

鱼道

——设计、尺寸及监测



鱼 道

——设计、尺寸及监测

李志华 王 珂 刘绍平 译
段辛斌 刘明典
陈大庆 昌永华 王瑞雯 审校

中 国 农 业 出 版 社
联合国粮食及农业组织
2009·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

鱼道：设计、尺寸及监测/李志华等译. —北京：中国农业出版社，2009.10
ISBN 978-7-109-13566-6

I. 鱼… II. 李… III. 鱼道 IV. S956.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 177637 号

封面照片：

上图：图伊列雷斯升鱼机（基尔托夫-瓦伦应用生态学研究所乌·施韦维尔斯摄）
左图：达腾菲尔德鱼坡（联合国粮农组织渔业局格·马穆勒摄）
下图：监测用电捕（基尔托夫-瓦伦应用生态学研究所）

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
2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月北京第 1 次印刷

开本：880mm×1230mm 1/16 印张：9

字数：235 千字 印数：1~3 000 册

定价：48.00 元

（凡本版图书出现印刷、装订错误，请向出版社发行部调换）

11—CPP/09

本出版物的原版系德文，即 *Fischaufstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle*，由德国水资源与陆地改良学会（DVWK）于 1996 年出版。此中文翻译则基于联合国粮食及农业组织于 2002 年出版的英文版（即 *Fish Passes – Design, Dimensions and Monitoring*），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 978-7-109-13566-6

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）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的观点。

版权所有。为教育和非商业目的复制和传播本信息产品中的材料不必事先得到版权持有者的书面准许，只需充分说明来源即可。未经版权持有者书面许可，不得为销售或其他商业目的复制本信息产品中的材料。申请这种许可应致函：

Chief, Electronic Publishing Policy and Support Branch

Communication Division

FAO

Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy

或以电子函件致：

copyright@fao.org

© DVWK 1996 年（德文版）

© 粮农组织 2002 年（英文版）

© 粮农组织 2009 年（中文版）

德国水资源与陆地改良学会的英文版序言

在过去的几十年中，德国进行了极大的努力，使地表水的水质恢复到可接受的状态，即根据德国生物水质分类标准被确定为“轻微到中等负载”。主要通过建造污水处理厂净化生活污水和工业污水实现了好转。今天，在水保护管理方面的努力，越来越致力于河床、河岸及前洪泛区的自然生态系统功能的恢复。因此，应尽可能逆转河床形态的改变，消除洄游性鱼类所不能克服的障碍。

1986年，欧洲第三大河流——莱茵河沿岸五国的部长们及欧洲委员会的相关管理局为莱茵河的恢复确定了一个政治议程，并同意采取行动使鲑和其他洄游性鱼类能够在2000年前返回到莱茵河及其支流。要实现这一目标，许多地方过去、现在仍然需要鱼道（fish pass），但是缺乏建造全功能鱼路（fish way）的普遍有效的设计标准，尤其对外观自然并与景观很好融合的解决办法而言。为满足这一要求，德国水资源与陆地改良学会（DVWK），代表德国从事水和景观管理的专家的非官方、非营利性、专业性团体，撰写并在1996年出版了这些指南。同时在莱茵河及其若干支流中又检测到了鲑，多么大的进展！

一个由生物学家和工程师组成的多学科工作组，将德国和其他国家反映这一领域技术现状的研究成果和经验编辑成册。随着这些指南用英文出版，DVWK希望有助于使恢复流动地表水纵向连通性的经验和指导对其他国家的水利工程师和渔业专家有用。关于本书，我们希望对知识跨越国界转移做出贡献，如能对欧洲和全世界水域的前瞻管理给予有益的建议，则将十分高兴。

德国水资源与陆地改良学会
国际合作常务委员会主席
艾科·吕贝 博士
2002年10月于波恩

关于本书的编写

由联合国粮农组织（FAO）和德国水资源与陆地改良学会（DVWK）共同出版的这本书，是 DVWK 于 1996 年最初在德国出版的一本书的一个译本。FAO 渔业局决定出版英文版，使全世界都能获得这一技术性文件中含有的宝贵信息，因为迄今没有类似的工作，尤其在贴近鱼道的自然类型方面。

本文献中文是由中国水产科学研究院长江水产研究所的李志华、王珂、刘绍平、段辛斌、刘明典共同翻译，并由陈大庆和昌永华编校。本文献英文是由联合王国的翻译家德·丹诺先生和联合国粮农组织渔业资源官员格·马穆勒先生共同翻译成的，并由格·马穆勒、FAO 顾问及 FAO 渔业局前职员阿·韦尔科姆博士编辑。

德文版“Fishchaufstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle”，是由 DVWK 鱼道技术委员会撰写的，并发表在 DVWK 主办的“水管理指南”上。水管理指南是技术—科学自愿协同工作的专业性结果，可供任何人使用。德文版在财政上得到了德国州际联盟水工作组（LAWA）的支持。

