study of pool passes.). ENI-TRS - CEMAGREF Rep. , 70 p.
- LONNEBJERG N. , 1990. Fishways in Denmark. Proc. Int. Symp. on fishways, Gifu, Japan. 253 - 257.
- PERKINS L. Z. , 1973. Fish ladders for Lower Monumental Dam, Snake river, Washington: hydraulic model investigations. U. S. Army Eng. Div. , Corps of Eng. , Rep. 109 - 116 p.
- PHILIPPE L. , 1897. *Rapport sur les échelles à poissons* (Report on fish ladders) . Ministry of Agriculture. Committee for improvements in agriculture and forestry, 27 p.
- RAJARATNAM N. , VAN DE VINNE G. , KATOPODIS C. , 1986. Hydraulics of vertical slot fishways. J. Hydr. Eng. , 112; 909 - 927.
- RIDEOUT S. , THORPE L. , CAMERON L. , 1985. Passage of American shad in an Ice Harbor style fish ladder after flow modifications. Symp. on small hydropower and fisheries, Aurora, Colorado, 251 - 256.
- RIZZO B. , 1969. Fish passage facilities design parameters for Connecticut river dams. Turners Falls dam. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, Boston, Massachusetts, 32 p.
- RIZZO B. , 1986. Fish passage design information. Fish passageways and diversion facilities course, Merrimack, New Hampshire, 26 p.



照片1 Vernon 坝 Ice Harbor 型鱼道（康涅狄格河，美国）上游视图



照片2 Vernon 坝 Ice Harbor 型鱼道（康涅狄格河，美国）下游视图



照片3 Clunie 坝潜孔型鱼道（苏格兰）



照片4 Cau 坝鲑科鱼小型“跌水式”鱼道（奥索河，大西洋岸-比利牛斯省）



照片5 Orne 河 Hom 坝半圆槽孔鱼道（诺曼底地区）



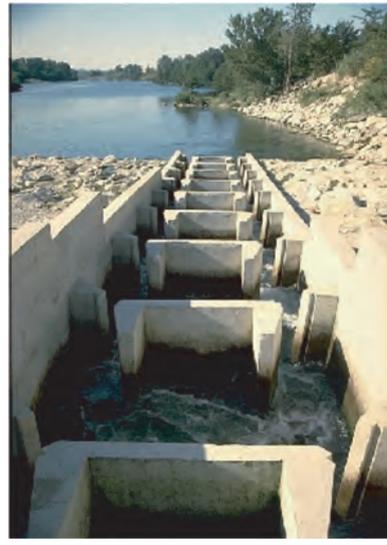
照片 6 侧深溢流槽口及潜孔鱼道（韦泽尔河）



照片 7 Iffezheim 电站旁的垂直竖缝鱼道（莱茵河），注意底部上面的砌石块，使小型种通过较为容易



照片 8 Dordogne 河 Mauzac 电站的垂直竖缝鱼道



照片 9 Gardon 河小型溢流堰上竖缝鱼道



照片 10 一个大型双垂直竖缝鱼道中变向水池的斜切角（皮约堰，波河）



照片 11 Meuse 河 Sambeck 坝上的 V 型溢流堰鱼道（荷兰）



照片 12 Meuse 河 Sambeck 鱼道 V 型溢流堰上游的水流详情（荷兰）



照片 13 Meuse 河 Sambeck 坝鱼道 V 型溢流堰细部（荷兰）



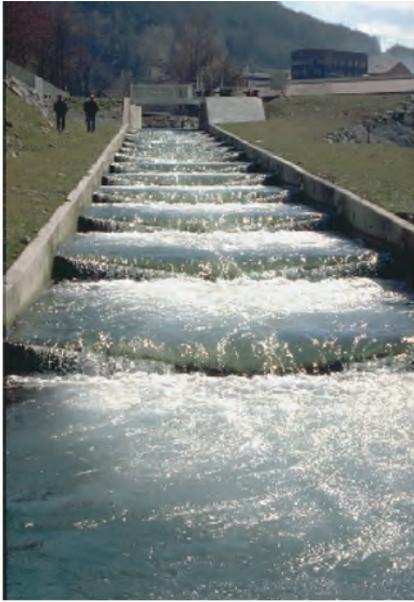
照片 14 Chatillon sur Lison 自然旁路水道的概览（卢河）



照片 15 Loue 河鲑科鱼类的自然旁路水道（利松堰畔沙蒂永）



照片 16 Adour 河西鲱的自然旁路水道（图卢泽特堰）



照片 17 Neste 河 Sarrancolin 坝上的三角堰鱼道



照片 18 Bröl 河上的自然旁路水道 (德国)



照片 19 Sinsat 堰旁的前拦河堰 (阿列日河)



照片 20 Gave de pau 河 Lestelle 堰旁的前拦河堰



照片 21 Gave de pau 河上 Biron 小型电站的自然旁路水道

第六章 挡板鱼道

M. LARINIER*

1. 原理

第一个挡板鱼道（丹尼尔鱼道）是由比利时土木工程师 DENIL 设计的，当时设计的目的是让鲑鱼通过 Ourthe 河的 Angleur 水坝（DENIL, 1909）。这类鱼道的主要目标是通过在笔直渠道的底部和侧壁安装一系列挡板来降低平均流速，这些渠道本身具有矩形截面和相对陡峭的坡度。

挡板鱼道的板型变化复杂，形成次要的螺旋状的水流，经由强劲传送动量而可以极有效地消散能量。

水工模型实验第一次由 DENIL 开始（DENIL, 1936—1938）。后来又有许多人重复和扩展了这些试验。试验的目标是简化最初挡板的复杂形状，但同时保持水力效率。美国的 MCLEOD 和 NEMENYI (1940)，英国的 WHITE 和 NEMENYI (1942)，新近法国的 LARINIER（本文作者，1978, 1983）及 LARINIER 和 MIRALLES (1981)，丹麦的 LONNEBJERG (1980) 及加拿大的 RAJARATNAM 与 KATOPODIS (1984, 1990)，RAJARATNAM 等 (1985, 1987) 都对挡板鱼道的发展做出了贡献。

2. 特征和运行

许多不同类型的挡板鱼道已有水工模型的研究，但是却尚未在野外以生物学的观点评估之。下面仅介绍在实践中已经过检验并且证明是有效的，得到充分反馈的例子。

有 3 种不同类型的挡板鱼道：

①仅在水平渠道底部嵌入挡板的鱼道。宽的鱼道可以并排布置几个“单位鱼道”。这种鱼道在这方面有很大的优势，可以提供大范围的水流，但是同时又有很大的缺陷，因为流速随水深变化明显，故只能承受上游水位不大的情况。

②在底部和两侧均安装挡板的鱼道。这类鱼道能承受上游水位较大的变化。但是，过鱼个体的大小一般会限制挡板的尺寸，因而限制了渠道和挡板的宽度，水流也因此受到限制，流速不会超过每秒数百升。

③只在侧面安置挡板的鱼道（LARINIER 和 MIRALLES, 1981）。此种鱼道的好处是能够承受上游水位的较大变化，且允许通过足够大的水流，同时在运行上也非常有效。这种鱼道的主要缺点在于容易被漂流垃圾所堵塞，特别是树枝，因此需要频繁的维护，这就是这种鱼道很少被使用的原因。

挡板的几何特征是以无因次的形式表示：所有维度都和某一个参考维度（渠道的宽度或挡板高度）相关。非常重要的一点是，不应改变给定的几何特征，因为挡板形状或挡板间距的任何改动，都可能导致水流结构的明显变化，而可能影响鱼道的效能。

* CSP - CEMAGREF, GHAAPE - Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professe, Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France

对于任一个挡板鱼道，其“水力”和“生物”运行范围可指定如下：

“水力”运行的范围：为了形成螺旋水流需提供最小流量。在这种流量以下时，这种鱼道在运行上就相当于一个微型的水池型鱼道。高于某种流量时，视渠道的坡度、挡板的类型和尺寸而定，会形成这种从上游住下游冲洗鱼道的波浪。螺旋水流只是偶尔形成，水流逐渐变为超临界流，而挡板不再能够充分散逸能量。

“生物”运行范围：挡板鱼道适合某些特定鱼类及某些特定大小的鱼类。对于任何一种洄游鱼类而言，挡板鱼道的生物运行范围（渠道坡度，挡板尺寸，以及流量）只有通过鱼道监测得到的经验才能获得。

尽管鱼道的“水力”运行范围可以在试验室中通过水工模型试验迅速和容易地确定，但是生物运行的却需要长期估计。它只有经由长期对鱼道仔细的监测方能得到，例如通过捕鱼，以及记录各个捕鱼时期当时的水利条件（特别是上游水头）和温度。

藉由渠道和挡板的宽度的改变，挡板尺寸的选择也可以有一定的弹性。但是，以下几点必须注意：当挡板的尺寸增加，同时渠道坡度保持不变时，就会导致螺旋水流的大小增加和流速的增大，如果这些漩涡的大小相对于鱼类来说太大，也许会对鱼道的效率有不利的影响。鱼将会根据局部流速条件调整方向，而可能会撞向挡板；减少挡板尺寸也有它的不利之处，因为在可接受的上游水位变化范围内，鱼道的水力运行范围与挡板和渠道的尺寸成比例，因此会随之缩小。

实际上，一般会建议在可以同时保持水利运行范围的条件下，使用最小尺寸的挡板，这将使可通过的鱼类的个体大小范围达到最大值。

通常，任何渠道横断面的紧缩若会导致第一个挡板上游流速的增加，因而延迟了注入流量时间，这种情况应该避免。特别是，第一个挡板上游的鱼道底面反转点应该在此道挡板下端顶口（下池点）的下面，这样控制断面就能处在第一个挡板处而不会在上游更远的地方。对于有圆弧形上游围墙入口可视为鱼道的一个优势，即能引导不会延迟下泄水流注入的平滑的层流。

鱼道下游入口（鱼的入口）一定要潜得很深，这样可避免水流的任何局部加速或者产生落差，因为这都会对鱼类通过造成不利影响。鱼类必须游动进入挡板鱼道，不需要跳跃，因为这样会造成伤害。即使在水流很小的条件下，最下游的挡板也一定要在水面以下，最起码要和最上游的挡板上的水头高保持同样的深度。

3. 游动区段和休息池的长度

在挡板鱼道中没有休息区域，因此鱼类必须一次性通过鱼道。当整个落差（就长度而言是整个池子的长度）太高时，鱼类必须持续在一段时间内积聚力量，因此可能超出了鱼类的耐力极限。因此，有必要提供一个或多个休息池。

实践中，对于海鳟鱼和鲑鱼，每 1.8~2.5m 的落差应提供一个休息水池，在休息池中间的游动区段长度限制在 10~12m。很明显的是，当只考虑较大个体的鱼（体长大于 60cm）时，游动区段可以设计的更长一些。然而，这会导致把较小个体的鱼类排除在外，因为他们没有那么大耐力通过这么长的游动区段。

对于小鱼譬如褐鳟来说，应该在每 1.20~1.50m 落差提供休息水池，并且游动区段的长度不应该超出 6~8m。

任何挡板鱼道的游动区段必须是直线的（形成一条直线），若必须改变方向，则仅限于休息水池的地方进行。休息水池必须足够长，防止水流以过大的力量撞击对面墙壁（特别是在 180°转向处），或防止在下一个游动区段形成干扰水流（即防止螺旋水流的形成）。

休息池最小可接受的长度大约是 10d，d 是进入休息池水柱的最小尺寸，亦即，挡板（侧边挡板）

净宽的最小值，或者挡板（底部挡板）水深的最小值。池底反转点以下水深最小值一般是 0.50m。可应用水池型鱼道的单位容积消能量的最大值来保证鱼类能够得到休息。

4. 挡板鱼道的利用与限制

挡板鱼道的水流特征是急流、紊流度和含氧量都相当高。这一类型的鱼道一般应用于淡海水间洄游种类如鲑鱼、海鳟、湖鳟、海七鳃鳗（这几种鱼可轻易使用此类鱼道）和某些大型亲流型种类譬如触须白鱼之类。通常，挡板鱼道用于体长大于 30cm 的鱼。在挡板的大小和游动区段的长度显著减小的情况下，它们也可能用于较小的种类譬如褐鳟。

通常小鱼没有足够的耐力通过挡板鱼道。小鱼在传统大小的挡板鱼道中必须使用爆发式游泳的流速范围，然而在这一流速范围内，它们通常只能维持几秒钟。因此，游动区段的长度必须限制在几米以内，这通常使这种鱼道的应用变得不切实际。使用小型挡板来使水力条件（流速、螺旋流尺寸）适用于小型鱼类是有可能的，这样就可以使流速限制在持续式泳速之内，鱼类可以维持这种速度达几十秒的时间。然而这使得鱼道变得非常小，并有不可避免的缺陷：非常受限制的运行水流范围（每秒几十升），降低鱼道的吸引力，增加堵塞的可能性，并且不能承受上游水位太大的变动。

已经说过这不是一个理想的提议，但值得注意的是，已观察到小鱼在某些情况下通过挡板鱼道。例如，观察到小鱼使用挡板鱼道作为微型水池式鱼道，当鱼道的水头相当低时，不足以产生在正常运转时会有螺旋水流，则它们在挡板之间得以休息（CSP, 1989）。在其他情况下，鱼道正常运转时，一些鱼类试图利用挡板间的平静区域来逐步通过鱼道（SCHWALME 和 MCKAY, 1985）。

5. 平面挡板鱼道或丹尼尔鱼道

这是最常用的挡板鱼道。其主要特征是挡板结构简单，这种挡板本身在一个平面，安装时角度与渠底成 45°角。其宽度（L）可变动于约 0.60m 和 1.00m 之间，渠道坡度（S）在 0.12 和 0.20（12% 和 20%）之间。

挡板一般用钢板（厚 8mm 至 10mm）、木板或混凝土（最大厚度 $L/20$ ，其中 L 是水道的宽度）制作。

丹尼尔鱼道在欧洲（法国、英国、爱尔兰、瑞典）已被作为大西洋鲑鱼和海鳟鱼道广泛应用，美国东海岸也采用丹尼尔鱼道作为大西洋鲑和灰西鲱的鱼道。

图 1 显示了丹尼尔鱼道的几何特征。

图 2 对于几种渠道坡度（S）以无因次形式显示了流量 $Q^* = Q / (\sqrt{gL}^{2.5})$ 、上游水头（ h_a / L ）、平均水深（ h / L ）和下泄流速 $V^* = V / \sqrt{gL}$ 之间的关系。

鱼道运行的水头（ h_a ）是对于上游水位和上游挡板的槽口的顶点（最低点）的高差。运行水头（ h_a ）不应与总水头（ h_r ）混淆。总水头是上游水位和上游第一个挡板所在河道底部的高差。所以有下面的关系式：

$$h_r = h_a + 0.236 L \sin(45^\circ + \arctg S)$$

渠道坡度从 10% 到 20%（ $S = 0.1$ 到 0.2 ）时，总水头 h_r 从 $(h_a + 0.183L)$ 改变到 $(h_a + 0.196L)$ 。

平均水深（ h ）是渠道底部上面鱼道水的平均深度。

对于大型鲑科鱼类，通常使用最大坡度 20%，且鱼道的内部宽度范围（L）大约在 0.80m 和 1.00m 之间。在一些鱼道中，宽度 L 可以增加（1.2~1.3m）。但是，使用这种大型挡板不一定具有优势，因为这意味着必须降低渠道坡度（为了维持可接受的流速、通气和紊流度）。并且它对于小鱼

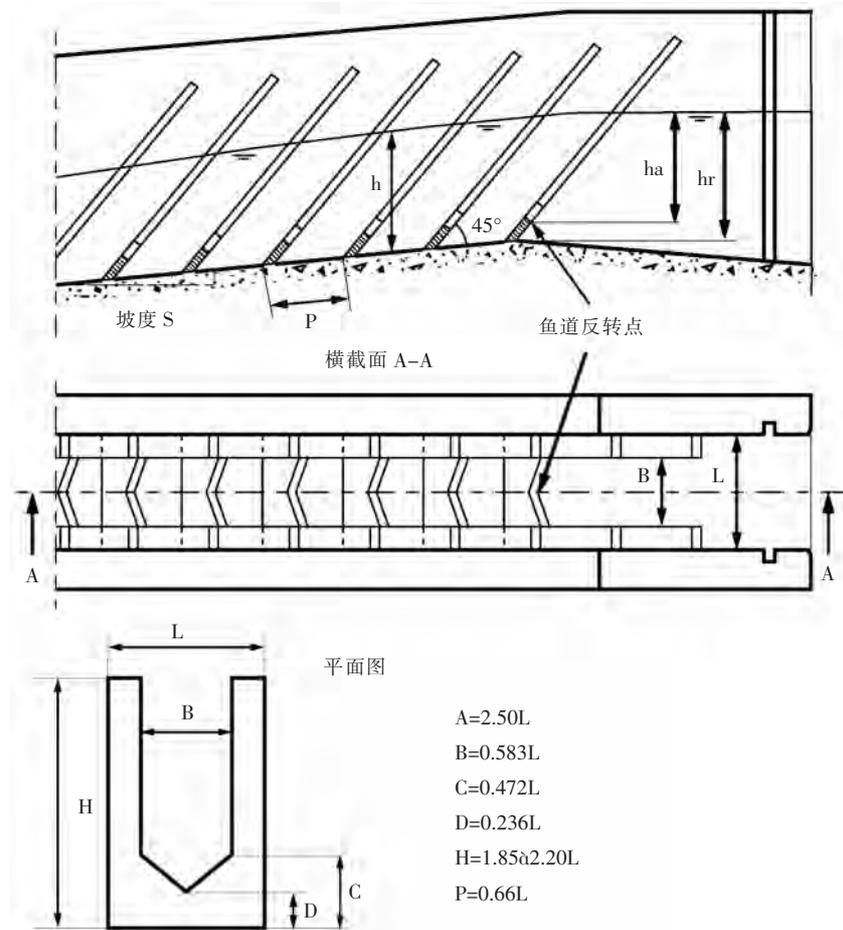


图1 平面挡板鱼道的特征参数

亦有不利影响（增加螺旋流尺寸、挡板间的距离和游动区段的长度）。

对于专门为鳟鱼设计的鱼道，必须使用小的挡板和短的游动区段。建议渠道宽度（ L ）应在 0.50 米和 0.70m 之间，渠道最大坡度为 20%。

平面挡板鱼道的运行下限由两个因素决定，即产生螺旋流的上游挡板的最小水头（即水流通道的 h_a ），和鱼类能正常游动的最小水深（ h ）。比例 $h/L=0.5$ 可以采取作为低限，这相当于 0.33L 长的鱼类通过鱼道所需的高于挡板槽口顶部的最小水深。

平面挡板鱼道的运行上限很难确定，因为这取决于鱼的游泳能力。 h/L 之最大比例为 1.0 至 1.1 是合理的。

图 3 和图 4 显示渠道坡度为 20%、宽 0.9m 鲑鱼鱼道和宽 0.6m 鳟鱼鱼道流量（ Q ）、上游水头（ h_a ）、平均水深（ h ）和平均流速（ V ）间的关系。

6. FATOU 鱼道

Fatou 鱼道是由 DENIL 开发的原型启发得到的（DENIL, 1909）。这个模型从水力学观点看是非常高效率的。但是，它有两个主要缺点。由于挡板的形状，它不容易修建，并且树枝和其他垃圾容易阻塞鱼道。此外，挡板较高的水力效率限制了鱼道入口处水柱的动能，导致了鱼道入口缺乏吸引力。它与平面挡板鱼道应用范围很相似，故通常选用后者。

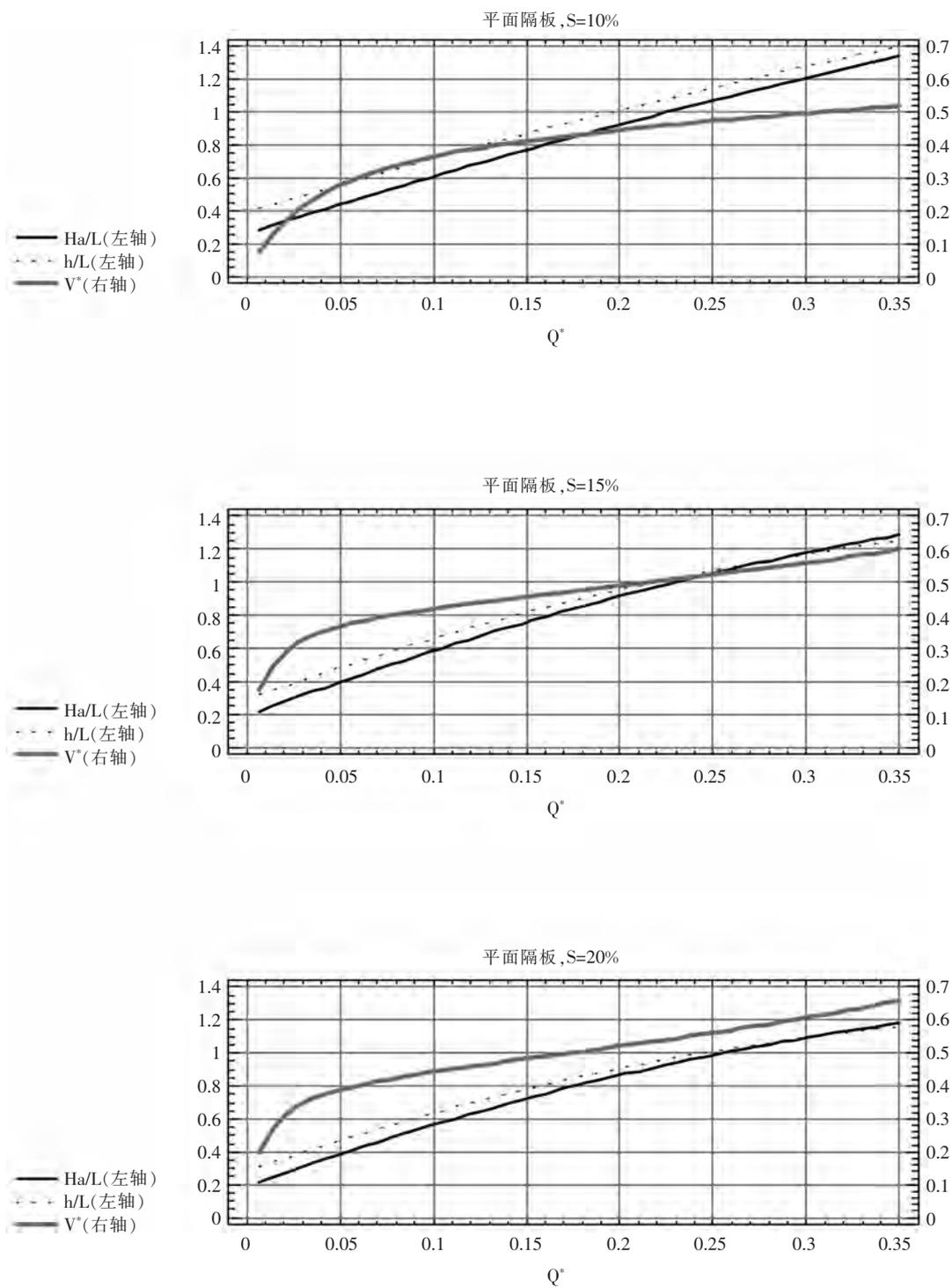


图2 平面挡板鱼道下泄流量、上游水头、平均水深和平均流速之间的关系

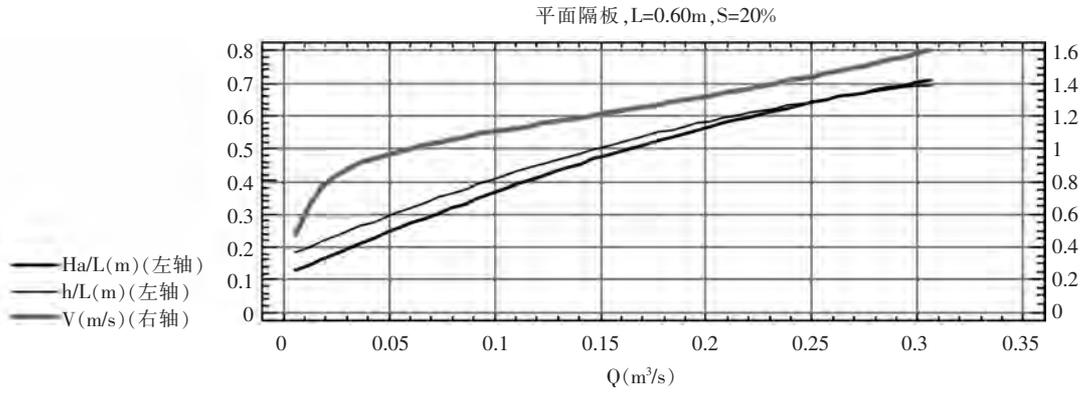


图3 宽度 L 为 0.60m , 坡度 S 为 20% 的平面挡板鱼道流量、上游水头高、平均水深和平均流速之间的关系

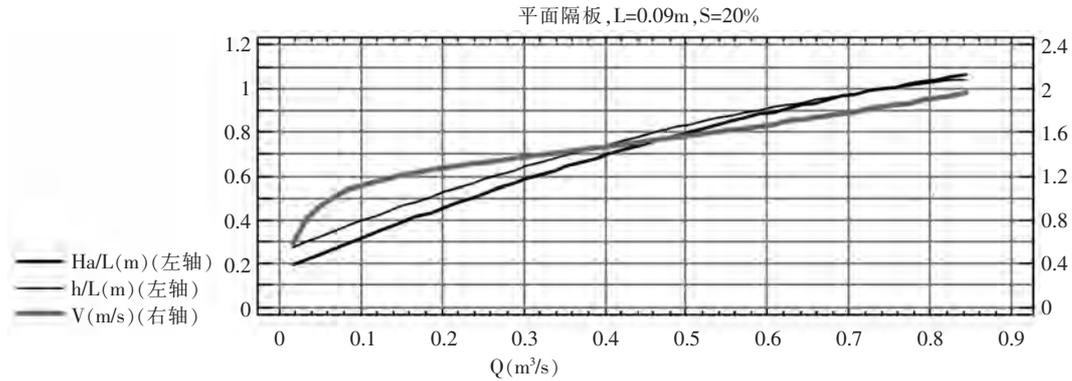


图4 宽度 L 为 0.90m , 坡度 S 为 20% 的平面挡板鱼道流量、上游水头高、平均水深和平均流速之间的关系

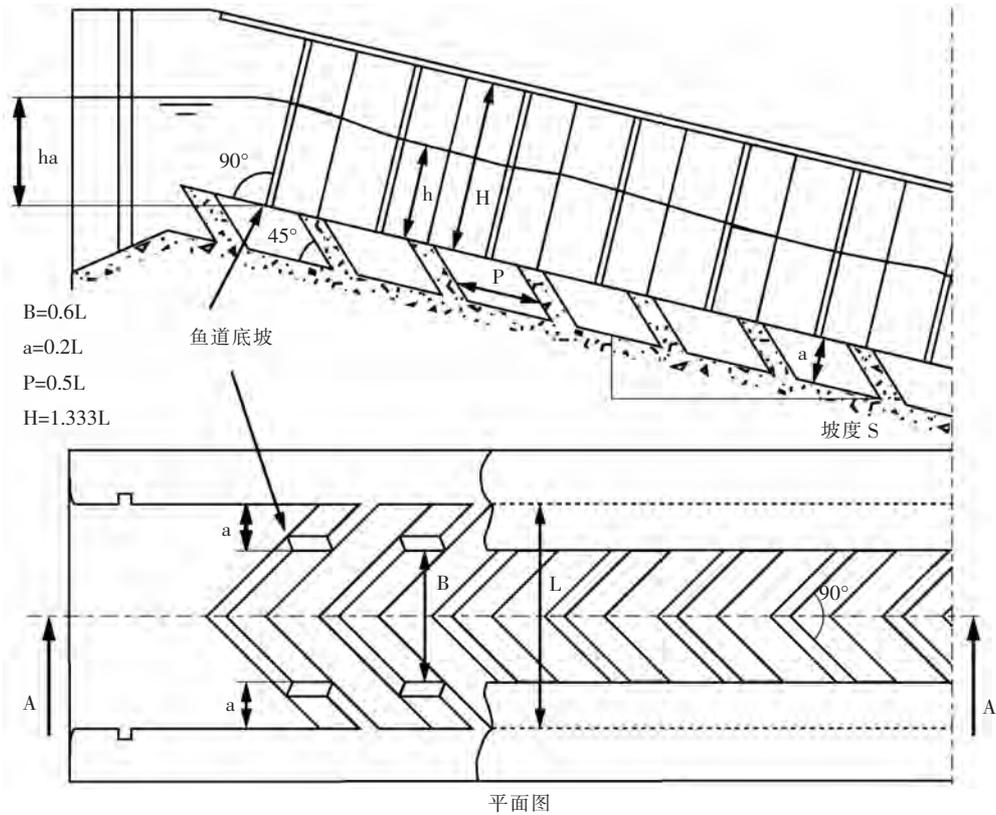


图5 Fatou 挡板鱼道的特征参数

图 5 显示的是 Fatou 鱼道的几何特征。

图 6 显示几种渠道坡度 (S) 无因次量的流量 $Q^* = Q / (\sqrt{gL}^{2.5})$ ，上游水头 (h_a/L)，平均水深 (h/L)，和平均流速 $V^* = V / \sqrt{gL}$ 之间的关系。

使用条件与平面挡板鱼道是相似的。

运行范围由两项特征值决定，其一是， h/L 比率的最小值，大约是 0.4，以使螺旋流既可以“注入”鱼道又满足鱼类游动的水深，另一是 h/L 比率的最大值，大约是 1。

图 7 和图 8 显示渠道坡度为 20%，0.90m 宽的鲑鱼鱼道、0.60m 宽的鳟鱼鱼道中流量 (Q)，上游水头高 (h_a)，平均水深 (h) 和平均流速 (V) 的关系。

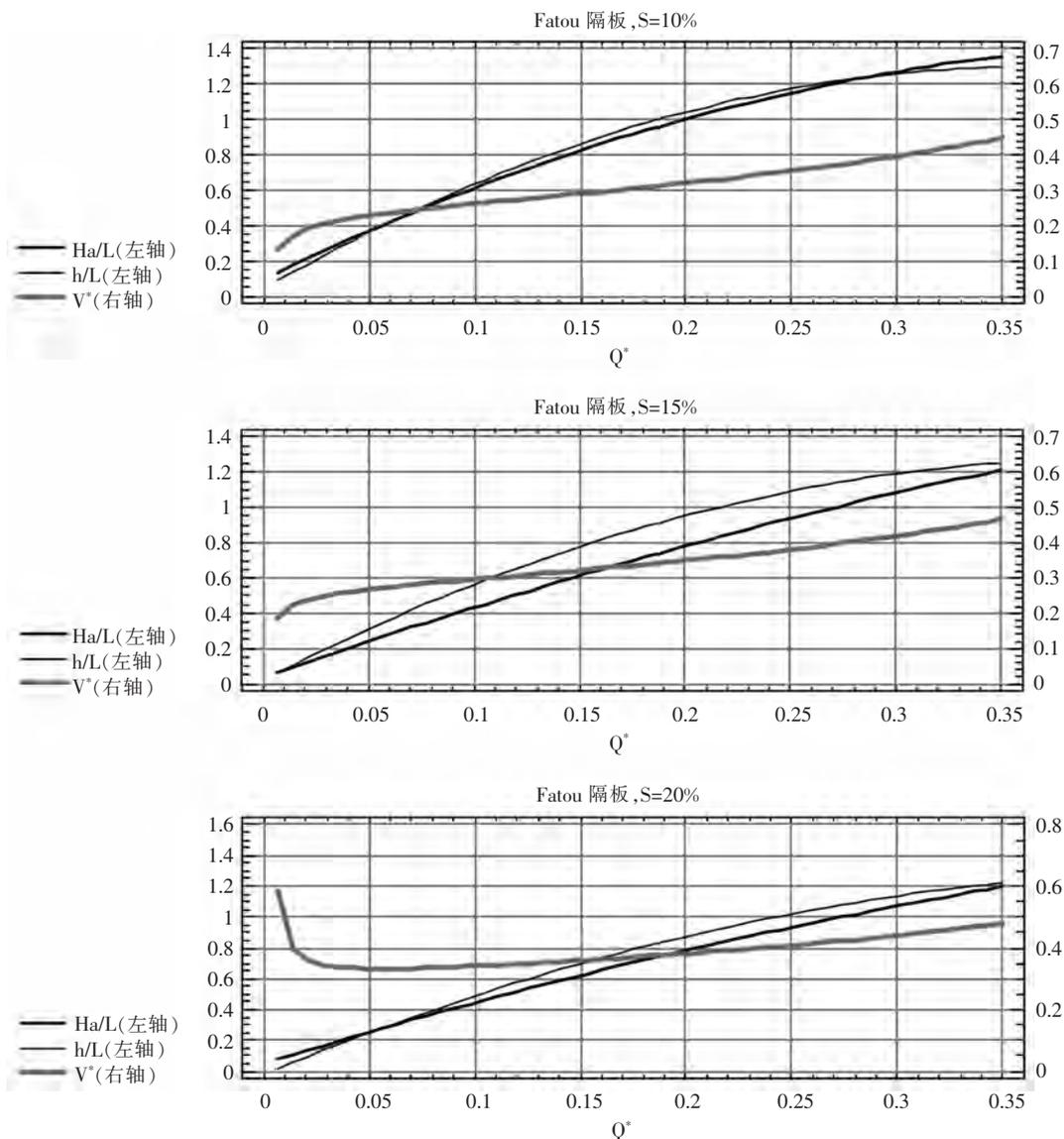


图 6 Fatou 挡板鱼道流量、上游水头、平均水深和平均流速之间的关系

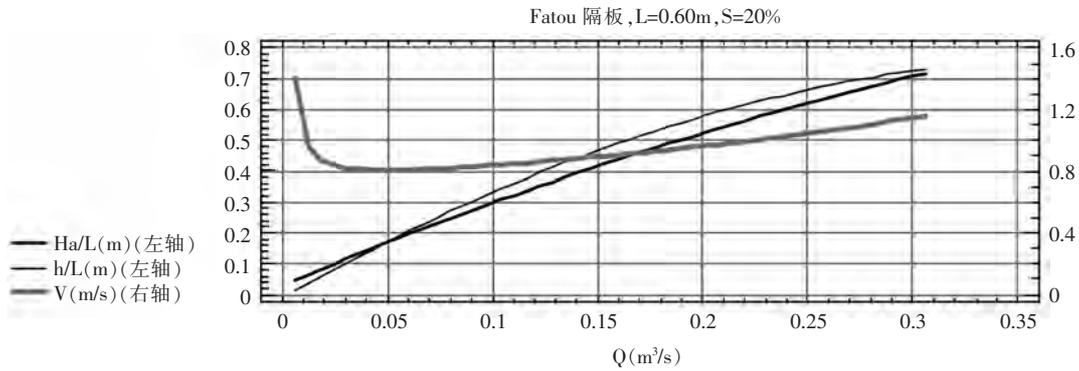


图 7 Fatou 挡板鱼道 (宽度 $L=0.60\text{m}$, 坡度 $S=20\%$) 流量、上游水头、平均水深及平均流速的关系

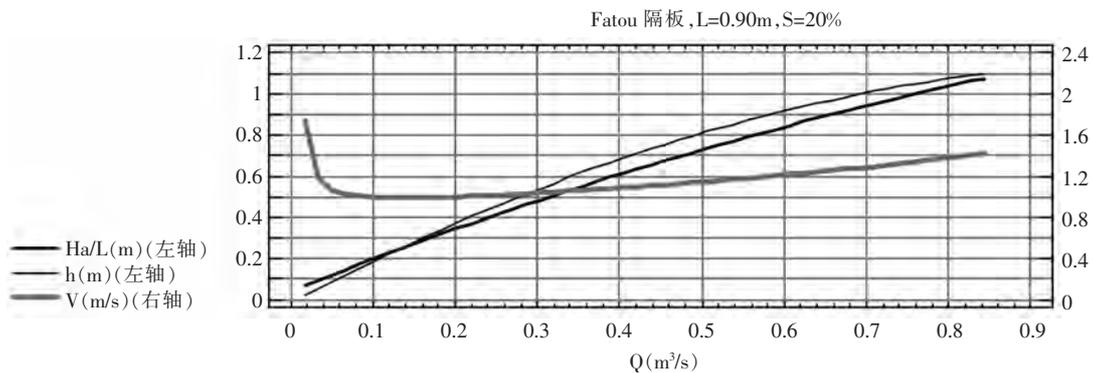


图 8 Fatou 挡板鱼道 (宽度 $L=0.90\text{m}$, 坡度 $S=20\%$) 流量、上游水头、平均水深及平均流速的关系

7. 超高效底部挡板鱼道

该类型鱼道包括很薄的人字型挡板, 挡板仅仅安装在鱼道底部。这种鱼道优势是可以并列挡板单元以达到足够强的吸引力水流。为了稳定水流, 必须在挡板之间安装一条同等高度的纵向条。这种类型的挡板是从 BIRO 模型 (DENIL, 1936—1938; 粒里尼尔, 1977) 得到启示后经由水工模型 (LARINIER 和 MIRALLES, 1981) 试验发展起来的, BIRO 模型已用于荷兰的 BIRO 大坝。这种鱼道主要在法国使用, 但是现在在英国得到很大的推广。挡板用 8~10mm 厚的钢板制作, 其高度一般在 0.08m 到 0.20m 之间变化。

图 10 显示几种渠道坡度 (S), 无量纲的单位宽度流量 $q^* = q / (\sqrt{2g} \cdot a^{1.5})$, 上游水头 (ha/a), 挡板上的平均水深 (ha/a) 及平均流速 $V^* = a q^* / h$ 之间的关系。

(a) 是挡板高度 (m)。

上游水头 (ha) 是上游水位和最上游挡板较低点之间的高程差 (相对应于进入鱼道加速开始之前的上游水位)。运行水头 (ha) 和相对于在上游末端第一个挡板处渠道底部反转点的总水头 (hr) 间的关系如下:

$$hr = ha + a - 2.6 a S$$

平均水深 (h) 是鱼道中挡板以上的平均水深。

因为鱼道宽度可能有较大变化, 图 10 给出了 ha 和 q 之间的关系, q 为单位流量 (即每米宽的流量)。鱼道的总流量 Q (m^3/s) 包括 N 个高度 (a) 并列的单元, 从下式可以得到单位流量 (q):

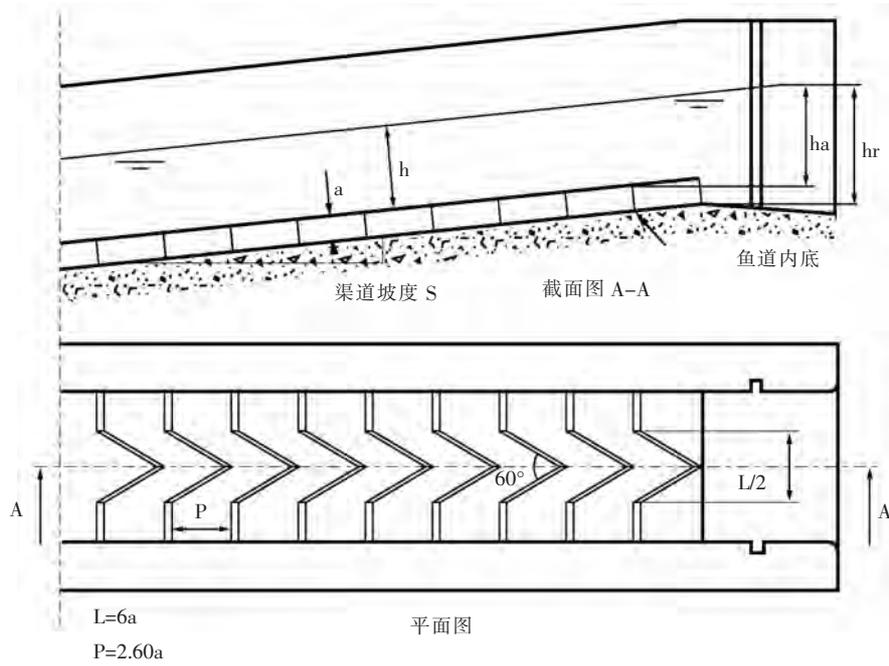


图9 超高效底部挡板鱼道的特征参数

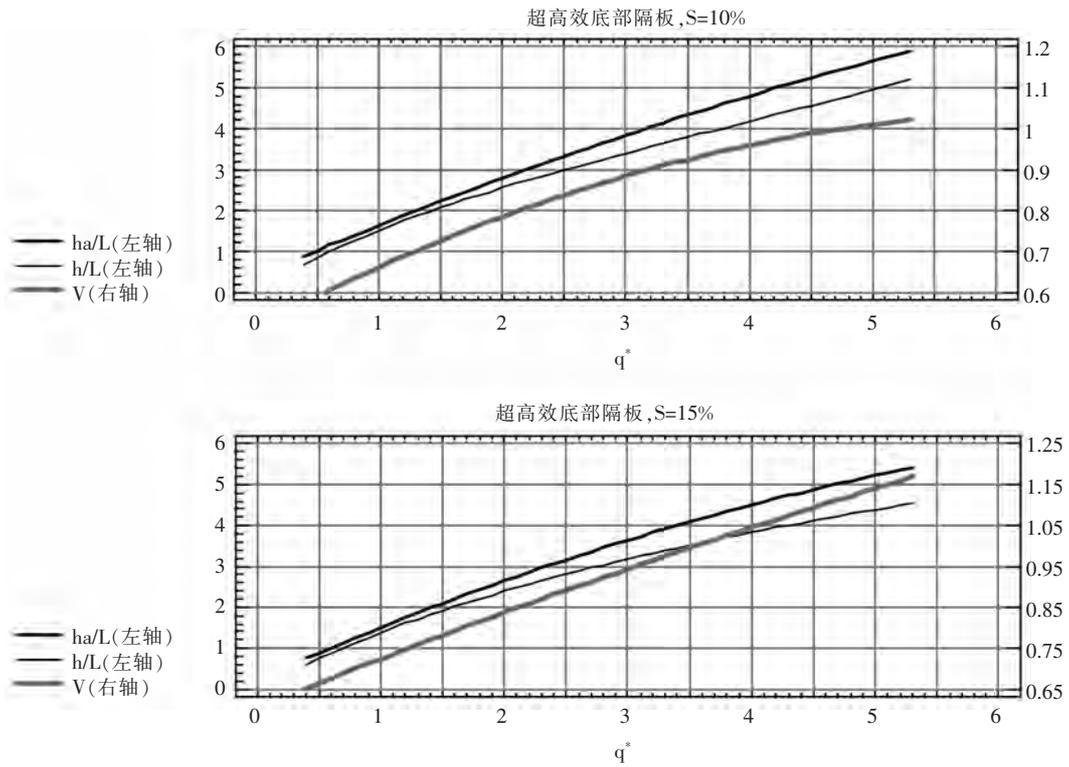


图10 超高效底部挡板鱼道流量、上游水头、平均水深和平均流速之间的关系

$$Q=6 a N q$$

对于大型洄游性鲑科鱼类来说，挡板高度（ a ）的取值范围一般在 0.10m 和 0.20m 之间，且渠道的最大坡度为 15%~16%。

对于专门为鳟鱼设计的鱼道来说，挡板尺寸和游动区段的长度都必须减少，推荐挡板高度在 0.08 和 0.10m 之间，最大坡度还是 15%~16%。

鱼道的运行下限是由特征值上游挡板的最小水头（ h_a ）（或者挡板以上的最小深度（ h ））决定，这个深度能够形成螺旋流并且能提供鱼类游动所需的足够水深。这个低限可以表示为 $h/a = 1.15$ 。最低水深（ h ）由鱼的大小决定。对于大型洄游鲑科鱼类来说最低水深为 15~20cm，对于鳟鱼来讲，最小深度为 10cm。