发表在这些指南中的建筑及维护规则是指导技术正确实施的一个标准，因而在正常情况下是专业性工作的一个重要信息源。然而，这些指南不可能包含要求采取进一步或限制措施的所有特例。使用这些指南不免除任何人对其自己行动的责任。每个人的行动由他或她自己负责。

致 谢

我们向美国特纳斯福尔斯的斯·欧·康特溯河性鱼类研究中心的生态学家亚历克斯·哈罗博士及德国工程学位证书获得者、亚琛呢绒厂顾问工程师乌尔里希·杜蒙表达我们最诚挚的谢意。他们诚恳地帮助修改译稿。我们还衷心地感谢 DVWK 的德·巴里翁先生、国家水和废物管理局——科隆区波恩分局的维·沙阿先生及基尔托夫·瓦伦应用生态学研究所的布·亚当博士和乌·施韦维尔斯博士（全为德国人）。

特别感谢罗马的格·埃利斯先生，他非常耐心而专业地绘制了本书示意图。

FAO/DVWK

鱼道——设计、尺寸及监测

罗马，联合国粮食与农业组织，2002，119 页

内容提要

关键词：鱼道、鱼路、鱼梯、技术性鱼道、贴近自然型、水力计算、溯河洄游、自由通道、河流修复、恢复、纵向连通性、监测

许多种鱼进行或多或少延长的洄游作为其基本行为的一部分。在欧洲最著名的例子是鲑（*Salmo salar*）和鲟（*Acipenser sturio*）。这两种鱼从海洋返回其在河流中的产卵场通常游泳数千米。除了这些长距离洄游的种类外，其他鱼类和无脊椎动物在其生活史的某些阶段进行短期或小规模洄游，从河流的一个区段到另一个区段。

鱼道对于恢复鱼类及其他水生物种在河流中的自由通道具有愈来愈大的意义，因为这类装置是使水生动物区系能够通过妨碍其溯河旅行的障碍物的唯一通路。鱼道于是成为流水生态改良的关键部件。其有效运行是自由通过河流中恢复的一个前提。然而，现有装置的研究表明，其中许多运行不正确。因此，各类风险承担者如工程师、生物学家和行政官员表示对与现代经验和知识相符合的、普遍有效的标准和说明书有很大的兴趣。

本书首先涉及鱼道的生态学基础，并讨论了对于学科间复杂问题切合实际应用必须了解的一般要求。这些一般原理为鱼道设计和评价的技术规则、忠告及正确选择其水力学尺寸和测试运行的建议所遵循。鱼道能够以技术上注重实用的方式或以模仿自然的方式来建造。旁路水道和鱼坡是较自然的解决办法之一，而技术性较强解决办法包括普通的水池式通道、狭槽通道、升鱼机、水力鱼闸及鳗鲡梯，本书涉及了所有这些类型。而且，特别强调了全面监测的重要意义。

本书仅涉及溯河洄游的减轻，因为 1996 年用德文出版的第一版在编写时关于降河通过改良的资料甚少。因此降河洄游的复杂题目仅论及但未深入展开。

联合国粮农组织序言

在全世界的许多国家，内陆捕捞渔业在保障食物的可得性和收入及通过食物或游钓渔业改善生活等方面起着重要的作用。多年以来，在资源利用方面联合国粮农组织（FAO）从未减弱提倡可持续的观念，而且可持续发展在渔业和水产养殖的一切活动中继续是一个高度向往的目标。然而，要在捕捞渔业中实现这一目标，不仅特别需要改进渔业管理，而且要有正确的生态系统管理。

淡水正在成为愈来愈宝贵的资源，而且各个部门如农业、渔业、水电生产、航运等对其利用的竞争增强，这些部门中，渔业在经济上一般说来不是最重要的部门。对水生生态系统保护的责任通常在渔业之外，并且在许多情况下渔业不得不在外部门强加的限制之内被管理。为了供水和发电而筑坝，为了航运和防洪而开挖渠道，为便于农业和城市使用而地面排水和开垦湿地之类的种种活动，全都对水生生态系统从而对鱼类自然种群具有深远的影响。坝堰最不利的影响之一是中断了河流的纵向连通性。这意味着鱼类不再能够自由迁移。这不仅关系到长距离洄游种类，而且关系到生活史的某一阶段依靠纵向运动的所有鱼类。

联合国粮农组织渔业局的正式规划及基于野外的活动，是为提供关于最佳做法的管理忠告而特别制定和安排的，并帮助实施《责任渔业管理法规》及有关技术指南。在渔业局重点规划的框架中，内陆水资源及水产养殖处（FIRI）特别开展一项防止生境退化和复兴内陆渔业的活动，包括关于鱼类洄游及减轻措施需考虑的问题。作为这一活动下的一项正常工作，FIRI 收集、述评、分析和传播与坝堰及其和鱼类与渔业相互作用有关的信息，并提倡修复水生环境作为内陆水域管理的一个合适工具。