鱼道运行上限很难决定，因为这取决于鱼类的游泳能力。

图 11 和图 12 给出了渠道坡度为 15% 时，挡板高为 0.15m 的鲑鱼鱼道、挡板高 0.1m 的鳟鱼鱼道中，单位流量（ q ）、上游水头（ h_a ）、平均深度（ h ）和平均流速（ V ）间的关系。对于大型鲑科鱼类的鱼道的运行范围，用单位流量表示，应在 250 l/s/m 和 1 400 l/s/m 之间（即相当于上游水面高度 50~60cm， h_a 在 0.23m 和 0.82m 之间的范围）。对于鳟鱼，鱼道的运行范围应在 150 l/s/m 和 500 l/s/m 之间（相当于上游水面高度范围在 30cm 以下， h_a 在 0.18m 和 0.42m 之间）。

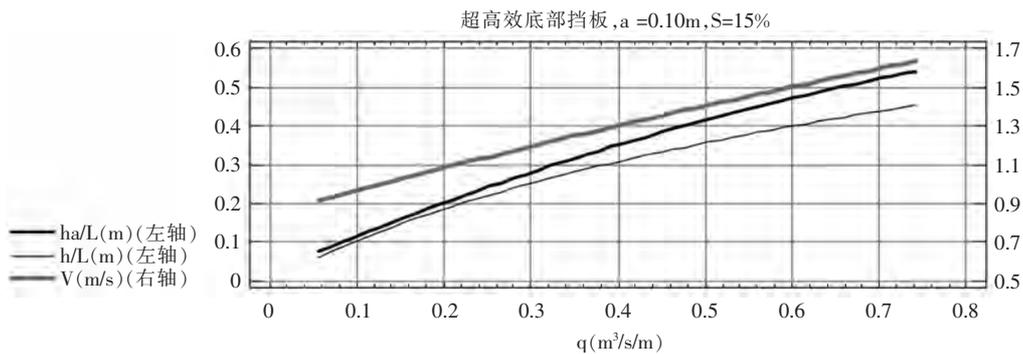


图 11 高度 a 为 0.10m，坡度 S 为 15% 的超高效底部挡板鱼道流量、上游水头、平均水深和平均流速之间的关系

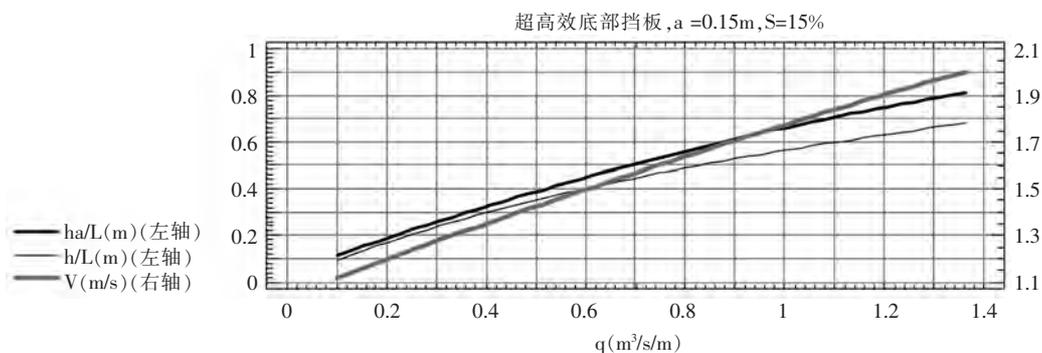


图 12 高度 a 为 0.15m，坡度 S 为 15% 的超高效底部挡板鱼道流量、上游水头、平均水深和平均流速之间的关系

8. 既可以过鱼又可过船的 V 型挡板鱼道

对具有底部挡板的鱼道做部分改动后，应该可以通过独木舟或皮艇。在一些小型电站，可考虑建

造一个可以供独木舟下行及鱼群上行的通道。

在对以前仅作为鱼道使用的挡板的设计做了进一步测试之后，使这些鱼道也可以允许小船通过 (LARINIER, 1984)。

对于通过小船来说，厚挡板（用木头制作）优于薄挡板（用钢制作），因为后者存在潜在危险。挡板以最简单的形状为最佳，即方形断面的 V 型挡板加上一个直角开口，挡板本身为方形断面，大小在 8~15cm，通常为 10~12cm。这种鱼道可以并排几个 V 型挡板，使鱼道足够宽，以允许小船通过（一般在 1.40~2.10m）。最大允许坡度约 15%~16%。

在原来的模型上添加纵向条板，以减少挡板对独木舟和皮艇的破坏性。因为这些纵向条板有增加下泄流量的作用，故应尽可能限制其宽度。

这种设施作为鱼道主要不利之处是，它与那些具有超高效挡板的鱼道相比，水力效率较低，且必须注意的是，在模型测试的结果中，这种挡板曾被废弃而采用前一种设计。这种鱼道的“生物”运行范围由于依靠过鱼种类的游泳能力因此也限制了过鱼的种类。

这类型鱼道只适用于大型洄游性鲑科鱼类（长度大于 40cm），并且只有在上游水位变化不太剧烈时使用。这种大型鲑科鱼类鱼道的运行范围，以单位流量表示，在 250L/s/m 和 800~900L/s/m 之间（对应于上游水位变化范围约 30~40cm）。鳟鱼鱼道的运行范围非常低（大约 10cm），因而大大地限制了该种鱼类使用此类鱼道的吸引力。

图 13 显示鱼道的几何特征。至少二列 V 字型挡板并排横跨整个鱼道的宽度。图中显示的 V 型挡板的朝向比较适合鱼类通过，因为洄游鱼类所喜欢的低流速区域位于鱼道的两侧。

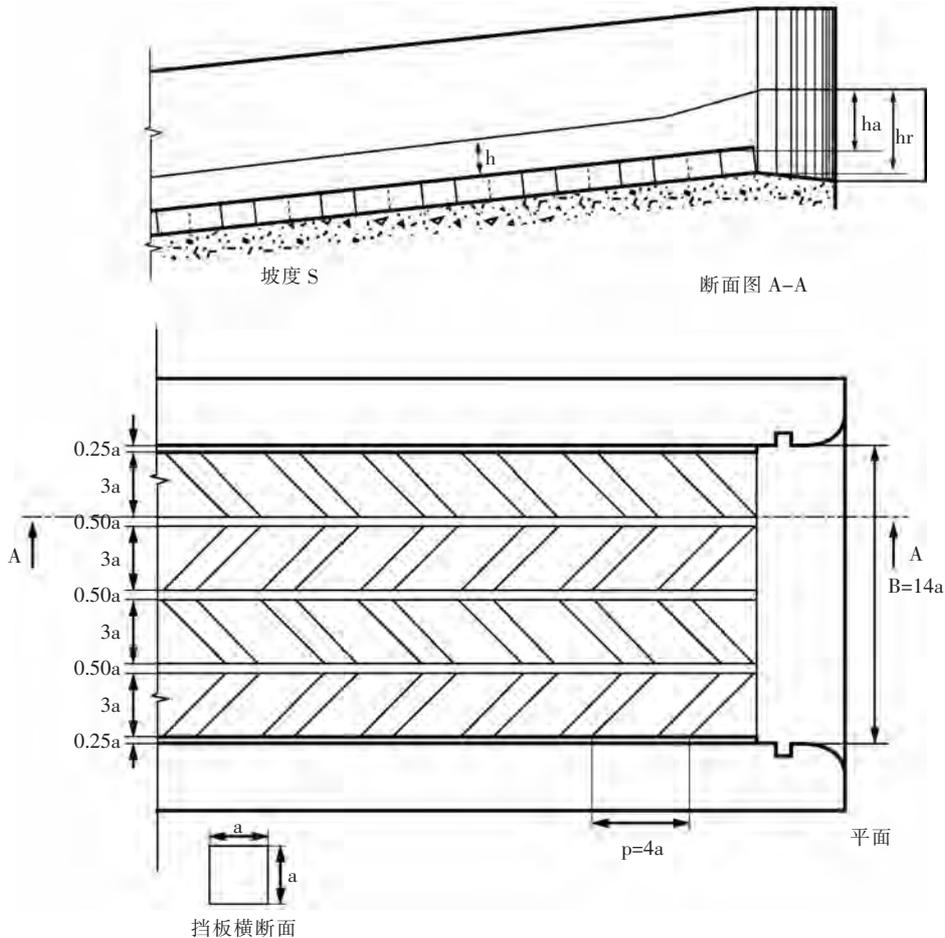


图 13 V 型挡板式鱼道的特征参数

鱼通道考虑时，有可能需要布置纵向的条板，而仅留中间一条沿着鱼道中轴，以稳定水流流态。当考虑小船通过时，V型挡板方向应该倒过来，以便鱼道设施的中心对应于V点的上游，可以促进小船通过鱼道的中心。所有的纵向条板必须保持原位。

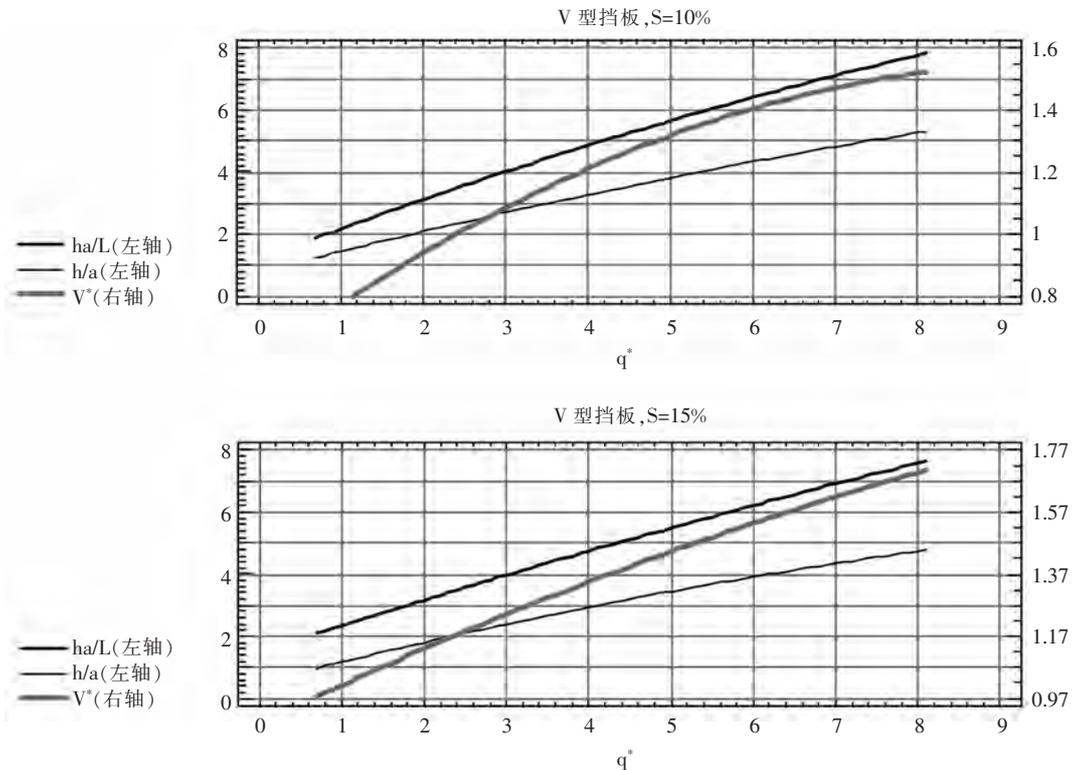


图 14 V 型挡板式鱼道的流量、上游水头、平均水深和流速之间的关系

图 14 显示几种渠道坡度 (S) 无因次量的单位流量 $q^* = q / (\sqrt{2g} \cdot a^{1.5})$ 、上游水头 (ha/a)，平均水深 (h/a)，平均流速 $V^* = aq^*/h$ 间的关系。

上游水头 (ha) 是上游水位和最上游挡板较低点之间的高程差 (相当于进入鱼道加速开始的前上游位)。运行水头 (ha) 和相对于在上游末端第一个挡板处渠道底部反转点的总水头 (hr) 间的关系如下：

$$hr = ha + a - 3aS$$

平均水深 (h) 是在挡板之上鱼道水深的平均值。

鱼道的流量 Q (m^3/s) 可以简单地经由将从 ha 获得的单位流量 (q) 和鱼道宽度 (L) 相乘得到。

图 15 显示的是挡板高 0.1m 的鲑鱼鱼道单位流量 (q)、上游水头 (ha)、平均水深 (h) 和平均流速 (V) 间的关系。

9. 阿拉斯加陡峭鱼道

这类型鱼道在 20 世纪 60 年代阿拉斯加为太平洋鲑通过而设计的 (ZIEMER, 1962)，原型是由 MCLEOD 和 NEMENYI (1940) 试验的。已有数种侧面挡板高度和角度不同变化的方案开发成形。标准阿拉斯加的陡峭鱼道 (图 16) 非常狭窄 (0.56m 宽, 0.70m 高, 内部净宽度 b 为 0.35m)，因此可用于较陡的坡度 (25%~33%)。

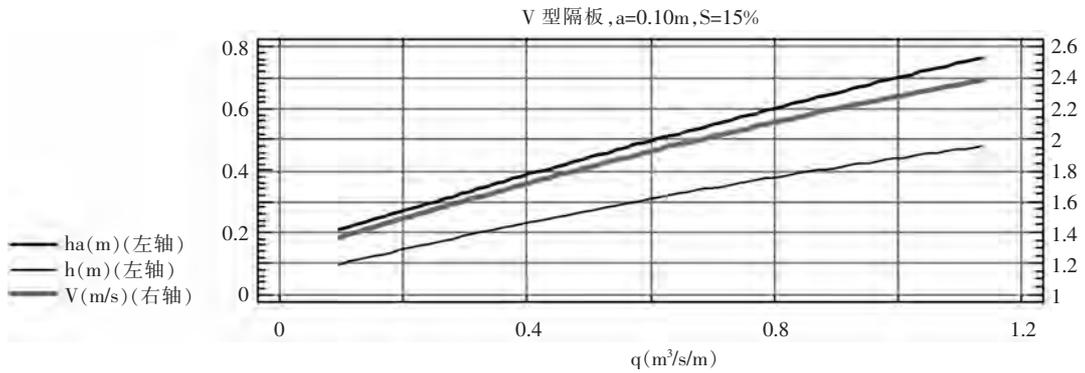


图 15 V 型挡板鱼道（高度 a 为 0.10m，坡度 S 为 15%）流量上游水头、平均水深和平均流速之间的关系

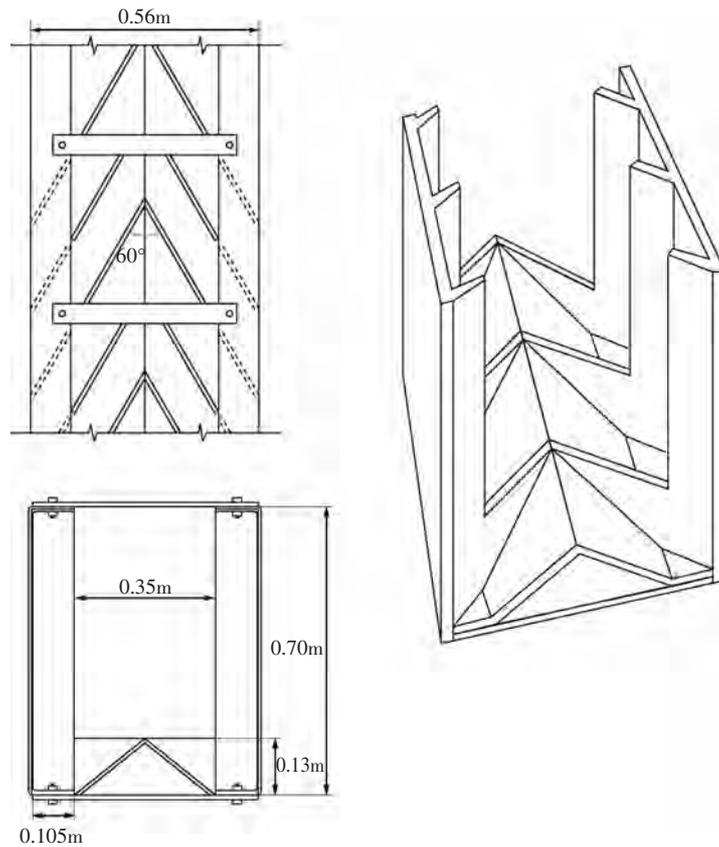


图 16 阿拉斯加斜坡鱼道特征参数

鱼道中的下泄流量可由以下公式计算（RAJARATNAM 和 KATOPODIS, 1991）：

$$Q=0.36 (S g)^{0.5} h^{1.55}$$

式中 Q: 鱼道流量 (m³/s)

h: 底部挡板上的水深

S: 鱼道坡度

g: 重力加速度 (9.81m/s²)

这种鱼道是以每段大约 240kg，长 3m 的铝板材（厚 6mm）预铸而成。它可以通过直升机运输至

现场后用螺栓固定安装。它是为了安装在阿拉斯加州不易接近的自然瀑布处而特别设计的。因为在当地无法建造结构物本身较为经济的混凝土鱼道。

这种鱼道的主要不利之处在于它有限的流量和有限的承受上游水位变化的能力。解决方法是在入口处增加辅助水流，以此增加设施的吸引力。出于宽度的限制，这种鱼道很有可能受到树枝和漂浮垃圾的阻塞。

在一些容易接近障碍，且在现有障碍物安装适当设施必然需要大量土木工程的国家，如法国，这种类型的鱼道的应用价值不高。

参考文献

- CONSEIL SUPERIEUR DE LA PECHE (National Council of Inland Fisheries), 1989. *Estimation d'efficacité de deux dispositifs de franchissement sur des seuils du Gave du Pau* (Assessment of the efficiency of two fish passage facilities on the weirs of Gave de Pau) . Délégation Régionale Midi - Pyrénées Aquitaine Rep. , 13 p.
- DENIL, G. , 1909. *Les échelles à poissons et leur application aux barrages de Meuse et d'Ourthe* (Fish Ladders and their use at the Meuse and Ourthe dams) . Bull. Acad. Sci. Belg. , 1221 - 1224.
- DENIL, G. , 1936—1938. *La mécanique du poisson de rivière* (The mechanics of riverine fish) . Ann Trav. Publ. Beige. , 395 p.
- LARINIER, M. , 1977. *Les passes à poissons* (Fishways) Study 16. Ministry for Agriculture, CTGREF Rep. , 136 p.
- LARINIER, M. , 1978. *Etude de fonctionnement d'une passe à poissons à ralentisseurs plans* (Study of the operation of a fishway with plane baffles) . Bull. Fr. Pisc. , 271; 40 - 54.
- LARINIER, M. , 1983. *Guide pour la conception des dispositifs de franchissement des barrages par les poissons migrateurs* (Guide to designing fish passage facilities at dams for migratory fish) . Bull. Fr. Pisc. , special edition, 39 p.
- LARINIER, M. , 1984. *Dispositif mixte passe à poissons - glissière à canoë - kayak* (passage facility for fish and canoes). Unpublished Rep. , 19 p.
- LARINIER, M. , MIRALLES, A. , 1981. *Etude hydraulique des passes à ralentisseurs* (Hydraulic study of baffle fishways) . CEMAGREF, Unpublished Rep. , 53 p.
- LONNEBJERG N. , 1980. *Fiskepas af modströmstypen. Meddelelser fra Ferskvands fiskerilab.* (Denil - type fish passes. Reports from the Fresh Water Fish Laboratories) . Denmark's Fiskeri - og Havundersogelser, Silkeborg, 107 p.
- MCLEOD A. M. , NEMENYI P. , 1940. An investigation of fishways. Bull. Iowa State Univ. , Ames, Iowa, 24; 1 - 72.
- RAJARATNAM N. , KATOPODIS C. , 1984. Hydraulics of Denil fishways. J. Hydr. Eng. , 10 (9): 1219 - 1233.
- RAJARATNAM N. , KATOPODIS C. , 1991. Hydraulics of Steeppass Fishways. Can. Soc. Civ. Eng. , 18; 6.
- RAJARATNAM N. , KATOPODIS C. , VAN DER VINNE G. , 1985. M1 - type backwater curves in Denil fishways. Can. Soc. Civ. Eng. , Annual Conf. , 141 - 156.
- RAJARATNAM N. , KATOPODIS C. , FLINT - PETERSEN L. , 1987. Hydraulics of two - level Denil fishways. J. Hydr. Eng. , 113 (5): 670 - 674.
- SCHWALME K. , MCKAY W. C. , 1985. Suitability of vertical slot and Denil fishways for passing northern temperate, nonsalmonid fish. Can. J. Fish. Aquat. Sci. , 42: 1815 - 1822.
- WHITE C. M. , NEMENYI P. , 1942. Report on hydraulic research on fish passes, in " Report of the Committee of fish passes" . Inst. Civ. Eng. Rep. , 59 p.
- ZIEIMER G. L. , 1962. Steeppass fishway development. Alaska Dept. of Fish and Game, Informational leaflet 12, 9 p.



照片 1 平面挡板鱼道缩尺模型中的水流



照片 2 超高效挡板鱼道的试验模型



照片 3 超高效底部挡板鱼道缩尺模型中的水流



照片 4 鳟鱼正通过超高效底部挡板鱼道模型中向上游迁移



照片 5 宽 V 型挡板鱼道缩尺模型中的水流



照片 6 鳟鱼正在侧面挡板鱼道的缩尺模型中向上游迁移



照片 7 Cascadec 堰（伊索勒河，布列塔尼）平面挡板鱼道



照片 8 Elle 河（布列塔尼）FATOU 型挡板鱼道



照片 9 Normandy 地区超高效底部挡板鱼道



照片 10 Dore 河（多姆山省）上装有两个游动区段的平面挡板鱼道



照片 11 位于加来海峡省 Canche 河布里默附近用作独木舟道的 V 字形挡板鱼道



照片 12 Thames 河（英国）超高效挡板鱼道

第七章 鱼闸和升鱼机

F. TRAVADE^① M. LARINIER^②

1. 鱼闸

1.1 原理和运行

爱尔兰工程师博兰大约在 1949 年以缩尺模型形式设计了第一个鱼闸，随后就在位于 Liffey 河上的 Leixlip 水坝修建了第一个鱼闸。苏格兰北部水力发电委员会随后修建了许多这种类型的鱼闸，并试图使鱼闸尺寸标准化。

鱼闸一般由一个位于上游的闸室，通过一根斜管或一个垂直的竖井与下游的一个大型的下游闸室相连，在各闸室两端设有自动水闸门。

基于开发的第一个鱼闸模式，北苏格兰水电委员会提出了一些关于标准鱼闸的特征和尺寸，如图 1 所示。

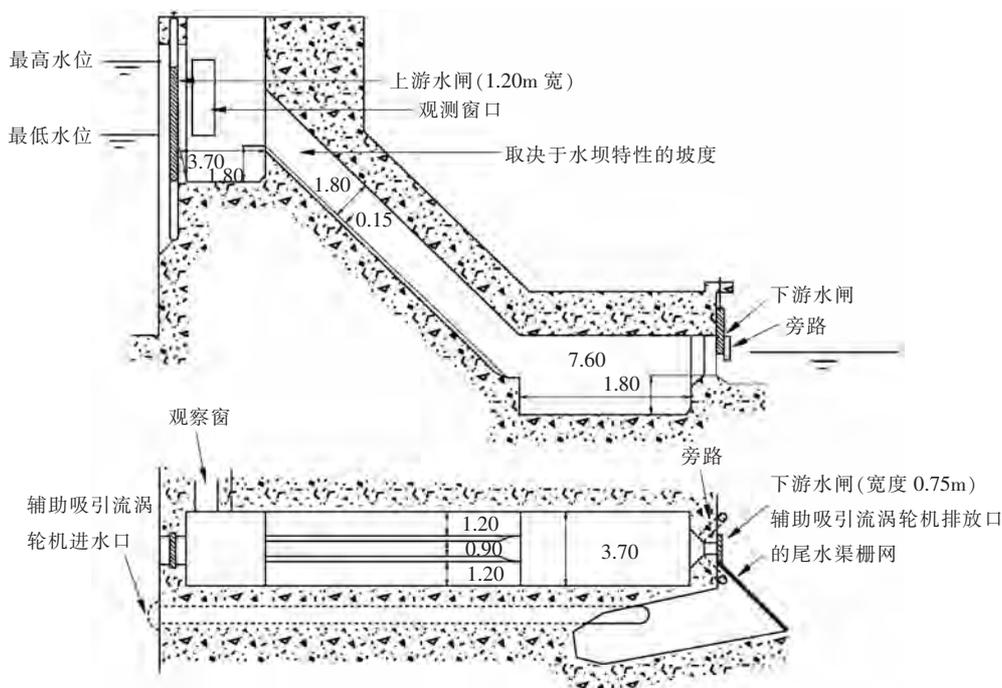


图 1 鱼闸的剖面图 (艾特肯)

鱼闸的操作原理与船闸非常相似。洄游鱼类被吸引到下游闸室中，然后就像小船通过船闸一样通过鱼闸，通过打开位于设施下游末端的旁路，在鱼道内产生一个向下的水流，以此促使鱼离开

① Electricité de France, Research and Development, 6 Quai Watier, 78401 CHATOU Cedex - France.

② CSP - CEMAGREF, GHAAPPE, Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France.

鱼闸。

鱼闸的运行周期，可总结如图 2：

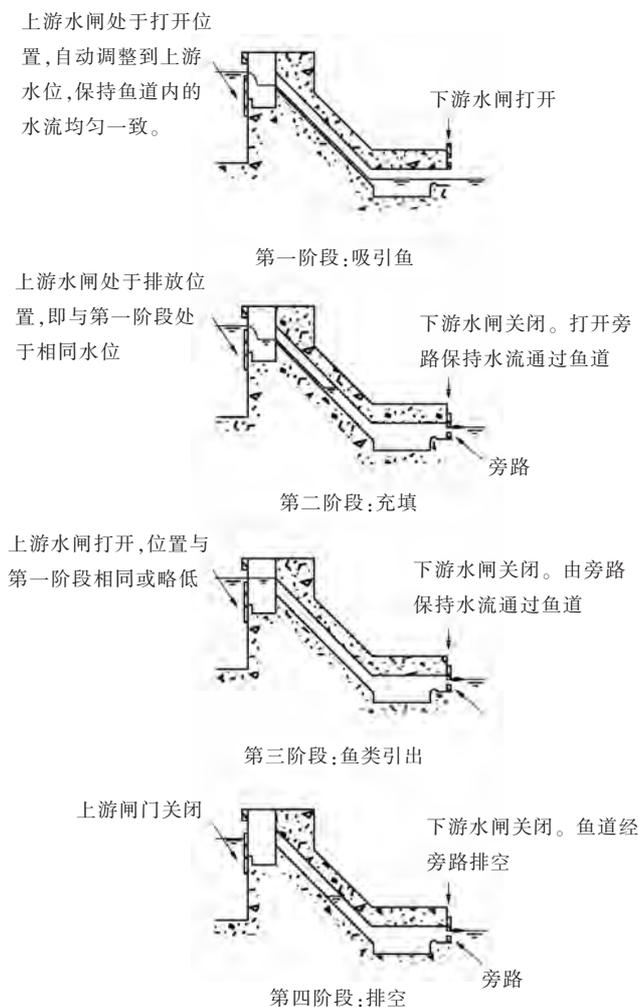


图 2 鱼闸操作原理示意图

吸引阶段：下游水闸门开启，由上游闸门控制水流进入鱼道。水流进入由上部闸室形成的中部水池，然后通过输送管道注入贮留室，最后流出贮留室进入尾池。水流经由这些产生，以吸引鱼类进入较低的闸室。

填充和退出阶段：在吸引期持续一段时间后，下游水闸门关闭开始给鱼闸充水。鱼类接着随着水流表面进入管道，鱼类上升而在鱼闸内充水，直至到达上游水池。打开下室的水道，刺激鱼进入蓄水前池。下室跨越部分下降的上游水闸引起吸引流。

排空阶段：再经过一个规定的时期，关闭上游水闸，同时保持旁路水道开启，使鱼闸内贮水逐渐被排空。在鱼闸贮水差不多被清空并且下游水闸的水头足够低时，重新开启下游水闸。由旁路水道来将鱼闸进一步清空，可避免在鱼道入口处产生高速水流而可能在入口附近击退部分鱼类。

整个周期的持续一般需 1~4h。

博兰鱼闸的设计非常灵活，并可适应几种类型的障碍物和从几米到 60 多米的水头差（AITKEN et al.，1966）。

当水头差少于 4 或 5m 时，可以使用整体开放式的系统，包括下游水池（图 3）。

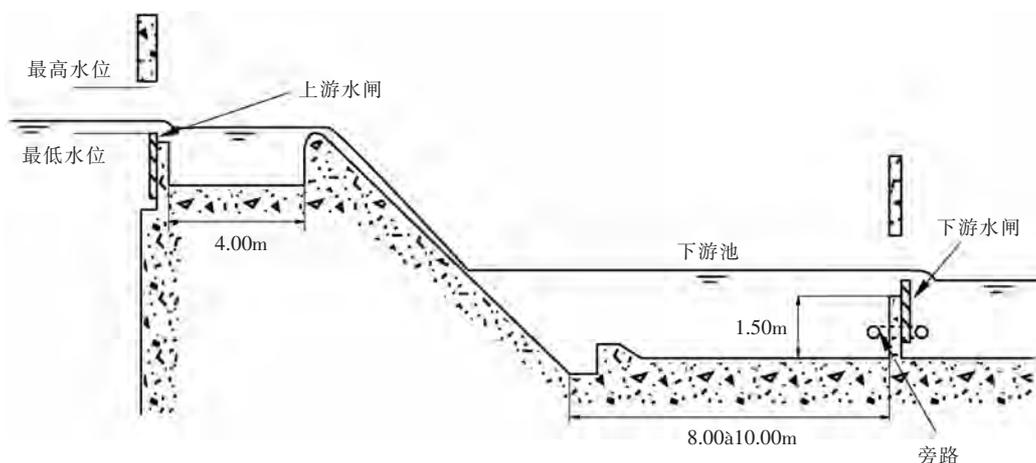


图3 低水头条件下开放式鱼闸安装示意图

1.2 鱼闸的效率

像其他任何鱼类通过设施一样，鱼闸的效率取决于其吸引鱼的能力。鱼闸的入口必须设置在良好的位置。因为通过鱼闸的水流被控制在数百升/秒，故有必要提供一个辅助水流。当下游水位变化时，下游闸门有必要同时随之调整以使入口处保持足够的流速。最后，最好在鱼闸内部提供照明，以此来使外部环境亮度到鱼闸内部有一亮度过渡。

这种鱼道的效能高度依赖于鱼类的行为。它们在整个吸引阶段都必须持续留在下游水池中，在充气阶段随着水位上升而上升，然后在鱼闸排空前离开鱼闸。

为此，必须确保在整个吸引阶段，下游贮留池中具有鱼类适应的水流速度和紊流条件。另一方面，填水速度不应该太快，以免产生过大的扰动和空气卷入，而使鱼留在下面的闸室。最后，鱼类必须有充分的时间离开鱼闸，以避免鱼闸排空后鱼类又被扫回鱼闸下游。

很明显，为洄游鱼类确定假定的最适水力条件不太可能。鱼闸运行过程的最适宜特征也与通过的鱼类的行为密切相关。因此，在设计鱼闸时，必须考虑它运行的灵活性（如各阶段持续时间、上游水闸和下游水闸开启的时间和程度等）。

不论怎样采取防护措施（尤其在采取这些措施的地方），许多鱼闸的效率非常有限。相对于其他传统鱼道来说，鱼闸最主要的缺陷是，能提供的过鱼容量（换算为过鱼数量）是有限的，这是因为它运行的不连续性及下游闸室容量太小。

此类系统只是一些阶段诱捕鱼类，因为在填充和退出期间，鱼闸没有提供明显的吸引流来引导鱼类进入鱼闸，因此在填充和退出期间到达的鱼类可能新的周期开始前离开这个区域。在诱捕期结束之前，进入鱼闸的鱼类也有可能离开下游闸室。

哥伦比亚河第一个坝上修建了第一个鱼闸（Bonneville 坝、Dalles 坝、McNary 坝），但在美国其他地方放弃了鱼闸而倾向于水池型鱼道。同样，法国大多数鱼闸也被认为是无效的（其中部分存在明显的设计原因），这些鱼闸中部分已被或将被水池型鱼道或升鱼机取代。

在美国（RIZZO, 1968 和 1969）、俄国（KIPPER and MILEIKO, 1962; MALEVANCHIK and RYAKHOVSKAYA, 1971; PAVLOV, 1989）及最近在澳大利亚（BEITZ, 1997），针对鱼闸的上述缺点，人们做了如下几点改进：

洄游鱼类将被诱捕进入鱼闸下游末端的贮留池中；

沿水池边墙铺设两条水平轨道，在轨道上安装拖车，车上安装一赶鱼栅栏（集鱼装置），将洄游鱼赶入鱼闸的内部。

在整个填水阶段，渠底赶鱼栅随水位的上升逐渐提升，以此强行将鱼类赶往上游。当必须把鱼闸设计的如此复杂时，采用升鱼机或鱼道等较简单方法将会更加适宜。

1.3 使用船闸作为过鱼通道

使用船闸作为过鱼通道往往不是鱼道设计的初衷，这是因为，为了使船只通过，船闸一般位于相对平静的区域，这种情况下很难吸引洄游的鱼类。而且，对于某些鱼类如西鲱，在船闸填满水且上游闸门开启时，这类鱼将难以通过。

在美国进行的试验表明，使用船闸通过位于哥伦比亚河上 Bonneville 坝处船闸的洄游鱼不到 1.5% (MONAN 等 1970)。

但是，在某些情况下，船闸可以作为重要的备用设施作为鱼道使用。许多试验 (KREITMANN, 1925; KIPPER, 1962; JOLIMATER, 1992) 表明，与任何其他过鱼设施一样，有一个必须满足的条件是，在下游接近船闸的渠道创造足够的吸引水流。这可以通过开启填充水闸（部分或全开）和下游闸门来实现。一旦船闸注满水后，还需要保持足够的水流速度刺激鱼类游出船闸进行上溯。显然，这不是船闸在设计上所具有的功能。

1992 年，有超过 10 000 多条西鲱用了 49 个周期，通过了位于 Rhne 河上的 Beaucaire 坝上设置的通航船闸。最佳辅助流是约 $60\text{m}^3/\text{s}$ ，相当于水轮机泄流量的 2%~8% (JOLIMAITRE, 1992)。由于在船闸内维持几 m^3/s 的流量，并且通过部分提高上游闸门创造出表面连续流，这就保证了鱼类可以离开出口进入上游河段。

但是，通航船闸作为过鱼设施的用途会受到限制，因为过鱼要求的操作方式显然与通航所要求的方式是不一致的。

2. 升鱼机

2.1 运行原理

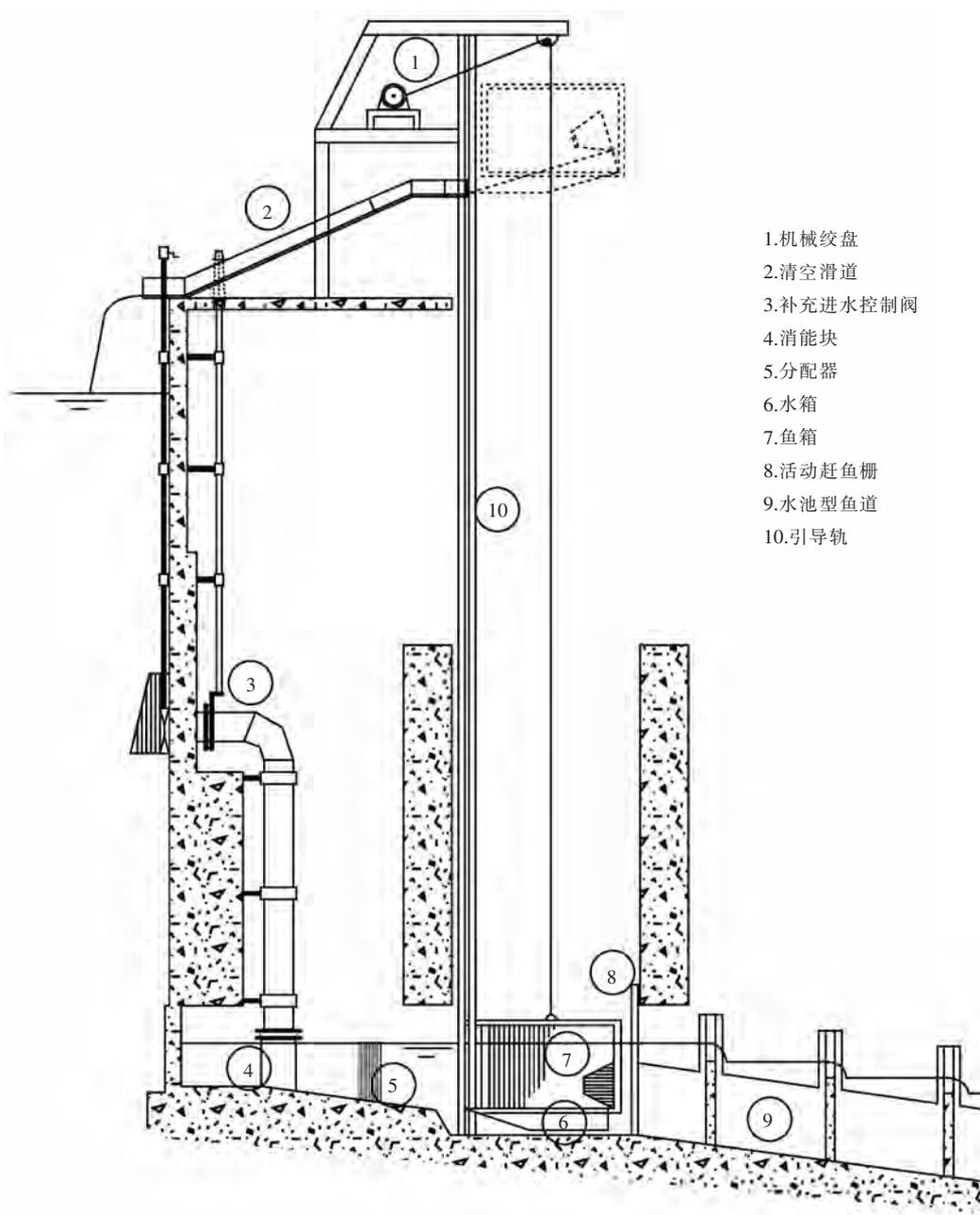
在原理上，升鱼机是一种机械系统，首先是把鱼诱捕到障碍底部一个适当大小的水箱中，然后提高并且在上游倒空。

图 4 和图 5 图解了这类设施。辅助水流将洄游鱼类吸引入诱捕（或贮流）池中。鱼类被诱捕进入装有防止鱼类回游逃逸装置的铁丝网笼中，它与一个位置较低的构件形成一个运输水箱。在诱捕池下游处用一个垂直的网面挡住，以防止在水箱提升期间其他鱼进入水池。

一个用于提升水箱的电动绞盘安装在金属或水泥结构上。通过倾斜水箱或者打开阀门把鱼释放到上游去。

释放鱼有两种方式。一种是从水箱中直接通过滑道卸入上游前池，一种是在升鱼机和上游水池没有紧密相连的条件下，通过一条与上游坝前蓄水相连的渠道释放。在这条渠道中保持恒定的水流，以此来确保鱼类的朝向和鼓励鱼类前进到上游池子。

当有很多鱼需要被移到上游，或当鱼无法容忍环境的封闭（譬如西鲱）时，很有必要设置一个较大的贮留池，因为这种类型的升鱼机比较大而且笨重，故现在这种包括诱捕和运输设备的升鱼机变得越来越不适用了。可能的补救措施是，把诱捕、贮留和提升功能分开，分别使用不同的设备（图 6，图 7）。鱼类被诱捕并贮留在一个大池子中，大池子的入口带有防回流装置，水箱被埋置入贮留池最上游的地面。在水箱被提升之前，鱼类经由一个固定在水平移动拖车上的直立赶鱼栅，将它们推挤入水箱上面的区域中。这个赶鱼栅包括两个可以活动的板，通常用作诱捕鱼（活动板打开以形成倒波）。这一原理的设施最早用于美国康涅狄格河 Holyoke 水电站中，并在以后成功用于法国的 Golfech (Garonne 河) 和 Tuileries (Dordogne 河)。



- 1.机械绞盘
- 2.清空滑道
- 3.补充进水控制阀
- 4.消能块
- 5.分配器
- 6.水箱
- 7.鱼箱
- 8.活动赶鱼栅
- 9.水池型鱼道
- 10.引导轨

图4 鲑科鱼类典型升鱼机的剖面图（Poutes 大坝，Allier 河）

这两种类型的升鱼机运行周期如下：

①有整合式诱捕水箱的升鱼机。

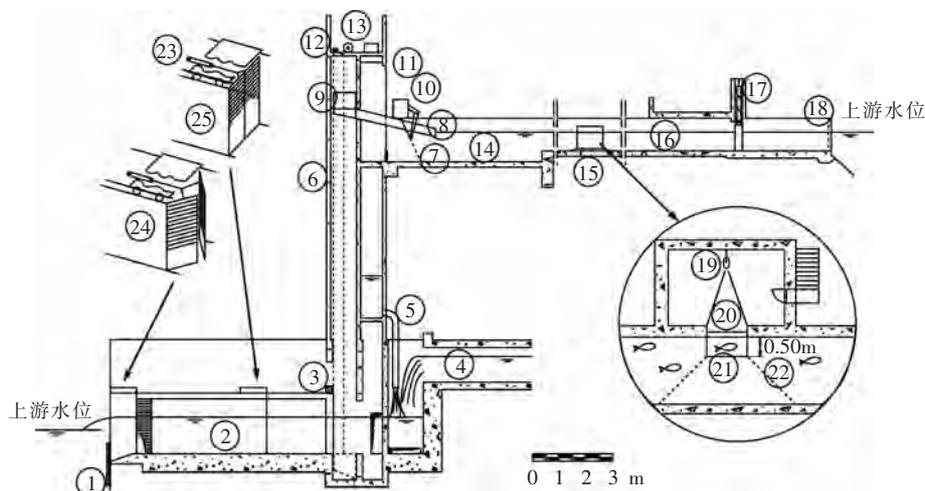
诱捕阶段：水箱位于降低后的位置，介于鱼类诱捕区和升鱼机上层结构之间的可移动式垂直分隔栅位于提升后的位置。鱼类被水流吸引至鱼笼，并且被入口倒须困于笼中。

水箱上升和倒空阶段：降低可移动式垂直移动分隔栅栏，防止其他鱼类继续进入。水箱被提高并且在上游被倒空。

水箱降低阶段：倒空水箱后，水箱重新回到诱捕位，垂直分隔栅栏再次被升高。

②安装有机械赶鱼栅的升鱼机。

鱼诱捕阶段：水箱处于降低后的位置，且可移动式垂直分隔栅位于提升后的位置。鱼受水流吸



- | | | |
|-------------|--------------|--------------|
| 1.自动泄水闸 | 10.自动拦污栅 | 18.保护隔栅 |
| 2.鱼类贮留池 | 11.控制渠道泄水闸门 | 19.照像机 |
| 3.赶鱼栅绞盘 | 12.可移动赶鱼栅的绞盘 | 20.计数窗 |
| 4.主要补充吸引水流 | 13.水箱绞盘 | 21.白色 PVC 板 |
| 5.渠道流出的流量 | 14.接收池 | 22.隔栅 |
| 6.升鱼机竖井 | 15.计数窗 | 23.起重机 |
| 7.隔栅 | 16.转移渠道 | 24.诱捕模式下的赶鱼栅 |
| 8.滑槽 | 17.隔离闸门 | 25.集鱼模式下赶的鱼栅 |
| 9.处于升起位置的水箱 | | |

图 7 安装有机械赶鱼栅的升鱼机剖面图 (Garonne 河上的 Golfech 大坝)

时,可移动式垂直移动分隔栅栏落下,以此来阻止其他鱼在升鱼机上升时进入提升室。

水箱提升阶段:水箱被提升并在上游被倒空。同时赶鱼栅收回,重新回到诱捕位。

水箱下降阶段:水箱被倒空后,回到诱捕位,可移动垂直分隔栅栏再次被提起。

2.2 设计标准

根据在美国东海岸进行的试验 (BELL, 1986; DALLEY, 1980; RIZZO, 1986) 和最近在法国进行的试验 (TRAVADE 等, 1992) 获得以下标准。

2.2.1 升鱼机类型的选择

是选用带整合式诱捕水箱的升鱼机还是选用带赶鱼栅的升鱼机,主要取决于过鱼的种类和数量。

对于装备整合式诱捕水箱的升鱼机来说,比较适合同时通过电站的鱼类数量不太多的情况,并且鱼类中没有容易受伤和过度紧张的病弱种类,因此这种设备一般适用于鲑鱼种群(鲑鱼、海鳟鱼和鳟鱼),因为他们每年的迁移数量不会超过几千条。通常假设这种设施位于使用这种设施的鱼类数量较低的河流(有洄游鲑鱼的小河道或者大河的上游支流中)。这种类型的升鱼机对于西鲱比较适合,由于这种鱼类对压力和损伤相当敏感,且该鱼种喜欢以较大的鱼群不定时洄游。对于有大量洄游鱼类的河道来说也可能使用这种升鱼机,不过需要容量较大的提升水箱(如在美国 Androsconggin 河 Pejepscot 坝上安装的升鱼机)。

当有大量洄游鱼类(几百至上千条)同时到达设施或者洄游种类是较脆弱的鱼类时,最好使用安装赶鱼栅的升鱼机。这一般是在大河较下游的河段(如法国 Dordogne 河和 Garonne 河),在这里,除西鲱外,还有超过 20 种的几万条鱼可能使用这种设施。例如,经统计,1997 年约 100 000 尾西鲱(约有 200 吨重),还有其他约 20 多个不同种类的约 50 000 尾鱼使用了这种升鱼机 (CHANSEAU

等, 2000)

2.2.2 升鱼机位置的选择

确定升鱼机位置的标准与其他过鱼设施相似, 入口的地点取决于站点的条件。相对于河流流量来说, 吸引水流必须是明显充足的, 并且在入口处一定要有显著的水头差 (对多数鱼种来说, 为 0.2~0.3m), 以此来促进鱼类进入过鱼设施。

对于有整合式诱捕水箱的升鱼机来说, 也许可以设置在小段的水池型鱼道或挡板鱼道的上游位置。这就使限制诱捕网箱和单向安全装置的深度成为可能, 在洪水期水位较高时保护设施, 同时也限制了设备的维护要求。

2.2.3 供水系统

所有或部分水流可以注入贮留池。当由于诱鱼水流在诱捕笼和贮留池中水流流速不够大时, 可以将所有水流导入池子。在有整合式诱捕水箱的升鱼机中, 水流在消能后注入诱捕水箱的上游处。在有赶鱼栅的升鱼机中, 水流应分多个补水点注入, 一部分经由水箱上游, 一部分通过池子侧壁, 水流通过栅格时流速应低于 0.4m/s。

如果所有的水流无法被注入贮留池, 那么一部分必须分流注入倒须处。正如其他鱼类通过设施一样, 水流速度应低于 0.3m/s。在北美, 这一吸引水流可在水流通过设施底部的消能块后获得。尽管这一办法的优点是在任何水位条件下都可以通过栅格保持恒定的水流, 但缺点在于它存在清洁方面的问题。因此, 在法国, 通常通过垂直栅格来注入吸引水流。这些栅格尽可能布置在紧靠倒须处, 以此来保证喜欢在诱捕池入口洄游的鱼类尽快被吸引进鱼笼中。

2.2.4 诱捕和贮留池 (笼)

结构的总尺寸取决于以下几个参数: 运行期间, 每尾鱼所需要的最低水流量、流速和该种鱼需要 的最小结构尺寸 (长度、宽度、深度)。

贮留池内每公斤鱼需用水约 15kg, 即每尾鳟鱼 5~15L, 每尾大西洋鲑或海鳟 80~150L, 每尾西鲱约 30l。

结构的最小尺寸 (长×宽×深) 计算如下:

— 鳟: 2.5m×1.5m×1m (3.75m³)

— 鳟 1.5m×1.0m×0.8m (1.2m³)

— 西鲱: 5.0m×2.5m×1.5m (19m³)

诱捕装置通常包括带倒须的栅格, 在入口孔中必须保持 0.6~1.0m/s 的最低速度以吸引鱼类。在潜孔中安装铰链连接的垂直条来充当阀门以提高“诱捕”效果。铰接垂直带必须轻到不阻止鱼进入。图 4 和图 5 在评估一个整合式诱捕水箱时应考虑的主要标准。在安装有赶鱼栅装置的升鱼机中, 移动式的赶鱼栅同时具有诱捕贮留栅格的功能 (图 6 和图 7), 处于诱捕位的两个栅栏间的间隔在 30cm 至 40cm 之间。

贮留池内的最大流速必须在 0.3~0.6m/s 之间, 视种类而定。

2.2.5 提升水箱

每公斤鱼所需水大约为 6L 容量, 即每尾鳟鱼需 2~6L, 每尾大西洋鲑和海鳟 30~60L, 每尾西鲱约 10L。

水箱的最小尺寸应该考虑到过鱼鱼种的大小。对于鲑鱼和海鳟来说, 最小长度应分别采用 1.5m 和 1.0m, 并且最小深度分别采用 0.3 和 0.2m。

对西鲱来说, 水箱的最小尺寸一般来说由迁移高峰期所需提升的鱼类数量的最大值决定。根据鱼的大小确定水箱的最小尺寸完全是不恰当的, 因为在洄游高峰期, 抵达障碍物的过鱼数量相当大。

鲑科鱼类升鱼机所用的小型水箱 (300~800l) 可轻易地被倒空。大型水箱则必须安装一个清空

闸门。在设计和完成过程中应该特别注意（圆形光滑的载体），应使对鱼类的伤害降至最小（圆弧的角，光滑的构件等）。水箱的结构也必须引导鱼进入清空水闸（倾斜的底面，收缩的滑道），以保证在水箱清空以后没有鱼留下。为了在清空水闸打开时降低流速，提升水箱的水深应该最小且表面积应该尽量大。

2.2.6 圈禁和推挤栅格

为了注射辅助水流、限制诱捕池和贮留池中的鱼以及为将鱼类推挤聚集在水箱上面，栅格的类型和净网主要取决于过鱼的种类和大小。为了防止栅格阻塞鱼通过，设计时必须仔细。必须考虑到维护（清洁和处理）的局限。为了防止鱼卡在栅格之间，栅格最好采用矩形断面和长条而非圆形断面的长条制成。

长条之间的净间隔必须足够小，以防止小鱼因头骨被卡而被捕获。对于鲑科鱼类来说，长条间距相当于过鱼体长的约十分之一。

最大净间隙（e）应如下：

e=4.0cm（大西洋鲑和海鳟）

e=3.0cm（西鲱）

e=2.0cm（鳟鱼）

e=2.5cm（海七鳃鳗）

e=0.5cm（溯河前进的洄游鳗鱼）

栅格的表面积必须使注入过鱼设施的辅助水流符合建立的速度标准（ $V_{max} < 0.30 \sim 0.40 \text{m/s}$ ）。

机械赶鱼栅移动的速度约为 5~15m/s。

2.2.7 上游鱼的释放

水箱必须在上游坝前蓄水，或者转动渠道中清空，释放区域的水必须足够深，水域须足够宽，以防止鱼撞击池壁或池底。清空前必须仔细选择，以便使游泳能力差的鱼不被吸入水轮机或溢洪道。还应避免大环流，死水区，或水流湍急区等易使鱼类迷失方向的区域。

如果从水箱卸鱼需用滑道，则滑道必须完全光滑，而且横截面最好为圆形。目前尚未发现长达 10m 的斜槽在现今使用的升鱼机中存在问题。为了防止鱼受伤或受惊吓，卸鱼和接受水面间的落差高度不应超过 5m。

转动渠道必须足够宽和足够深，以免影响鱼类的行为。对鳟鱼来说，最小宽度应为 0.5m，对鲑鱼来说应为 1m，对西鲱来说为 1.5m。流速必须能刺激鱼类溯河游泳，且应在所有使用它的鱼类的游泳能力之内，提供 0.3m/s 和 0.6m/s 间的流速通常比较适宜。

如果上游水头波动大，或如果坝的设计使水很难藉由重力注入转动渠道，可在顶池上使用抽水渠道，这就需要有一个特殊装置（“伪堰”）让鱼到达上游水位。在 Gaved Oaaau 河的 Castet 升鱼机中就安装了这样一个装置。

2.3 大小和运行

升鱼机的运行周期必须适合不同种类的洄游方式。对于像洄游性鲑科鱼类这样单独或小群迁移的鱼，诱捕阶段持续一至数个小时。另一方面，对于西鲱来说，这种鱼大量洄游，在上溯洄游高峰期时，整个周期的持续时间应该尽量缩短（大约 10min）。

贮留池和水箱的大小可由两个指标的函数确定，一个是在最短周期内到达设施的鱼群的最大数量（ N_c ），另一个是前面一节给出的容量标准（RIZZO, 1986；TRAVADE, 1992）。 N_c 取决于自然迁移方式和升鱼机的运行频率。这意味着收集有关鱼类迁移节律的信息非常重要（相对于年迁移量的日高峰与该高峰日的每小时高峰量），并且事先确定在设施处提升水箱可能的最大频率。

贮留池和水箱所需要的容积用下式表示：

$$V=C+N_c V_{\min}$$

式中

N_c 是一个周期中数量最多的鱼种在贮留池中的最大数量；

V_{\min} 是最常见种类的每尾鱼所需要的容量；

C 是校正系数，考虑到其他种类的鱼出现的情况。

例如，对美洲西鲱 (*Alosa sapidissima*) 和欧洲西鲱 (*Alosa alosa*) 来说，参数 N_c 可以通过相当于年洄游的 10% 的每日峰值以及于该日峰值量 15% 的小时峰值获得。考虑到洄游种群的大小 (N_t) 及一个周期的最少持续时间 (d 用分钟表示)，一个周期来到的鱼的最大数量由下式获得：

$$N_c = (N_t \times 0.1 \times 0.15 \times d) / 60$$

2.4 维护与保养

升鱼机包括许多机械设备，许多部件或全部部件淹没在水中的运动设备，如栅格，在运行中需经常维护，因此，相对于其他类型的过鱼设施，其成本较高。

主要是针对机械部件和机电部件（提升间、水闸、栅格和其他机械部件）的定期检查、维修以及对栅格的定期清洁。

升鱼机的这些局限和随之而来的费用消耗取决于升鱼机的类型，站点情况和使用材料的质量。为了使运行成本最小，升鱼机的设计和制作期间应考虑几个要点：

应使用坚固耐久的设备，少用自动化程度复杂的设备（类似于“农业机械”）；

保护全浸没或部分浸没金属部件，防止腐蚀。从这一方面考虑，电镀优于镀锌；

为了尽可能防止河流垃圾阻塞栅格和（或）诱捕池，吸引水流的供给应该尽可能适当地被保护；进水口必须位于不堆积垃圾的地方，且设置拦污网的网孔小于升鱼机的栅格网孔。进水闸安装在入口，如果需要，再安装一套拦污栅；

应提供清洁和维护栅栏的设备，包括可移动栅格、水闸和排空诱捕池的抽水泵。

根据约 10 年的经验，法国安装的升鱼机的维护和运行费用的大小如下：

适用于鲑科鱼类的小型升鱼机（安装有整合式诱捕水箱）：每年日常运行的维护和检查费约为 200~1 000 欧元（设备），对应劳动力为每年 5~10 人/天，清洁要求因地点而异。对位于 Poutes (Allier) 的升鱼机，从未出现过堵塞问题，它需要的清洁劳动力约为每年 2~5 人/天。

大型升鱼机（安装可移动式赶鱼栅）：年运行的维护和检查费用约为 15 000 欧元。包括清洁工作在内的设备运行维护和检查所需要的劳动力，相当于每年 100 人/天（约 30 000 欧元）。

与其他维护费用相比，运行所需的能源成本可视为相当低。提升高度超过 10m 的小型鲑科鱼类升鱼机通常消耗约 0.1~0.2kW 时，提升一个大型升鱼机约 6.0~7.5kW 时。

2.5 升鱼机的优、缺点

升鱼机与其他类型的鱼类通过设施相比的主要优点是：

成本较低（相对来说和鱼必须提升的高度无关）；

总尺寸小（这使在建筑物中设置升鱼机相对容易）；

对于上游水位变动敏感度低。

对于那些使用传统鱼道有一定难度的鱼类，如西鲱或梭鲈升鱼机，可以认为升鱼机是高效率的。在 Garonne 河的 Golfech 坝和 Dordogne 河的 Tuileries 坝中选择升鱼机是因为升鱼机的后一种优势。最近几年的监测表明，河道中所有鱼类都在使用升鱼机，包括在其他类型鱼道中非常罕见的种类。这类型设施在 Holyoke 坝针对美洲西鲱证明了它的效率（康涅狄格河，美国），但是在同一条河流的其

他站点，针对这种鱼修建的高效率水池型鱼道在应用上则有许多困难。

与静态道相比，具有下列缺点：

运行费用较高；

因故障或维修造成停机时间较多；

由于从运行上考虑不能使用较细的栅格，故对小鱼或小个体鱼（如鳗鲡）的运输效率低。

最后，最近在法国进行的无线电跟踪研究显示，鲑鱼可能只是勉强进入诱捕池，并且进入前可能必须经多次尝试才能接近入口。这可能大大延迟迁移，关于这一问题尚须做深入研究。

参考文献

- AITKEN P. L. , DICKERSON L. H. , MENZIES W. J. M. , 1966. Fish passes and screens at water power works. Proc. Inst. Civ. Eng. , 35: 29 - 57.
- BELL M. C. , 1986. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Fish. Eng. Res. Prog. , U. S. Army Corps of Eng. , North Pacific, iv. , Portland Doregon, 290 p.
- BEITZ E. , 1997. Development of fishlocks in Queensland. Second National In : Fishway technical report, . BERGUIS A. P. , LONG P. E. , STUART I. G. (Eds), Rockhampton. Australia, 125 - 152.
- CHANSEAU M. , DARTIGUELONGUE J. , LARINIER M. , 2000. *Analyse des données sur les passages enregistrés aux stations de contrôle des poissons migrateurs de Golfech et du Bazacle sur la Garonne et de Tuilières sur la Dordogne*. (Analysis of fish passage at the monitoring stations of Golfech and Bazacle dams on the Garonne river and Tuilières dam on the Dordogne river. GHAAPEMIGADO Rep. RA00.02, 64 p.
- DALLEY P. J. , 1980. A review of fish passage facilities for american shad. Northeast Fish and Wildlife Conf. , Ellenville, New - York, 32 p.
- JOLIMAITRE, J. F. , 1992: *Franchissement par l'aloise feinte de l'aménagement de la chute de Vallabrègues : étude du franchissement de l'écluse de navigation. Avant - projet de passe à poissons sur le seuil de Beaucaire* (Passage of the Vallabrègues dam by Allis shad; study of The use of the navigation lock. Preliminary plan of fish passage facility of the Beaucaire weir) . Conseil Supérieur de la Pêche Rep. , 42 p .
- KIPPER Z. M. , MILEIKO I. V. , 1962. Fishways in hydro - developments of the USSR. Rybnoe Khozyaistwo, Moscva, 57 p.
- KREITMANN, L. , 1925. *Passes à poissons et lacs de barrage en Suisse Compte rendu de mission piscicole* (Fish passage facilities and reservoirs in Switzerland. Report on fisheries project) . Ministry for Agriculture. General Directorate of Waterways and Forestry, 43 p.
- MALEVANCHIK B. S. , RYAKHOVSKAYA G. N. , 1971. Design of fish ladders at hydro - developments. Gidrotekh. Stroit. , 2: 6 - 11.
- MONAN G. , SMITH J. , LISCOM K. , JOHNSON J. , 1970. Evaluation of upstream passage of adult salmonids through the navigation lock at Bonneville dam during the summer of 1969. 4th Progress Rep. on Fish. Eng. Res. Prog. 1966—1972, U. S. Army Corps of Eng. , North Pacific Div. , 104 - 113.
- PAVLOV D. S. , 1989. Structures assisting the migrations of non - salmonids fish: USSR. FAO Fish. Rome, Tech. Pap. 308, 97 p.
- RIZZO B. , 1968. Fish passage facilities design parameters for Connecticut river dans. Holyoke dam. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, Boston, Massachusetts 40p.
- RIZZO B. , 1969. Fish passage facilities design parameters for Connecticut river dams. Turners Falls dam. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, Boston, Massachusetts, 33 p.
- RIZZO B. , 1986. Fish passage design information. Fish passageways and diversion facilities course Merrimack, New Hampshire, 26 p.
- TRAVADE, F. , LARINIER, M. , TRIVELLATO, D. , DARTIGUELONGUE, J. 1992. Conception d'un ascenseur à poissons adapté à l'aloise (*Alosa alosa*) sur un grand cours d'eau; l'ascenseur de Golfech sur la Garonne (Design of a fish lift suitable for shad (*Alosa alosa*) on a large watercourse; fish lift at Golfech on the Garonne) . Hydroécol. Appl. , 4 (1): 91 - 119.



照片1 Beaucaire 电站 (Rhone 河)
船闸的上游段的闸门



照片2 经 Beaucaire 电站船闸调度后, 西鲱
正通过船闸的上游闸门离开



照片3 Allier 河 (Poutès) Poutès 坝升鱼机的提升设备,
诱捕笼处于提升位, 左侧是清空滑道的上游段



照片4 Poutès 升鱼机 (Allier) 提升期间的诱捕水箱



照片5 Poutès 升鱼机诱捕水箱中的鱼



照片6 在 Poutès 坝通过滑道在前
池清空升鱼机的诱捕水箱



照片 7 Kemansquillec 升鱼机 (Britanny) 水箱上游俯视图, 垂直栅格及下游处平面挡板鱼道



照片 8 Golfech 大坝 (Garonne 河) 升鱼机全视图



照片 9 Golfech 升鱼机的贮留池和栅格设施



照片 10 Golfech 升鱼机中赶鱼栅正在集鱼



照片 11 西鲱被倒进 Golfech 升鱼机上游转运渠道



照片 12 建造期间的 Golfech 升鱼机的全视图



照片 13 Tuilières 升鱼机 (Dordogne 河) 在诱捕鱼阶段时贮留池和赶鱼栅俯视图

第八章 通过涵洞、岩堰及河口障碍物的过鱼通道

M. LARINIER*

1. 通过涵洞的过鱼通道

1.1 鱼类通过涵洞洄游造成的问题

由于建造成本和维修成本较低，很多种类的（圆形、椭圆形、卵圆形、箱形、管状、拱形、及无底拱）涵洞相对于传统桥梁有很大的优势。

用这类结构取代自然河道的渠道，会对局部流动特征、基本组成和照明设施做一定变动。

这可能会对鱼类洄游造成严重的障碍，如过高的流速（至 3~4m/s），水深不足，出口升高（即下游内底高于现有河床）和土石聚集，后者频繁发生以至影响了鱼类的洄游。

涵洞的坡度越大，在设施入口处的加速度就越大。由于涵洞一般来说粗糙度较低，河水流过时很容易加速，通常明显加速（水流可能变成奔流），然后在涵洞内部几乎保持恒定的速度。在这样的流速下，涵洞内部几乎没有静水区的存在，鱼类必须一口气通过整个涵洞。而在低水位时期，水流可能变得非常浅以致无法满足鱼类游泳的需要。

当涵洞结构的下游过高时，鱼类通道便会频繁发生阻碍。有时这一落差是刻意设置的，但更多是由于没有考虑现有河床的高程而引起的不当建造。若没有采取预防性措施（如加固河床，修建低水头混凝土堰或岩堰），还可能引起涵洞下游河床的侵蚀。

较少发生的是，由于涵洞上游末端（上游内底高程过低）安装位置不当导致结构正上游处出现某段过于陡峭，以致鱼类无法通过。

1.2 可通过涵洞的设计和建造方针

1.2.1 鱼类通道的要求

随着涵洞设施的建设，河流水力条件发生改变，务必保证涵洞不会构成鱼类通过的障碍。

一个涵洞能否被鱼类通过不仅取决于通过该涵洞的鱼类的游泳能力（如游泳速度和耐力），也取决于洄游期间涵洞中的水流情况。

鱼类的游泳能力一般由一条经验曲线表示，它显示在给定流速的水流条件下，鱼类能够游动的距离或长度。

借助于这一信息，鱼类能够通过涵洞的水力标准（设计涵洞长度时的最大流速和足以让鱼类游过的最低水深）是可以在设计涵洞时确定和使用的。

应满足下列条件：

“参照鱼种”（种类和大小）必须是能通过该涵洞洄游的游泳能力最低的鱼；

应考虑的水流条件必须是洄游期间会遇到过的水流状况；

* CSP - CEMAGREF, GHAAPE - Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France

洄游期间河流的水文条件必须用与对其他任何鱼类通过设施相同的方法来确定。

当日流量曲线可以获得时，涵洞应保持在低流量 ($Q_{90} - Q_{95}$) 和仅有 5%~10% 的时间超过的高流量 ($Q_5 - Q_{10}$) 鱼类皆可通过之状况。

在没有这些数据的情况下，尤其是经常发生在那些较小的河流中，涵洞要保持在可通过鱼的情况下，应有约为年平均日流量 2 倍的流量。

除了不能超过最大流速外，涵洞中的最小水深必须维持以允许最大个体的鱼在最低水位期间可通过，对鳟鱼来说最小值约为 0.15m，对鲑鱼和海鳟鱼约为 0.30m。

1.2.2 可过鱼涵洞的设计和建造标准

涵洞的形状决定水力参数，如水深和流速，这些参数将影响鱼类通过。较宽跨度的涵洞（箱形、拱形、无底拱形）可使水流通过断面比自然溪流来得小。在使用同样粗糙度材料的情况下，这种类型管道中的流速可能没有圆形管道中的流速那么急。此外，如果涵洞的横截面和建造条件（坡度适中，设施坡度比小河的自然坡度低）允许，沉积物质（砾石、小卵石）能够沉积在底部而提高了粗糙度，从而有助于降低流速。但是，如果要在低流量期间保证最低水深，则圆形和椭圆形涵洞更可取。

在法国，设计涵洞时一般基于高速公路百年一遇的洪水回归期及道路 25~100 年一遇洪水回归期时可能的最大流量。结合涵洞的特征（尺寸、横截面的形状、粗糙度和坡度），可以计算出洄游期间最大水流情况下涵洞内的水流速度。

当涵洞的大小和类型能够满足鱼类通过的条件，那么可采用过鱼需要的标准。如果过鱼标准无法适用于传统的涵洞时，则应考虑其他解决方案。

经验表明，最佳的解决方法是使用无底拱形结构的涵洞，或者是大小与小河水流的宽度和横断面相当的涵洞。两者皆可填充与最初的河床底质大小相当的材料，以此保证小河的水力特征在通过管道时几乎没有改变。涵洞必须以与小河相同的坡度安装，并且在上下游末端的内底高程必须低于小河的河床高程。这很大程度上帮助了在涵洞中重建河流的河床（KATOPODIS, 1984）。组成底质层的材料尺寸必须满足在洪水期间的稳定性。在设计涵洞时考虑过鱼能力通常意味着将超过水力需要规格。

在中等长度涵洞和自然渠道坡度的情况下，可水平设置涵洞。涵洞内底必须设置在低于河床之下，而且涵洞的宽度必须等于或大于自然水道的宽度。正如上例所示，这相当于在涵洞中重建一个稳定的底床。这一方法的合理上限是挑选渠道坡度和涵洞长度的乘积不超过涵洞直径 20% 的站点（BATES, 1999）。

通过调节涵洞的大小和坡度，也可将涵洞中的流速降低到一个适当的水平。这一解决办法同前例一样，通常导致涵洞尺寸过大。然而，除了在坡度较缓和且涵洞较短的情况下，不应把涵洞的坡度设计的比自然渠道的坡度低很多。后者可能导致涵洞出水口过高（形成落差）或冲刷上游河床（形成陡峭渠段）。二者都会对鱼类的通过造成不利影响。

另一个为保障鱼通过而控制涵洞中的流速和水深的解决办法是设置挡板，人工增加材料的粗糙度（如在建筑物底部位置固定大石头）或建造传统鱼道。

为了保证任何时候，尤其低水流期的最低深度，涵洞底部一定要比自然河流底部低约 30cm（图 1）（WATTS, 1974；DRYDEN and STEIN, 1975；DANE, 1983）。

涵洞下游必须提供对两岸和出口水池的保护措施。因此这些建筑物必须满足以下条件：

在鱼类通过涵洞前为其提供一个休息区；

在涵洞下游段（鱼的入口）保证最低水深并减小入口处的落差或加速度；

通过水流的消散流出以减小水流能量，控制涵洞下游的侵蚀，从而防止尾水水位的任何下降。

水池应有足够的容积以保证水流能量的散逸，同时不会造成水流的过分动荡或过高的含氧量。水池可用混凝土做成，但是用乱石加固是一种更好的解决方案，因为它能适应水流天然底将来任何较小的改变。

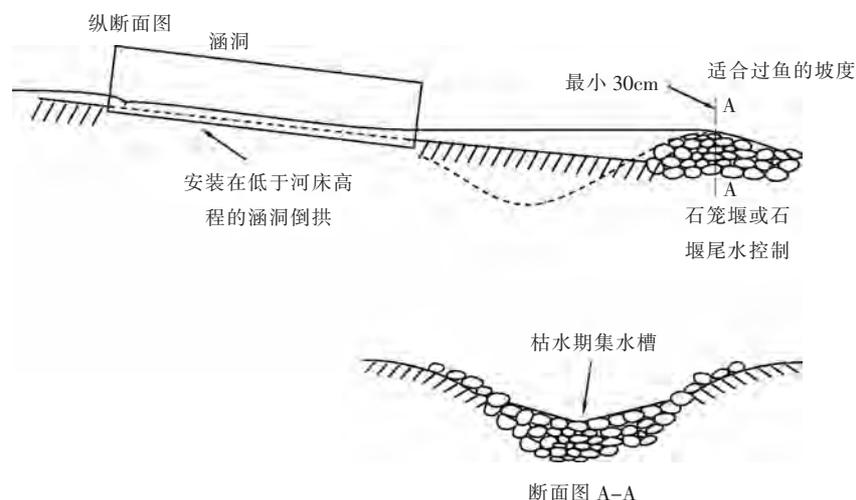


图1 下游布置的控制尾水位的低岩石堰涵洞修建示意图

一般建议在水池下游末端设置一个控制设施以维持水位比涵洞出口处高至少 30cm，以防止在高流量期间加速度过大或产生显著落差。在某些情况下，无论是作为预防性措施，还是为了矫正下游端太高的落差，在涵洞下面修建数个前拦河堰是合理或甚至是必需的。前拦河堰的数量取决于站点的坡度和地形。把总落差可分成鱼能够通过的几个小落差。堰的结构作用如同鱼道，因此应使用传统鱼道的设计标准，尤其是前拦河堰之间的水头差应不超过 0.25~0.30m。

所有前拦河堰都必须有开口或顶部有凹口以集中水流，从而使鱼能在低水流期间通过。

1.3 涵洞挡板

在北美获得的经验表明，对于新建涵洞，最好的解决办法是保证尽可能接近原来的水流条件（坡度、河床质材质、横截断面和湿润的周边环境）。挡板的修建需要很多的维护，并且在很大程度上降低涵洞能够接纳的最大流量（ENGEL, 1974; DANE, 1983）。然而，现有涵洞在设计修建当初并未考虑过鱼通道的情况下，用挡板作为改进措施往往是唯一的方法。另一方面，在新建涵洞的坡度较大时，人工设置粗糙度高的构件或挡板经常是必须的。挡板有两个作用，一是限制涵洞中的水流，二是在洪水期间保护涵洞的底部。

下面介绍几种高效且较晚安装的常用挡板类型。

1.3.1 有槽口或竖缝的水平挡板（图 2）

一系列的堰被安装在横跨涵洞的整个宽度上，保证在低流量期间有充足的水深和高流期间可以接受的流速。中间或靠边的槽孔（正方形、矩形或三角形）或垂直开到渠底的垂直竖缝，以低于流量的条件校准，可便于鱼类通过一个较宽范围的水流（RAJARATNAM 和 KATOPODIS, 1989, 1990）。

这一类型的过鱼设施类似于传统的水池型鱼道。它也可以采用同样的设计标准，尤其是溢流堰的最小水头，这与过鱼的种类有关，必须采取下列具体的预防措施。

墙高应使用可维持最小水深的标准（ T_{min} ）（对鳟鱼来说为 15cm，对鲑鱼来说为 30cm），尤其在紧靠溢流堰正下游的最浅区域。

在各个跌水底处的水深应至少为池间水头差的 2~2.5 倍，才能使鱼通过。

溢流堰之间必须有足够的间距。如果溢流堰靠得太近，一旦流量增大，便会在挡板间形成环流区，水流将变成持续的环流，水能将得不到消散，于是就会形成流速很高的“拟平滑流”（KNIGHT and MCDONALD, 1979）。

每个池子单位容积的消耗能必须保持可接受水平（参照水池型鱼道的标准）。

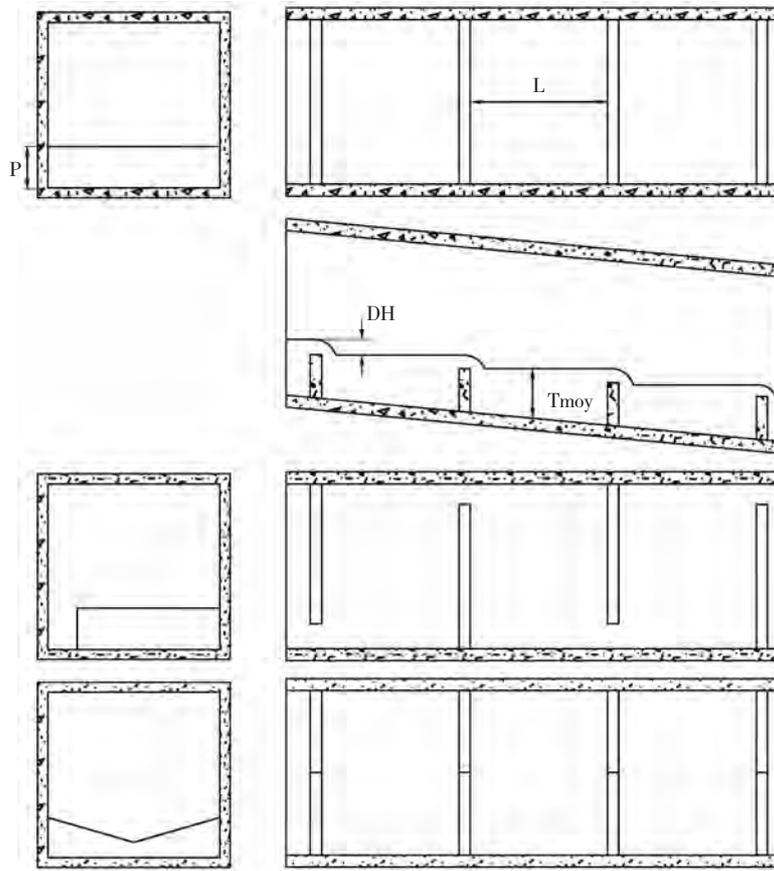


图2 矩形堰、三角形堰和竖缝堰挡板系统

这些要求需要两个参数来保证，即堰高（ p ）和堰间距（ L ），前者一般在 0.15m 和 0.40m 之间变动，后者的大小应满足 $(S \times L/p)$ 的值为 0.20~0.30（LARINIER 和 CHORDA，1995）：

$$0.20 \leq (S \times L/p) \leq 0.30$$

式中 S 是结构的坡度。

1.3.2 三角形堰顶的挡板（图2）

与上述解决办法相比，三角形溢流堰的优势在于能够形成多样化的水流条件。鱼可以选择它们喜欢的区域通过，选择的依据是水流的水文条件。三角形三条边的斜率约为 1/5 和 1/7。在低水流时期，下泄水流仅能填装三角堰的底部。如果在这样的条件下，三角形顶点上的上游水头（最小水头 H_{min} ）不足以让鱼通过，此时水流应集中在长方形的竖缝中，就如同水平堰顶的情形一般。可采用与水平挡板相同的设计标准来确定其间隔与高度。

1.3.3 “偏置”挡板（图3）

这一构造的挡板在加拿大和美国广泛使用（MCINLEY 和 WEBB，1966；ENGEL，1974；RAJARATNAM 等，1988）。这种构造的挡板适合于所有类型的涵洞。这类挡板的主要缺点是，虽然它们在水力上比上述挡板有更高效率，但是它们难于安装且成本较高。这是由于这类挡板结构复杂，间隔窄，这意味着需要的安装数量较大。

图3显示了这一系统的几何特征。尺寸和间隔用无因次形式表示，它们是水道宽度的函数。

模型试验（LARINIER 和 CHORDA，1995）显示可通过加大挡板的间隔来减少其数量，尤其在涵洞的坡度较为缓和的情况下。可根据挡板的高度（ p ）和涵洞的坡度（ S ）来调整间隔，如下式所示：

$$0.25 \leq S \times L/p \leq 0.35$$

溢流堰的最小高度为 0.20~0.30m。在低流量时期，这一装置的功能如同小型的垂直竖缝式鱼道，而在高流量期间，侧墙的不同取向可创造出螺旋流，此时的涵洞则如同超高效挡板鱼道。

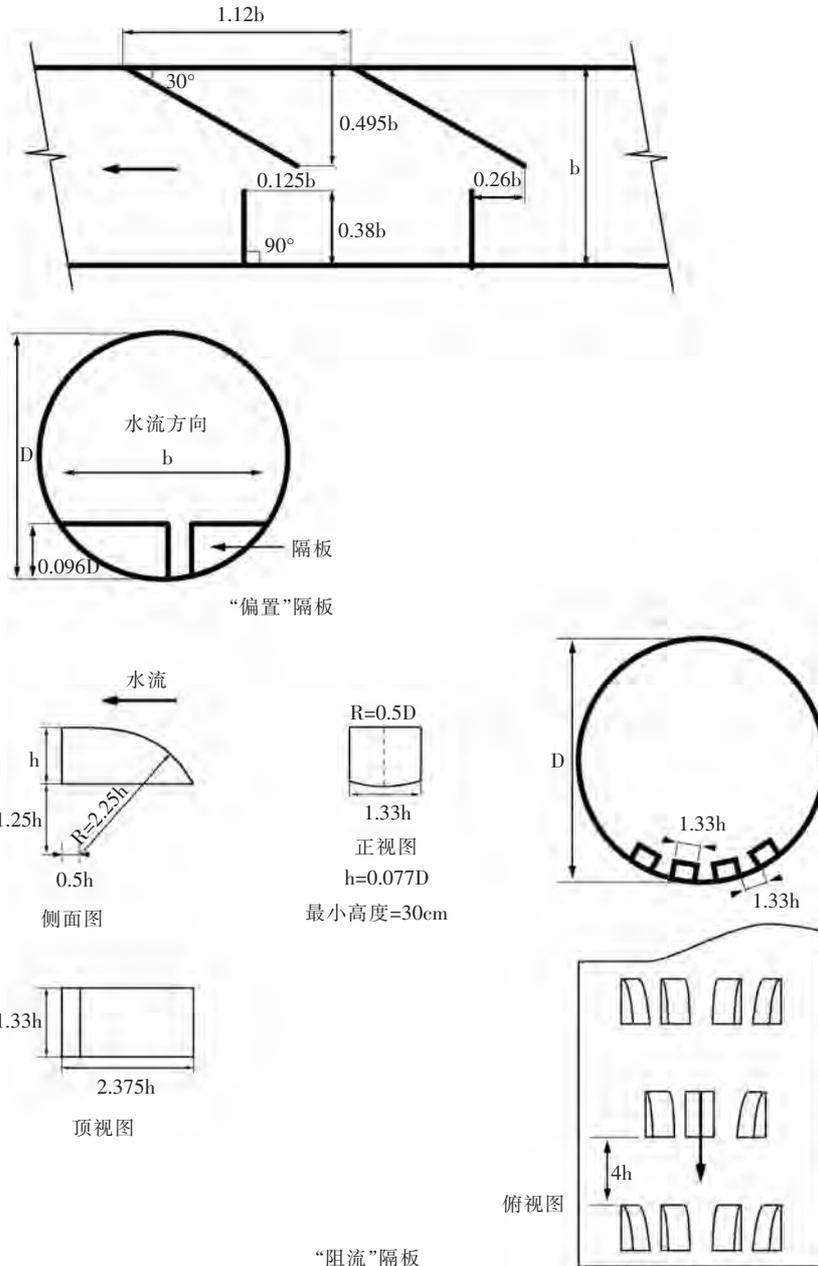


图3 “偏移”挡板和阻流块挡板设计尺寸

1.3.4 “阻流”块挡板

这一挡板系统，在圆形涵洞水工模型（ENGEL, 1974; KATOPODIS et al., 1978;）中测试，包括一系列流线型的障碍，通常是交叉有序的排列。这些挡板的形状是经过精心设计的，以保证鱼类在挡板之间有足够的休息时间，同时涵洞水力条件对挡板的影响及垃圾堵塞的风险降至最小。建议“阻流”块的最低高度为 0.30m。