在试图使水生资源可更持久时，FIRI 特别关注鱼道的改进及纵向自由连通性的恢复，因为这些正是引起全世界日益关注的重要问题。最初由德国水资源与陆地改良学会（DVWK）用德文出版的这本《鱼道——设计、尺寸及监测》，是对鱼类通过障碍减轻的一个极其重要的贡献。它首先涉及鱼道的生态学基础，并讨论对于学科间复杂问题切合实际应用必须了解的一般要求，然后才给出鱼道设计、其水力尺寸正确选择及其效率评价的技术规则和忠告。根据主要来自欧洲和北美的知识和经验，本书描述了各种类型的鱼道，特别着重“贴近自然”的解决办法。论述了成功的要素——监测。

联合国粮农组织渔业部决定联合德国水资源与陆地改良学会出版英文版，使该技术文献中的宝贵信息可被广泛利用。这是更为重要的，因为迄今在英语文献中尚无可与之相比的书籍，尤其在贴近自然类型的鱼道方面。希望本书有助于大大增强需要鱼类无障碍通过的意识，增加全世界结构优良、尺寸适宜鱼道的数量，恢复失去的洄游路线。

联合国粮农组织渔业部渔业资源司
内陆水资源及水产养殖处处长

贾建三

序 言

鱼道对于鱼类和其他水生生物物种在河流中自由通过的恢复具有愈来愈大的意义。这些装置通常是使水生动物（区系）能够通过封锁其溯河旅行的障碍物的唯一途径。它们因此成为流水生态改良的要素。

鱼道的有效运行是自由通过在河流中恢复的一个先决条件。现有装置的研究表明，其中许多运行正确。为此，许多专家称对与现在的经验和知识水平相符合的普遍有效的设计标准和说明书有很大的兴趣。

德国水资源与陆地改良学会组建的一个专门化技术委员会，通过生物学家和工程师间的多学科合作，确定了鱼道建造和运行的现在技术发展水平。考虑了来自其他国家的研究结果与报告。

本指南首先涉及鱼道的生态学基础，讨论了对于学科间复杂问题切合实际应用必须了解的一般要求，这些一般原理为鱼道设计及评价的技术规则和忠告与正确选择水力尺寸及测试运行的建议所遵循。

在撰写这些指南时，显然，它并不能完全令人满意地回答一些问题，尤其是那些与用于水力发电的坝上鱼道的设计和整合相关的问题。究其原因，首先是几乎没有关于鱼道运行的可靠数据，鱼类在鱼道附近的行为需要深入研究，其次应用现有的水力计算模型确定贴近自然的建筑物尺寸只能提供粗略的近似值。因此仍然相当需要能够填补我们的这方面空白知识的研究。遗憾的是，鉴于同样的原因，对于许多关心导鱼装置和降河通过装置标准的专业人员表示的推荐这类标准的愿望不能立即作答。

技术委员会由咨询公司、工程顾问团、能源公司、大学及专业化管理机构的下列代表组成。

贝阿特·亚当	博士，生物学位证书，应用生态学研究 所，基尔托夫-瓦伦
雷纳·博赛	工程学位证书，莱茵-威斯特伐利 亚电力局再生电力生成处，埃森
乌尔里希·杜蒙	工程学位证书，呢绒厂顾问工程 师，亚琛
罗尔夫-于尔根·格布勒	工程学位证书，水利工程和环境顾 问工程师，瓦尔茨布赫塔尔
费雷纳·盖特内尔	工程学位证书，普雷恩·盖特内尔 的顾问工程师，希尔德斯海姆

- | | |
|-------------|--|
| 哈罗·哈斯 | 工程学位证书，下萨克森地区生态
管理局淡水渔业处，希尔德斯
海姆 |
| 弗兰克·克吕格尔 | 工程学位证书，勃兰登堡区环境管
理局河流设计，水利工程及防洪
处，法兰克福/奥得河 |
| 罗伯特·拉普 | 工程学位证书，巴伐利亚州水电公
司，慕尼黑 |
| 沃尔夫-迪特而·桑齐恩 | 博士，生物学位证书，巴伐利亚地
区水管理局慕尼黑 |
| 维尔讷·沙阿 | 工程学位证书，国家水和废物管理
机构——科隆区，波恩分部，波
恩（该技术委员会主席） |
| 乌尔里希·施韦维尔撕 | 博士，生物学证书，应用生态学研
究所，基尔托夫-瓦伦 |
| 路德维希·施泰因贝格 | 生物学证书，北莱茵-威斯特法伦州
生态陆地林业机构/北莱茵威斯
特法伦州驻雷克林豪森农业发展
办事处基希洪德姆-阿尔鲍姆渔业
科，基希洪德姆-阿尔鲍姆（该技
术委员会副主席） |

在此，本技术委员会希望感谢渔业学会、垂钓俱乐部、德国渔业行政人员和渔业科学家协会、大坝营业公司的代表、来自公共管理机构和行政机关中通过特殊贡献和忠告支持本技术委员会工作的专家，还感谢在审稿阶段提出建设性意见的所有人士。

维尔讷·沙阿

1995 年 11 月于波恩

目 录

1. 前言	1
2. 生态学原理	2
2.1 流水生态系统	2
2.1.1 地质与气候	2
2.1.2 水速	2
2.1.3 切应力和底质分布	4
2.1.4 温度	5
2.1.5 氧	5
2.2 河流连续统一体	6
2.3 流水的生物分区	8
2.4 潜在的自然种类组成	12
2.5 水生生物的回游行为	13
2.6 坝堰引起的对水生动物区系的危害	16
3. 鱼道的一般要求	19
3.1 鱼道的最佳位置	20
3.2 鱼道入口和吸引流	22
3.3 鱼道出口和出口位置	24
3.4 鱼道中的流量和水流状况	25
3.5 长度、坡度、休息池	25
3.6 鱼道底部设计	27
3.7 运行时间	27
3.8 维修	27
3.9 避免干扰和保护鱼道的措施	28
3.10 融入周围的景观	28
4. 贴近自然型鱼道	29
4.1 底斜坡和底微斜坡	29
4.1.1 原理	29
4.1.2 设计与尺寸	30
4.1.3 跌水的重新造型	32
4.1.4 可调节堰改造成分散式或阶流式斜坡	33
4.1.5 综合评价	33
4.1.6 实例	34
4.2 旁路水道	38
4.2.1 原理	38
4.2.2 设计与尺寸	38
4.2.3 综合评价	42
4.2.4 实例	43
4.3 鱼坡	46

4.3.1	原理	46
4.3.2	设计和尺寸	46
4.3.3	特例	48
4.3.4	综合评价	50
4.3.5	实例	51
4.4	水力设计	57
4.4.1	流量公式	57
4.4.2	抗扰动蛮石的流阻	57
4.4.3	蛮石槛的设计计算	60
4.4.4	底斜坡和底微斜坡上的临界流量	65
4.4.5	试运行	65
5.	技术性鱼道	66
5.1	水池式鱼道	66
5.1.1	原理	66
5.1.2	设计与尺寸	67
5.1.3	水力设计	70
5.1.4	总体评价	72
5.1.5	实例	73
5.2	狭槽鱼道	75
5.2.1	原理	75
5.2.2	设计与尺寸	75
5.2.3	水力计算	77
5.2.4	总体评价	82
5.2.5	实例	83
5.3	丹尼尔鱼道	84
5.3.1	原理	84
5.3.2	设计与尺寸	86
5.3.3	水力计算	87
5.3.4	总体评价	90
5.3.5	实例	91
5.4	鳗鲡梯	93
5.4.1	鳗鲡洄游的特点	93
5.4.2	设计	93
5.4.3	总体评价	94
5.5	鱼闸	94
5.5.1	原理	95
5.5.2	设计	95
5.5.3	总体评价	95
5.5.4	实例	96
5.6	升鱼机	98
5.6.1	原理	98
5.6.2	结构	98
5.6.3	总体评价	98
5.6.4	实例	99
6.	鱼道的监测	100
6.1	监测的目的	100
6.2	方法	100

6.2.1 张网法	101
6.2.2 堵截法	101
6.2.3 标志	102
6.2.4 电捕	102
6.2.5 自动计数设备	102
6.3 效果评价	103
7. 法律要求	104
7.1 新设施	104
7.2 现有设施	104
8. 参考文献	105
9. 符号表	109
10. 专业术语解释	112
 附录：最常用鱼道构造类型概况	 114