应该核实，在射流条件下鱼类流动距离大约是挡板高度 2.5 倍的情况下，“阻流”块之间的流速

是否与通过的鱼类的游泳速度一致。综合 ENGEL (1974) 和 KATOPODIS (1978) 获得的结果, 可以得出流速随坡度变化的函数, 以无因次形式表示如下:

$$V / (gRh)^{0.5} = 7.97 S^{0.539}$$

式中 Rh 是未装挡板的涵洞的水力半径 (截面面积/湿周), S 是涵洞的坡度。

虽然该系统是在圆形涵洞中测试的, 但是还是可以在边上增加额外的阻流块, 可以应用于椭圆形涵洞或拱形涵洞。ENGEL (1974 年) 提出以下公式计算横跨整个宽度必需的阻流块数量:

$$N = 1/2 (1 + 7B/H)$$

式中 H 是涵洞高度, B 是涵洞宽度。

因为两个阻流块的横向间距等同于它们的宽度, 故这种类型的挡板系统的主要缺点是需要大量的阻流块。这些阻流块是否能够在低水位期间提供足够的水流以保证鱼类通过, 目前还不清楚, 尤其是在相对较宽的椭圆涵洞中。

相对于其他类型的挡板, “阻流” 挡板的主要优点是它们的阻力较低, 也不容易被淤积或漂浮等堵塞。

1.3.5 水流中挡板的效果

上述所有装置所适用的坡度值应为 $0.5\% \sim 5\%$, 在坡度大于 5% 的情况下使用必须经过非常慎重的考虑。

对任何给定流量, 这些装置都会大幅增大涵洞中的水深, 这一效果与水深与挡板高度的比值成正比。

在涵洞的流量输送方面, 挡板的效果与它们的“粗糙度”有关, 而粗糙度本身则取决于比值 L/p 和 h/p (分别是间隔对高度之比和水深对高度之比)。

当水深和涵洞直径之比 (h/D) 在 0.5 和 1 之间时, “偏移” 挡板 (高度 p/D 等于 0.1) 分别减少流量 $55\% \sim 45\%$ (RAJARATNAM et al., 1988)。

对于坡度在 1% 和 5% 之间, 带有水平或偏移挡板的箱式涵洞来说, 堰高 (p) 为 0.30m , L/p 之比 (挡板间距对挡板高度之比) 在 5 和 20 之间, Strickler 系数 K 变化从 15 和 21 。这意味着, 在涵洞中设置挡板会极大地减少它的容量 (LARINIER 和 CHORDA, 1995)。

2. 通过岩石堰的过鱼通道

在 1965—1975 年间, 法国对建筑材料需求增加, 导致对冲积河流中砾石开采猛增。这一过度开采通常是在河流“维修”的借口下进行的, 对河道的自然平衡产生了巨大影响。这些影响包括河道水位的降低、河槽被刷深、河岸被侵蚀、护岸建筑物被毁、建筑物地基暴露和地下水位下降。

为了稳定切割的渠道, 建设了很多的岩石溢流堰。这些稳定设施的高度变化范围从小于 1.50m 到超过 8m 。

这些岩石堰通常形成洄游鱼类难以通过或甚至完全不可通过的障碍。它们通常与河岸成直角, 因为在大多数情况下堰顶是水平的, 横跨溢流堰的整个宽度的水流条件 (流速和水深) 是均一不变的。在平均流量或高流量条件下, 流速变得太大以至于鱼类无法通过。在低流量时, 即使在较低的结构中, 水流穿过岩石后的水深不足致使大鱼很难甚至无法通过。

为了使鱼类更易通过阻碍, 设计了许多不同的解决方法。在 Gave de Pau 河, 在一些堰底安装了底部挡板鱼道, 独木舟或皮舟也可以使用这些设施。然而, 这类过鱼设施仅被证明部分有效, 这一解决方法并不令人满意。因为其流量和宽度与河流的流量和宽度相比是非常有限的, 所以它们对洄游鱼类没有充分的吸引力, 它们不能适应河道中的所有鱼类 (鲑科鱼, 还有鲤科鱼), 也不能适应上游水位的较大变化。

对于大流量（大于 $1\text{m}^3/\text{s}$ ）的情况，一个较好的解决办法是安装竖缝或侧面深槽及潜孔鱼道。它们更加适合当地可见的鱼类种类及水位变动。然而，值得注意的是，砾石沉积可能给这类鱼道造成严重的问题，致使效率下降和维护成本增加。

另一种办法是在河岸的一侧或两侧附近建造较低的岩石堰，形成分散落差的前拦河堰。

在 Adour 河和 Aave de Pau 河，成功地修建了几条流量类似自然旁路通道的堰（Toulouzette 溢流堰，Meillon 溢流堰，Baudreix 溢流堰）。由于要求的坡度很低（2%至最大 5%），致使堰体非常长，而妨碍了其普遍应用。根据进水口地点的不同，其可能受到洪水过后砾石频繁堆积的影响，这就可能干扰进水量并且需要进行必要的维护。尽管如此，只要能够使现有鱼类使用该设施，就应采用这一办法。

最佳解决办法（除不修建任何新堰的明显办法外）是把溢流堰设计得更加容易让鱼类通过。应该采取措施是使其高度降到最低，并设法采取便于鱼类通过的形式。有人用水工模型进行了一些试验（LARINIER et al., 1995）并试图建立一些标准，此后在 Adour 河和 Gave de Pau 河修建了若干试验性溢流堰。

其原理如下：

限制堰高（最大值为 1.0m 至 1.2m）。

在整个建筑物宽度范围内，提供多样化的流速、水深和单位流量。这可以通过一个略呈三角形的断面（在整个堰宽范围内，其高程变化在 20cm 至 80cm 之间，具体高程视洄游期间上游水位的变动）得到解决。在低水位期间，水流集中在中间（从而为较大的鱼提供了可接受的水深），而在高水位期间，在溢流堰的两侧仍然有适合鱼类通过的水流。

通过限制溢流堰下游面的坡度至 10%~12%之间来控制流速，或者在设施内部修建“阶梯”，以实现如同前拦河堰的功能（图 4）。

这些办法将导致堰体建造成本增大。另一方面，对游泳较好的鱼类（如鲑科鱼）而言，排除了修造传统水泥过鱼设施的需要。后者很难和岩石溢流堰的结构整合，极可能引起维护问题。

3. 在海岸和河口障碍处的过鱼设施

一些设施会妨碍洄游主要是由于其功能限制而非高度。旨在限制河口下游潮水进入的拦潮闸及河口坝就属于这类情况。可能是为了防止农业耕地遭受淹没，或供娱乐用，或供应工业用水或生活用水，或为建造船坞的需要而建造水库。这一类型的障碍物的功能在于，低潮时，水流流入大海；一旦涨潮，闸门就关闭，而闸门外的水位可能因为涨潮而高出河岸水位数米。

有两个特殊因素将使过鱼问题复杂化，而且这两个因素是必须考虑的：

障碍物的两侧水位变化较大。下游水位视潮水的相位状态而定，而上游水位随淡水存量而定。下游水位变化范围视潮汐的振幅（潮汐系数）及大坝与大海之间的距离而定；

这种结构可阻止盐水向上游移动。鱼类不但不能从盐度梯度的逐步上升中受益（即逐步适应环境的变化），反而会面临盐度的突然变化。对此类生物学效应（威胁、死亡）和行为效应，仍然了解甚少甚至一无所知。

自 19 世纪末以来，法国的塞纳河近海区域由于修建出海的防潮闸门，导致河口逐渐消失。修建出海防潮闸门使陆地开发成为可能。通过修建防潮闸门在河道旁创造出一个旁通入口渠道（或可称为涵洞），可避免涨潮时原来的河口遭受淹没（EUZENAT and FOURNEL, 1983）。这些防潮闸门一般由一个或多个木板构成，闸门允许河流向大海方向泄水，同时防止海水倒灌入河道。

这些设施一般是鲑科鱼类洄游的一大障碍。这主要是因为低潮时，涵洞中的速度增加；而高潮时为防止海水倒灌而完全关闭闸门，这都对鱼类洄游造成巨大阻碍。

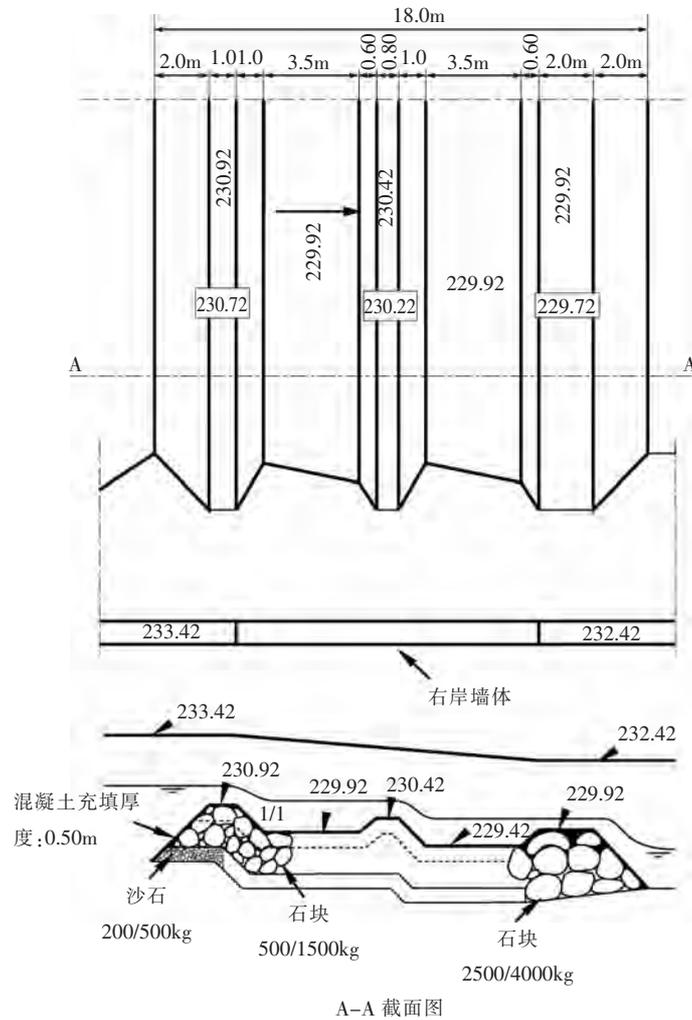


图4 Adour 河上的阶梯式岩石构造

几种假想的方案可供作为设计参考。通过在涵洞底部安装偏转器或挡板以降低管道中的流速。闸门处的过鱼通道可以经由在挡板上方开通一个顶部槽口，或通过修改水闸设计以使通过闸门的水位增高。门可以在侧面转动但角度少于 90° ，以使门的重量可以帮助其紧密关闭。

模型试验表明，水闸的运行状态（持续时间和打开程度）对其重量、重心位置及返回转矩等都非常敏感（I. M. F. T, 1988a, 1988b）。用较轻的闸门代替现有的闸门，或在某些情况下用带铰链的门代替一块或多块阀式闸门能大大方便鱼类通过，这能为鱼类通过提供更宽的通道。闸门也可由浮式闸门，以便其能够随潮汐相位的变化自动开关。

最近，在 Bresle 河的 Le Tréprot 港建造了一座通航船闸，包括一个船闸和供鱼类通过的拦河闸。无论潮汐高程如何，鱼类都能通过一系列的前拦河堰到达鱼道入口。其中前拦河堰保证在设施询问的最小水位。上游河流水位保持在 7.5m 的高度（参照水位 0.00 = 最低潮水位）；而下游，即海平面，其根据潮汐变化而水位变动在 4.20m 和 10.00m 之间。过鱼设施从下游到上游包括下列部分（图 5）：

- 一个较低的人口，安装一个受控制闸门，并且保证水位在海水位 4.2m 和 6.5m 之间。
- 两段 V 字形挡板鱼道（坡度 16%），可以把鱼提高到 6.75m。
- 上游入口，安装控制闸门，且在高于海平面 6.5m 状态运行。

- 侧面较深凹槽型鱼道，允许鱼上溯通过。

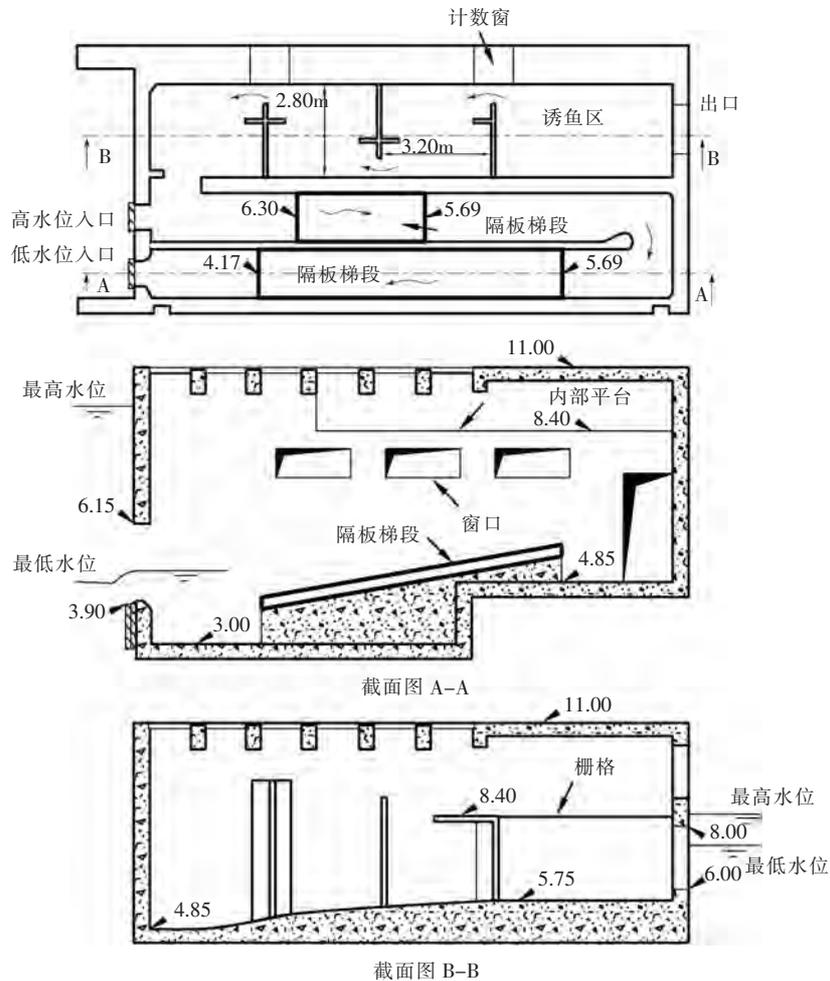


图5 Bresle河河口鱼道示意图

一旦海水达到 6.5m，下入口立即关闭，上入口开启，允许鱼通过，直接进入水池型鱼道。

同样，当潮水水位保持低于 9.5m 时，该设施作为潜孔型鱼道使鱼溯河向上游动 (EUZENAT and LARINIER, 1990; I. M. F. T., 1990)。

运行几年以后，位于上游几公里的鱼类监测站未发现拦河闸设施对鱼群的显著影响。

参考文献

- BATES 1999. Fish passage design at road culverts. Washington Department of Fish and Wildlife, Habitat and Land Program, Environmental Engineering Division Rep. , 50 p.
- DANE B. G. 1983. A review and resolution of fish passage problems at culverts sites in British Columbia. Fisheries and Marine Serv. , Vancouver, Rep. 810, 126 p.
- DRYDEN R. L. , STEIN J. M. , 1975. Guidelines for the protection of the fish resources of the Northwest territories during highway construction and operation. Fisheries and Marine Serv. , Tech. Rep. Series CEN/T - 75 - 1, 32 p.
- ENGEL P. , 1974. Fish facilities for culverts of the McKenzie highway. Nat. Wat. Res. Inst. , Burlington Ontario 33 p.
- EUZENAT, G. , FOURNEL, F. , 1983. *Etude préliminaire des conditions hydrauliques du passage mer/rivière des salmonidés migrants en Seine - Maritime. Problèmes du busage estuarien* (Preliminary study of the hydraulic conditions of the passage of migratory salmonids from sea to river in Seine - Maritime. Problems of estuary culverts). Con-

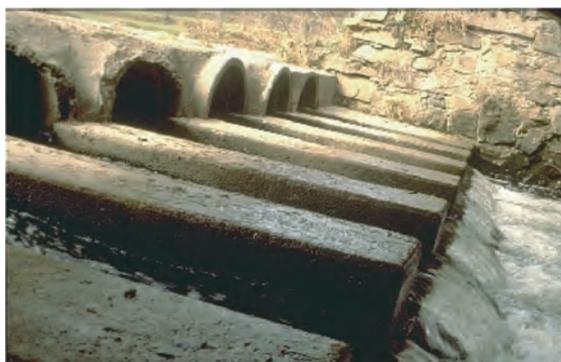
- seil Supérieur de la Pêche Rep 8 p.
- EUZENAT G. ; LARINIER, M; 1990. *Port de Pêche du Tréport, barrage - écluse. Dispositif de franchissement par les poissons migrateurs* (Le Tréport fish harbour dam lock. Fish passage facility for migratory fish) . Conseil Supérieur de la Pêche Rep. , 65 p.
- L. M. F. T. , 1988a. *Etude sur modèle réduit de l'écoulement dans les exutoires des rivières côtières de Seine - Maritime. Cas de l'Arques* (Study on a model of the flow in the outlets of the coastal rivers in Seine Maritime. The Arques case.) .Rep. 436. 2, 21 p.
- I M. F. T. , 1988b. *Etude sur modèle réduit de l'écoulement dans les exutoires des rivières côtières de Seine - Maritime. Ouvrage de rejet en mer. Rivière La Durdent* (Study on a model of the flow in the fish outlets of the coastal rivers of the Seine Maritime. Sea gate. La Durdent River) . Rep. 436. 3, 38 p.
- I. M. F. T. , 1990. *Port du Tréport. Etude sur modèles réduits d'une passe à poissons de l'évacuateur de crues du chenal de restitution* (Le Tréport harbour. Study on models of a fish passage facility at the spillway of the control channel). Rep. 452. 1, 65 p.
- KATOPODIS C. 1984. Drainage design considerations for fish passage. Proc. of 3rd Annual Western Provincial Conf. Rationalization of Water and Soil Research and Management. Manitoba Water Resources Branch; 347 - 376.
- KATOPODIS C. , ROBINSON P. R. SUTHERLAND B. G. , 1978. A study of model and prototype culvert baffling for fish passage. Fisheries and Marine Serv. , Tech. Rep. 828, 78 p.
- KNIGHT D . W. , MCDONALD J. A. , 1979. Hydraulic resistance of artificial strip roughness. J. Hydr. Div. , 105 (HY6): 675 - 690.
- LARINIER M. , CHORDA J. , 1995. *Prise en compte de la migration du poisson lors de la conception des ouvrages de rétablissement des écoulements naturels dans les aménagements routiers ou autoroutiers* (Fish passage design at road and motorways crossings) .GHAAPPE Rep, 95.01, 11 p.
- LARINIER M. , CHORDA J. , FERLIN O. , 1995. *Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs. Etude expérimentale* (Rock weirs for migratory fish passage. Experimental study) GHAAPPE/HYDRE Rep. 95.05, 25p.
- MCKINLEY W. R. , WEBB R. D. , 1966. A proposed correction of migratory fish problems at box culverts. Fish. Res. Pap. , 1 (4): 33 - 45.
- RAJARATNAM N. , KATOPODIS C. , 1989. Hydraulics of culvert fishways II: slotted - weirculvert fishways. Can. J. Civ. Eng. , 16 (3): 375 - 383.
- RAJARATNAM N. , KATOPODIS C. , 1990. Hydraulics of culvert fishways III: weir baffle culvert fishways. Can. J. Civ. Eng. , 17 (4): 558 - 568.
- RAJARATNAM N. , KATOPODIS C. , LODEWYK S. , 1988. Hydraulics of offset baffle culvert fishways. Can. J. Civ. Eng. , 15 (6): 1043 - 1051.
- SAYRE W. W. , ALBERTSON M. L. , 1961. Roughness spacing in rigid open channels. J. Hydr. Div. , 87 (HY3): 121 - 150.
- WATTS F. J. , 1974. Design of culvert fishways. Dept. Civ. Eng. , Univ. of Idaho, USA, 62p.



照片 1 涵洞下游出口视图，显示洄游鱼类遇到的问题：
悬空的出口、高速水流和涵洞中水深不足



照片 2 下游视图显示洄游鱼类遇到的问题：
高流速及湍流



照片 3 涵洞下游出口视图，显示洄游鱼类面临的问题：
悬空的出口、高速水流



照片 4 “偏移”挡板



照片 5 拱形涵洞中的矩形挡板



照片 6 拱形涵洞中的 V 型挡板



照片 7 溪流的自然断面在这个高速公路的涵洞中被保留下来



照片 8 在低流量时期，岩石堰可能是鱼类无法通过的障碍



照片 9 Adour 河（比利牛斯）上阶梯式排列的石槛结构



照片 10 故意制造的低坡度，以便鱼类通过



照片 11 Arques 河（Dieppe）的防潮水闸



照片 12 Tréport 河的河口坝概况，显示鱼类可以在低潮时到达前拦河堰下方的鱼道入口，泄水闸在右侧

第九章 西鲱鱼道的设计

M. LARINIER^① F. TRAVADE^②

1. 引言

一直到近几年,法国的大部分过鱼设施对阿勒斯西鲱 (*Alosa alosa*) 证明是无效的或者是效率很低的。在存在西鲱的河道中修建大坝导致这个种群在大坝上游的支流中极为罕见,甚至消失。这种现象不只发生在法国。1923年渔业局的委员关于美洲西鲱 (*Alosa sapidissima*) 的问题致函联邦电力委员会,称“美洲西鲱是否会在任何高度的鱼道中上溯非常值得怀疑”。直到1955年,哥伦比亚河 Bonneville 坝上的两条大型鱼道(宽约10m)才被认为是北美大陆这一物种有效的设施。这两条鱼道占水电站总建设成本的约10% (DALLEY, 1980)。

综合对两种西鲱(阿勒斯西鲱和美洲西鲱)获得的鱼道设计经验似乎是合适的,因为在法国和北美做的所有观察表明其洄游行为非常相似。

2. 西鲱的游泳能力和洄游行为

2.1 游泳能力

尽管西鲱游泳能力较好,但仍低于鲑鱼和海鳟。野外观察表明,当要通过的距离超过数十米时,约2m/s的水速将会使许多西鲱难以通过 (CTGREF, 1981)。

在Loire河上的St. Laurent - des - Eaux堰观察并估计了鱼类的爆发速度 (LITAUDON, 1985)。在温度16~17℃时,不同个体的游动速度在3.1m/s和4.7m/s之间,且仅能持续短暂时间(约6~7s)。美洲西鲱仅能持续几秒的最大游泳速度,估计在4.1m/s和6.1m/s之间。

这些数值与关于美洲西鲱的记录数值相似。在长约30m、流速在3.5m/s和4.15m/s之间的水道中,对8000多尾美洲西鲱的游泳情况进行的观察 (WEAVER, 1965) 结果表明:在鱼类自主无干扰游动的前提下,没有一尾西鲱能够通过整个水道,且西鲱上溯所达到的平均距离与流速成反比。水道中的流速分别为3.5m/s、3.85m/s和4m/s时,西鲱达到的平均游动距离分别为9m、7.1m和5.7m,而这是在最有利温度条件(21℃)下获得的。通过比较,游泳能力与大西洋鲑相当的硬头鳟全都毫无问题地通过整个水道。基于这些数据,大多数西鲱的最大游泳速度在4.3m/s和4.6m/s之间,有大约10%的个体的爆发速度低于3.8m/s或大于4.9m/s。

从BEACH (1984) 提出的从大西洋鲑转置到西鲱(考虑到西鲱的大小和形态)的模型,可获得不同温度下的曲线,这与在野外做的观察一致。在20℃时,不同大小的个体最大游泳速度在4.0m/s和5.4m/s之间,相应的耐力在5和16秒之间。低于20℃时,最大速度大大下降。例如,在15℃时,在3.5~4.3m/s之间。根据鱼类个体体长的不同,巡航速度的上限在0.8m/s和1.4m/s之间。

^① CSP - CEMAGREF, GHAAPE - Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France

^② Electricité de France - Research & Development, 6 Ouai Watier, 78401 CHATOU Cedex - France

约 3.5m/s 至 4m/s 的流速和几米长距离的障碍物便会对西鲱的洄游造成阻碍。而障碍物处上下游水位差约 1m 时就足以造成这样的流速。这意味着，即使是中等高度的障碍物也可能造成西鲱洄游的严重障碍，尤其当水流是“跌流”时。下面将对这做进一步解释。

简而言之，西鲱可通过的最大距离是：在 3.25m/s 的水流中少于 3m；在 3m/s 的水流中为 5m；在 2.5m/s 的水流中约为 10~12m。而在最适温度条件下，上述的流速增加 1m/s 时，西鲱也可游动与上述相同的距离。

2.2 迁移行为

美洲西鲱倾向于在水面上层行动并在通过潜孔时有些犹豫，因此必须在鱼道中提供表面通道。

美洲西鲱也是成群移动的，这种行为要求过鱼设施必须尽可能宽，以免分散鱼群。

如果诱捕西鲱的空间过小，即便在短时间内，也会导致很高的死亡率。

美洲西鲱似乎需要一个确定的水流来确定游向。在静止或非常湍急的水体中，该鱼种会失去方向，它们似乎喜欢层流、连续流，即使流速较大。在任何情况下，它们似乎有意避免湍流或气体含量较多的区域（跌水下游漩涡、水跃、涡轮机尾水和汹涌的水流）。在这些区域，它们的运动和定向比鲑科鱼类更加困难。

与多数鲑科鱼类不同，西鲱不跳跃，一般仅游过障碍物。鉴于这一原因，它们通过“跌流”有很大的困难。在跌流的表面逆流中，它们往往头朝下游定位，容易迷失方向。

许多观察表明，西鲱很容易在角落里或在鱼道水段突然扩张引起环流区被困。一些对美国的美洲西鲱和法国的阿勒斯西鲱所做的观察（C. T. G. R. E. F.，1981）证实了这一点。因此，必须尽可能确保沿墙提供通道，并且尽可能使环流区容量最小，同时必须防止水池间的短路现象。

西鲱在过鱼设施中的行为特征是频繁后退。这可能导致当鱼群发现自己被困时，整个鱼群向下游游动。这可能发生在一段水流突然改变时造成具有垂直中心轴的环流区域或鱼道方向突变的地方，或由潜孔引发的具有水平轴的环流区。

目测及无线电跟踪研究表明，在障碍物底部时，西鲱的活跃性比鲑科鱼类低得多，它们倾向于在“舒适区”逗留相当长的时间，也因此延迟了整个迁移的时间。

美洲西鲱似乎对光线的突然改变非常敏感，因此有必要给鱼道的地下部分安装照明，或者给设施中有阴影或光线暗的区域增加照明。

3. 水池型鱼道

如果采用特殊设计标准，水池型鱼道对西鲱可能是更高效的。

鱼道中的流动必须是“连续的”而非“跌入的”，因为西鲱根据表面流确定自己所在方位，并且不会跳跃。

不应设置深潜孔，因为西鲱往往容易在潜孔出口处的逆流中被困，故潜水管的位置必须很低。在美国西海岸一些带有潜孔的控制渠段，在引起堵塞和鱼类死亡后不得不废弃（MONK et al.，1989）。在 Garonne 河 Bazacle 大坝挡板鱼道上游的水池控制段中也观察到西鲱在通过大坝时受到阻碍（DARTIGUELONGUE，1990）。

必须保证鱼沿侧壁通过，且必须避免设施中间的槽口和竖缝。提供至少一个垂直竖缝或侧槽孔，但最好在设施的两侧各提供一个。

尽可能避免大环流区的存在，因为鱼类往往在此处被困（Farmington 河上的虹鳟鱼道、Connecticut 河的 Tumers 瀑布及 Dordogne 河的 Tuilières）。特别是对于一些水流方向变化较多的水池型鱼道，由于这些水池容积较大，流态特殊，在一些环流难以清除的区域，可采用“引导”栅格避免西

鲱进入 (DARTIGUELONGUE et al. , 1992)。

西鲱往往成群游动，因此必须保证鱼道尽可能宽并且有足够的流量以免分散鱼群。

槽孔或竖缝的最小宽度必须为 0.45~0.50m。

水池必须足够深（最浅 1.2m），并且限制紊流速度及水体含气量，最大的单位容量消耗能应为 $150W/m^3$ 。

水池间水头落差应不超过 0.3m。最好采用 0.20~0.25m 的较低水头差，因为这些都是“连续流”容易产生的条件，并且便于设置较宽的鱼道设施（竖缝或槽孔）。

在达到上述设计标准后，该设施将是一个大型鱼道设施，它的承载流量大于 $1m^3/s$ ，多数的水池容积大于 $12m^3$ 。

下面列举几个对西鲱（图 1）有效的过鱼设施：

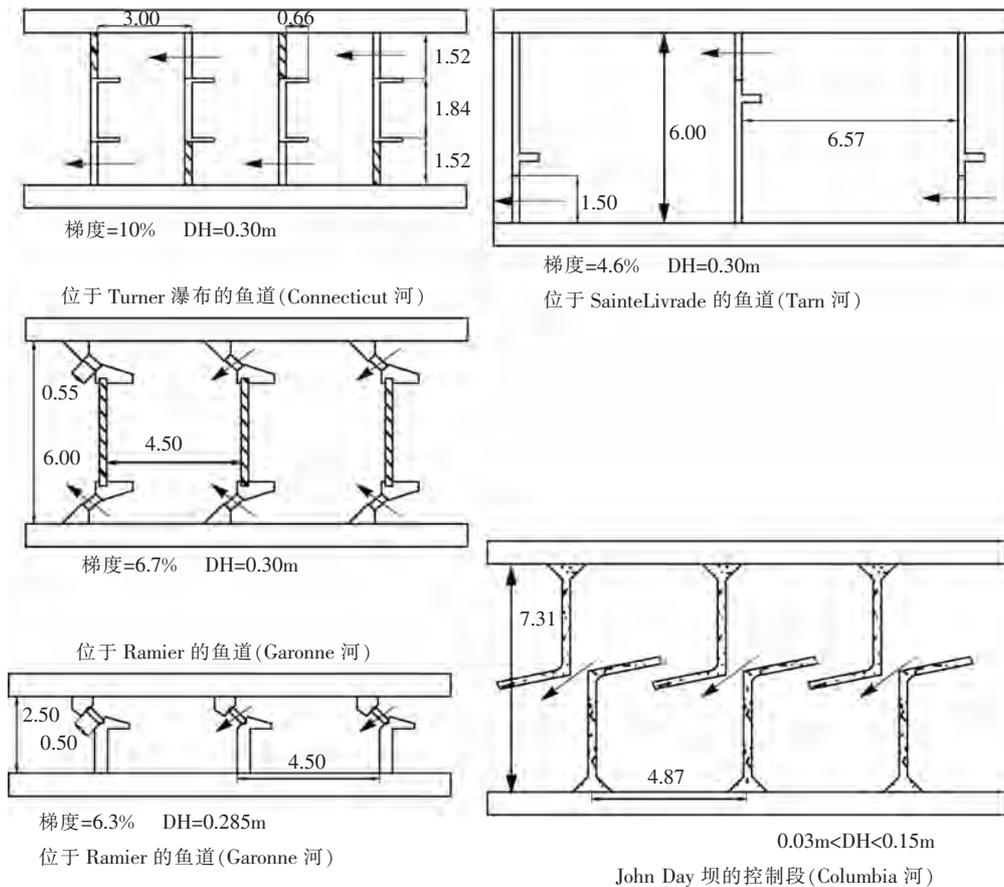


图 1 西鲱使用的水池型鱼道

- 美国哥伦比亚河 (Bonneville, John Day 等) 和康涅狄格河上港口型鱼道 (Turner 瀑布) 规定了溢流堰顶部的水头约为 40cm，并产生了连续流 (RIDEOUT et al. , 1985)。在水池长度相对较短的情况下，将水头从 0.30m 增加到 0.40m 意味着在交叉处的槽口，每隔一个需关闭，以防止短路水流的出现，这有助于降低水池中的紊流速度。

- 0.55m 宽的双竖缝鱼道 (Dordogne 河的 Bergerac 鱼道、Gave de Pau 河上的 Puyoo 鱼道)。

- 单竖缝鱼道或单侧深槽孔鱼道，使得连通装置有足够的宽度，约为 0.45~0.50m (Garonne 河上的 Ramier 坝和 Bazacle 坝，Tarn 河上的 Sainte - Livrade 坝，Aveyron 河上的 Arduis 坝)。在这类竖缝鱼道中，要尽可能减小长-宽比，或者将水流适当地导入进水水池并流向侧壁下游 1/3 处，竖缝基石的高度也必须尽可能降至最低。

● 在某些大型设施中使用的带控制段的“Chicane”型鱼道（Connecticut 河 Vernon 坝、哥伦比亚河 Bonneville 坝，MONK et al.，1989）。这类鱼道的最大优点是几乎完全没有大的环流区。但是，这类鱼道需要较低的水池间水头差（最大约 15cm），这意味着要建造大型鱼道才能充分消散能量。

4. 挡板鱼道

虽然供西鲱使用的挡板鱼道在法国、美国和加拿大等国家都有使用，但是仍然难以评价这类鱼道的过鱼效率。

观察资料非常清楚地表明，西鲱通过具有挡板鱼道特征的螺旋流时的困难比鲑科鱼大得多。

在 Narraguagus 河曾监测到数百条西鲱使用平面挡板鱼道（坡度 13%，宽 1.22m，长 12m）（DALLEY，1980）。

事实证明 Rhône 河 Beaucaire 处的平面挡板鱼道（两段游动区段的坡度分别为 8% 和 19%，宽 1.3m，总长 40m）对西鲱无效（C. T. G. R. E. F.，1981）。然而，这一设施的失效不能仅归因于鱼道的水力状况，也可能包括以下因素：

- 在不影响效率的情况下很难进行鱼道监测；
- 鱼必须通过一个整体隧道和鱼道上游的黑暗段；
- 无助于将鱼导向鱼道入口的非常湍急的辅助流。

然而，最重要的因素是鱼道的吸引力低（入口位置不良，入口离障碍物 1 500m）。

每年，几千尾西鲱到达位于图卢兹的 Bazacle 坝。该坝安装有具垂直竖缝的水池型鱼道和三段长度各为 12m 的游动区段的 V-型挡板鱼道（坡度 17%，宽 1.50m）（DARTIGUELONGUE，1991，1992）。然而，使用挡板鱼道的西鲱仅占过坝西鲱总数的很小比例（约 1%），绝大多数使用水池型鱼道。水池型鱼道入口位置较好无疑是两种鱼道效率差异的一个主要因素。

在一个流入 Rhône 河的小型侧向水道上，在一个高 1.8m 的水文测量堰处，对一个 V 形挡板的试验性鱼道（坡度 16%、宽 1.8m、长 10m、挡板横截面 0.10×0.10m）进行了测试。单位流量在 300 和 750L/s/m 之间时，经计数 350 多尾西鲱通过了该鱼道。然而，实际效率与鱼道入口处的水力状况非常密切相关。西鲱仅在其被引导网导向鱼道时才使用该鱼道。在没有引导网的情况下，西鲱宁可远离鱼道入口处的湍流区，并且呆在障碍物的底部。

在 Douve 河（诺曼底），最近修建的 V 型挡板鱼道成功地使小群西鲱通过了低障碍物（RICHARD. comm. pers.）。

在同一地点，已进行了几个试验来比较挡板鱼道和水池型鱼道各自的效率。

在加拿大（CONRAD，私人通信），试验表明，西鲱宁愿使用平面挡板丹尼尔鱼道，而非位于附近的水池型鱼道。这一结果可能是因为，一方面挡板鱼道的吸引力大些（流量大得多），另一方面水池的尺寸较小。这就使挡板鱼道比水池型鱼道更加适合西鲱通过。

在美国，Bonneville 实验室进行了多次试验，研究利用挡板鱼道将洄游鱼类从水池型鱼道导向磁检测装置的可能性（SLATICK，1975）。受试鱼道是阿拉斯加型鱼道（坡度 24%，总宽 0.56m，净宽 0.35m，长 8m），满负荷时最大流量为 160L/s。这些试验表明，西鲱比鲑科鱼类进入设施更加勉强。然而，假如给西鲱足够的时间且设施入口和出口处的水力状况合适，大部分西鲱会使用这种鱼道。特别是，当鱼被引导栅栏导向鱼道入口时，将获得最佳的过鱼效果。在水池型鱼道（具中缝和“跌流”）和挡板鱼道间进行选择时，所有西鲱和大部分鲑科鱼选择后者。

必须非常慎重考虑关于挡板鱼道和水池型鱼道比较效率的结果，这些结果总是有利于前者，因为水池型鱼道较小，且其水流流态主要为西鲱不喜欢的“跌流”。如果水池型鱼道扩大一些，使用与挡板鱼道相当的流量，尤其是如果它们具有“连续流”，结果将大大不同。

5. 升鱼机和鱼闸

在一个小体积水体里诱捕西鲱，即使时间很短，也可能导致相当高的死亡率。因此，在为西鲱设计升鱼机时，得在一个每尾鱼预定有最小水容量（30L/尾西鲱）的大暂养池中诱捕鱼（最小尺寸约为 $5\text{m}\times 2.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ）（TRAVADE 等，1992）。

这通常需要提供一机械赶鱼栅，该装置横向运行，并在提升操作开始前将鱼推赶并困在提升水箱上面的空间。必须根据每尾西鲱约 10L 水的标准，计算水箱的最小容积。

升鱼机的技术要求（暂养池和水箱的容积，水箱提升的最大频率）必须考虑西鲱洄游每小时的高峰次数，变动范围大约是年均总通过量的 1% 至 2.5% 之间（CHANSEAU 等，2000）。

升鱼机格栅网目的净间隔不得大于 2.5~3.0cm。

必须将辅助流的大部分（如速度允许，可以是全部水流）喷入水箱上游。暂养池单向安全装置入口处的流速必须在 1m/s 左右。

上游转运渠道的最小宽度必须为 1.5m，最低流速 0.30m/s。

传统“Borland”闸的用途是有限的，因为其效率高度依赖于物种的行为。然而，倘若闸能在自由水面运行（像一个通航船闸），且暂养池足够长、有足够的容积，在坝的水头落差适中的地方及其他办法不可行时，是能够使用 Borland 闸的。务必在倒空阶段产生速度足够的表面流，引诱鱼游出。

倘若船闸的运行适合于西鲱的行为，可使用船闸过鱼。必须在船闸的下游引渠中创造足够的吸引流，闸满负荷引诱西鲱出闸进行上溯时必须产生相当高的速度。在 Rhône 河，经常使用船闸使西鲱顺利通过，其作为鱼类设施的操作方式与对通航要求的操作方式是不一致的。因此，洄游期间仅允许闸的几个日常操作。

美国北卡罗来纳州最近使用声波跟踪来评价美洲成体西鲱通过开普菲尔河上船闸的效率。通过率从 1997 年的 18% 增加到 1998 年的 61%。在低水流期间，鱼道效率可以通过一些方式增加，包括通过增加从鱼闸入口射出的吸引水流，在一天内尽可能多的运行船闸，以及关闭较低的闸门以便使鱼进入后更好的保持在闸室中（MOSER 等，2000）。

6. 西鲱鱼道的吸引力和设置

与鲑科鱼类鱼道相比，西鲱鱼道在鱼道的定位、入口的选择和障碍物处吸引力的质量（用入口处的流速、下泄流量和水流流态表示）方面的要求苛刻得多。

一般，西鲱对障碍物脚下区域的探查比鲑科鱼类少得多。如果鲑在某些情况下仅一个入口就能获得良好的通过率，这不适用于西鲱。在电站宽超过 20m 的地方，要保证满意的效率，集鱼廊道必不可少。经验表明，若只能设置一个入口，为了设法使西鲱发现和进入鱼道，涡轮机运行时通常必须非常小心，在 Garonne 河的 Bazacle 电站和 Dordogne 河的 Mauzac 电站就是这种情况。

主要入口必须沿着河岸，并且入口处的流速必须较高（约 2m/s）。

在任何辅助吸引水流上都必须安装栅栏，防止鱼转向进入吸引流，并保证鱼被导向鱼道入口。

7. 西鲱鱼道的效率

西鲱鱼道的效率总是低于鲑科鱼类鱼道。在鲑科鱼道中，效率高达 95%~100% 的并不稀罕。对于西鲱鱼道，75% 的效率是异常的，50% 是优秀，遗憾的是，10% 至 20% 则很常见。

但是，即使在最有利的环境下，在同一条河流附近的多个障碍物皆设置很好的监测装置，也很难

评估设施的真实效率，因为在不同障碍之间没有发现最适合繁殖的区域。

在 Merrimack 河（美国东海岸）第一和第二个障碍，两者相距约 15km（Essex 和 Pawtucket）处，西鲱通过一个电站再通过另一个，平均通过的百分比大约是 10%。通过率变动于最小 3%和最大 23%之间（STOLTE, 1991）。

在 1989 年到 1996 年间，通过 Garonne 河的 Golfech 升鱼机后使用 Bazacle 鱼道（位于上游约 100 千米处）的西鲱的比例变动在 6%和 34%之间（平均 18.5%）。1990 年，通过 Bazacle 鱼道后使用位于正上游的 Ramier 鱼道的西鲱的百分率超过 70%（DARTIGUELONGUE, 1990）；这一特别高的百分率与有利的水文条件有关（Garonne 河流速非常低）。这使得鱼道入口非常具有吸引力。

在 Dordogne 河，通过安装在下游 15km 处的 Tuilières 升鱼机中观察到的数字，其中约有 6%到 56%的西鲱使用 Mauzac 水池型鱼道。比例变化之大可能主要有二个原因。一是在洄游期间 Dordogne 河河水量的变化（低流量期间通过率较高），二是 Kaplan 涡轮机对 Mauzac 鱼道入口处下泄流或多或少有些干扰作用。

西鲱鱼道的运行效率有限意味着，可以预见在同一条河流中已有一系列障碍物的地方，特别是所有产卵区都在那些障碍物的上游时，要恢复主要种群仍是相当困难的。

参考文献

- BARIL, D., 1988. *Etude des conditions de franchissement par l'aloise (Alosa ficta rhodannensis) d'une passe à ralentisseurs de fond expérimentale (site expérimental de Beaucaire)* (Study of the conditions for the passage of shad (*Alosa ficta rhodannensis*) in an experimental floor - baffle fishway (experimental site at Beaucaire) . Conseil Supérieur de la Pêche Rep. , 35 p.
- BEACH M. H. , 1984. Fish pass design - criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. Ministry of Agriculture Fisheries and Food, Lowestoft Fish. Res. Tech. Rep, 78, 45 p.
- CHANSEAU M. , DARTIGUELONGUE J. , LARINIER M. , 2000. *Analyse des données sur les passages enregistrés aux stations de contrôle des poissons migrateurs de Golfech et du Bazacle sur la Garonne et de Tuilières sur la Dordogne* (Analysis of fish passage at the monitoring stations of Golfech and Bazacle dams on the Garonne river and Tuilières dam on the Dordogne river) . GHAAPE/MIGADO Rep. RA00, 02, 64p.
- C. T. G. R. E. F. , 1981 . *Migration des aloses dans le bas - Rhône. , observations effectuées en 1979 et 1980.* (Migration of shad in the lower Rhône; observations made in 1979 and 1980) . Unpublished Rep. 10 p.
- DALLEY P. J. , 1980, A review of fish passage facilities for American shad. Northeast Fish and Wildlife Conf. , Ellenville, New - York, 32 p.
- DARTIGUELONGUE J. , 1990. *Suivi de la migration de dévalaison et de montaison à la passe à poissons du Ramier au printemps 1990* (Monitoring the downstream and upstream migration at the Ramier fish passage facility in spring 1990) . SCEA Rep. , 41 p.
- DARTIGUELONGUE J. , 1991, *Contrôle du fonctionnement et de l'efficacité des passes à poissons installées au Bazacle en 1990* (Monitoring the operation and efficiency of the fish passage facility built at Bazacle in 1990) . SCEA Rep. , 31p.
- DARTIGUELONGUE J. , 1992. *Contrôle du fonctionnement et de l'efficacité des passes à poissons installées au Bazacle. Suivi de l'activité ichtyologique en 1991* (Monitoring the operation and efficiency of the fish passage facility built at Bazacle in 1990. Report on fish activity.). SCEA Rep. , 22p.
- DARTIGUELONGUE J. , LARINIER, M. , TRAVADE, F. 1992. *Etude du comportement de d'aloise dans la passe à poissons à l'usine de Tuilières sur la Dordogne* (Study of the behaviour of shad in the fish passage facility at the Tuilières power station on the Dordogne) . Conseil Supérieur de la Pêche - EDF Rep. , 55 p.
- LITAUDON, A. , 1985. *Observations préliminaires sur le franchissement du seuil de Saint - Laurent - des - Eaux (Loire) par l'aloise (Alosa a/osa)* [Preliminary observations on the passage of *Allis* shad (*Alosa alosa*) at Saint -

- Laurent - des - Eaux (Loire) weir] . EDF Rep. HE/31/85 - 37, 63 p.
- MOSER M. L. , DARAZSDI A. M. , HALL J. R. , 2000. Improving passage efficiency of adult American shad at low - elevation dams with navigation locks. N. Am. J. Fish. Man. , 20: 376 - 385.
- MONK B. , WEAVER D. , THOMPSON C. , OSSIANDER F. , 1989. Effects of flow and weir design on the passage behavior of american shad and salmonids in an experimental fish ladder. N. Am. J. Fish. Man. , 9: 60 - 67.
- RIDEOUT S. , THORPE L. , CAMERON L. , 1985. Passage of American shad in an Ice Harbor style fish ladder after flow modifications. Symp. on small hydropower and fisheries, Aurora, Colorado, 251 - 256.
- SLATICK E. , 1975. Laboratory evaluation of a Denil - type steep pass fishway with various entrance and exit conditions for passage of adult salmonids and American shad. MFR Pap. 1158, 17 - 26.
- STOLTE L. W. , 1990. Anodromous fish restoration programme, Merrimack river. U. S. Fish and Wildlife Serv. , Concord. , New Hampshire, Annual Progress Rep. 19 p.
- TRAVADE, F. , LARINIER, M. , TRIVELLATO, D. , DARTIGUELONGUE, J. , 1992. *Conception d'un ascenseur à poissons adapté à l'alose (Alosa alosa) sur un grand cours d'eau; l'ascenseur à poissons de Golfech sur la Garonne* [Design of a fish lift adapted for Allis shad (*Alosa alosa*) on a large watercourse; the fish lift at Golfech on the Garonne] . Hydroécol. Appl. , 4 (1): 91 - 119.
- WEAVER C. R. , 1965. Observations on the swimming ability of adult American shad (*Alosa sapidissima*). Trans. Am. Fish. Soc. , 94 (4): 382 - 385.