图表目录

图 2.1	各种体型的鱼对不同流速的适应 (依 Schua, 1970)	2
图 2.2	四节蜉蝣属 (<i>Baetis</i>) 的蜉蝣幼体的体态 (依 Schua, 1970)	2
图 2.3	不同流量条件下河流流动特征的改变	3
图 2.4	视流速而定的底质分布	4
图 2.5	河流连续统一体概念: 流水生物群落结构和功能特征的改变是河流宽度的一个函数	6
图 2.6	富尔达河的鳟区 (黑森州)	8
图 2.7	伊尔茨河的茴鱼区 (巴伐利亚州)	8
图 2.8	拉恩河的鲃区 (黑森州)	8
图 2.9	奥得河的欧鳊区 (勃兰登堡)	8
图 2.10	坡度、河宽和决定河流指示鱼区分区间关系的图示 (修改自 HUET, 1959)。典型核心区用灰色表示, 灰色区域间的区段是过渡区, 然而, 这些过渡在河流中是逐渐发生的	12
图 2.11	多林河鱼道中石蚕蛾 (<i>Anabolia nervosa</i>) 的幼体 (勃兰登堡)	13
图 2.12	杜父鱼 (<i>Cottus gobio</i>)	14
图 2.13	软口鱼 (<i>Chondrostoma nasus</i>)	14
图 2.14	鲑 (<i>Salmo salar</i>)	14
图 2.15	多瑙哲罗鱼 (<i>Hucho hucho</i>)	14
图 2.16	降海性产卵洄游鱼类的生活史: 以鳗鲡 (<i>Anguilla anguilla</i>) 为例	15
图 2.17	溯河性产卵洄游鱼类的生活史: 以鲑 (<i>Salmon salar</i>) 为例	15
图 3.1	本图所示的跌水, 即使不很高, 也对小鱼的洄游是一个不可逾越的障碍。位于加尔德莱根的劳格溪 (萨克森-安哈尔特)	19
图 3.2	具冲刷邻近溪底的射流涵洞是水生生物洄游不可逾越的障碍。位于斯托贝尔的普里奇哈格内尔磨坊 (勃兰登堡)	19
图 3.3	摩泽尔河 (莱茵兰-法尔茨) 上尼夫坝的鸟瞰图, 显示与坝的总体大小相比鱼道的大小 (白箭头)。	21
图 3.4	有底切岸和弓弧沙坝岸的河流中流态示意图。在或沿干流游泳的鱼将沿底切岸侧到达堰。因此, 鱼道应尽可能靠近鱼遇见障碍物的位置 (依 Jens 修改, 1982)	21
图 3.5	a) 旁路水道的最佳位置和 b) 技术性鱼道的最佳位置: 溯河洄游的鱼被干流引导, 向上游到正好在坝下的下游水中最湍流的区域或涡轮机出口。在岸附近鱼寻找到一条继续溯河运动的路。最重要的是, 必须保证鱼能通过消力池的底槛 (依拉瑞尼尔修改, 1992)	21
图 3.6	溯河运动的鱼在堰和岸的狭窄夹角中聚集, 这是建造鱼道的最适宜位置 (依拉瑞尼尔, 1992d)	22
图 3.7	通过建造两条鱼道 (即一条正好在水电厂旁, 另一条在堰旁), 确保旁路水电站附近的纵向连通性	22
图 3.8	通过旁路将额外流量送入鱼道第一水池下游的前室, 以增加鱼入口处的吸引流	22
图 3.9	连接鱼道入口和河底的水下填石坡	23
图 3.10	美国一座有集水道的水电站示意图 (依拉瑞尼尔, 1992d)	24
图 3.11	集水道的横截面 (依拉瑞尼尔, 1992)	24
图 3.12	在蓄水侧面, 几个不同标高的入水口保证鱼甚至在上游水位变动 (较低的) 时能离开鱼道	25
图 3.13	具休息池的技术性鱼道, 以弯曲	26