照片 1 Turners (美国康涅狄格河) 瀑布处的鱼类通过设施: 每隔一个关闭槽口, 增高水头以利于西鲱通过



照片 2 Puyoo 堰 (波河) 双垂直竖缝鱼道



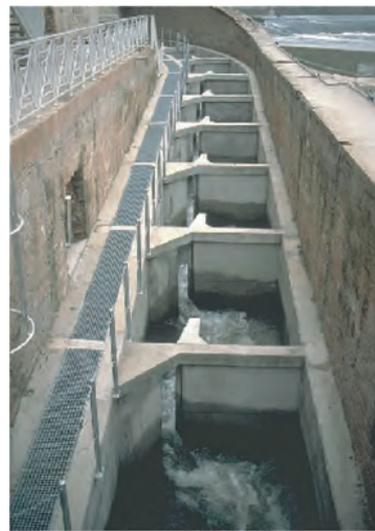
照片 3 显示 Dordogne 河 Bergerac 坝双垂直竖缝鱼道中流态的水工模型



照片 4 Sainte - Livrade 坝 (塔恩河) 的侧边槽口鱼道, 这个大型鱼道建在原船闸处



照片 5 Connectivut 河 (美国) Vernon 鱼道具垂直竖缝的控制段



照片 6 Le Bazacle (Garonne 河) 单垂直竖缝鱼道



照片 7 Rhone 河旁支渠道上的 V 型挡板鱼道。注意设置在下游将西鲱导向鱼道入口的网



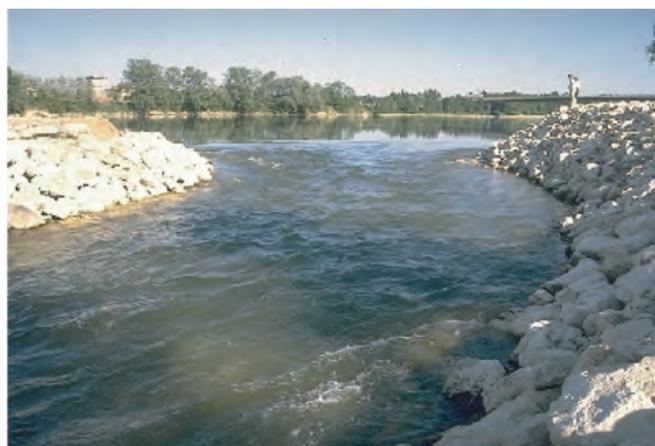
照片 8 Dordogne 河 Tuilieres 坝水池型鱼道。栅栏防止西鲱在环流区被诱捕



照片 9 Dordogne 河 Tuilieres 升鱼机



照片 10 Tuilieres 升鱼机监测站处观看西鲱通过 (Dordogne 河)



照片 11 Garonne 河 Beauguard 堰处的自然旁路水道入口

第十章 鳗鱼道

J. P. PORCHER*

1. 生物学要素

鳗鱼是数量最丰富的鱼类之一，例如鳗鱼占 Brittany 河流中鱼类生物量的一半，但是近几年有种群衰退的趋势（渔业和资源调查渔获量减少）。1994 年法国在 Poitevin 沼泽修建了第一条鳗鱼鱼道。鳗鱼鱼道必须考虑其生物学的各个方面及其很弱的游泳能力。鳗鱼鱼道与传统鱼道颇不相同，尽管后者能适应不同种类生活史不同阶段的要求。

1.1 淡水环境的殖民

不同于其他迁移鱼类向河道上游运动是为了索饵，鳗鱼向上游是为了占据领地，并且涉及该物种的幼鱼（幼鳗和小黄鳗）。

因此，在河流集水区下游端洄游鱼类的数量不像鲑鱼一样的几千上万条，而是数百万条。

1.2 洄游阶段的剧烈变化

殖民始于体长约 70mm、平均体重约 0.3g 的幼鳗进入河口时。可分为两个连续洄游阶段：

- 利用水流的被动洄游。在洄游季节的初期，幼鳗没有定向主动游泳的能力。它们随着涨潮做溯河运动，并在退潮期间将自己埋在沉积物中。

- 主动洄游。约从 3 月份起（在欧洲），幼鳗获得了游泳和爬行的能力，能够主动前进并通过若干障碍物。这个阶段一直持续到夏末。鳗鱼在淡水环境中殖民的阶段，延续至鱼被称为“小”鳗或“黄”鳗的年龄较大阶段。因此洄游鳗鱼的大小可变动在 10cm 至 40cm 以上之间。

黄鳗的洄游活动是季节性的。它与每年的温度变化（4~9 月，最活跃在 5 月和 7 月间）相符合，并允许洄游的鳗鱼在整个流域渐进式殖民。

障碍物处保证自由通过的设施必须考虑下列因素：

- 需要在有限时间内通过很大数量的个体；
- 洄游鳗鱼的平均大小，从下游到上游集水处逐渐增加。

1.3 游泳能力和洄游障碍物的类型

虽然关于鳗鱼的游泳能力没有很多可利用的数据，但现有的研究表明，其游泳能力弱于其他种类。引述的幼鳗最大游泳速度变动于 0.60m/s 到 0.90m/s 之间。McLEAVE（1980）研究了幼鳗（长度在 6.9cm 和 7.5cm 之间）的游泳性能，并证明其通过层流的能力非常有限。在 0.30m/s 的水流中行进的最大距离大约 3m，在 0.5m/s 的水流中降至约 30cm，并且高于 0.50m/s 的水流是无法通过的。

文献中给出的关于亚成鳗最大游泳速度的惟一数字是，在温度为 10°C 到 15°C 之间时，一尾长

* Conseil Supérieur de la Pêche, DR 2, 84 Rue de Rennes, 35510 CESSON SÉVIGNÉ France.

0.60m 的鳗鱼的最大游泳速度是 1.14m/s (BLAXTER and DICKSON, 1959)。因此, 鳗鱼很可能被不阻挡其他洄游种类的障碍物阻挡, 特别是:

- 跌水, 甚至低跌水 (几厘米) 都可能是不可逾越的;
- 涵洞或堰, 即使水流速度缓和, 没有多样性水流的条件下, 过鱼通道也会受妨碍。

因此, 阻碍鳗鱼洄游的障碍物的类型是特定的。偶尔观察到幼鳗在潮湿表面爬动越过垂直障碍物洄游, 并且鳗鱼出现在与河网隔绝的池塘中, 导致障碍物对洄游的影响长期被低估。无论场面可能多么壮观, 鳗鱼在没有提供设施的潮湿表面攀爬的能力常常是不牢靠的。就洄游鳗鱼的大小而论, 用这一方式通过是非常具有选择性的, 在很大程度上取决于水流的流量, 几乎在所有的情况下, 仅允许数量可忽略不计的个体继续洄游。

虽然鳗鱼有时能利用粗糙表面上的或被植物覆盖的微弱的水流, 如在以前磨坊处的面朝下游倾斜的溢流堰, 多种情形危害鳗鱼的通过。这些包括占据水流整个宽度、具有形成跌水或梯度断裂或引起高速流动的垂直光滑表面 (混凝土或金属材料) 的所有障碍物。

1.4 降河洄游的特殊问题

当青年鳗鱼性成熟时, 降河迁移的阶段便开始发生作用。一般从第一个秋天大水开始时, 在河道进行降河迁移。鳗鱼一般在夜间迁移, 且以相当被动的方式随主流行进。这些特征, 再加上大型的个体尺寸, 使它们在通过水利设备时特别容易受到伤害。涡轮机可能引起高死亡率, 但是尚无使鳗鱼偏离涡轮机的有效方法。然而, 最近在荷兰进行的关于进水口和渔业方面的工作证明, 即使在非常混浊的水中, 采用光的排斥效应能有效地使鳗鱼转向 (HADDERINGH et al., 1992)。尽管这提供了某种可能性, 但是仍需要具体的试验来确定何时和如何才能在不同类型的电站操作上使用这一方法。

2. 通过障碍的不同方式

2.1 河口设施的运转

这个技术可能应用在位于河口的一些阻碍, 并且运行以防止盐水侵入或洪水泛滥 (河道中流量很高时, 下游同时为高潮位)。在这些站点, 潮汐完全 (潮汐挡水板) 或部分被排除 (堰坝)。它们的运作方式 (在涨潮时关闭, 退潮时打开) 完全地阻挡了幼鳗迁移, 因此幼鳗会集中在障碍的底部。因为在河口低的区域幼鳗的迁移是被动的, 它们只是在最近到达那里, 过鱼设施的供应只部分解决问题。这是因为在幼鳗开发游泳或爬行能力之前, 过鱼设施无法发挥功能。

为了防止洄游完全被阻拦, 在涨潮期间可以做一些允许某些种类上溯洄游的安排。允许限量的海水通过, 或穿过或溢流过一个受控的结构通过障碍。闸门的开启在时间安排上必须与夜间涨潮非常精确地相符 (LEGAULT, 1990)。因此建议操作的效率必须被周期性的监测, 这一效率可以通过测量当前在堰坝上溯通道中幼鳗的密度得到。

设施运行时, 允许盐水在每次高潮时逆流通过设施, 因为它也有助于保持河口的盐分梯度。这使洄游鱼类能逐渐适应广盐性环境, 从而防止那些生理不能适应盐度突然变化的鱼类出现死亡。

2.2 通过传统类型的鱼道

由于鳗鱼的游泳能力有限, 通常不能设想鳗鱼能通过为其他种类设计的鱼道, 特别是对于较小的个体而言。深凹口或垂直竖缝鱼道 (不跳跃即能通过) 或池间水位差不太大的水池型鱼道, 可以允许这种鱼通过。然而, 由于在鱼道中使用的诱捕鱼设施一般不适合于捕获像鳗鱼这么细的鱼, 所以关于这一课题的研究尚未进行过。通过玻璃窗观察显示, 鳗鱼能利用与边界层关联的低流速区域、紊流区域和有非均匀性水流的高流速区域。改良设计 (例如在凹口最深处采用刷子一类的装置) 可以提高鳗

鱼的通过率。在瑞典，在垂直竖缝鱼道中使用刷子提高了七腮鳗的通过率（LAINE et al.，1998）。对于鳗鱼使用这些设备的好处仍需试验验证。

2.3 幼鳗和黄鳗专用鱼道

鳗鱼在潮湿、粗糙表面攀爬的能力已经被用于专门为幼鳗和黄鳗建造过鱼设施。在洄游鳗鱼聚集的附近区域提供装备有合适攀缘介质的斜坡，便于鳗鱼通过障碍物。各种各样的配置（坡道，输送沟渠，管子等）被广泛的安装在鱼道上（RIGAUD 等，1989）。

3. 幼鳗和黄鳗过鱼设施的设计

3.1 设计原理

为幼鳗和黄鳗设计的鱼道由两部分组成（图 1）：

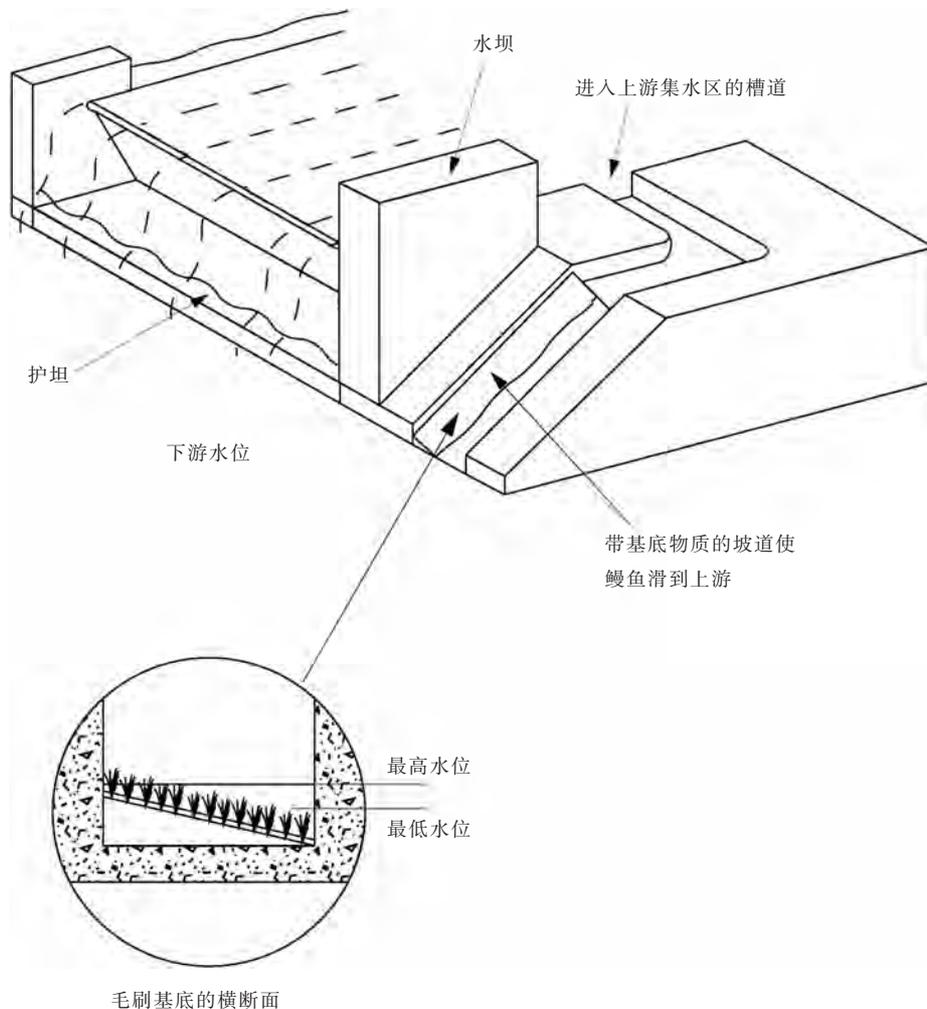


图 1 幼鳗鱼道示意图

- 上坡，下段淹没在下游水中。该坡覆盖以合适基底便于行进。基底的性质各不相同，视地区或国家而定。利用从上游蓄水自流供给的水或洒水，使基底永远保持潮湿。保持表面潮湿的小水流（几升/分）和注入斜坡底部的另一个较为明显的水流汇集，将洄游的鳗鱼吸引到鱼道入口；

● 上游段，设计这一段是为了让洄游的鳗鱼容易到达上游水位。可以通过不连续的供水，或通过提供能将洄游鳗鱼冲回下游的高速水流，创造一个对迁移不造成任何障碍的过渡区段。

3.2 斜坡

在法国或其他国家，鱼类通过设施使用的斜坡宽在 0.20m 和 1m 之间，坡度一般在 5% 和 45% 之间。

基底差异很大，视国家而定。

基底的材料可能是天然的（小卵石、树枝、灌木或麦秆）或人造的（网或刷子等）。天然基底需要较频繁的维护并必须定期更换。

在法国，对刷面进行的试验（LEGAULT, 1991）表明，鳗鱼通过过鱼设施的性能取决于基底的尺寸和斜坡的坡度。应根据站点中洄游鱼类的大小选择这些因素。法国现在使用的刷子有两类（LEGAULT, 1993）。

- 对于幼鳗，每一束刷毛的间距是 7mm。
- 对于小鳗和黄鳗，间距是 14mm。

在海岸附近安装的鱼道，那里有各种不同大小的鳗鱼（幼鳗和小黄鳗），可以使用纵向并排的刷子斜坡，各排刷毛束都有不同的间距。

3.3 上游段

这一段的主要问题在于上游水位的波动。水位稍有下降都可能导致鱼类通过设施变干。另一方面，水位上升也可能导致对攀缘坡的过度供水，导致攀缘坡上的流速过高。

这个问题可以通过 3 种不同的方法解决：

● 攀爬斜坡有一个侧向梯度（图 1），这就允许它能承受上游水位的适度变化（大约 20cm），同时在一边保持适当流速的浅区域，从而使洄游鱼类通过。在上游水位变化较大时，可以采取多个比类斜坡放置在不同高度一起编组使用。在法国一项研究的第一个结果（VOEGTLE and LARINIER, 2000）显示，一个 50% 侧向梯度（1 单位垂直比 2 单位水平距）可以充分满足鳗鱼通过，同时承受上游水位的一些变化。

● 整个设施应低于上游水池最小水平位置（图 2），可以在闸门下铺设树枝层形成通道，并且降低局部流速。这个做法仅限用于上游水面变化缓和的情况下，并且它的效率还没有充分地估计。

● 斜坡的上游端位于高于上游塘最高水位的高度（图 3）。使用抽出的水喷洒来湿润斜坡。到达攀爬坡顶的洄游鱼类被冲下斜槽，滑入上游塘或暂养池。在这里，可将它们捕捉以便转运和计数。

3.4 场地勘测

鱼道吸引力的概念目前对鳗鱼不如其他种那么明确。能够做出的建议是鳗鱼鱼道入口的设置尽可能靠近障碍物，并且临近洄游鳗鱼到达的上游最高点。重要的是，附近要有一个为洄游鳗鱼提供暂养和休息的平静区域。

作为确定鳗鱼鱼道在障碍物处的正确位置的一个指南，应识别接近洄游鱼类的休息区和集合区。在安装永久设施之前，采用流动式鳗鱼诱捕设施进行一些测试，以证实入口的最佳位置。

鳗鱼经常出现在为其他种类通过而设计的鱼道附近。因此可以将两个过鱼设施结合，以利用此吸引力。可在另一类鱼道的侧面甚至内部设置鳗鱼坡（图 4）。

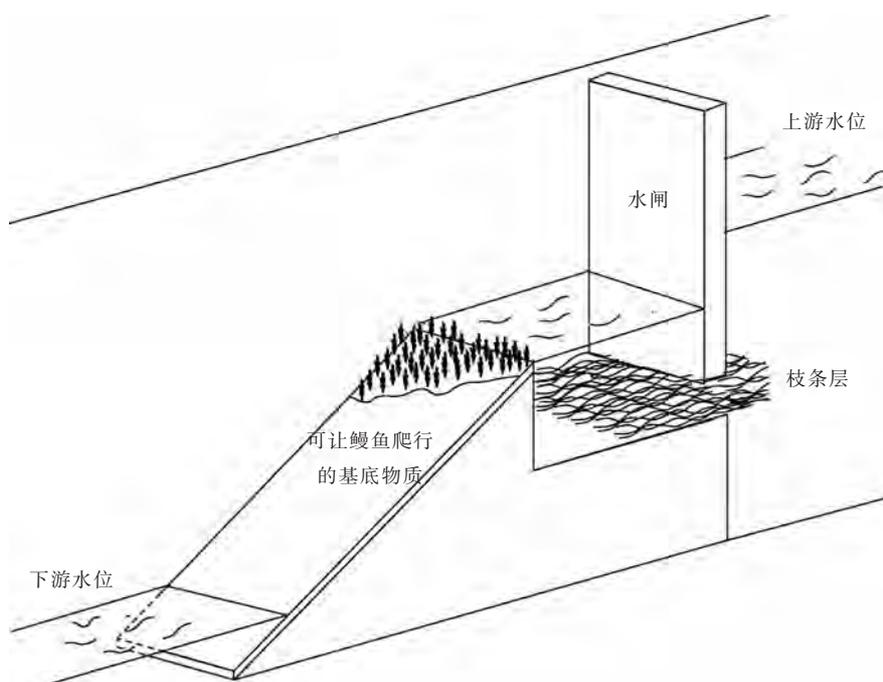


图2 水闸门下面加上树枝层以控制下泄水流及鳗鱼鱼道

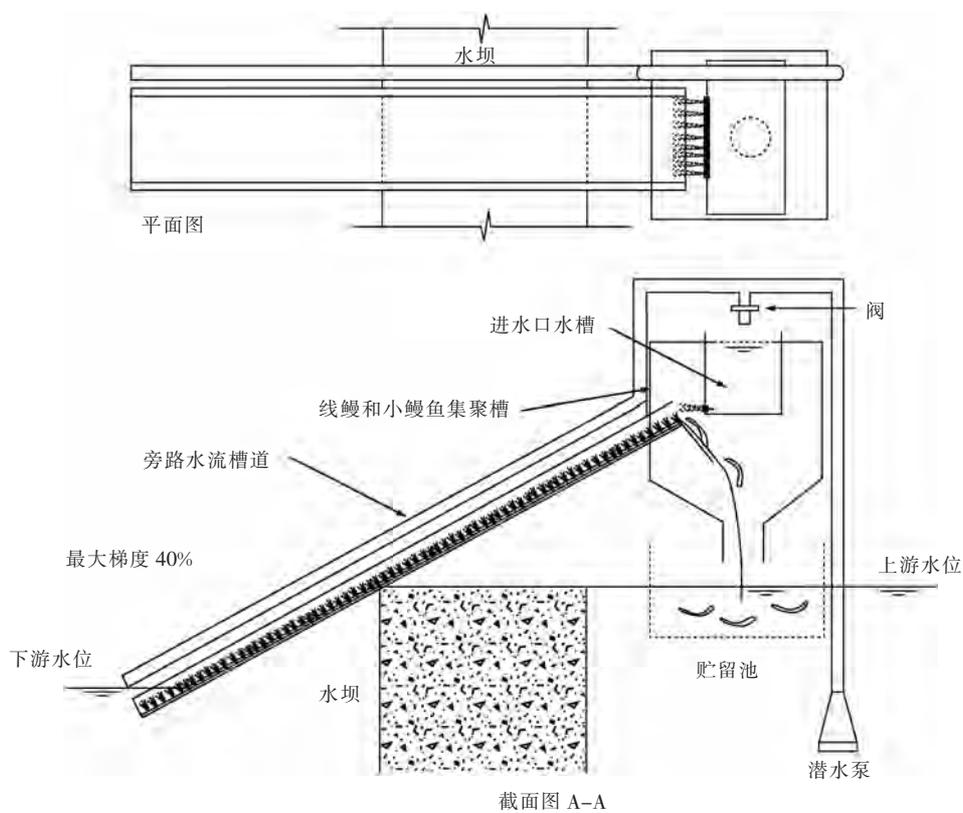


图3 配有上游诱捕池的幼鳗鱼道

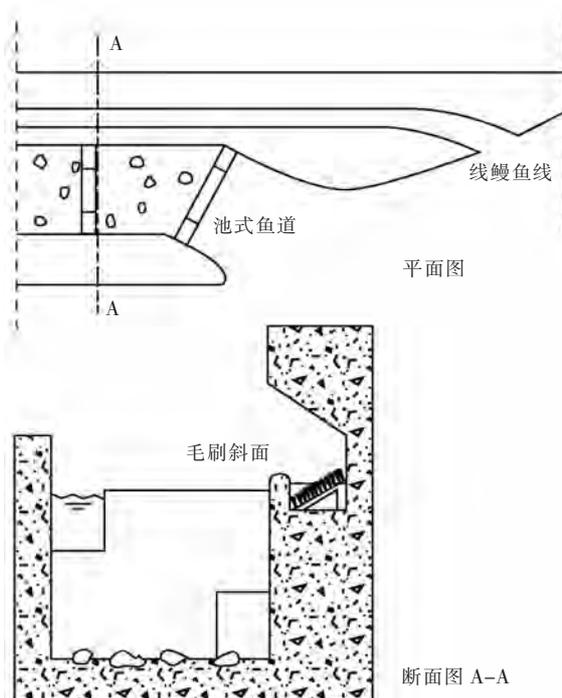


图4 结合幼鳗通道的水池型鱼道 (来自延斯, 1982年)

3.5 对现有技术的评论

尽管在户外修建了一些便于鳗鱼洄游的鱼道，但是几乎未对这类鱼类通过设施进行监测。在进行过研究的地方，这些研究也是不完善的。在法国，试验正在进行中 (VOEGTLE 和 LARINIER, 2000)，以比较各种基底 (刷子，混凝土块，地织物等) 对不同大小的鳗鱼的效率，且在不同的坡度 (从 15° 到 45°) 和上游水位条件下进行测试。

参考文献

- BLAXTER J. H. S., DICKSON W., 1959. Observations on the swimming speeds of fish. J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer, 24 (3): 472 - 9.
- HADDERINGH R. H., VAN DER STOEP J. W., HAGRAKEN J. M., 1992. Deflecting eels from water inlets of power stations with light. Irish Fish. Invest., 36: 37 - 41.
- McLEAVE J. D., 1980. Swimming performance of European eel (*Anguilla anguilla*) elvers. J. Fish. Biol., 16: 445 - 452.
- LEGAULT, A., 1990. *Gestion des barrages estuariens et migration d'anguilles* (Operation of estuary dams and eel migration). Int. Rev. Ges. Hydrobiol., 75 (6): 819 - 825.
- LEGAULT, A.; 1991. *Etude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles* (Study of some selectivity factors in fishways for eels). Bull. Fr. Pêche Piscic. 325; 86 - 91.
- LEGAULT A.; 1993. *L'anguille. Aménagement des obstacles à la migration* (The eel. Fish passage facilities at obstructions to migration). A. D. A. (Ed.) B. P. 24, 33610 CESTAS, 32 p.
- RIGAUD, C., FONTENELLE, G., GASCUEL, D., LEGAULT, A.; 1988. *Le franchissement des ouvrages hydrauliques par les anguilles (Anguilla anguilla). Présentation des dispositifs installés en Europe* (Passage at hydraulic plant by eels (*Anguilla anguilla*). Description of facilities installed in France.). Department of Halieutics publication 9, ENSA Rennes, 148 p.
- LAINE, A. KAMULA, R., HOOLI J., 1998. Fish and lamprey passage in a combined Denil and vertical slot fish-

way. *Fisheries Management & Ecology*, 5: 31 - 44.

VOEGTLE B. , LARINIER M. , 2000. Etude sur les capacités de franchissement des civelles et anguillettes. Site hydroélectrique de Tuilières sur la Dordogne (24) . Barrage estuarien d'Arzal sur la Vilaine (56) (A study of the climbing capacities of elvers and small eels at the hydroelectric installations of the Tuilieres on the Dordogne (24) and the estuary dam of Arzal on the Vilaine (56)) . GHAAPPE Rep. RA00.05, 69 p.



照片 1 Arguenon 河 Ville - Hatte 坝处的鳗鱼诱捕设施



照片 2 弧形闸门上的鳗鱼鱼道



照片 3 Arzal 坝（维莱讷河）上的鳗鱼鱼道



照片 4 Tuileries 坝测试鳗鱼攀爬基底的试验水槽



照片 5 在堰下游面协助小鳗通过的水泥块

第十一章 鱼道设计、施工监理、成本、水工模型研究

J. P. PORCHER^①, M. LARINIER^②

1. 鱼道设计

1.1 收集初步信息

一个鱼道必须满足两个同等重要的标准：

- 必须适合目标鱼类；
- 必须适合安装站点。

因此，鱼道设计必须首先收集生物学、水文学、地形学、水力学及水质信息。一条鱼道的任何项目文件中都必须有这些要素，因为这些数据对于在协商和规划期间，是否能够作出综合全面的决定具有至关重要的作用。

1.1.1 生物学数据

首先，必须确定要考虑的所有洄游种类。

● 对于现有障碍物，可以查阅法律法规，以了解在该段水体中，环境法的 L. 432-6 条款所列明必须考虑的过鱼种类；

● 对于为了更新或修改现有的水权执照、特许经营权以及为了新电站的建设，维护水环境的要求可能会比条款 L432-6 列出的更为广泛。如果应地方当局要求，则还需要建立现有保护鱼类以外任何指定洄游鱼类的过鱼通道。

无论如何，在制定计划前应明确规定洄游种类的名单。

技术档案应规定种类的名单，而且对于其中的每一个种，有下面的可用数据：

- 现有的实际数量或潜在数量；
- 溯河或降河洄游的时间；
- 获得各类信息的手段（文献检索、其他查询、野外观测、下游监测站等）。

1.1.2 水文及水质数据

文件资料必须包括从最近的水文测量站获得的河道水文特征。这些信息包括年均日流量、月均流量、特有低流量和高流量（Q10 和 Q90）。必须明确洄游时期流量的变化以及关于上游设施管理效果的信息。

在小型河道中，计划施工的位点附近很少有测量站。这种情况下，可以选择参考位点研究其水文特征。选择的参考位点应该与施工位点位于相同的水文地理集水区，若无，则选择位于地理环境相当的测站，以得到令人满意的水流修正资讯。一般来说，不需要获取高精度的数据，但是一定要明确特征流量的范围以及鱼类洄游时期河流流量的变化幅度和特性。除了一些石灰石地带外，具有相似地质

^① Conseil Supérieur de la Pêche, DR2, 84 Rue de Rennes, 35510 CESSON SÉVIGNÉ - France.

^② CSP - CEMAGREF, GHAAPPE, Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France.

特征的河流盆地一般具有直接相关性。

必须研究施工位点的水质状况：

- 由于水温对洄游鱼类游泳及跳跃能力的影响，特别是对经过山区冷水河段的洄游鱼类来说，水温对鱼道的效率可能有重大的影响。另外，在鲑鱼洄游的有些时期，大型河流下游河段的水温可能达到较高的限制值；

- 必须考虑用来提供鱼道设施以及辅助水流用水的水体的物理化学质量（特别是污染物及含氧量）。特别是要关注水库入水口的水质，因为这里可能容易发生热分层及物理化学分层。由于深水处缺乏水体交换，在每年的不同时期可能发生不良温度或低氧浓度的情况。

1.1.3 障碍物特征

a. 结构图

必须注意以下几点：

- 施工位置总览图，显示所有可能对整个工程十分重要的特征。这些包括各种水渠、电站进水口、溢洪道等的配置；

- 洄游鱼类在障碍物处受阻聚集区域的详细测量图；

- 可能建设鱼类通过设施处的详细平面和断面图；

- 所有水力控制设施（堰、闸门、进水口）尺寸和高程及涡轮机特征的详细测量图；

- 尽管可使用现有设计图，但必须通过现场检查来确定其准确性。

b. 河流流量和水位

技术文件必须有河流流量和上下游水位间的关系曲线。

鱼道设计需要考虑到上游水位（设施的水源）和下游水位（鱼的入口）。设计图上必须明确标明相对应于最大水位落差的低流量时期的水位。明确指出预期正常流量、最大流量和最低流量及鱼道预期运行水位也是非常重要的。

有时，应在站点安装水位监测设备，或是一块水位测量板，或是一个水位自动记录仪。在新建设施的情况下，有时很难精确确定施工后的下游水位是多少，因为这取决于工程的性质和河床随后的演变。因此建议在设施下游段的设计中给出安全界限，以适应下游水位后续的任何下降。

在某些情况下（固定堰），通常应用不同类型堰的经典流量公式可估计河中任何给定流量的预期上游水位。

c. 运行状况的研究

技术文件中必须有设施运行状况的精确描述，还应有不同流量引起的流态变化的分析，以及其对溯河洄游和降河洄游的可能影响（例如：将鱼吸引到涡轮机或溢洪道的泄水）。还应研究停止运转和间歇运行带来的影响。如可行，应考虑执行新的运行草案以提高鱼类设施的效率。

d. 对洄游鱼类试图通过的暂养区和暂养段的调查

在现有障碍物的情况下，必须努力确定鱼类在建筑物下何处聚集及其试图通过的区域。这些信息可通过直接观察、询问渔业部门和沿岸居民、渔民等途径来获得。这提供了鱼道入口位置的良好指南。对大型工程，宜进行预先研究（直接观察、无线电跟踪等）。

1.2 鱼道设施的设计

以上资料提供了鱼道设计工作的基础。设计的不同阶段可以按时间顺序描述如下：

1.2.1 按照流量和水位确定鱼道设施的运行范围

鱼道设施运行的河流流量的范围以收集的水文数据以及目标鱼类的洄游时间为基础。当目标鱼类的洄游时间“窗口”比较狭窄以及当洄游时间和产卵期十分接近时，这对减小洄游中的延滞是非常重要的。

通常，当河道中的水流保持在低流量（ Q_{90} ）和年均日流量的 2~2.5 倍时，鱼道设施的正确运行应该是可以达到的目标。在法国的大多数河流中，这个较高的流量一年仅有约 30 天会被超过，而且仅持续数天。这一方法通常确保了在整个西鲱的洄游时期鱼道设施的持续运行，确保了鲑鱼洄游的足够时间。

一旦鱼道设施运行的河水流量范围确定，就必须建立相应的上游及下游水位。实际上，水位的准确信息对鱼道设施的正确设计是非常必需的。

1.2.2 鱼道流量的选择

确定鱼类通过设施使用的流量必须牢记吸引洄游鱼类及确保其通过的需要。在管理和许可一个电站的过程中，通常确定一个最小的可接受的生态流量以全部或部分用于鱼道设施上溯或降河洄游通道的运行。必须牢记鱼道内的流量应当一直保持和河流或电站中流量相比而言明显的比例。

1.2.3 鱼道类型的选择

多数情况下，最终决定将是一个折中方案。几种类型的过鱼设施或几种配置都可能是适合的，每种都有其自身的优缺点。

确定鱼道类型时，应考虑的主要因素有以下几点：

- 过鱼种类。有些鱼道是专用的。幼鳗的情形显然是这样。
- 设施中的流量。流量很小（数十 l/s ）或很大（数 m^3/s ）时，可能不适用于某些鱼道。
- 上、下游水位变动。不同类型的设施对上、下游水位变动有不同的灵敏度。
- 地形限制。鱼道类型的选择还受地形限制。挡板鱼道的游动区段必须在一条直线上且必须在休息池处才能改变方向，因此挡板鱼道不像水池式鱼道那样有很强的适应性。升鱼机通常可以方便地和现有设施结合在一起使用，因为它仅需要较小的场地。

● 障碍物处的水头落差。这是选择鱼道类型时应考虑的一个重要因素。因为它对过鱼设施的造价有直接影响。挡板鱼道在低坝处造价较低，但对于中高坝来说，水池型鱼道似乎更合理（因为挡板鱼道需要设置休息池）。对于高坝，升鱼机的造价可能比水池型鱼道更少。

● 鱼类通过设施的运行和维护成本。从长远来看，这可能是一笔很大的支出。在选择鱼类通过设施时不应忽视这一因素。如有选择余地的话，应当尽量采用固定的（静态的）过鱼设施（如水池型鱼道或挡板鱼道），而不要选择有许多活动件的设施（如鱼闸或升鱼机）。要特别注意进水口和栅栏的堵塞，可能需要频繁的、昂贵的维护工作。我们应尽量选择维护方便的设施。

● 河流中沉积物的迁移。在有大型底床推移质（鹅卵石、蛮石等）运动剧烈的地方，为了避免推移质沉积的风险，应避免采用挡板鱼道和深的水池型鱼道。

● 气候条件，尤其是结冰，将严重影响活动件和/或细网栅栏的运行。设计山区中的升鱼机时必须考虑这一因素。

1.2.4 鱼道的位置

鱼类位置的选择必须考虑以下因素：

- 可用空间；
- 鱼道运行时，所对应的河川流量范围下的水流流态；
- 洄游鱼类聚集和试图通过区域信息的收集；
- 维护问题。

1.2.5 鱼道设施的尺寸与设计

过鱼设施的设计必须考虑详细，采用参考附近站点经验确定的最新设计标准，即最佳实例经验。设计文件应当包括以下要素：

- 设施位置的工程图及所有的辅助结构图；
- 详细的纵剖面图和横断面图；

- 描述鱼类通过设施特征的记录：水池尺寸，水池间连通装置（凹口、竖缝或潜孔的尺寸），挡板特征、坡度等；
- 估计的鱼道水力学行为（流量、水池间落差、流速等）的详细描述，几种设置需要考虑洄游时期上下游的水位特征；
- 吸引水流的来源，消能方式，以及注入鱼道的方式；
- 鱼道入口处的流量和流速与河流流量的相对比例；
- 免受残渣危害的保护手段。

2. 施工

2.1 总则

当鱼道设施作为大型工程的一部分（例如新建的小型水电站处的鱼道）或安装在大型设施上时，土木工程师通常会监视设施管理各个方面的状况。在此我们不会详细讨论他们的方法。但是需要指出的是：确保采用优质材料以及可靠的水力机械设备并且最后校检实质水位（鱼道渠底以及所有围墙、基槛的内底、引水渠道等）是十分重要的。

当鱼道是一个小工程，并由地方承包商建造时，下面的指导可能是有帮助的。

2.2 施工程序

施工开始日期的选择应考虑其预计工期及河流的水文特征。正常情况下，工程应在低至中等流量时竣工，否则建筑工程就有被洪水冲击损坏的危险。这会大大增加成本。应尽一切努力确保有足够的劳动力资源和物质资源，在最有利的时期内完成工作。

应特别注意围堰结构及保持建筑物干燥的相关问题。经验表明，在此阶段试图降低花费通常导致后期预算的增加，或导致设施无法正常发挥其功能。因此，必须准确估计不让水进入工地、保护施工工程的条件，必须预计施工进出或将材料运送到工地的困难，必须采取一切必要的措施保证施工顺利进行。

可要求承包商特别许诺，例如对洪水风险负担支付的赔偿，或对工程所有或某些阶段延期罚款。应在技术要求中说明特殊制约（过鱼设施中某些部分水位的精确，例如暂养池、连通装置）。

2.3 工程的性能

2.3.1 设计图的说明和设施的建造

施工图必须非常详细（即，应拒绝任何没有对现场进行准确地形调查的草图，或更糟的是现场绘制的图），高程必须精确到厘米并用清晰的点来表示。

施工图上必须注明日期，且工程一旦开始，就必须核实承包商有最新的图（而且仅这一张图）。必须同承包商的代表讨论设计图，而且必须保证承包商确知若对鱼道施工有任何疑问时该联系谁，或是否因现场情况需要做任何变更。无论如何细小的修改，都必须经过鱼道设计者的同意。

承包商初次到达现场后，必须准确确定和标明设备的地面足迹。

2.3.2 工程监理

在施工的主要阶段，必须安排熟悉鱼类通过设施功能和设计标准的人定期视察。尤其推荐在下列阶段的视察：

- 拆毁或挖掘工程的完成时期；
- 地基和底板的加固时期；
- 任何密封工程完工时，灌注混凝土前；

- 工程的其他任何关键部件的完成时期；
- 最后竣工时。

每个阶段都要核查底板和基槛（设施内所有控制流量、流速和水头差的所有区段）的高度，特别在有可能将设施建得太高以限制拆毁工程的下游段。特别要注意，应检查确保设施下游方留有一个足够大的水池，因为承包商担心建筑物底部受到侵蚀，习惯填平水池。

为了防止对洄游鱼类的伤害，设施中应避免尖锐边缘。还要特别注意与现有设施的连接处，转角、转向器、池间连通装置，及任何挡板金属段的边缘。可使用橡胶挡板，防止洄游鱼类进入没有出口的通道或容易造成伤害的区域。

2.4 工程验收

正式验收工程前，“客户”应仔细检查建筑物状况。如果检查在洪水到来前执行，则有助于完成土木工程标准的总体检查（除非在定期监工阶段已经进行）。验收程序必须包括设施的防洪状况及水力运行的检查（水位的测量和流量的计算）。如果必要，可采用临时措施调节或调整若干堰上或流经若干池间连通装置的流量（用小板改变堰顶高度）。如果确认这些措施是必要的话，则应作为永久措施。

3. 鱼类通过设施的造价

3.1 水池型鱼道

水池型鱼道的成本大约与土木工程施工的容积成正比。亦即，体积用鱼道结构的内宽、长度和平均深度的乘积表示。

基于约 300 个水池型鱼道的统计资料（2001 年元月）显示：平均净成本约为 645 欧元/m³（中位数 550 欧元/m³，第一个和第三个四分位数分别为 380 欧元/m³ 和 800 欧元/m³）。然而，对于不同的设置，单位成本变动相当大，从不到 100 欧元/m³ 到超过 1 500 欧元/m³ 不等。

大多数和鱼道设施相关的数据都属于在现有的障碍物上加建鱼道。当鱼道与电站或坝同时建造时，成本比改型设施的低得多。

为了估计一个鱼道的成本，所需要的土木工程构件的容积包括：

- 所有水池的容积，即鱼道自身的容积；
- 辅助水流供给、运输及消能所需要的容积；
- 诱捕和/或观察鱼所需要的容积。

对于一个给定的设施，只有水池的最小设计容积（低水时期的水容量）可方便地快速预测出来，因为它与障碍物处的最大落差（一般发生在低水期间）及鱼道的设计流量成正比。这一容积的估计通常是基于平均容积耗散功率不超过 150~200W/m³。

另外，还要注意以下几点：

- 考虑在洄游时期，鱼道不同渠段可能的水位变化范围的水池容积；
- 容积要符合安全界限以防止鱼道溢流；
- 额外容积，也可能是多变的，受站点的地形和鱼道的路线影响。

施工成本也可以用最大落差（H）和鱼道设计流量（Q）的函数来表示：

$$C=K H Q$$

式中 C：鱼道的成本（欧元）（净成本）

H：低水时的最大落差（m）

Q：低水时鱼道中的流量（m³/s）

系数 K 的平均值为每米落差和每立方米/秒流量约 97 260 欧元（中位数 80 000 欧元，第一个和第三个四分位数分别为 53 000 欧元和 115 000 欧元）。由于建设鱼道处状况的不同，该值的变化范围为 15 000 到 300 000 欧元。

用上面的公式估计成本的精确性，显然比采用土木工程构件的容积低得多。

3.2 挡板鱼道

通过对大约 100 个挡板型鱼道的统计得出，平均单位花费为 2 750 欧元/m³（中位数为 2 000 欧元/m³，第一个和第三个四分位数分别为 1 300 欧元/m³ 和 3 000 欧元/m³）。然而，正如水池型鱼道的情形一样，挡板鱼道的成本变动范围很大，视设置场地的具体条件而定（从不到 300 欧元/m³ 到超过 7 600 欧元/m³）。

与水池型鱼道相同的是，施工造价也可以用最大落差（H）和流过设施的设计流量（Q）的函数来表示：

$$C=K H Q$$

系数 K 的平均值为每米落差和每 m³/s 流量约 62 000 欧元（中位数 51 000 欧元，第一个和第三个四分位数分别为 36 000 欧元和 83 000 欧元）。系数 K 很可能在 10 000 欧元和 180 000 多欧元之间变动，视配置而定。

3.3 升鱼机

鳟升鱼机的成本变动在 15 000 欧元与 75 000 欧元之间，鲑升鱼机的成本在 50 000 欧元到 125 000 欧元之间。具机械集鱼装置的大型西鲱升鱼机的成本约为 250 000 欧元到 400 000 欧元。

在这些成本上还必须增加设置升鱼机所需要的土木工程工件的成本。尤其是对进水口的必要施工以及将吸引水流消能或灌注进入鱼道的花费。这些花费根据配置的不同差异很大。

Tuilières 升鱼机和 Golfech 升鱼机的成本分别为 1 300 000 欧元和 3 500 000 欧元。

4. 水工模型研究

由于水流流态相当复杂，而难以简单地解析计算求取近似值，在过鱼设施设计中经常采用比例模型测试。

水工模型的研究通常有以下目的：

- 视觉化和最优化鱼道中的水流，以确保流速、落差和紊流度及考察的洄游鱼类的游泳能力相符合，确保洄游时期在障碍物处洄游鱼类能够适应要经历的各种水位；
- 设计鱼道设施的进水口和辅助水流系统，保护设施免受飘浮残渣的破坏；
- 解决与鱼道设施相关的任何问题，尤其是根据障碍物处的水文变动状况确定最佳入口位置。

鱼类通过设施的大多数类型（垂直竖缝鱼道、艾斯港型鱼道、挡板鱼道等）是作为对模型系统研究的结果产生的。

模型通常采用的比例变动于鱼道自身模型的 1/3 到 1/10 之间，确定鱼道设施最优位置的模型，则为 1/10 到 1/25 之间。

弗劳德相似定律适用于鱼道中的水流，因为流体运动的主要作用力来源于重力，而所有其他的力如流体摩擦力和表面张力都可忽略不计。

虽然模型研究花费巨大，但是对于大型设施的鱼道来讲是必不可少的。这有利于避免在后期校正困难且花费巨大的错误。

第十二章 鱼道监测技术

F. TRAVADE^①, M. LARINIER^②

1. 鱼道监测

监测鱼道的运行以及相关的功能控制是十分重要的，这是因为：

- 检验鱼道开始投入运行后的效率并在必要时调整运行状况；
- 收集对未来鱼道的设计和发展来说不可缺少的技术信息及生物信息；
- 确定洄游鱼类种群的数量并描述洄游方式，对于设计在同一河道上游建设的鱼道以及合理的鱼群数量管理来说都是很有必要的。

采用的技术可以用以下标题来概述：

- 监测鱼道的水力及机械运转状况。
- 收集显示鱼道效率的定性的生物信息。
- 计数过鱼数量。
- 将鱼道过鱼数量与总的洄游鱼类数量对比，显示鱼道的真实效率。

2. 监测水力和机械运转状况

在鱼道开始投入运转以及此后规律的间隔时期，应当进行许多简单的测量和观测，以确保鱼道符合设计标准。

2.1 水力参数

鱼道中及鱼道周围几个特殊位点（上游、下游、特殊水池等）的水位必须进行测量。在水池型鱼道中，这包括每个水池和鱼道入口处的水位及水头差。为了上游和下游水位的合并，这些测量是必须采取的。

必须校检鱼道中不同位点的水流流态和紊流度以适应不同鱼类的特殊需要，例如，水池间每个隔墙处的流态为跌流或连续流、水池中的环流区等。

2.2 机械运行参数

在挡板鱼道和水池型鱼道中，应监测控制流量或水池间及下游入口（即自动闸门）处水头差的各种调节设施。对于机械式运转的鱼道（升鱼机和鱼闸），必须监测所有运行周期的机械装置，并检查运行周期各个阶段的持续时间。

① Electricité de France, Research and Eevelopment, 6 Quai Watier, 78401 CHATOU Cedex - France.

② CSP - CEMAGREF, GHAAPE, Institut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France.

2.3 鱼道的阻塞

应特别注意由漂浮残渣引起的任何阻塞。这些残渣可能严重妨碍鱼类通过某些关键性的区域（水池连接处，鱼道进水口等），或可能降低鱼道的吸引力（堵塞过滤辅助水流的栅栏）。这两种情况都可能在不一定会显示出水流明显受扰动的情況下发生，鉴于此，必须定期和仔细检查潜孔。

3. 收集定性生物学信息

除鱼道效率的定量分析外，一定数量的间接信息也能表明设施总体的运行状况。这样的信息如果能在鱼道设置前收集到就会更加有价值：

- 洄游鱼类在障碍物底部跳跃的频率或鱼的密度（如果鱼是可见的）；
- 坝下游渔民的密度（鱼不可能轻易通过的可靠迹象）；
- 鱼道中上溯鱼类的观测；
- 鱼类丰富度指数（观察、捕获）及鱼道上游产卵活动的计数（鲑科鱼类和七鳃鳗产卵砾石堆、西鲱的“bulls”，法国西南部用来意指成群的西鲱产卵亲鱼）。

以上列出的几点并不全面，其他一些信息对鱼道运行的定性分析可能也是有用的。

4. 计数鱼道中鱼的数量

4.1 诱捕

原则上，诱捕计数包括安装在鱼道中或鱼道出口的捕鱼设备以及释放鱼进入上游前进行人工计数的过程。

诱捕陷阱通常是设置在鱼道内的一个装有单向系统的笼子或容器。为了使鱼从监测过程中休息复原，或为了计数鱼的数量，鱼类通常通过部分清空诱捕设备或通过提起陷阱底部的铁笼被集中到一个小体积的水体中。在某些情况下，鱼类通过人工转移计数，而在其他情况下其数量可用肉眼计数（图 1）。

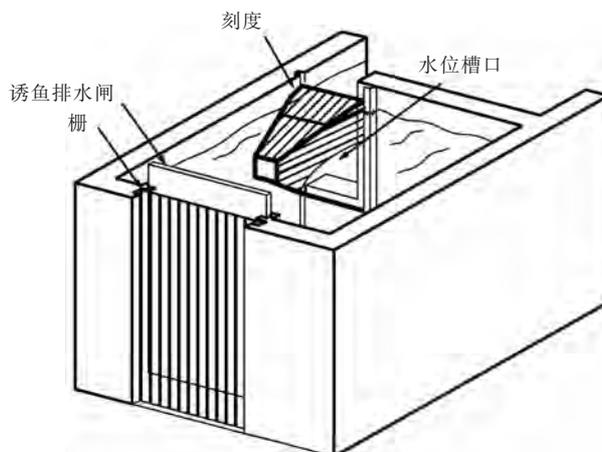


图 1 小型的水池型鱼道中用来计数鱼的诱捕装置，排空水池后鱼被人工捕捞

诱捕陷阱的尺寸必须考虑到某一时间同时通过鱼类的最大数量。因此陷阱的大小和各种鱼类的日洄游峰值以及陷阱设施的运行频率有关。诱捕陷阱容量的计算方法为：捕获每 kg 鱼最少需要大约 15l 容量的水体（CLAY, 1961；BELL, 1986）。

目前法国最常用的诱捕陷阱的尺寸为：2.5~4.5m 长，1.5~3.0m 宽，超过 1~2.5m 深。

必须定期计数，避免鱼被困太久。通常的频率是每天一、二次。还需要监视，防止堵塞和偷鱼。

诱捕陷阱设施的成本差异很大，视鱼道的大小、操作系统的复杂程度及过鱼种类的不同而定。诱捕陷阱设施的成本可能在不到 1 500 欧元到 25 000 欧元之间，相当于鱼道成本的 1%~10%。这些设施的运行和维护成本一般较高，主要是因为这类运行需要劳动力操作。它们也可能因地点而有很大差异，视洄游鱼类的丰富度和自然属性的差别、陷阱的自动化程度、栅栏的清洗和维护需要（这通常是不可预测的）而定。运行期间诱捕陷阱管理需要 0.5~4 个工作人员，视地点而定。

诱捕监测方法的主要优点在于相对来说容易实施，尤其是小型设施。其他优点包括：明确辨认过鱼种类的可靠性，鉴别鱼类生物特征（大小、体重、性别等）的可能性以及可方便地从中挑选个体用来标记或繁殖。

诱捕监测方法的缺点：增加了鱼类受伤和受刺激的几率（甚至引起脆弱鱼类如鲱鱼的死亡），维护困难，在大型河川上的设施对人力资源需求较大，以及难以获得持续的真实时间的数据。另外一个难以估计的弊端在于诱捕陷阱对鱼道效率的负面影响，因为许多鱼类不愿进入诱捕陷阱。

4.2 自动电阻计数器

电阻计数器的原理为：水与鱼体的导电率不同，鱼的电阻比水小。鱼类被迫通过一系列淹没的电极（一般 3~5 个）。通过不同方式持久地监测及分析电极间的电阻便可探测鱼类的通道，确定鱼类的游动方向，并可根据信号峰值来区分个体大小（图 2）。无论水的传导率如何变化，计数器敏感度的自动调整可以确保鱼类大小的准确鉴别。

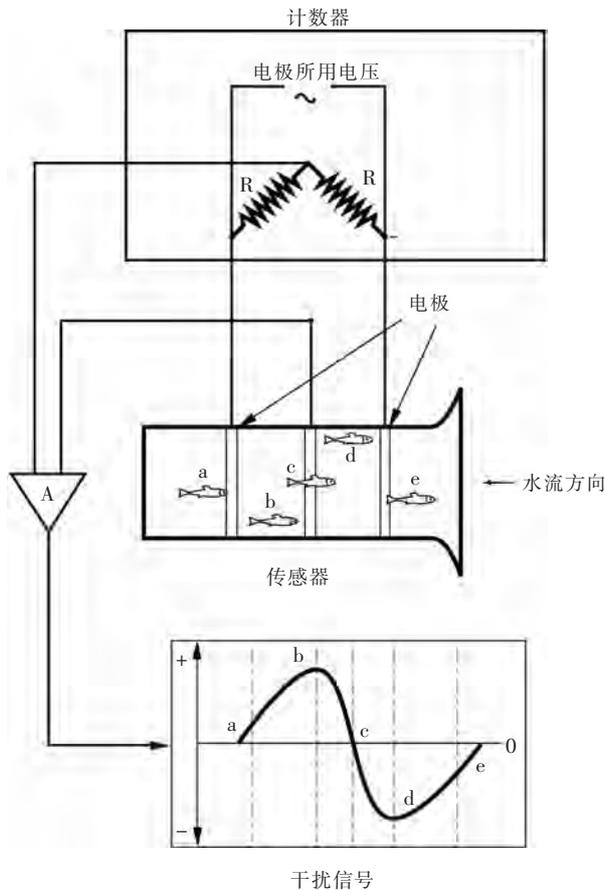


图 2 自动电阻计数器的运作原理

目前，英国正使用这种计数器。在 20 世纪 70 年代，英国农业渔业粮食部首次进行了该计数器的研究。后来又有其他学者对这种计数器继续进行了研究 (BUSSEL, 1978; DUNKLEY and SHELTON, 1991; FEWINGS, 1994; NICHOLSON 等, 1995)。苏格兰水电公共有限公司 (前北苏格兰水电局)、夏基海洋电子公司及丁沃尔水产品公司曾销售多种模型。在法国，伏龙和埃尔菲斯电子技术公司同高级渔业理事会—内陆水生生物资源科学单位科技信息处等联合研制了一种较易于维护、操作成本较低的类似计数器，(BONNEFOIS, 1988; GOSSET, 1986)。

由于位置的不同，传感器的形状特征是多变的。如果计数器被安装在鱼道中，可采用圆形电极安装在鱼道中两个水池间槽口的导管中。导管的直径取决于鱼道的结构、流量以及计数鱼类个体的最小尺寸。目前采用导管的直径一般在 0.30~0.50m 之间。

通常，计数器和数据记录仪连接在一起以方便捕获鱼道中的时态数据。除了生物重要性以外，此信息有助于消除由于无鱼假象引起的错误计数。

必须避免强烈紊流和夹杂空气引起的计数错误。为了达到这一目的，当水深不足时，水位探测器回路打断计数器的运行。另外，要保证足够高的流速 (大于 1m/s) 以防止鱼类徘徊在电极之间。

计数的可靠性 (可能超过 80%) 最重要的是取决于传感器定位的质量以及监测频率。

导管计数以外的另一种方法是结构下游面上装有电极的“克伦普堰 (Crump weirs)”。和导管计数相比，这种计数方法的优势在于：堵塞率较低，通过的鱼类和物体容易观察。缺点在于：增加了由水位变化和信号较低引起的环境协调问题 (FEWINGS, 1994)。

必须有合格的职员来执行频繁的监测 (至少每周一次)。虽然职员并不严格需要电子学知识，但必须受过培训以具备发现导致反常现象或故障原因的能力，主要包括对传感器的损害、电力损失、电击结果的失败等。

计数器的优点在于投资成本低 (计数器的成本约 6 000 欧元，传感器的制造和安装费用在 1 000~2 000 欧元，视场地而定)，且维护费用低 (需要较少的人力)。

这种方法固有的最大弊端在于：除了通过尺寸大小外没有任何其他方法来区分种类。实际上，这种方法仅限用在过鱼种类较少并且仅通过尺寸大小就能区分种类的河段 (鳟鱼区河段，仅有鳟鱼、海鳟和鲑鱼会出现)。而且还需要确保在这些河段不会计数其他洄游鱼类而引起误差。因此，七鳃鳗已经证实为一大麻烦，因为它们习惯附在河床底部并处在传感器上保持不动。

4.3 可视计数或通过磁带录像计数

视觉观测提供了一种不需要接触或释放鱼类就能持续计数的方法，因此不会遇到诱捕陷阱中物理上的缺点。只要将鱼类引入可视区域便可进行鉴别及计数。这种观测方法包括两种技术。一种是从上方的外部观察的方法：在这种情况下，鱼类被迫穿过浅色底的浅水区，以呈现出鱼的轮廓。另外一种技术是侧面观测法：鱼类被迫从垂直的透明窗前穿过。后一种方法较受推荐，因为对大部分的鱼种来说，从侧面形态上更容易准确地鉴别过鱼种类。

在挡板鱼道或水池型鱼道中，在引导鱼类系统 (格栅或槽口) 的上游安装一个水平的观察板以更加方便地执行外部观测。观察板淹没深度不超过 0.3m。在鱼闸中，观察板被直接安装在闸门的上游。在具有小型水箱的升鱼机中 (水深不超过 0.4m)，观测直接在水箱上方进行，水箱的底部要漆成浅色。

侧面观察时，透明窗前的鱼道应比较狭窄，藉由安装格栅或束缩渠道和水流本身以导引鱼，从而使鱼类靠近窗壁以便于观察。一般来说，可以接受的最小宽度为 0.4~0.5m 之间，以避免造成过鱼种类的不安。由于水体浊度的差别，这一宽度可在 0.3~1m 之间调整。通常在窗壁对面放置浅色的观察板，并率定校准相对的长度比例，以更清晰地显示鱼类尺寸大小 (图 3)

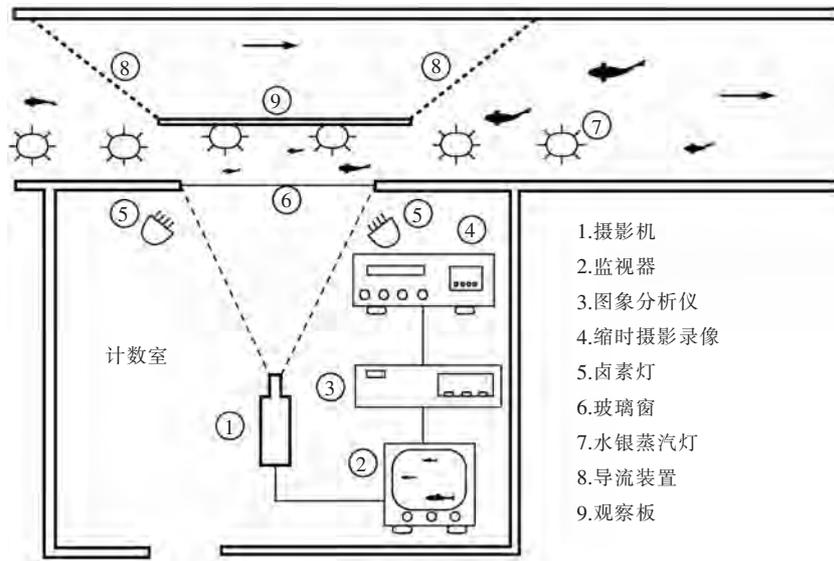


图3 过鱼记录系统自动录象示意图

为了更方便的计数，鱼类必须以适合的速度通过观测设备以便于及时鉴别种类。为了使鱼类不在计数器前停滞或徘徊，观测区域的水流速度必须维持在 1~1.5m/s 之间（该值随过鱼种类及位点改变）。计数设备必须安装在紧挨鱼道上游末端的地方以解决鱼道中某些鱼类普遍存在的后退游动问题。观测区安装照明设备以确保全天随时可视性。

另外，应特别注意避免在观察窗前引起反向水流，因为反向水流容易导致鱼类的徘徊。

即时进行计数需要全日制的观察员，这种耗时巨大的方法。在非常大型且通道连续的一系列鱼道中（美国哥伦比亚河）可验证其结果。然而，除了人力需求外，这种方法还存在一些弊端：不能延期分析这些即时获取的数据（鱼体大小、过鱼种类的行为以及游泳速度等）。

近来，录像技术（尤其是监视技术）发展迅速，已经实现了一定程度的自动化，降低了观察者在现场视觉计数的需求。在法国已经采取了一些新的解决方法。

过鱼通道的不连续性推动了小容量升鱼机（当上升时水深在 0.2~0.4m 之间）内对鲑鱼的自动监测。在水箱上方安装录像机，升鱼机上升过程中可视记录仪便会打开一段时间。从 1986 年开始，阿列河（法国）Poutès 处的鲑鱼升鱼机中已经安装了这种设备。这种计数系统可日夜不停的进行计数（每天 12 次上升），每个月只需要一个小时的分析就可以得到准确率大于 95% 的记录结果。

在 Gave d'Aspe 河上的 Soeix 坝和 Garonne 河上的 Malaussé 坝的鱼闸中采用了类似的方法。在上游闸门的鱼道出口处安装观察板。然而，这种方法需要在注入水体及清空阶段持续的摄影，并且分析时间比升鱼机中的花费要长。

在过鱼通道为连续的地方，可使用两种带有浸没的观察窗的方法：

- 连续的低速录像记录以及随之进行的用缩时摄影记录下对高速录像磁带的分析。设定好记录以使标准的三小时录像磁带可持续 24 或 48 小时，例如：记录速度降低到正常的 1/8 或 1/16。然而，分析工作常常是非常辛苦的。如果鱼类数量较大时，因为需要频繁的倒带鉴别过鱼种类，所以一个月 24 小时磁带的分析时间可能需要 3.5~5 小时。

- 当鱼类到达计数区域便引发录像记录仪记录整个过程，从而实现了对过鱼种类的自动纪录。法国电力研究与开发处（TRAVADE, 1990）曾使用一种可视系统，该系统通过对视觉影像的总结过程来实现对观察窗处鱼类的观测（图 4）。该系统是由一个不断拍摄观测窗的录像机连接到一个缩时摄影（一个标准 3 小时磁带可录 480 小时）记录仪构成。然而，当收到外部信号时，系统可以以正常

速度真实记录。这些信号通过平时安全控制设施中采用的图像分析仪产生，这种安全控制设施可侦查到进入可视区域的鱼类。该系统只在鱼类在观测窗前出现时录像，无论是前进还是后退。通过对配置做一些敏感度调整可以适时观察位点及鱼类的特点。

通过观看磁带可以进行种类鉴别及鱼类计数。在许多主要河道（例如：Dordogne 河的 Tuilières 升鱼机、Bazacle 升鱼机，Garonne 河的 Golfed 升鱼机及 Le Bazacle 升鱼机）的过鱼设施中，这些用来进行全天候计数的系统已经被成功地应用了十余年。只需要一个观察者每天便可以计数几千尾 20 余种不同的鱼类，并提供洄游方式方面有价值的信息。

每天少于 10 尾鱼的 24 小时观测所需分析时间理论上只有 10 分钟，而每天计数 5 000 尾以上的全天候观测结果的分析时间则需要超过 7 小时。实际上，这些时间和环境条件（可见度、漂流碎片引起的错误的起始信号）以及计数的过鱼种类（种类区分的难易程度、通过速度、鱼类个体或成群游动、后退行为）有关。实践证明，对于过鱼率较低的通道（每天过鱼数量少于 400 尾）来说，平均分析时间大约为观测时间的 4%~10%（或 24 小时录像需时 1~2.5 小时）；而对于高过鱼率的通道（3 000~5 000 尾/天），平均分析时间则为观测时间的 15%~20%（或 24 小时录像需时 3.5~4.5 小时）。

近来，法国（CATTOEN 等，1999）发明了一种新的数位系统，可用来记录数位影像，并且用来回顾记录。其目的就是要减少复查类似磁带（例如在 Cerbere 系统所用的磁带）所用的时间。观测窗前通过鱼类的影像以数位形式记录下来，被压缩保存在个人电脑的硬盘中（图 4）。通过软件程序就可方便地回顾记录结果，并可自动产生电脑档案（图 5）。对首次 6 个月试验的调查数据结果是：和 Cerbere 系统相比，这种设备可以将计数鱼类所需时间减少到原来的 1/8。法国目前有 4 个监测站现在都已经配备了这种系统。

观测窗前探测鱼类的可靠性取决于各种环境因子（光线、水的浊度）以及过鱼种类的特点（大小、颜色、速度及潜水深度）。平均来说，在良好可见度的情况下，对鲑科鱼类、鲱鱼以及体长大于 25cm 的鲤科鱼类探测效果非常好（90%~100%）；对七鳃鳗、触须白鱼之类以及体长在 10~25cm 之间的鲤科鱼类的效果较好（70%~90%）；对鳗鲡和体长小于 10cm 的鱼类来说效果一般（50%~70%）。



图 4 触发器记录过程中的屏幕显示

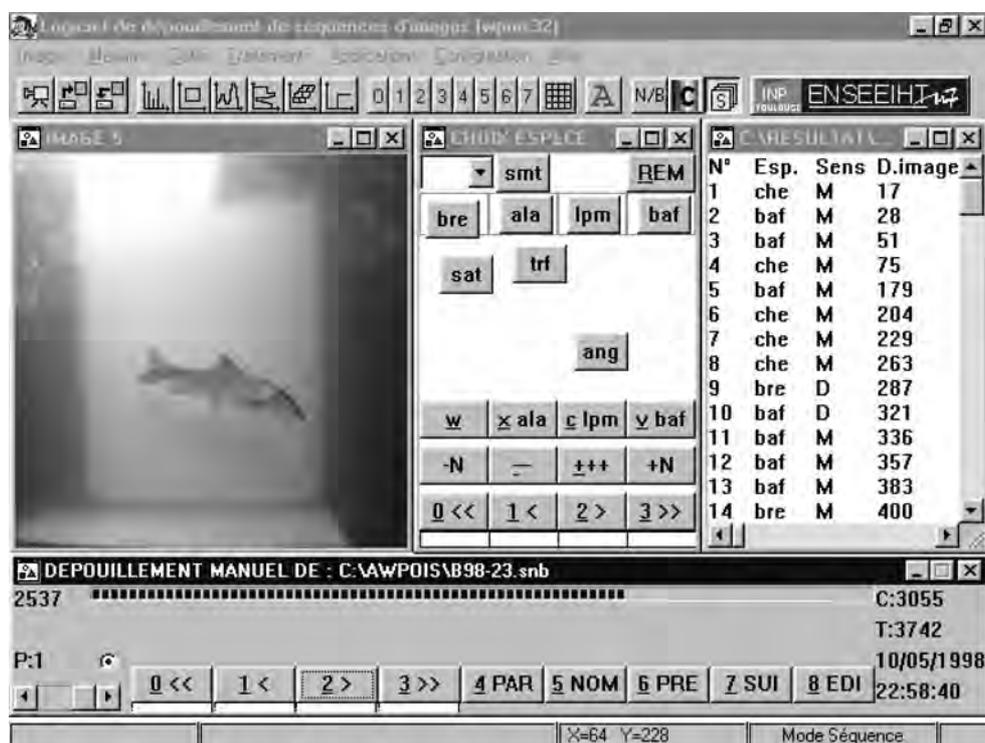


图5 交互式回顾核准期间的屏幕显示

观测区域的光线特点对该系统的运行是非常重要的，因为光线影响系统探测鱼类的能力以及鱼类自身的行为。供光灯可以安装在上方的水体表面，也可以安装在观测窗的对面。当照明灯安装在观测窗的对面时，鱼类显示出剪影轮廓，因而可从影像来鉴别鱼类。

观测窗上方的表面照明需要足够的亮度才能确保监测工作的正常运行（卤光灯大约需要 2 000W，水银蒸气灯需 500W）。在观测区上游及下游数米的地方必须以渐弱的强度延伸照明区以降低对鱼类洄游行为的干扰，特别在夜间，观察板的背光照明在计数区域的整个背景中要保持统一的亮度。相对于表面光源，当水体浑浊度增加时，背光照明可保持更高的可见度。由于适合最新的数位设备，背光照明已经成为常用的光照形式。

必须进行规律性的检查（3~7 次/周）以更换录像磁带、检查设备、清洁观测窗和鱼道区域。

安装自动可视计数系统的费用包括安置计数设备的观测站的费用（地基、鱼的引导系统、光源）以及录像系统本身的费用。由于位点特征和安装复杂度的差别，计数站的费用从 15 000 欧元到 50 000 欧元不等。可进行即时分析的持续监测的可视系统的费用（最少 2 个录像记录仪、1 个摄影机、2 个监测器）如下：

- 升鱼机观测系统的费用为 2 500~5 000 欧元（有可能采用国内的录像机）；
- 采用非自动记录系统的监视录像机，“持续”监测系统的费用为 5 000~10 000 欧元；
- 包括一个图像分析仪的系统费用为 10 000~15 000 欧元。

视觉计数的优点在于：不需要对鱼类进行处理，难以捕获的鱼类（如鲑鱼）也可计数，只需要较少的人力，可精准明确所有鱼类的洄游行为及模式。

视觉计数的弊端：不能在混浊的水体中计数，有些种类难以鉴别；在具备自动记录系统的情况下，有些过鱼种类难以探测；漂流碎片尤其是水草影响真实结果。

当采用视觉计数分析数量巨大的洄游鱼类时需要耗费大量的资源，法国近来正在进行全自动计数系统的开发工作（CASTIGNOLLES 等，1994a, 1994b；CATTOEN 等，1999）。这种系统的基本功

能包括利用视觉影像对过鱼种类进行即时自动识别（通过鱼类的影像形状分析）以及自动计数观测窗前所有通过的鱼类，不论是往前或往后移动。当水体清澈时可以得到很好的结果，能够准确识别并计数具有特殊形状和大小的鱼类（大的鲑科鱼类、鲱鱼、海七鳃鳗、鳗鱼、鲤科鱼以及触须白鱼之类）。然而，目前这种系统在渔业领域的应用还不够可靠，主要是因为当水体混浊或观测窗前同时存在大量鱼类时该系统不能识别种类（影像重叠）。尽管如此，人们通过研究已经设计出一种新的数位系统（CATTOEN 等，1999），新系统考虑到了数位图像的记录以及记录的交互回顾。

5. 鱼道真实效率的评价

评价鱼道的真实效率既要根据障碍物底部通过鱼道的洄游鱼类的比例，又要根据洄游的延滞状况。可使用的评价方法有两种。

5.1 定量或统计方法

主要和最直接的方法包括：测量或评估障碍物下游鱼类数量的大小，并将该数值与计数得到的总的过鱼数量比较。鱼类种群的大小通过计数陷阱中鱼的数量或计数下游鱼道中鱼的数量确定。另外，也可以通过定量渔业调查技术确定。

另外一个间接的方法：标记设施下游一定数量的鱼类，然后计数这些鱼中通过鱼道的比例。鱼道的效率以公式表达如下：

$$E=100 (N_p/CN_m)$$

式中 E：鱼道效率，以百分比表示

N_p ：进入鱼道中标志鱼类的数量

N_m ：下游标志鱼类的总数量

C：($0 < C \leq 1$) 表示对鱼类的影响的系数（例如死亡率）

鱼道下方洄游鱼类种群的数量可通过计数通过鱼道的鱼的数量来估计：

$$N_e=C \cdot N \cdot N_m/N_p$$

式中 N_e ：鱼道下游鱼类的估计总量

N：通过鱼道的未标志鱼类的数量

实际上，在评价鱼道效率中最大的困难就是估计标志本身对鱼类的影响（即系数 C）。对于强壮的鱼类（如鲑科鱼类）来说，标志的影响可能是微不足道的。然而对一些脆弱鱼类（如鲱鱼）来说影响则是巨大的，标志可能改变其洄游行为甚至造成明显的死亡率。

5.2 行为方法

这些方法突出了许多因素对鱼道效率的影响。这些因素包括鱼道入口的位置，鱼道中的流量，环境因子等。当鱼类接近设施时，这种方法需要对鱼类个体的运动和作直接监测。遥感勘测技术将发射装置直接安装在鱼体上，通过适合的接收器接受信号来达到远程探测的目的。鱼类的遥测定位有两种系统是可以利用的：

- 超声波遥测技术。采用 20~100 千赫兹频率的发射器（STATSKO and PINCOCK, 1977）。这种系统的优点是：在任何传导率的水体中（淡水或海水）都可跟踪鱼类。然而由于该系统受周围噪音的影响（紊流、涡轮机运行等），需要水下水中听音器的定位，并且消耗巨大能量的弊端，其发射寿命短（最多几个星期）。

- 无线电遥测技术。使用频率为 20~180 兆赫兹的无线电发射器（MCLEAVE et al., 1978; SOLOMON, 1982; TRAVADE, 1989）。该系统的优点是：水上或水下天线都可以在相当远的距离

处探测发射器（最优条件下可达 2km）。另外该系统不受河道或水电站噪音的影响，并且不会消耗大量的能量。这意味着采用小型发射器就可以保持几个月的使用寿命。然而，该系统仅限于在淡水中使用，因为当传导率大于 $300\sim 400\mu\text{s}/\text{cm}$ 时，水体对声波有高吸收率。

由于这个原因，无线电跟踪实质上是一种监测河道洄游鱼类的技术（传导率少于 $400\mu\text{s}/\text{cm}$ ），而超声波遥测通常用在河口及海水研究中。

小型发射器（重 2—25 克，根据洄游鱼类体长变化）可以植入鱼体内部（胃或腹腔）或者体外（通常在靠近背鳍的背部肌肉处）。对于在溯河洄游中不进食的大型成年鱼类（鲑鱼和鲱鱼）将发射器植入胃里是最简单的方法，并且对鱼的干扰也最小。将鱼麻醉后，发射器通过一个涂药器导管被压入胃的基部。天线可以沿身体穿过鳃弓和背之间，对脆弱鱼种的话（鲱鱼）也可以放在上颌骨一角。

在捕获和麻醉鱼类、以及当植入发射器时要特别小心，以尽量避免对鱼类行为的干扰。

由于河流长度、研究内容以及要求精确度的不同，可以通过几种方法对标志鱼类进行跟踪。

5.2.1 人工跟踪

可以使用便携式头顶的定向（环状天线或 Adcock 天线）或非定向天线（Whip 鞭状天线）来定位鱼类。这种定位可以徒步进行，也可以使用汽车、船或飞机等工具以各种速度进行。对于高精度定位（误差在数厘米以内），可以使用安装在电极末端的水下环状天线。在水面宽广的河流中，需要双角测量或三角测量以精确定位鱼类，这就需要使用安装在固定位置的 2—3 个接受器去发现发射器的方位，目标鱼的位置就在方位交叉的地方。

5.2.2 自动跟踪

接受器可以自动探测一定范围内是否有鱼类出现，然后用连接在接收器上的纸张记录仪或数据记录仪记录下来（可直接得到处理结果）。由于监测区域大小的不同，可以使用水上天线（覆盖范围较广）或水下天线（覆盖范围小，如水池型鱼道中的一个水池）。鱼类在该范围内的出现以时间的函数来记录。相互参考几个记录仪对一个位点的记录结果，可以实现对鱼类运动的自动跟踪。这些站点需要有安装扫描仪（自动扫描每条鱼的频率）的接受器，或者要有几个在不同频道同时工作的接受器。

法国近来的研究中（TRAVADE 等，1989；CHANSEAU 等，1999；CHANSEAU et LARINIER，1999）所使用的设备起源于美国（先进的遥感系统）和加拿大（LOTEK）。

由于装备和劳动力的需求，这种技术使用起来相当昂贵。一个自动收听站的花费为 8 500—16 000 欧元，一个发射器的花费为 200—250 欧元，且应将发射器视为消耗品。另外还需要一个或二个人员以及用于研究鱼类运动的自动无线电收听站的小型计划。人工定位则需要 3—6 个人员进行更广泛的研究。

虽然花费巨大，这项可以在鱼类接近鱼道过程中以及鱼类在鱼道中直接观测鱼类行为的技术已经被证明是快速获得鱼道功能信息不可缺少的设备，而鱼道运行上某些特定方面也因此可以更加精细的确定。在测定或比较一条河道上几个鱼道的效率时，这也是一种非常有用的技术（CHANSEAU and LARINIER，1999；CHANSEAU 灯，1999；G·ARMSTRONG 关于泰晤士河的研究）。

参考文献

- BELL M. C. , 1986. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Fish. Eng. Res. Prog. , U. S. Army Corps of Eng. , North Pacific Div. , Portland, Oregon, 290p.
- BONNEFOIS, P. , 1988. *Le compteur à poissons type "FRON" au sein des techniques de comptage* (The "FRON" fish counter as a counting technique) .CEMAGREF Rep. , 110p.
- BUSSEL R. B. , 1978. Fish counting stations (notes for guidance in their design and use) .Dept. of the Envir. , London, 97p.
- CASTIGNOLLES N. , CATTOEN M. , LARINIER M. , 1994a. Fish species recognition using a Bayesian classification process. J. Communications: Image processing II , 45, 21 - 24.
- CASTIGNOLLES N. , CATTOEN M. , LARINIER M. , 1994b. Automatic system for monitoring fish passage at

- dams. in: TESCHER A. G. , ed. , Applications of digital image processing XVII . SPIE, int. Soc. Optical Eng. , 2298, USA, 419 - 429.
- CATTOEN M. , LARINIER M. , THOMAS N. , 1999. *Système et logiciels pour la surveillance des passes à poissons*. (System and software for the monitoring of fishways) . But Fr. Pêche Piscic. 353/354; 263 - 277.
- CHANSEAU M. , CROZE O. , LARINIER M. , 1999. *Impact des aménagements sur la migration anadrome du saumon Atlantique (Salmo salar L.) sur le Gave de Pau (France)* (Influence of man made obstructions on the upstream migration of Atlantic salmon (*Salmon salar* L.) on the Gave de Pau river (France)) . Bull. Fr. Peche Piscic. 353/354; 211 - 237.
- CHANSEAU M. , LARINIER M. , 1999. *Etude du comportement du saumon Atlantique au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Baigts (gave de Pau) lors de sa migration anadrome*. (The behaviour of returning adult Atlantic salmon (*Salmon salar*) in the vicinity of Baigts hydroelectric power plant on the Pau River as determined by radiotelemetry. Bull. Fr. Pêche Piscic. 353/354; 239 - 262.
- CLAY C. H. , 1961. Design of fishways and other fish facilities. Dept. of Fisheries, Ottawa, Canada, 301p.
- DUNKLEY D. A. , SHELTON G. J. , 1991. Recent developments in automatic fish counters for salmon rivers. Int. Council for the Exploration of the sea, CM 1991/M, 27, 5p.
- FEWINGS G. A. , 1994. Automatic salmon counting technologies. A contemporary review. Atlantic Salmon Trust Publication, Pitlochry Scotland, 66p.
- GOSSET, C. , 1986. *Présentation et essais d'un computer à resistivite pour poissons* (Presentation and trials of a resistivity fish counter) . Bull. Fr. Pisc. , 303; 141 - 151.
- MCLEAVE J. D. , POWER J. H. , ROMMEL S. A. , 1978. Use of radio telemetry for studying upriver migration of adult Atlantic salmon (*Salmo salar*) . J. Fish. Biol. , 12; 549 - 558.
- SOLIMON D. J. , 1982. Tracking fish with radio tags. Symp. Zool. Soc. Lond. , 49; 95 - 105.
- STATSKO A. B. , PINCOCK D. G. , 1977. Review of underwater biotelemetry with emphasis on ultrasonic techniques. J. Fish. Res. Bd. Can. , 34; 1261 - 1285.
- TRAVADE F. , BOMASSI P. , BACH J. M. , BRUGEL C. , STEINBACK P. , LUQUET J. F. , PUSTELNICK G. , 1989. Use of radiotracking in France for recent studies concerning the EDF fishway program. Hydroécol. Appl. , 1/2; 33 - 51.
- TRAVADE F. , 1990. Monitoring techniques for fish passes recently used in France. Proc. Int. Symp. on fishways, Gifu, Japan, 119 - 126.