图 3.14	狭槽鱼道中的粗糙底质，下施普雷瓦尔德地区的下普赫尔河堰（勃兰登堡）	27
图 4.1	三类外观自然的鱼道	29
图 4.2	一个特征贴近自然，坡度富于变化的河段，为外观自然底槛的设计提供了一个模式。这种河段的特征是，坡度不规则，通常被分成阶梯。蛮石槛上的低跌水后是鱼找到隐蔽处并能存活数个低水期的水池	29
图 4.3	底斜坡和底微斜坡的构造（据 GeblerR 修改，1991）	30
图 4.4	底微斜坡为填石构造（据 Gebler 修改，1990）	31
图 4.5	蛮石块构造式的槛（平面图）	31
图 4.6	曲面底斜坡平面图（依 Schauburger，1975）	32
图 4.7	人工跌水改建成底凹凸不平的微斜坡	33
图 4.8	可调节堰改建成保护槛	33
图 4.9	大魏尔/洛伊萨赫底斜坡（下游视图）。较浅边缘区中降低了的流速和流态的多样分化，提供底栖动物区系和鱼类种类中的弱游泳者皆能够通过斜坡的可能性，以致不需要其他改善设施（即单独的鱼道）	34
图 4.10	改建前的木板隔墙——水生动物不可逾越的一个障碍	35
图 4.11	改建后的比绍夫斯韦达保护槛	35
图 4.12	芒法尔河中一个底阶的纵截面，蛮石块构造（示意图）	36
图 4.13	芒法尔河中的底阶。本例中所采用的岩槛构造产生可观的结构多样性。为了恢复洄游，应认为，改造河底中宽度与整个河宽相同的跌水是最佳解决办法，胜过任何单独的鱼梯	36
图 4.14	显示米伦哈根/戈尔德巴赫底斜坡位置的平面图	37
图 4.15	米伦哈根/戈尔德巴赫底斜坡	37
图 4.16	旁路水道。绕坝的旁路：普通结构实例	38
图 4.17	旁路水道使得采用贴近自然的构造及与水道所在地点很好地融合成为可能。本例中，水道的线形是依原有植被而定的。拉普瑙磨坊（勃兰登堡）	39
图 4.18	加固旁路水道的底和两岸的例子	39
图 4.19	放置了抗扰动蛮石的旁路水道	40
图 4.20	中断旁路水道的蛮石槛	41
图 4.21	拦水坝（竣工前不久）中旁路水道进水口处的控制装置。这一构造限制流入量，且在发生洪水时或对水道进行维修时可关闭。开口必须向下一一直延伸到底部，且不中断底质的连续性。位于金绍（巴伐利亚州）的莱希坝	42
图 4.22	瓦勒尔庄园（下萨克森州）附近的瓦勒尔贝凯溪中的旁路水道	43
图 4.23	塞弗特氏磨房坝位置示意图。虽然以前的磨房坝不再用来发电，但磨房塘作为调节池及为了保护已兴盛的湿地群落生境必须予以保留，在磨房坝附近修建了一条长 120m、运送总流量达平均高水流量的旁路水道。总高度差为 3.3m 意味着，水道底必须用蛮石槛分段加固。其他区段显示零坡度，没有加固。自然改变能形成水池、陡岸和淤积	44
图 4.24	塞弗特氏磨房旁的旁路水道。蛮石槛的加固段和未加固段交替产生高度可变的流动状态。可让零坡度区听任其自然改变。照片前景显示倾斜岸切割，但这并未危害蛮石槛的设置	44
图 4.25	金绍旁路水道位置示意图	45
图 4.26	主堰下旁路水道与老河床连接。为了便于操作，使老河床的最低流量为 $20\text{m}^3/\text{s}$ 。照片显示莱希坝旁路水道在金绍的上游段。这一区段施工坡度平缓，不加固水道横截面即可获得波状结构。在下游段克服最大高度差，下游段的构造呈阶流式，坡度为 $I=1:20\sim 1:30$ 。流量由旁路水道的入口构造控制，该入口构造床具有保护旁路水道免于洪患之功能，主电站旁若再加设一鱼道则可大大改善这个堰附近的环境	45

图 4.27	鱼坡在坝旁的定位	46
图 4.28	本例中，鱼坡取代了左手堰槽，总流量达到平均流量，是通过鱼坡传送的，该鱼坡设计采用了抗扰动蛮石偏置的、粗糙水道形式。坡体是一个填石构造。石头砌的矮墙将鱼坡与无障碍堰区分开。克雷韦林堰，多林溪（勃兰登堡）	46
图 4.29	鱼坡在旁路电站主堰附近的位置。正常情况下，最低总流量通过鱼坡传送。水仅在流量较高时才溢出堰。齐格河（北莱茵-威斯特法伦州）上的艾托夫鱼坡	46
图 4.30	水池式粗糙水道型通道（平面图）	48
图 4.31	水池式凹凸不平水道型鱼道（水道的横截面与纵截面）	49
图 4.32	桩道（纵截面示意图）	50
图 4.33	埃尔茨河上的埃塞尔斯布吕克鱼坡（下游水视图）。该斜坡坡度平缓，和谐地融入堤及现有堰构造	51
图 4.34	达腾费尔德/齐格河鱼坡（有鱼坡的门槛全视图）	52
图 4.35	下游水视图	52
图 4.36	德尔门霍斯特鱼坡。竣工前不久上游水端视图。坡度平缓的鱼坡覆盖以一层不间断的砾石和石头的衬底层。对于建在堰的上游水区、出口（鱼的入口）直接邻接堰的鱼坡，避免形成死角。这类表面粗糙、坡度平缓的鱼坡，整个河流的动物区系都可毫无限制地通过	53
图 4.37	鸟英根/菲尔斯水池式粗糙水道型通道，下游水端视图	54
图 4.38	放置蛮石块	55
图 4.39	布局与坡结构	55
图 4.40	斯皮坡伦堡堰；施工中的鱼坡	56
图 4.41	斯皮坡伦堡堰；竣工后的鱼坡	56
图 4.42	具抗扰动蛮石的旁路水道	58
图 4.43	计算实例说明示意图	59
图 4.44	具蛮石槛的旁路水道和斜坡的水力设计计算	60
图 4.45	莱希河金绍坝附近的鱼溪。其陡坡被用蛮石制做的横槛中断。槛间盆状构造的底未加固，经过冲刷能形成水池	62
图 4.46	淹没流衰减系数	62
图 4.47	绕过蛮石的水流	63
图 4.48	计算实例示意图	63
图 4.49	艾托夫—温克尔米勒鱼坡的试运行，不可能精确设计计算这类不规则蛮石槛。因此，蛮石的最佳排列在这里最初是借助于沙袋。在这次试验后，蛮石才被固定。必须认为这类试运行是施工过程的一个必不可少的部分，因而在设计阶段其成本就已被考虑	65
图 5.1	传统水池式鱼道（纵载面与水池结构）（依 Jens 修改并补充，1982）	66
图 5.2	水池式鱼道（平面图）（依 Larinier 修改并补充，1992a）	66
图 5.3	在贝尔讷河（下萨克森州）胡德磨坊坝附近用砖建造的、具交错水池的水池式鱼道。该建筑物与过去磨坊总画面非常相配	67
图 5.4	水池式鱼道的纵截面（示意图）	68
图 5.5	水池式鱼道术语	68
图 5.6	长菱形鱼道隔墙的结构（依 JENS，1992）	69
图 5.7	长菱形鱼道实例（摩译尔河上的莱赫芒堰，下游水视图）	69
图 5.8	易北河上盖斯特哈赫特坝旁弓形鱼道的水池结构与尺寸（单位用 m 或 cm）（依 HENSEN 和 SCHIEMEMZ，1960）。另一个弓形鱼道可在上阿勒尔河上的吉夫霍恩中找到。该弓形鱼道小，宽 0.75m，仅有一个 25cm×25cm 的中心潜流孔口	70
图 5.9	水池的横截面	71