照片 1 鱼道上游设置的诱捕鱼的网络箱



照片 2 通过提升诱捕笼的底部计数



照片 3 水池型鱼道入口（上游）段中设置的诱捕陷阱



照片 4 位于鲑科鱼类水池型鱼道槽口中的自动电阻计数器的管式传感器



照片 5 位于鳗鱼攀缘坡上游段的自动电阻计数器的 4 个导管传感器



照片 6 升鱼机水箱提升阶段，录像监测鱼



照片 7 Garonne 河 Golfech 升鱼机计数站，上游视图



照片 8 Garonne 河上的 Golfech 升鱼机，自动录像计数系统



照片 9 通过计数窗观察到的小型鲤科鱼类



照片 10 在背光照明的情况下，观察西鲑通过计数窗



照片 11 微型发射机用于成鱼的无线电跟踪



照片 12 用无线电发射机标志鲑

第十三章 降河洄游：问题与设施

M. LARINIER^①, F. TRAVADE^②

1. 概要

降河洄游的鱼道技术远不如溯河鱼类通过设施先进。这主要是因为重建洄游鱼类自由运动的尝试始于溯河鱼类通过设施的建造，而且降河洄游问题只是新近才被重视和提出。另外研究降河洄游的有效设施要困难和复杂得多。这一情形不仅发生在法国，因为迄今没有一个国家找到了降河洄游的令人满意的解决办法，尤其在涉及大型设施的地方（EPRI，1994）。

2. 降河洄游涉及的种类和生命周期阶段

降河洄游，亦即游向大海或湖泊的降河洄游，涉及不同种类不同发展时期的鱼类。在法国，被法定为保护种类的淡水鱼种、洄游鱼种以及在特定时期进行降河洄游的种类主要有以下几类：

- 大西洋鲑（*Salmo salar*）和海鳟（*Salmo trutta trutta*）：为到达其索饵场向海洋洄游的幼鲑（smolt）及产卵后的成鲑（kelt）。必须指出的是，对海鳟成鱼提供降河通过设施要比鲑鱼重要得多，因为海鳟比鲑鱼有更频繁的多次产卵行为；

- 阿勒斯西鲱（*Alosa alosa*）：主要是幼鱼（多数成鱼产卵后死亡）。

- 芬塔西鲱（*Alosa fallax*）：幼鱼和成鱼。

- 鳗鱼（*Anguilla anguilla*）：仅成鳗，在向其海洋产卵场洄游期间。

- 海七鳃鳗（*Petromyzon marinus*）和河七鳃鳗（*Lampetra fluviatilis*）：两种七鳃鳗的幼鱼以及河七鳃鳗的成鱼。

- 鳟（*Salmo trutta fario*）和茴鱼（*Thymallus thymallus*）：向下游索饵场洄游的幼鱼和产卵后的成鱼。

- 白斑狗鱼（*Esox lucius*）：成鱼和幼鱼。

还有一些河流种类（鲤科、食鱼科）虽然没有被法定为保护种，但在生活史中也进行较长距离的洄游。这些运动包括周年性的、季节性的甚至每日性的洄游，其目的可能是产卵、索饵、躲避以及殖民等。

洄游行为根据种类及发育时期的差别发生在不同时期。

3. 人工治理河流对降河洄游鱼类造成的问题

在河流上建坝可能对降河洄游鱼类引起许多问题。这些问题包括：

① CSP - CEMAGREF, GHAAPE - Istitut de Mécanique des Fluides, Avenue du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE - France.

② Electricité de France - Research & Development, 6 Quai Waiter, 78401 CHATOU Cedex - France.

- 降河洄游在水库静水区延迟或甚至完全受阻；
 - 越过溢洪道或穿过涡轮机时对鱼类的伤害；
 - 鱼类或鸟类在水库蓄水区或涡轮机出口处的掠食引起的死亡；
 - 水质改变（水库中含氧量不足、涡轮机或溢洪道下游气体过饱和）引起的死亡；
- 本章将进一步考虑由水电站引起的问题（即，将与水质有关的问题先搁置一旁）。

一般来说，与溯河洄游种类，尤其是与鲑科鱼类有关的问题都已经研究的很彻底，但是对其他洄游种类的研究相对较少。下面的综述除非另行说明，否则仅适用于洄游的鲑科幼鱼。

3.1 穿过溢洪道的过鱼通道

穿过溢洪道可能是伤害或导致鱼类死亡的直接原因，也可能导致鱼类失去方向感或眩晕从而增加了被捕食或得病的几率。国外许多地方（美国及加拿大等）的研究已经证明直接死亡率因位点的差别有相当大的变化。根据记录，哥伦比亚河上的 Bonneville 坝、McNary 坝和 John Day 坝（皆有约 30m 高的溢洪道）的死亡率较低，在 0% 和 4% 之间。相反，在 Elwha 河，Gines 坝（60m 高的溢洪道）和 Elwha 坝（30m 高溢洪道）处的死亡率则高得多，分别为 8% 和 37%（BELL and DELACY, 1972; RUGGLES, 1980; RUGGLES and MURRY, 1983）。

能量在溢洪道中的消耗方式似乎对鱼的致死率有深刻影响。导致死亡率的因素有以下几个：剪切效应、溢洪道表面的磨擦、大坝底部消能池的紊流、当鱼碰到水时水流速度及水压的突变、碰撞到护坦或挡板时引起的震荡或损害。

当穿过溢洪道进入尾水池时，鱼类可以通过两种方式下落：在空中自由落体（脱离水体）或随水柱一起下落。

鱼类脱离水体自由下落时所达到的极限速度和鱼的体长有关。体长 10~13cm 的鱼类经过 25~30m 下落时达到的最大速度为 12m/s；体长 15~18cm 的鱼类经过 30~40m 下落后达到的最大速度为 15~16m/s；体长 60cm 的鱼类经过大约 200m 的下落到达的速度超过 58m/s。经验证明，无论什么体长的鱼类，当与水体表面碰撞的速度超过 15~16m/s 时，会发生重大伤害（如鳃、眼睛和内脏破损等）（BELL and DELACY, 1972）。体长 15~16cm 的鱼类下落 30~40m 的高度便能达到这一速度，而体长大于 60cm 的鱼则仅下落 13m 的高度。

体长小于 10~13cm 的鱼类自由下落时，入水速度一般在临界速度以下，无论什么高度都不会造成伤害。如果体长较大的鱼下落速度小于 15~16m/s 的临界速度时也不会造成伤害。后者对应到体长大于 60cm 的大型个体，其下落高度为 12m，或者体长 18cm 的个体其下落高度为 30m。

当鱼类在水柱中穿过溢洪道进入尾水池时，如果鱼类随着水柱减速且方向不发生偏转，鱼类的存活率将和最佳的自由落体的情况一样，并且和水体表面的速度是一样的（BELL and DELACY, 1972）。经过 13m 高度的下落后，水柱将达到 16m/s 的临界速度，超过这一高度，伤害和死亡将随高度的增加快速上升（落差 50~60m 时，死亡率为 100%）。

总之，自由落体穿过溢洪道，对于体长小于 15~18cm 的鱼类都是比较安全的，因为它们的下落速度不会超过临界速度。对于大型鱼类来说，自由下落或与水体一起下落危险程度是相同的。

在任何情况下，大坝基部的紊流度越低，鱼类所受的物理性撞击越小，减少物理损伤需要提供足够的水量，且没有危险的结构物，例如消能池，那么鱼类存活机会越大。

倘在坝基处有一个容积足够的水池，水柱自由下落至水池表面，则会比其他类型的溢洪道更合适，因为这样消除了溢洪道表面的擦伤（RUGGLES and MURRAY, 1983）。这种情况尤其适合小型鱼类，特别是在鱼类脱离水体自由下落的情况。

在法国，溢洪道很少对鱼类造成问题，尤其是有两栖类生活的河道上这些通常是高度小于 10 米的中小型大坝。如果它们能够安全地下落到下游一侧，大坝底部水体足够深并且没有过度具伤害性障

碍物（预铸块、抛石堆等）的话，那么溢洪道通常被认为是鱼类通过大坝最安全的方式。

3.2 穿过水电涡轮机的过鱼通道

穿越涡轮机的鱼类将遭受各种形式的压力，而很可能造成高死亡率。这些压力包括撞击运动中或静止的涡轮机部件（导流叶片、涡轮上的叶片或刀片）引起的物理损伤、突然加速或减速（由涡轮机入口处的 3~5m/s 加速到涡轮内的 10~30m/s）、剪切、水压的突变以及穴蚀现象。

许多国家（如美国、加拿大、瑞典、瑞士、德国、法国）已经作了许多实验研究，对象主要为鲑科鱼类，同时对鲱科及鳟鱼也做过实验，其目的在于确定这些鱼类在穿越几种主要的涡轮机时的致死率。这些实验的结果被总结在许多文章中（BELL, 1981; MONTREAL ENGINEERING COMPANY, 1981; MONTEN, 1985, EPRI, 1987; LARINIER and DARTIGUELONGUE, 1989; EPRI, 1992）。

培尔顿水轮机的致死率为 100%。幸运的是，这些涡轮机仅仅用在落差极大的大坝处，并且没有被安装在两栖类生活的河流上。

在弗兰西斯水轮机和卡普兰式水轮机的涡轮中，鲑科鱼类（幼鲑和幼鳟）的致死率变化较大。这时的致死率取决于叶片特征（直径、旋转速度等）、运行方式、水头差以及鱼类大小。在弗兰西斯涡轮机中致死率从低于 5% 到高于 90% 不等。一般来说，卡普兰式水轮机涡轮的致死率较低，从低于 5% 到高于 20% 不等。然而，这两种类型涡轮机的不同之处仅在于：弗兰西斯涡轮机通常安装在高落差大坝上。当两种类型的涡轮机安装在同样水头及流量的情况下，损害是相似的。在法国 Dordogne 河 Mauzac 电厂大型低水头弗兰西斯水轮机已经记录了大约 5% 的低致死率（LARINIER and DARTIGUELONGUE, 1989）。

不同鱼类间的致死率也是不同的。管鳔鱼类（鲑、鲱及鲤）鱼鳔中的气压可以通过气管和嘴来快速调控，因此这些鱼类能够忍受气压的快速变化。另一方面，对闭鳔鱼类（河鲈、梭子鱼）来说，气压的调控则通过鱼鳔血管中气体的改变来缓慢实现。气压急剧下降导致的鱼鳔破裂的危险因而大增，也因此这些鱼类对气压的变化是非常敏感的。

通常，由于成年鳟鱼体长较大，其致死率较高，可能为鲑科幼鱼的 4~5 倍。大型低水头卡普兰式水轮机的典型致死率为 15%~30%。在大部分小型水电站上的较小型涡轮机中甚至达到 50%~100%（MONTEN, 1985; LARINIER and DARTIGUELONGUE）。根据记录，致死率最低值 6% 发生在低水头、三叶卡普兰式水轮机（HADDERINGH and BAKKER, 1998）。

直到近来，幼体西鲱比鲑科鱼类更易于在涡轮机中死亡。在相同的涡轮机中比较所记录的致死率，幼鲱鱼为 65%~80% 之间，而对鲑鱼的致死率只有大约 10%~15%（TAYLOR and KYNARD, 1985）。然而，最近用新方法（个体气体标签，一旦鱼类经过涡轮就会充气膨胀使鱼浮出表面）的实验表明这些被观察的鲱鱼的致死率实际上和鲑科鱼类是相似的。因为使用的实验方案和恢复技术的原因，鲱鱼致死率一直是被过高估计的。

现在有许多用来预测死亡率的公式。在法国的研究中（LARINIER 和 DARTIGUELONGUE, 1989），已研发出以涡轮的性质和鱼的大小为基础的公式，用来预测幼体鲑鱼和鳟鱼在弗兰西斯和卡普兰式水轮中的死亡率。

在弗兰西斯涡轮机中，表示鲑科鱼类幼鱼死亡率的最佳回归公式如下：

$$P = [\text{SIN}(-4.12 + 1.25V_1^{0.821} + 2.28N^{0.19} (TL/esp)^{0.84} W_1^{0.71})]^2 \quad (R=0.87)$$

式中 P 为死亡率（在 0 和 1 之间）；V₁ (m/s) 和 W₁ (m/s) 为转轮入口处的绝对速度和相对速度；N (转数/分) 为其旋转的速度，TL (m) 为鱼的长度；esp (m) 为高度一半处测量的轮叶间距离。

这个回归公式的缺点是必须知道转轮的几何形状和运行方式才能评价入口速度三角的特征。也可

使用另一个参数较容易获得的替代方程：

$$P = [\text{SIN} (6.54 + 0.218H + 118TL - 3.88D1m + 0.0078N)]^2 \quad (R=0.85)$$

式中 H 为净水头 (m)；D1m (m) 为高度一半处测量的叶轮的入口直径；N (转数/分) 为转速；TL (m) 为鱼类的长度。

对在卡普兰水轮机中的死亡率有显著影响的惟一因素是鱼的长度 (TL, m) 以及在高度一半处叶片 (数量 N_p) 间的距离 esp (m) ($\text{esp} = 3.14D1m/N_p$)

对于鲑科幼鱼：

$$P = [\text{SIN} (13.4 + 42.8 (TL/\text{esp}))]^2 \quad (R=0.59)$$

对于鳗鱼：

$$P = [\text{SIN} (28.6 + 48.7 (TL/\text{esp}))]^2 \quad (R=0.85)$$

在大多数情况下，这些公式给出了死亡率的一个粗略估计值，并可用来鉴定可能引起相当大损伤的那些设施。然而，这些公式通常过高地估计了大型低水头卡普兰式水轮机引起的损伤。这些涡轮机中鲑科幼鱼的死亡率一般不到 5%。这一过高估计可以用统计计算中所使用的三角变换（反正弦）来解释。当计算比例或百分比时，这一转换应用在统计分析中，在可能值的两端（亦即接近 0 与 1 时），其估计值并不是那么好。若能接受对于某些极大的涡轮机来说可能会有预测出负的死亡率的风险，那么建议采用不带有三角转换的分析方法是更合理的。

3.3 捕食

水电站似乎使附近的鱼变得脆弱，更容易被食鱼鸟及凶猛鱼类捕食，从而增加了洄游鱼类的致死率。水库蓄水区可以为大量的凶猛鱼类提供栖息地，同时使得洄游鱼类聚集在大坝上游处，从而方便了捕食者捕食。穿越电站后可能使鱼类受到不同程度的物理损伤、眩晕、紧张、迷失方向甚至困在大坝底部的紊流或环流漩涡中。所有这些现象都增加了洄游鱼类被掠食者伤害的几率。尽管没有现成的数据来描述这些状况对鱼类死亡率的影响，但捕食现象对洄游鱼类的整体死亡率可能有明显的影响。Snake 河上两座大坝的溢洪道上刚释放到下游处的小鲑鱼的死亡率据报道达到 32% (RUGGLES 和 MURRAY, 1983)。在丹麦，穿过两条河流上浅水水库的鲑鱼幼鱼及海鳟幼鱼的死亡率分别为 81%~85% 和 99% (RASMUSSEN 等, 1996)。

4. 降河洄游设施

4.1 概要

建造降河洄游鱼类的过鱼设施目的在于防止鱼类被拖入涡轮机进水口中，并且引导它们进入能够将鱼类转移到下游的旁通道中。

降河洄游的鱼类随水流一起运动。工程师在设计降河鱼类通过设施时必须考虑到这一个洄游行为模式特征。设施必须设计为可以引导鱼类随着水流流态进入旁通道，并且不需要向上游游动以找寻设施周围的一个安全路线 (ASCE, 1995)。

虽然有很多不同的系统用来防止鱼类被夹带进入进水口，但它们的效果并不相同。它们可能采取障碍物物理性排斥鱼类进入涡轮机入口的方法，也可能采取刺激物行为障碍的方法来引导（吸引或排斥）鱼类。无论采用何种方法，都包括直接转移或捕获转移设施来绕过障碍物。

4.2 物理性格栅

防止鱼类进入涡轮机的一个有效的办法是采用鱼不可能通过的小孔口格栅。

4.2.1 格栅或过滤面积

格栅表面的面积由过鱼种类的游泳特征决定。格栅前的水流应保持足够缓慢以使鱼类有足够的时间找到旁通道入口，否则它们会撞到格栅上。

流向格栅的水体流速（垂直格栅面的流速分量，在上游 10cm 处测量）应该适合过鱼种类的游泳能力以及相应生命阶段，必须低于巡航式流速的上限（大约 $0.15+2.4L$ ， L 为鱼的体长，单位为 m，VIDELER, 1993）。对于幼鲑来说（15~20cm 长），水流速度大约为 0.5m/s。苏格兰采用更低的值 0.3m/s。因为那里的幼鲑体长较小，约为 12~15cm。美国西海岸的幼鲑体长更小，因此要采用明显更低的流速：体长大于 6cm 的流速为 0.25m/s，体长小于 6cm 的幼鱼采用流速为 0.15m/s（CLAY, 1995；ASCE, 1995）。

4.2.2 格栅表面的定位

格栅应放置在横跨进水口可以引导鱼类进入旁通道的地方。和水流方向呈对角线放置格栅，并且把旁通道入口设置在离格栅较远的下游端是比较有效的。格栅可以通过两种方法引导鱼类：

- 可垂直或近乎垂直放置，以与总流向成一很小角放置格栅（而不像大多数现有设施中的 90° ），并且将旁通道入口设置在格栅下游最远的一端。
- 格栅可与垂直线略微倾斜，以引导鱼往水的上层游动，可放置一个或多个旁通道入口，位于侧边或格栅上方。
- 格栅表面与水流正常方向的角度在任何情况下都小于 45° ，且在某些情况下可低至 20° 。视格栅表面的角度而定，产生一个平行于格栅表面的、可达到法向速度 1~3 倍的速度分量（切向速度）。

4.2.3 格栅的类型（材料和净间隔）

物理格栅以多种形式出现，包括多孔板、金属杆、楔形—金属丝、塑料网或金属网。

金属丝或网丝的净孔隙尺寸取决于欲阻拦鱼类的最小体长。小于 $1/10$ 鱼类体长（ L ）的棒间距足以将鱼类拦在入口外。然而，为了避免鱼类被夹在棒间隙，应该采用更小的净孔隙（大约鱼类体长的 $1/12$ 到 $1/15$ ）。

4.2.4 格栅水力

物理性格栅的效率和引导鱼类进入旁通道的能力，以及旁通道的布置（见 4.5 节）密切相关。因此不仅要求水流速度要适应鱼类的游泳能力，而且临近格栅的水流速度必须均匀。不能有流速太高或太低的区域，因为这样的区域不利于引导鱼类顺利通过。高速水流可能使鱼类撞击或挤压，而低速水流则容易引起鱼类聚集从而增加被捕食的几率。

4.2.5 保护与维护

必须防止格栅被大型物体造成机械伤害，并且应防止大量碎片的损害。碎片积累造成的堵塞既可能导致对格栅的机械损害，也可能改变水流速度而造成鱼撞击格栅。一般来说，拦污栅可用来保护细网孔格栅，并限制碎片在旁通道入口的积累。拦污栅的金属棒之间的孔隙应当考虑到会通过它的过鱼种类的尺寸以及行为特征。

4.2.6 物理格栅的例子

目前已经被利用的格栅有很多类型：

- 洄游季节在入水口拦污栅上临时设置的细网目格栅（对大西洋鲑幼鱼为 $2.5\text{cm}\times 2.5\text{cm}$ ）（AITKEN 等, 1966）。这种格栅的设置对进水口大小（因为水流速度必须低于 0.30m/s）和维护需要（为了清洁必需移开格栅）提出了非常严格的限制。
- 与水流成一定角度的细杆垂直格栅在美国被广泛使用（ASCE, 1995）。考虑到水道的宽度，格栅通常和直线保持一个较小的角度放置，可以横跨整个渠道或者呈“V”字形设置以降低系统的总长。格栅和水流的角度应尽可能小（ 15° 至 45° ），以便鱼能容易被导向设置在下游端的旁通道，还确保格栅尽可能自我清洁（图 1）。

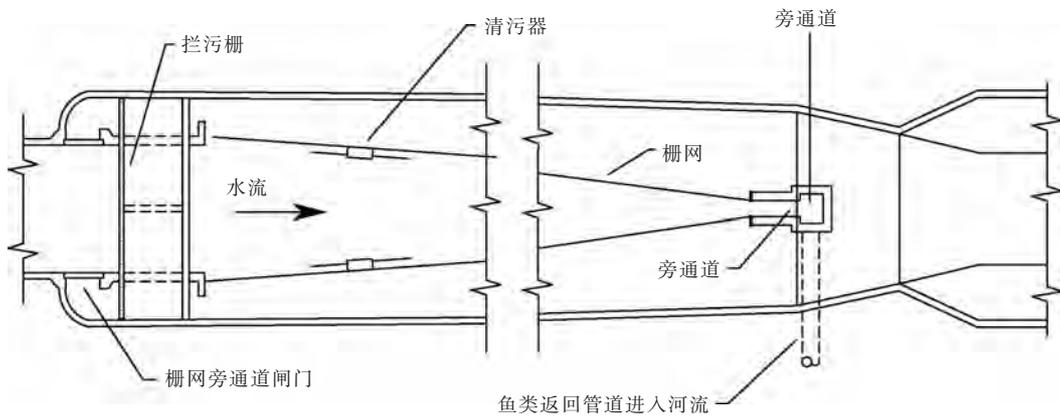


图 1 斜角格栅 (自 EPRI, 1994)

● 旋转式具自我清洁功能的鼓形格栅在美国的灌溉渠道中被广泛应用 (NIETZE 等, 1990; RAINEY, 1990)。这些由电动马达提供能量的格栅为引导鱼类进入浅水渠道提供了很有效的方法, (图 2)。现有的鼓形格栅每个鼓的尺寸从长 0.9m、直径 0.45m 到长 7m、直径 6m (ASCE, 1995)。这些鼓形格栅以一定角度 (约 26°) 横跨渠道以引导鱼类进入旁通道。网丝主要由不锈钢或电镀金属丝制造。因为鼓形格栅的 70%~80% 要淹没在水体中才有效果, 所以鼓形格栅在应用上只能用于水位变化不大的站点。经验表明鼓形格栅在引导鲑鱼鱼苗及幼鱼进入旁通道是十分有效的, 且对鱼体几乎没有任何伤害。

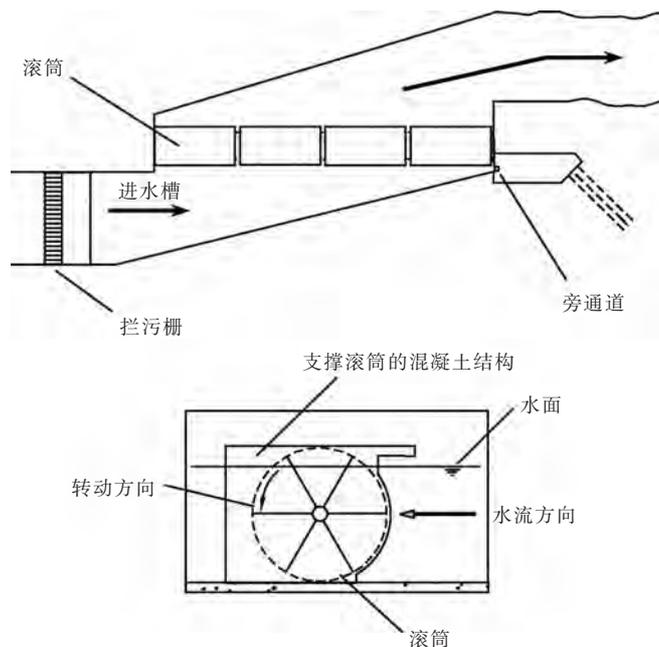


图 2 带有角度的鼓式格栅 (自 EPRI, 1994)

● 淹没式移动格栅被应用在美国西海岸的一些大型水电工程上 (哥伦比亚河及支流)。那里的涡轮机流量可以在 340~570m³/s 范围内变化 (WILLIAMS, 1990)。这些 6~12m 长的格栅被安装在涡轮机入口处的上方部分以使鱼类进入旁通道系统, 使鱼类进入尾水或集运设施。这种设计的基础是观测资料的结果: 大部分洄游的幼鲑在水体顶端进入入口。这种格栅的效率和位置、过鱼种类以及涡轮机入口的水力状况有关, 其变化较大 (20%~75%) (图 3)。这些系统的机械结构复杂, 难以操作

和维护 (NORDLUND and RAINEY, 2000)。

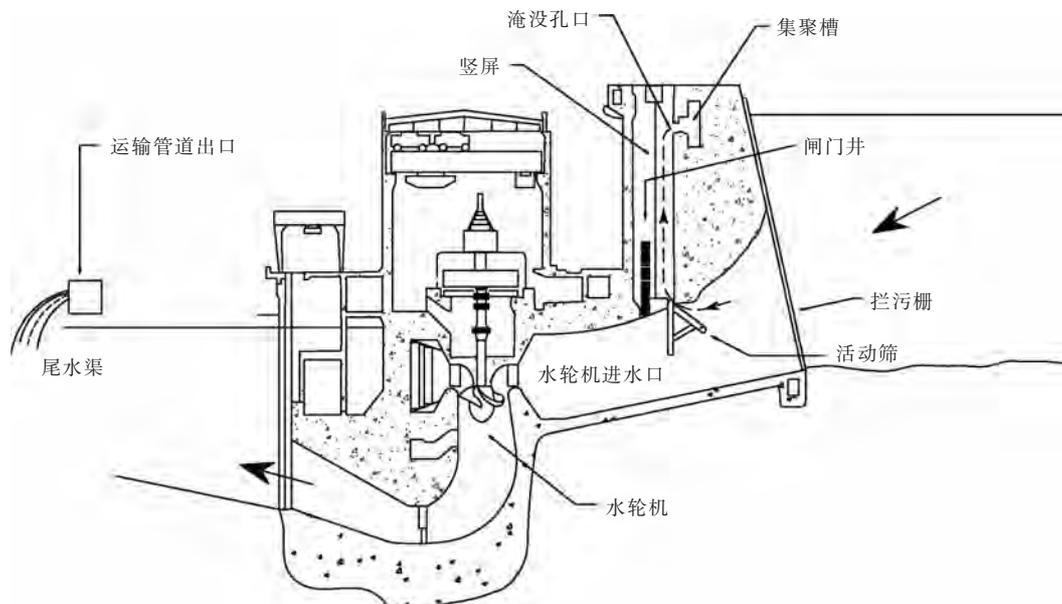


图3 潜水移动式格栅

● Eicher 或“撇渣”格栅 (EICHER, 1985) 以较小的角度被安装在涡轮机进水口处以及管道或压力导水管处来偏转鱼类进入旁通道 (图 4)。这种格栅由间隔 2 毫米的楔形金属丝形成的 2 毫米的三角框构成。水管中最大的平均流速为 2.4m/s。穿过格栅并进入旁通道入口的法向流速在 0.45m/s~1.5m/s 之间。格栅可以绕轮轴旋转以使网面对水流，因而可以冲洗掉任何碎片。这种格栅的主要优势在于它可以在较高的临界速度下运行，并有非常光滑的不锈钢剖面金属丝以减少对鱼类的机械损伤。在水流速度达到 2m/s 的情况下，几种太平洋幼鲑的存活率仍可高于 90%。另外它还可以自我清洁。这种格栅的上游需要放置拦污栅以防止大的碎片进入 (WINCHELL 等, 1993)。

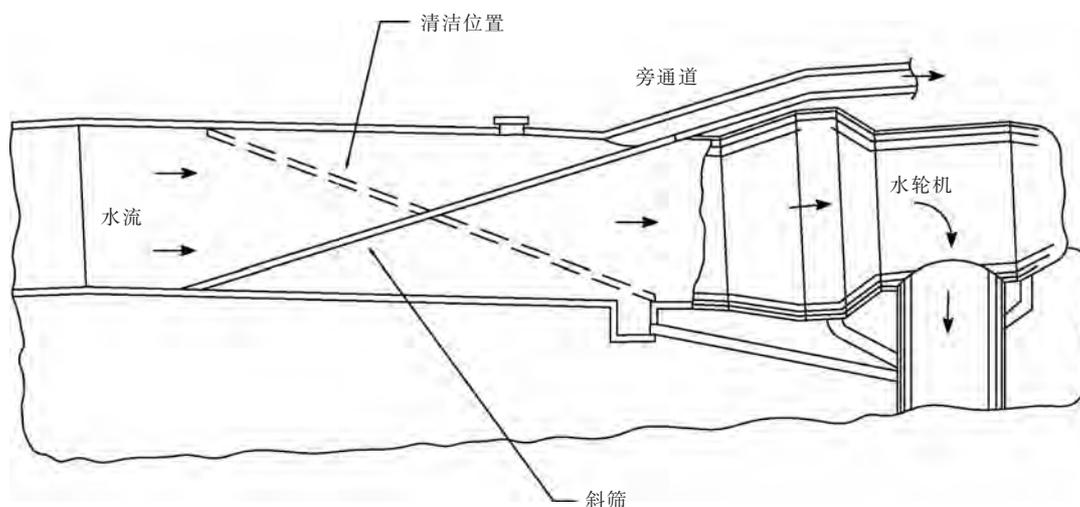


图4 Eicher 格栅

● “组合倾斜格栅” (Modular Inclined Screen - MIS) (TAFT et al., 1992, 1993) 是近来出现的一种类似于 Eicher 格栅的新格栅。这种格栅应用于矩形管道，这种管道可适用于大范围的进水口及水流形态。这种格栅系统由带拦污栅的漏斗入口、插板狭槽、楔形金属丝制成的矩形格栅以及引导鱼

类通过管道进入下游的表面旁通道构成。矩形格栅一般与水流方向保持 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的角度放置。组合式斜格栅和 Eicher 格栅一样都具有轮轴。检验水力特点和鱼类行为的水工模型测试给出了令人满意的结果。在高速水流 ($0.6\sim 3\text{m/s}$) 下可使鱼类偏转并且存活率在 99% 以上 (TAFT et al., 1993)。

4.3 行为性格栅

这些设施通过利用鱼类对各种刺激的自然反应 (吸引或排斥) 来引导鱼类。这些障碍对设计者及利用者来说都是方便的, 因为它们仅仅需要最小程度的保护和最少的清洁。

在各种类型的行为性格栅试验中, 视觉的、听觉的、水力的及电力的刺激被广泛应用。于是产生了泡幕格栅、声音格栅、固定的及可动的链式格栅、吸引或排斥性的光照格栅、电力格栅以及流动动力式 (“百叶窗”) 格栅。实验室或测试站点, 行为格栅已获得了令人满意的结果。然而在全尺寸 (非比例缩尺) 的设施中还没有很多的评估结果。科技还未到达人们期望的水平, 在控制条件下取得的结果在实际情况中未必可行。

在利用行为性格栅时应特别小心, 特别是因为产品的制造商有意提高技术的应用率, 可能故意夸张其效率。

4.3.1 光线

闪光灯被认为可以用来排斥鱼类。美国和加拿大已经做过用淹没的频闪灯将洄游鱼类引离进水口的实验。这种设施的效率变化相当大, 结果可以从可接受值变化到零 (EPRI, 1994)。除非位点的设置非常适合使用该技术, 一般来说此方法是不可靠的。

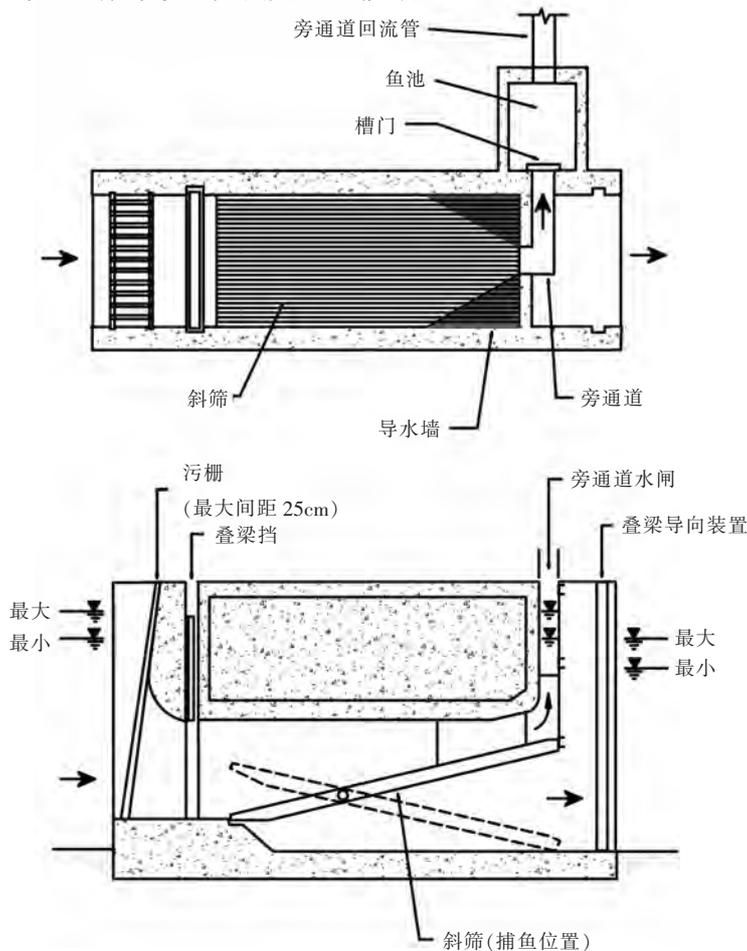


图5 组合式倾斜格栅 (MIS)

从效率来看，偏转成鳗向下游游动的“排斥”灯格栅得到了令人满意的结果（HADDERINGH et al., 1992）。这些格栅上安装有淹没在水中的连续光源，利用鳗鱼怕光的生理特征使其进入黑暗区域。

观察表明，夜间降河洄游期间，鲑科鱼类被连续光源所吸引。在法国，采用低功率间歇式照明（水银蒸汽灯）吸引鱼类进入旁通道附近，首次得到了令人满意的结果。一旦光源被切断，鱼就会进入旁通道（LARINIER and BOYER - BERNARD, 1991a; 1991b; LARINIER and TRAVADE, 1996; 1998; GOSSET and TRAVADE, 1999）。在法国受监测设施（阿列日河吉尔霍特电厂和阿列河普特斯坝）中获得的一些最新结果表明，采用连续光源极大提高了进水面降河洄游旁通道的效率。美国的试验表明，用水银蒸汽灯获得的结果因过鱼种类的不同有所变化，一些种被吸引，而另一些则被这种光排斥（EPRI, 1994）。

4.3.2 电力刺激

过去几年中，电力格栅在法国等许多国家得到应用，但都没有得到令人满意的效率（EPRI, 1986; 1994）。法国 Nive 河上用大西洋幼鲑进行了几年的实验没有得到令人满意的结果，其效率仅在 15% 左右（GOSSET and TRAVADE, 1999）。

4.3.3 声音

因为机械部件很少，因此造成的堵塞也较少，所以许多水电站经营者倾向于声音格栅。在 20 世纪 80 年代，北美利用变频器产生声音的排斥效应做了许多实验。美国开发了两种系统并且申请了专利。一种为 EESCO（Energy Engineering Services Company）公司的低频系统（频率低于 3k 赫兹），另一种是由 Sonalysts 发明的超声波系统（鱼惊™）。低频系统可以对多种过鱼种类起作用，而超声波系统主要对鲱科鱼类起作用（EPRI, 1994）。

在英国，Fish Guidance systems Ltd (FGS) 开发了另外两种低频系统。一种为著名的 SPA（Sound Project Array）系统，采用第一个专门用来威慑鱼类的电磁变频器，而不同于以往，是采用为军队或其他用途设计的变频器。另外一种为已经申请专利的 BAFF（Bio - Acoustic Fish Fence）系统，它将声音变频器和气泡帘结合在一起。在 BAFF 系统中，声音被困在气帘中，产生的声墙用来引导鱼类进入旁通道。

到目前为止，用 SPA 和 BAFF 两种系统对大西洋鲑首次降海幼鲑转向的试验产生了不同的结果。在英国实验是在条件较好的情况下（浅水小型河道、较大的旁通道并且高比例的流量）运行，在夜间得到了较好的效率（70%），而在白天效率较低（30%）（WELTON et al., 1997）。在法国，引导首次降海幼鲑进入表面闸门及小型水电站的小型旁通道的实验结果令人失望，其效率实际上几乎为零（GOSSET et al., 1999）。

导致这些结果的原因可能是：鲑科鱼类对频率超过 50Hz 的声波不太敏感。据 KNUDSEN 等人（1994）最近的观测，最敏感范围为 10~30Hz。美国正进行实验研究以改进用于鲑鱼的次声波障碍（TAFT et al., 1996）。

4.3.4 百叶窗

流体动力式或百叶窗式格栅（图 6）是由一系列垂直狭板构成，每个狭板都和水流方向保持直角（ASCE, 1995）。自从 20 世纪 50 年代以后，这种格栅已经在许多地方得到应用。最著名的是美国西海岸的灌溉渠道入口（流量可高至 140m³/s）以及加拿大海边省份在小型水电站的进水口做的实验。在美国西海岸，这种格栅已经逐渐被旋转鼓形格栅取代（NIETZEL 等, 1995; ASCE, 1995）。由于这种格栅对鲑科幼鱼 60%~90% 的效率被认为是不够理想的，且比物理性格栅低得多，因此渔业部要求移除这种格栅。

百叶窗格栅与水流方向的角度通常在 10°~15° 之间。狭板间距由于过鱼种类尺寸的差别在 2.5~

5cm 之间变化。流向格栅的水流速度必须保持固定且均匀，其数值也和过鱼种类的尺寸及游泳能力有关（对大西洋幼鲑而言在 0.6~1m/s 之间）。旁通道中的水流速度为格栅附近水流速度的 1.5~2 倍（RUGGLES, 1980；ASCE, 1995）。

第一批百叶窗格栅被安装在接近渠道的整个渠深里。然而近来一些“部分水深”的百叶窗格栅在美国开始使用，这一措施的依据是大西洋幼鲑和幼鲱生活在水体的上层。

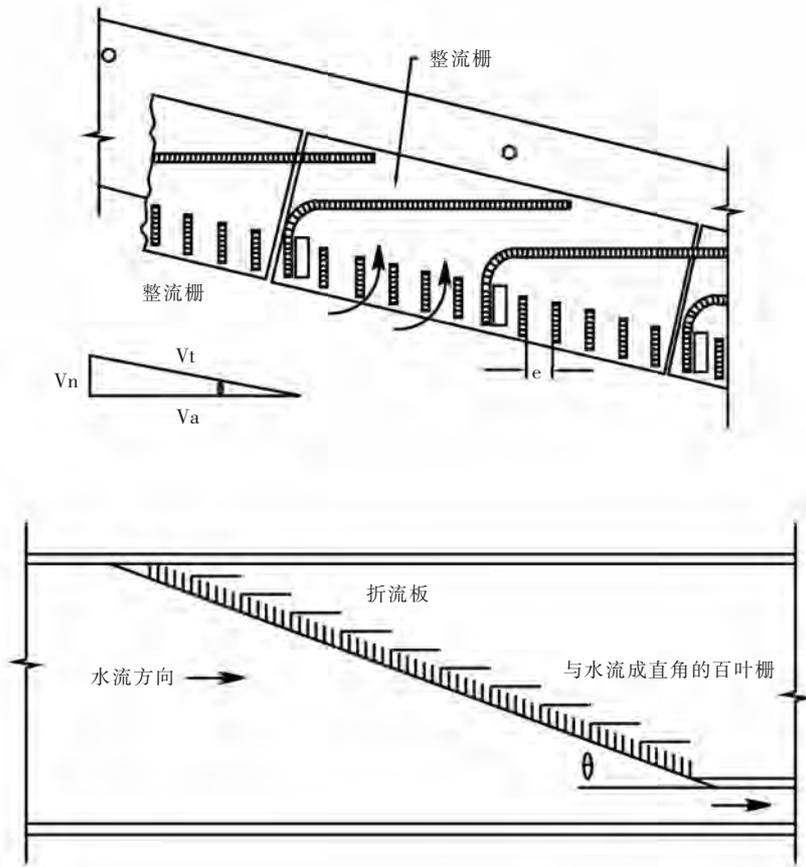


图 6 百叶窗式格栅

最近在 Connecticut 河上的 Holyoke 水电站宽 40m、深 6m 的进水渠道中设置了一个部分水深百叶窗系统（最大流量 140m³/s）。这一非常长的设施由超过 120 多 m、深 2.75m 的多个聚乙烯百叶窗构成，将鱼导向流量约 4m³/s 的旁通道。该系统对鲱科鱼类幼鱼的效率为 86%，对大西洋鲑首次降海幼鲑为 97%（ODEH 和 ORVIS, 1998）。在另一个地点（梅里马克河伊斯特曼福尔斯电站）设置了一个浮动式的百叶窗格栅，结果是令人满意的（RUGGLES 等, 1993）。