图 5.10	水池式鱼道的纵截面（伴有计算实例的示意图）	72
图 5.11	科布伦茨/摩泽尔鱼道（下游水视图）。该坝的鱼道位于摩泽尔右岸水电站旁，于 1951 年投入运行。GENNERICH（1957）、PELZ（1985）和其他人检查了该鱼道的运行。虽然大量的鱼能够通过该鱼道，但在靠近涡轮机出口附近捕获的鱼多得多，显然是因为它们找不到鱼道的入口。试验表明，鱼道入口和涡轮机出口的距离约为 45m，这是因为鱼道太长，约 102m，应是问题所在。	73
图 5.12	达赫尔水池式鱼道（投入运行前不久）	74
图 5.13	运行中的达赫尔水池式鱼道（下游水视图）	74
图 5.14	具两个狭槽的狭槽鱼道的实例（示意图）	75
图 5.15	多尔多涅河（法国）上的贝尔杰拉克堰旁的狭槽鱼道（ $h_{\text{tot}}=4.0\text{m}$ ， $b=6.0\text{m}$ ， $l_b=4.5\text{m}$ ， $l_{\text{tot}}=73\text{m}$ ， $Q=2.2\sim 7\text{m}^3/\text{s}$ ，通过旁路水道的补充流量 $0\sim 6\text{m}^3/\text{s}$ 。建造年份，1984 年）。这类结构证明对大型鲑科鱼类和有经济意义的西鲱（ <i>Alosa alosa</i> ）及鲤科鱼类都适合	76
图 5.16	仅有一个狭槽的狭槽鱼道的尺寸和术语（平面图）	76
图 5.17	狭槽中的流速分布，光滑底与凹凸不平底间的比较（依 GEBLER，1991）	77
图 5.18	狭槽鱼道的纵截面（示意图）	79
图 5.19	狭槽鱼道详图（纵截面示意图）	79
图 5.20	狭槽鱼道中的狭槽流。水流必须从狭槽沿对角线形成，防止水池中的短路流（下普赫尔河坝/下施普雷瓦尔德）	79
图 5.21	狭槽宽度为 $s=17\text{cm}$ 的狭槽鱼道中的流量	80
图 5.22	锐缘狭槽边界的方程（5.9）中的流量系数 $\mu_r=f(h_u/h_0)$	80
图 5.23	计算实例的示意图（狭槽鱼道的纵截面）	81
图 5.24	拟采用的狭槽鱼道隔板结构。堰板安装在两侧呈 U 形，而中心钢材截面同时具有钩状凸出物导流的功能。因此，中心钢材截面的宽度应较大（ $b=16\text{cm}$ ）（根据 KRÜGER 等，1994b）	81
图 5.25	新吕伯瑙/下施普雷瓦尔德附近施普雷坝旁的狭槽鱼道（下游水视图）	83
图 5.26	丹尼尔鱼道（示意图）（依 LONNEBJERG 修改，1980）	84
图 5.27	丹尼尔鱼道中的隔板（标准丹尼尔鱼道术语）（依 LONNEBJERG 修改，1980）	85
图 5.28	丹尼尔鱼道中特有的速度分布（依 KRÜGER 修改，1994a）	85
图 5.29	有中间休息池的丹尼尔鱼道。普伦茨劳（勃兰登堡）附近的戈尔米茨磨坊/河的上游水平视图	85
图 5.30	丹尼尔木制鱼道吉夫霍思/伊塞（下萨克森州）	86
图 5.31	丹尼尔鱼道（纵截面，施工原理和术语示意图）（依 LARINIER 修改，1992b）	89
图 5.32	$h^*=f(h_0)$ 的关系（依 LONNEBJERG 修改，1980）	89
图 5.33	隔板的尺寸	89
图 5.34	丹尼尔鱼道的纵截面	89
图 5.35	温克尔米勒/齐格河水电站旁的鱼道（北莱茵-威斯特伐利亚州）	91
图 5.36	下丹尼尔通道及之上的休息池视图。吸引流清晰可见，其在尾水渠处有大范围的影响面积，同时使鱼道入口易于被发现	92
图 5.37	下丹尼尔通道视图。混凝土制通道覆盖有木板，木板上安装有呈 U 形开口的隔板。水面上的高湍流度水气混合物令观察者误解，然而通道底区附近的流速实际上低得多	92
图 5.38	齐格河的海七鳃鳗（ <i>Petromyzon marinus</i> ）	92
图 5.39	鳗鲡（ <i>Anguilla anguilla</i> ）	93
图 5.40	罗斯波特（莱茵兰-法尔茨州）附近绍尔坝上的长菱形鱼道和鳗鲡梯。上游水视图。鳗鲡梯内放置了柴捆，平行设置于长菱形鱼道靠河岸一方的边墙	94