在河流流量及水流速度在降河洄游时期保持相对不变的地方，可以考虑使用百叶窗式系统。此系统的效率高度取决于进水渠道的水流流态。百叶窗式系统需要拦污栅来保护自身免受漂浮物的破坏，这些漂流物可以在很大程度上降低过鱼效率。

4.3.5 表层导流墙

可采用与水渠入口成一角度设置的导流墙使在表层洄游的那些鱼类转向，例如鲑科鱼类。在美国东海岸的 Bellow Falls 电站（康涅狄格河）安装了这种设施。引导墙垂直往下到一半深达 9m 的水位，以 40°角穿过去的，并且引导鱼类进入泄流闸门和导入尾水的渠道。安装在拦污栅附近的辅助旁通道用来接纳在导流墙下通过的鱼。导流墙的效率估计为 84%，另外 10%的幼鲑穿过辅助旁通道，6%的幼鲑进入涡轮机口。该设施的效率很可能和导流墙与水流的角度有关，也可能和引导墙淹没的水深有

关 (ODEH and ORVIS, 1998)。

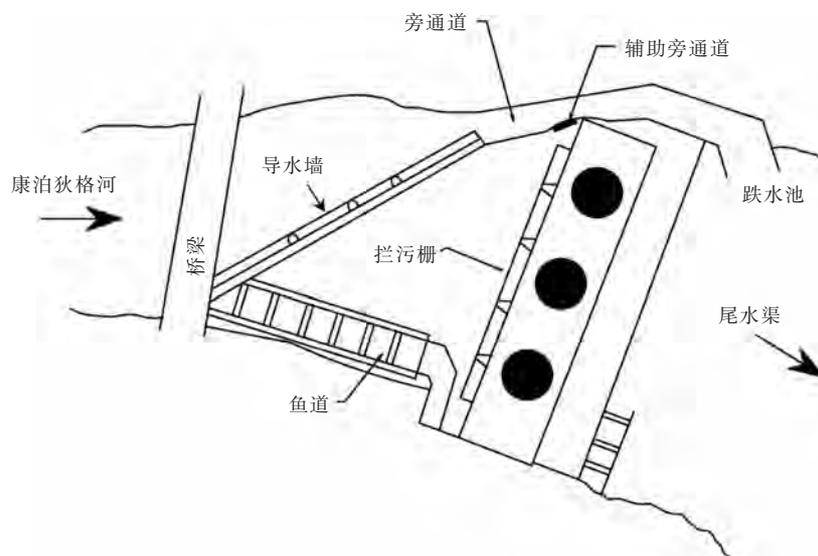


图7 Bellow Falls 电站的导流墙 (ODEH and ORVIS, 1998)

4.4 与降河旁通道结合的传统拦污栅

在法国，大多数水电设施在明确降河洄游设施的重要性之前便已经建立了。利用例如细网格栅等物理性格栅来改进现有设施是不切实际的。这是因为为了降低临近速度、增加过滤面积，需要扩大大多数的进水渠口。研究的重点便因而聚焦在更加经济且简单的技术上。

当表明旁通道和用来转移幼鲑及幼海鳟的传统拦污栅连接在一起时，用来评估表面通道效率的试验得到了令人满意的结果。在大多数情况下，拦污栅安装在表面，同时可以作为大型鱼类（降河洄游成鱼）的物理性格栅。有时这些拦污栅也可以作为幼鱼的行为性格栅，因为据观察这些幼鱼在自然情况下不愿意通过拦污栅。这种方法对水位较深的入口是更合适的。

法国已经实施了大量实验来量化连接传统拦污栅和表面旁通道的效率，同时来确定最佳位置和尺寸，并确定其使用范围 (LARINIER and TRAVADE, 1996; 1999; CHANSEAU et al., 1999; CROZE et al., 1999; TRAVADE et al., 1999)。

这些实验表明：这些设施的效率和两个因素密切相关：

- 拦污栅对鱼类的排斥效应必须是充分的；
- 进水渠道的速度模式必须使鱼类能够在拦污栅前停滞足够长的时间（亦即，要有足够低的和拦污栅平面垂直的速度法向分量）以确保鱼类能被引导进入旁通道入口（亦即，要有良好的和拦污栅平面平行的速度切向分量）。

拦物栅的排斥能力到底如何将取决于鱼类的尺寸及棒条间距，以及或多或少类似百叶窗式效应的切向流速分量。

为了防止幼鲑穿过拦污栅，棒条间距应该保持在鱼类体长的 $1/10$ 左右。然而，在以鲑鱼和海鳟幼鱼为实验对象的实验中，杆间距为 $2.5\sim 4\text{cm}$ 的拦污栅具有“行为”性的排斥效应（大约鱼类体长的 $1/8\sim 1/4$ ）。当杆间距继续增大时，排斥效应迅速降低。当间距为 $6\sim 7$ 时，鲑科幼鱼会很轻易的通过，除非有很强的与拦污栅垂直的切向流速分量。

在良好的流体动力条件下，垂直于格栅的流速分量适当以及具明显切线方向水流的情况下，鱼类体长 $1/7\sim 1/8$ 的棒条间距可以造成显著的排斥效应。

当拦污栅与进水渠道的轴保持一定角度设置时便可以产生切线方向的流速分量。然而，这可能导

致进水口临界流速分布不均匀。速度模式的不对称性也可由方向的变化或拦污栅上游一定距离处入口水道横截面的改变引起。

可使大西洋幼鲑在格栅前保持足够时间停留的最大水流速度为 0.5~0.6m/s。当格栅前方水力条件合适时，例如有明显的横向水流引导鱼类进入旁通道，此时更高的水流速度也是可以接受的。

旁通道入口的效率不仅取决于其流量，还取决于入口附近及旁通道中的水力条件。旁通道的“影响区域”，亦即鱼类可发觉流向的旁通道上游区域，可以被进水渠道中不均匀的临界水流造成的上升流在很大程度上削弱，因而可能在很大程度上降低水流往旁通道方向的水平流速分量，因此模糊了旁通道入口。有时，通过在进水口正上游处安装水平淹没格栅可用来降低上升流的效应。在 Soeix (LARINIER 和 TRAVADE, 1996) 和 Camon (CROZE 等, 1999; LARINIER 和 TRAVADE, 1996) 这两个地点，旁通道入口处水流条件的改进（通过安装水平格栅获得的改进）增加了设施效率，使其从 15%~35% 上升到 60%~75%。

若是进水渠道系统包含有数个拦污栅与往上游凸出的拦污栅支墩，情况会变得更加复杂。鱼类可能被困在由此系统造成的任何一个湾区中，无法轻易被引入单一的旁通道入口。在这种情况下，每个入水口都需要一个降河洄游的旁通道。

在法国 (LARINIER 和 TRAVADE, 1999)，对表面旁通道结合拦污栅的地方的近期调查显示：当水力条件较好的情况下，效率保持在 55%~85%，当水力条件较差时效率为 10%~20%。后者的例子如：旁通道位于鱼类聚集区域的对面沿岸，或者旁通道入口水流条件不合适，或者拦污栅的排斥效应不明显。

4.5 旁通道和降河洄游集运设施

旁通道

为了避免鱼被夹带进入取水进水口，无论使用哪一类型设施，都需要一个或一个以上的旁通道。这些旁通道对于引导鱼类绕过障碍物和使其安全进入原始河道环境（以水电站为例，进入大坝下面的尾水或水道）是必需的。这些旁通道可与物理性格栅或行为性格栅联合使用，或者是如果在合适的水流条件下鱼类自然进入旁通道时可单独使用。后者可能相对鲑科幼鱼来说，涡轮的入水口淹没在深水中的情况下。

旁通道的效率高度依赖于鱼类对水力状况的反应（水深、流速、加速度等），而水力状况又是由旁通道自身建造特点决定的（位置、形状、尺寸等）(ASCE, 1995; LARINIER 和 TRAVADE, 1999)。

旁通道入口必须设置在鱼类被引导聚集的地方附近，例如在物理性格栅或行为性格栅的下游一端。幼鱼的旁通道一般由位于表面的矩形开口构成，其开口尺寸和流量有关。最小的旁通道尺寸（入口的宽度和水深）应以不愿通过过窄或过浅的设施的鱼类反应为基础。对幼鲑来说，这个尺寸的最小值对宽度和水深而言，一般为 0.4~0.5m。

旁通道的效率高度依赖于入口处的水力条件。观测显示当水流加速度太高时，鱼类由于对速度梯度非常敏感因而不愿意通过。进入旁通道的水流加速度必须适中且渐进。在下游处的中间池而不是入口处控制水流，有助于降低控制旁通道入口处的水流加速度（图 8）。在不可能安装这种水池的地方，旁通道的流量可通过一个宽堰或一个翻板门的方式来控制。这两种皆比翻板门适合，因为垂直翻板门在门上缘正上游处形成很大的速度梯度。旁通道入口也应尽量避免产生水流分离，紊流现象可以通过消除剧烈的拐弯，或是必要的入口边缘采用圆弧形来避免。

旁通道的流量和穿过涡轮机的流量有关。在法国进行的实验中，令人满意的旁通道流量的范围在涡流机流量的 2%~10% 之间。这一比例随着不同位点的各种参数有所变化，因为这些参数（旁通道

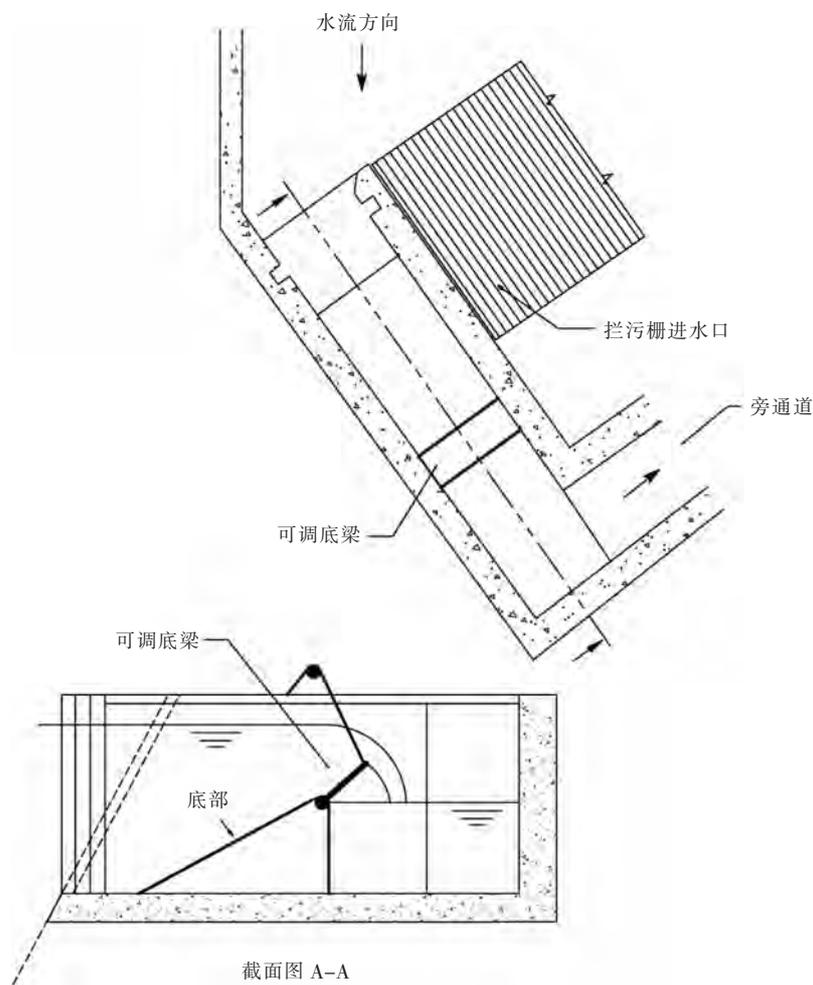


图8 降河洄游旁通道入口的平面和截面概念图

位置、水力特点、拦污栅特点等)影响着旁通道效率。这些参数越是不合适,旁通道中所需流量就会越大。

美国东北部目前所用的设计标准和法国的相似。举例来说,存在倾斜的引导设施时为涡轮机流量的2%,当临近水流与入口保持直角时则为5% (ODEH and ORVIS, 1998)。

在美国西海岸,表面旁通道越来越频繁地用在哥伦比亚河及支流的大型建筑结构上,虽然这些设施的尺寸和设计与法国的差别很大,5%~10%的涡轮机流量的设计标准是相似的 (FERGUSON et al., 1998)。

确定进水口上旁通道位置的原则显示在图9和图10中。当格栅角度呈锐角时,旁通道应安装在下游末端。进水渠水流很不对称的情况下,旁通道应当安装在鱼类聚集的环流区域。在没有非对称水流或不稳定水流的情况下,安装两个旁通道似乎是更合适的。在进水渠水位较深的情况下,可以安装带有几个入口的集鱼廊道。如果过滤面在垂直面上倾斜,旁通道应安装在平面的上部分。

宽的进水渠道或进水渠道的水流流态不能将鱼聚集在一特定区域时,需要安装几个旁通道。

影响旁通道的主要问题是堵塞或漂流碎片。这是因为鱼类聚集的区域便是旁通道该设置的区域,同时也是碎片积累的地方。为了克服这一问题,放水路的转移设施应足够宽以便于将漂流碎片带到下游。

将鱼类转移到下游

穿过旁通道后,鱼类必须被转移回到河流中。可以通过两种方法做到这点:旁通道后立即提供转

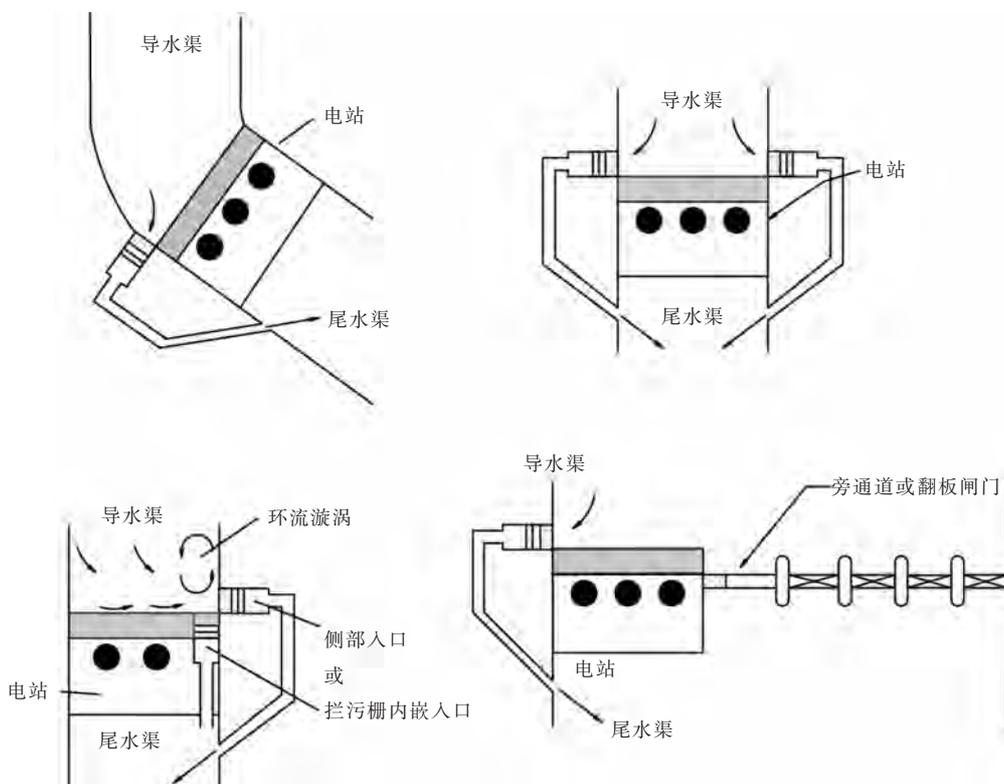


图9 水电设施进水渠处降河洄游旁通道位置的平面概念图

移设施或通过运输设施（如卡车或拖船）。

使用旁通道中的全部或部分水流，鱼类在同尾水区合并前经由暗渠或明渠通过电厂转回到主河道中。和明渠相比，管道更容易堵塞，并且不容易检查和维护。由于安装设施位点的不同，管道和渠道有许多不同的形状及区段。无论何种设计，都必须有平滑的内部表面及连接点，并且没有剧烈的拐角以避免对鱼类造成伤害。排出水体撞击下游水体表面处的流速（包括水流的垂直与水平分量）不能超过10m/s。有些机构甚至认为流速不能超过7~8m/s（ASCE，1995）。为了限制剪切效应及避免射流在下游水池喷射得过深，水体喷射最好分散开。鱼类不应当被转移到静水或缓水环境，因为那里很可能聚集着捕食者。

当旁通道中的水流量极大时（几个 m^3/s ），鱼类应通过倾斜格栅被引导进入较小的排放流量中。格栅可能是横向或水平，这样可以使转移鱼类的管道或渠道的尺寸有所减小。格栅通常是有“栅”的（楔形金属丝格栅较好），棒条净间隔的大小取决于过鱼种类。对大西洋幼鲑而言，棒条直径应为1cm，净间隔1cm（即孔隙率50%）。当过鱼种类个体较小时，杆间距也应变小。

鱼类诱捕及转移设施

在某些情况下，鱼类不能立刻返回到电站下面的河流中，或者必须经过一系列障碍物。在这些情况下，鱼类可以通过卡车或拖船转移到下游。这种操作需要将鱼类集中在一个暂养池中。暂养池中的水容量及流量根据运输频率（通常每天1~2次）进行调整。大多数诱捕陷阱和一个倾斜格栅一起作用。格栅可以过滤来自旁通道下的鱼类，通过滑道将它们引入暂养池。暂养池的容量由任何时候捕获鱼类的最大数量决定。一般按每kg鱼类需要30L水体计算（亦即每 m^3 约35kg鱼）。流入暂养池的水体流入率应当足够保证每小时将容纳池内的水体更换1~2遍。转运水箱的容量基于每kg鱼15L的计算基础（也就是每 m^3 水体大约70kg鱼）（BELL，1986；ASCE，1995）。

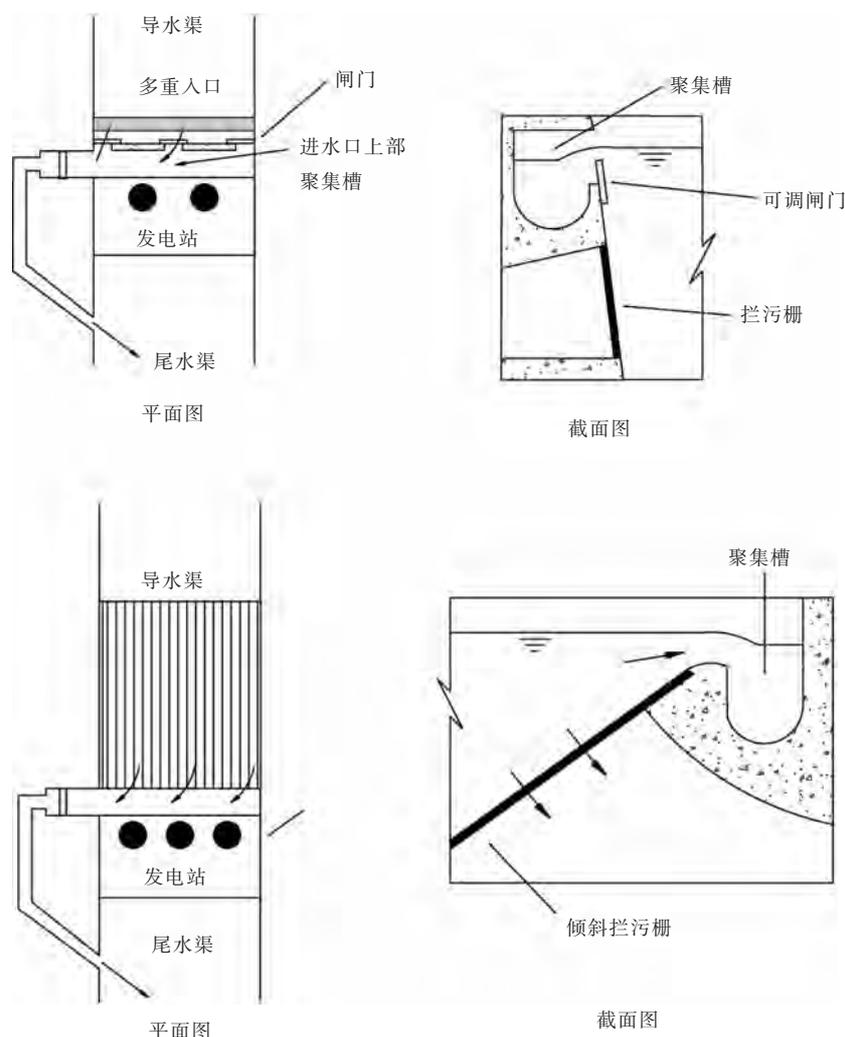


图 10 水电设施进水渠处降河洄游旁通道的平面和截面概念图

4.6 穿过涡轮机或溢洪道的鱼道

在大多数小型水电工程中，当前的技术，无论是物理性格栅还是结合传统式的或带倾斜角的拦污栅的表面旁通道，都可以显著降低对鲑科幼鱼及成鱼的伤害。虽然有时需要对设施做出大的调整，这些设施的效果还是相当明显的。

另一方面，在大型河流的下游河段上经常有低水头但高流量的设施，这种情况下要阻止大部分洄游鱼类穿过涡轮机是十分困难的，除非做一些大范围且代价昂贵的改进。此外，这些场所穿过涡轮机时对幼鱼的致死率通常是适中的。因此，提供低水平的保护可能是更经济实惠的。穿过溢洪道、垃圾及冰的排污道、或者特殊表面旁通道的池水可以通过大部分鱼类，取决于这些设施相对于涡轮机入口的位置。在存在几个溢洪道或不同特点涡轮机的地方，这些设施都应当得到详细评价。那些对鱼类具有最小伤害的设施应当在降河洄游期间充分利用。

4.7 其他种类

鲑鱼以外种类的降河洄游相关的问题直到近来才引起人们的关注。

对幼体西鲱鱼来说，因为其洄游行为和鲑科鱼类相似（在表层进行降河洄游），用于鲑科鱼类的

设计或设施用在鲑鱼上应该也是有效的。只要再考虑一下两种鱼类的尺寸及游泳能力的差别就可以了。此外，在法国，这种鱼类常常需要通过装有低速大型涡轮的低水头设施，以便于将致死率控制在较低水平（小于5%）。对这些鱼类具有重要作用的河段，仅有少数设施能引起中等程度的伤害，因此死亡鱼类的总量将不足以对种群造成明显的威胁。于是，在目前的技术状况下，用于鲑鱼的特殊降河洄游设施并不在优先考虑的范围内。除非未来技术有所改进，才会将之纳入中长程计划考虑。

就鳗鱼 (*Anguilla anguilla*) 而论，因为它们的洄游需求在法国也只是在近来才被承认，所以还没有专门的解决方法得以实施。仅有物理性格栅似乎是有效的，但是这些设施大部分都需要再次修改进水口的尺寸以维持当棒条间隙减小时的过滤区域。由于鳗鱼的底栖行为，用于幼鲑的带有拦污栅的表面旁通道对鳗鱼未必有效。需要对底层旁通道进行试验，虽然人们必须承认即使这项技术被证明是有效的，如何设计容易维护的设施仍是一个巨大的挑战。由于鳗鱼怕光的天性，采用光排斥格栅似乎是更有把握的方法 (HADDERINGH et al., 1992)。然而，如同其他行为性格栅的结果，人们担心其在现场的应用结果将不如在试验控制条件下获得的运用结果值得信赖。有些专家已经考虑在降河洄游时期停止涡轮运转并且捕获水电设施上游的鱼类 [美国的美洲鳗鱼 (*Anguilla rostrata*) (EUSTON 等, 1998), 新西兰的花叶鳗鱼 (*Anguilla dieffenbachi*) (MITCHELL, 1995)]。然而，这些方法都存在两种假定：可以预测降河洄游时期，并且降河洄游时间足够短不会影响发电量。有相对较长的降河洄游时间的欧洲鳗鱼似乎都不属于这两种状况。

对于鳟来说，采用在大西洋鲑及海鳟的方法可能是可行的。然而，格栅上的棒条间距及上游的流速标准需要适合更广泛的鱼体大小。

由于它们的洄游特点（时间、尺寸等）或洄游行为的差别，可用在其他种类（如鲤科、狗鱼科、鲈科）的信息很少。然而众所周知鲤科幼鱼（体长为几公分）可能在河中重新分布群时会集群洄游，尤其是在夏天 (SOLOMON, 1992)。在目前现有的水电入口设施中，推荐物理性格栅是十分困难的，因为这种方法需要降低格栅间距到数毫米，还需要非常慢的接近速度 (10~15cm/s)。这些通常都是和现有设施相矛盾的。在当前的科技状况下，唯一的解决方法似乎是表面旁通道，然而表面旁通道的效率还需要进一步验证。在低水头设施中，如果涡轮机导致的死亡率适中并且这些鱼类仅洄游有限的距离，仔细考虑降河洄游设施是否是必需的才是明智之举。这意味着这些鱼类仅受少数设施影响，并因此限制了可能的附加效应。这和淡海水洄游种类（如鲑鱼）洄游极大距离并因此必须经过很多障碍，经受了致死率的积累形成对比。这一主题少数的研究结果还没有观察到夹困和相联系伤害，而可能威胁到种群的存活 (EPRI, 1994; SORENSON 等, 1998)。

结论

我们已经评述了用来减少水电设施对鱼类降河洄游影响的各种技术。物理性格栅似乎是现在可用的最有效技术。表面旁通道结合传统拦污栅和百叶窗的应用范围有限。其他行为性格栅鉴于其在目前可靠性程度低，仅能被认为是试验性的解决办法。

把对降河洄游的影响考虑进来的需求意味着，更新或审批水电设施时将有更多的环境保护方面的约束（进水渠道的流速、表面区域、入水口格栅的方位及间隙等）。对于新的取水进水渠道也是同样的。在恢复洄游鱼类种群的河道中建设新设施，接受这些环保原则基本上应该是合理的。

为了找到适合操作者使用的比物理性格栅更有效的且受限制少的方法，显然在法国还需要更多的研究和开发。此领域的任何发展都需要人们加深对鱼类行为的认识，以便能够预测鱼类对环境刺激产生怎样的反应，特别是对进水渠中水力条件的变化的反应。相对有效的技术，例如遥测技术（声学或无线电遥测技术）、水声学及录像等可用来监测入水口处鱼类的行为。

进水口的设计也还需要更多的研究和开发。入水口需要考虑到洄游问题、相关辅助设施（例如组合式斜格栅）。同时需要降低对通过涡轮机鱼类产生的伤害。涡轮机有可能杀死鱼类，特别是在低水

头设施中。美国现在正在进行研究以使涡轮机设计适应鱼类的洄游 (OTA, 1995; CADA, 1997)。

最后, 当任何特殊设施需要确定效率目标时, 将目标放在整个流域并且考虑到现有的所有设施的附加影响是非常重要的。此外在评估某个站点最优解决方法时亦然。

参考文献

- AITKEN P. L. , DICKERSON L. H. , MENZIES W. J. M. , 1966. Fish passes and screens at water power works. Proc. Inst. Civ. Eng. , 35: 29 - 57.
- ASCE, 1995. Fish passage and protection. *In*: Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants, American society of Civil Engineers, New York, N. Y. , 469 - 499.
- BELLM. C. , 1981. Updated compendium of the success of passages of small fish through turbines. Fish. Eng. Res. Prog. , U. S. Army Corps of Eng. , North Pacific Div. , Portland, Oregon, 294 p.
- BELL M. C. , 1986. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. U. S. Army crops of Eng. , North Pacific Div. , Portland, Oregon, 290 p.
- BELL M. C. , DELACY A. C. , 1972. A compendium on the survival of fish passing through spillways and conduits. Fish Eng. Res. Prog. , U. S. Army Crops of Eng. , North Pacific Div. , Portland, Oregon, 121 p.
- BOMASSI P. , TRAVADE F. , 1987. *Projet de réimplantation du saumon dans la partie supérieure de l'Allier: Expériences sur les possibilités de dévalaison des saumoneaux au barrage hydroélectrique de Poutès en 1983 et 1984* (project for restoring salmon to the upper reaches of the Allier: experiences with downstream salmonid migration facilities at the poutes hydro - electric dam in 1983 and 1984) . *In*: THIBAUT M. , BILLARD R. (Eds), La restauration des rivières à saumous, INRA, 183 - 194.
- CADA G. , COUTANT C. , WHITNEY R. , 1997. Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines. U. S. Department of Energy, Idaho Operations Office, Idaho Falls ID, USA, 85 p.
- CHANSEAU M. , LARINIER M. , TRAVADE F. , 1999. *Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le Gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage - recapture et radiotélémetrie* (Efficiency of a downstream bypass as estimated by the mark - recapture technique and behaviour of Atlantic salmon smolts at the Bedous water intake on the Aspe river (France) monitored by radiotelemetry) . Bull. Fr. Peche Piscic. 353/354: 99 - 120.
- CROZE O. , CHANSEAU M. , LARINIER M. , 1999. *Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Camon sur la Garonne* (Efficiency of a downstream bypass for Atlantic salmon smolts and fish behavior at the Camon hydroelectric powerhouse water intake on the Garonne river) . Bull. Fr. Peche piscic. 353/354: 121 - 140.
- CLAY C. H. , 1995. Design of fishway and other fish facilities. Lewis Publisher, Boca Raton, Ann Harbor, London, Tokyo, 248 p.
- DESROCHERS D. , 1994. *Suivi de la migration de l'anguille d'Amérique au complexe Beauharnois*. Monitoring of American eel at Beauharnois generating station. Vice presidency Environnement, Hydro Quebec Rep. , 107 p.
- EICHER G. J. , 1985. Fish passage: protection of downstream migrants. Hydro Review, 4, 95 - 100.
- EPRI, 1986. Assessment of downstream migrant fish protection technology of hydroelectric application. Stone and Webster Eng. Crop. , Boston, Massachussetts, 420 p.
- EPRI, 1987. Turbine - related fish mortality: review and evaluation of studies. Res. Project 2694 - 4, Final Rep. , 102 p.
- EPRI, 1992. Fish entrainment and turbine mortality review and guidelines. Stone and Webster Eng. Corp. , Boston, Massachussetts, 225 p.
- EPRI, 1994. Research update on fish protection technologies for water intakes, Stone and Webster Eng. Crop. , Boston, Massachussetts, 420 p.
- EUSTON E. T. , ROYER D. , SIMONS C. , 1998. American eels and hydroplants: clues to eel passage, Hydro Review, 17 (4), 94 - 103.
- FERGUSON J. W. , POE T. P. , CARLSON T. J. , 1998. The design, development, and evaluation of surface oriented

- juvenile salmonid bypass systems on the Columbia River, USA. In: JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S., WEISS S. (Eds), Fish Migration and Fish Bypasses, Fishing News Books, 281 - 299.
- GOSSET C., TRAVADE F., 1999. *Etude de dispositifs d'aide à la migration de dévalaison des salmonidae; barrières comportementales* (A study of facilities to aid the downstream migration of salmonids; behavioural screens). Cybium 1999, 23 (1) suppl. : 45 - 46.
- HADDERINGH R. H., VAN DER STOEP J. W., HAGRAKEN J. M., 1992. Deflecting eels from water inlets of power stations with light. Irish Fish. Invest., 36: 37 - 41.
- HADDERINGH R. H., BAKKER H. D., 1998. Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht rivers. In JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S., WEISS S. (Eds), Fish Migration and Fish Bypasses, Fishing News Books, 315 - 328.
- HEYSEY P. G., MATHUR D., D'ALLESANDRO L., 1993. A new technique for assessing fish passage survival at hydro power station. In WILLIAMS U. P., SCRUTON D. A. et al. (Eds), Proc. Workshop 1991 on Fish passage at hydroelectric developments, Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1905, St John's, Newfoundland; 32 - 38.
- KNUDSEN F. R., ENGER P. S., AND O., 1994. Avoidance responses to low frequency sounds in downstream migrating Atlantic salmon smolt, *Salmo salar*. J. Fish Biol., 45: 227 - 233.
- LARINIER M., BOYER - BERNARD S., 1991a. *Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive* (Downstream migration of smolt and the efficiency of a downstream bypass at the halsou hydroelectric power station on the Nive) . Bull. Fr. Pisc., 321: 30 - 51.
- LARINIER M., BOYER - BERNARD S., 1991b. *La dévalaison des smolt de saumon atlantique au barrage de Poutès sur l'Allier: utilisation de lampes à vapeur de mercure en vue d'optimiser l'efficacité de dévalaison* (The downstream migration of Atlantic saslmon at the Poutes dam on the Allier: the use of mercury vapour lamps to optimise the efficiency of downstream migration) Bull. Fr. Pisc., 323: 129 - 148.
- LARINIER M., DARTIGUELONGUE J., 1989. *La circulation de poissons migrateurs; le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques* (The movements of migratory fish; passage through hydro - electric turbines) Bull. Fr. Pisc., 312 - 313, 1 - 90.
- LARINIER M., TRAVADE F., 1996. Smolt behavior and downstream fish bypass efficiency at small hydroelectric plants in France. Association internationale de Recherches Hydrauliques, 2^{ème} Symposium international sur lhydraulique et les habitats, Ecohydrauliques 2000, Quebec, vol B, 891 - 902.
- LARINIER M., TRAVADE F., 1999. The development and evaluation of downstream bypasses for juveniles salmonids at small hydroelectric plants in France. In: ODEH M. (ed), Innovations in fish Passage Technology, American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 25 - 42.
- MITCHELL C. P., 1995. Fish passage problem in New Zealand. Proc. Int. Symp. on fishways 95', Gifu, Japan, 33 - 41.
- MONTEN E., 1985. Fish and turbines. fish injuries during passage through power station turbines. Vattenfall, Stockholm, 111 p.
- MONTREAL ENGINEERING COMPANY, 1981. Fish mortality as a function of the hydraulic properties of turbines. Can. Electr. Assoc. Res. and Dev., Rep. G - 144, 75 p.
- NIETZEL D. A., CLUNET T. J., ABERNETHY C. S., 1990. Evaluation of rotary drum screens used to project juvenile salmonids in the Yakima river basin, Washington, USA. Proc. Int. Symo. on fishways, Gifu, Japan, 523 - 529.
- NORDLUND B., RAINEY S. 2000. Surface Collector Development on the Columbia and Snake rivers; a regional perspective. In: ODEH M. (ed), Advance in Fish passage Technology: Engineering Design and Biological Evaluation, American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 13 - 39.
- ODEH M., ORVIS C., 1998. Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the North - east USA. In: JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S., WEISS S. (Eds), Fish Migration and Fish Bypasses. Fishing News Books, 267 - 280.
- OTA (Office of Technology Assessment), U. S. Congress, 1995. Fish passage technologies: protection at hydroelectric facilities, OTA - ENV - 641, Washing, DC: U. S. Government Printing Office, 167 p.

- RAINEY W. S. , 1990. Cylindrical drum screens designs for juvenile fish protection at two large diversions. Proc. Int. Symp. On fishways, Gifu, Japan, 143 - 150.
- RASMUSSEN G. , AARESTRUP K. , JEPSEN N. , 1996. Mortality of Sea Trout and Atlantic Salmon smolts during seaward migration through rivers and lakes in Denmark. ICES C. M. , AnaCat Fish Committee. Theme session on anadromous and catadromous fish restoration programmes; A Time for Evaluation, 14 p.
- RUGGLES C. P. , 1980. A review of the downstream migration of Atlantic salmon. Freshwater and Anadromous Div. , Resource Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax, Nova Scotia, Can. Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci. 952, 39p.
- RUGGLES C. P. , 1992. What's new in downstream fish passage? Proc 4th Int. Atlantic Salmon Symp. St Andrews, New Brunswick, Canada, 22 p.
- RUGGLES C. P. , MURRAY D. G. , 1983. A review of fish response to spillways. Freshwater and Anadromous Div. , Resource Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax, Nova Scotia, Can Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci. 1172, 30 p.
- RUGGLES C. P. , ROBINSON D. A. , STIRA R. J. , 1993. The use of floating louvers for guiding Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts from hydroelectric turbine intake. Proceedings of the workshop on fish passage at hydroelectric developments. Can. Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci. 1905; 87 - 94.
- SOLOMON D. J. , 1992. Diversion and entrapment of fish at water intakes and outfalls. National River Authority, Report R&D-1, 51 P.
- SORENSEN, K. M. , FISHER W. L. , ZALE A. V. , 1998. Turbine passage of juvenile and adult fish at a warmwater hydroelectric facility in northeast Oklahoma: monitoring associated with relicensing. N. Am. J. Fish. Manage. 18: 124 - 136.
- TAFT E. P. , WINCHELL F. C. , COOK T. T. , SULLIVAN C. W. , 1992. Introducing a modular approach to fish screen installation. Hydro Review, 11 (7), 95 - 102.
- TAFT E. P. , AMARAL S. V. , WINCHELL F. C. , SULLIVAN C. W. , 1993. Biological evaluation of a new modular fish diversion screen. Proc. Symp. American Fisheries Society, Fish passage policy and technology, Portland, Oregon, USA, 177 - 186.
- TAFT E. P. , BROWN, N. A. , COOK T. C. , RONAFALVY J. P. , HABERLAND M. W. , 1996. Development in the use of infrasound for protecting fish at water intakes. Proceedings of the ASCE session on "Fish Bypass Systems", North American Water and Environment Congress '96, June 22 - 28, Anaheim, California, 6 p.
- TAYLOR R. E. , KYNARD. B. , 1985. Mortality of juvenile American shad and blueback herring passed through a low-head Kaplan Hydro - electric turbine. Tran. Am. Fish. Soc. , 114: 430 - 435.
- TRAVADE F. , GOUYOUO C. , DE FAVERI N. , 1999. *Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour les smolts de saumon atlantique (Salmo salar L.) à l'aménagement hydroélectrique de St Cricq sur le Gave d'Ossau* (Efficiency of a downstream by-pass and an acoustic barrier for diverting Atlantic salmon smolts at a hydro - electric power station at St Cricq on the Gave D'Ossau) . Bull. Fr. Peche Piscis. 353/354; 157 - 180.
- TURNER A. R. , FERGUSON J. W. , BARILA T. Y. , LINDREN M. F. , 1993. Development and refinement of turbine intake screen technology on the Columbia River. Proc. Symp. American Fisheries Society, Fish passage policy and technology, Portland, Oregon, USA, 123 - 128.
- VIDELER J. , 1993. Fish swimming. Chapman & Hall, Fish and fisheries series 10, 260 p.
- WHELTON J. S. , BEAUMONT W. R. C. , LADLE M. , MASTERS J. E. G. , 1997. Smolt Trapping Using Acoustic Techniques. Environment Agency, R&D Technical Report W66, 79 p.
- WILLIAMS, J. G. , 1990. Water velocity in relation to fish behavior in the design of screens for diversion of juvenile salmonids from turbines at hydroelectric dam on the Columbia river, USA. Proc. Int. Symp. On fishways, Gifu, Japan, 137 - 142.
- WINCHELL F. C. , TAFT E. P. , COOK T. , 1993. EPRI'S evaluation of the Elwa Dam Eicher Screen and subsequent design change and hydraulic tests. Proc. Symp. American Fisheries Society, Fish passage policy and technology, Portland, Oregon, USA, 189 - 196.



照片 1 美国一灌溉进水渠道处的鼓形格栅



照片 2 苏格兰一抽蓄式水电站入口处的细网目格栅



照片 3 Connecticut 河 Holyoke 运河工程处，
表面百叶窗式格栅的全视图（美国）



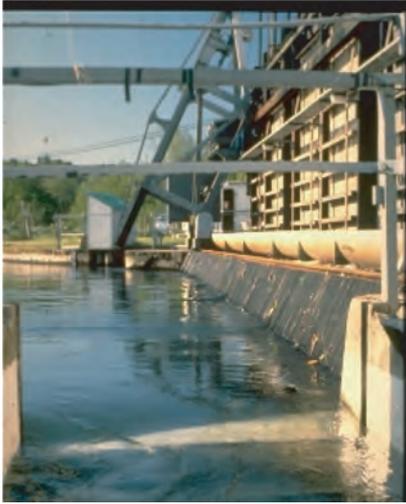
照片 4 Holyoke 运河工程处，百叶窗式
表面格栅（旁通道入口视图）
（Connecticut 河，美国）



照片 5 Halsou 电站处的试验电子格栅
（Nive 河，Pyrenees）



照片 6 Castetarbe 电站进水口处的
表层降河洄游旁通道（波河）



照片 7 Halsou 电站进水口处的表面降河旁通道 (Nive 河, Pyrenees)



照片 8 Soieux 电站进水口处的表面降河旁通道 (Gave d'Aspe 河, Pyrenees)



照片 9 Poutes 坝 (Allier 河) 处的表面降河旁通道。
10 米深的电站进水口位于左边



照片 10 Poutes 坝处的表面旁通道。注意旁通道入口的形状，能创造逐渐加速的水流



照片 11 St Cricq 电站进水口处的表面旁通道 (Gave d'Aspe 河, Pyrenees)。注意两个入口处于不同高度。

封面设计 田雨

ISBN 978-7-109-16113-9



9 787109 161139 >

定价：80.00元