图 5.41	摩泽尔河（莱茵兰-法尔茨州）上采尔廷根坝上的鳗鲡梯适应于鳗鲡的特殊洄游行为。这种梯存在于里面放置了帮助鳗鲡溯河迁移的无端尼龙刷的通道。此外，鳗鲡梯的建造还与另一普通鱼道相连，并平行于这一鱼道的侧面（依 JENS, 1982）	94
图 5.42	鱼闸运行原理（纵截面示意图）	95
图 5.43	舍登鱼闸（萨尔河）的纵截面图和平面图	96
图 5.44	舍登/萨尔鱼闸（堰整体图）。鱼闸安装在堰和发电厂间的隔墩中（见箭头）。	97
图 5.45	升鱼机结构及功能原理示意图（依 LARINIER 修改, 1992c）	98
图 5.46	图伊列雷斯升鱼机。升鱼机位于与涡轮轮机出水口直接邻近的右侧，并将鱼提升 10m 高运送入中间池，从中间池到上游水体的最后 2m 高度差由狭槽鱼道克服	99
图 5.47	图伊列雷斯升鱼机的下进口。关闭可启闭栅门，将聚集在前室中的鱼推向运输槽，然后升起该槽。栅门大大提升了该装置的效率。在照片右上部可看到渠道的开口，通过渠道开口狭槽鱼道获得运行所需水流（ $Q=1\text{m}^3/\text{s}$ ）。同时，这额外水流改善了升鱼机的吸引力	99
图 6.1	设置鱼张网监测施托伯河（勃兰登堡）上普里茨哈格内尔磨坊旁鱼坡的运行	101
图 6.2	用红色刺花染料标志并放流入米尔巴赫河。种群恢复计划框架 [兰河（莱茵兰-法尔茨）一条支流] 的鲑	102
图 6.3	齐格河（北莱茵-威斯特伐利亚州）中温克尔米勒堰旁鱼坡上的监测性电捕	102
表 2.1	莱茵河、威悉河和易北河 3 个水系主要鱼区中主要鱼类的分布	10
表 2.2	河的分区（依 Illies, 1961）	11
表 2.3	河区的坡降分类（依 Illies 修改, 1949）	12
表 3.1	若干较大鱼类种类成鱼的平均体长	26
表 5.1	水池式鱼道的推荐尺寸	69
表 5.2	仅有一个狭槽的狭槽鱼道的最小尺寸（m） （根据 GEBLER, 1991, 和 LARINIER, 1992a）	76
表 5.3	高上游水位时的水位与流速	81
表 5.4	丹尼尔鱼道的通道宽度和坡降的指导值（LARINIER, 1983）	86
表 5.5	丹尼尔鱼道中视所选择的通道宽度而定的隔板设计指导值， 依 LONNEJERG (1980) 和 LARINIER (1992b)	87

1. 前言

许多种鱼类进行不同程度延伸的洄游作为其基本行为的一部分，其中最著名的例子是鲑（*Salma salar*）和鲟（*Acipenser sturio*）。这两种鱼在从海洋返回到其在河流中产卵场通常要洄游数千千米。除了这些长距离洄游种类外，其他鱼类和无脊椎动物在其生活史的某些阶段多少进行短距离或小规模洄游，从河流的一段迁移到另一段。

欧洲中世纪就在许多小河和河流中建堰来利用水力资源。这些历史外观仍然是欧洲人文景观的一个必不可少的组成部分。由于工业化和人口日益增加，河流继续受到人类对其范围更广和强度更大利用的支配。

除了防洪，航运和生产饮用水等这些用途外，水力发电在当今新坝建筑中起着重要作用，尤其在增进可再生能源的利用方面。作为减少来自化石能源 CO₂ 排放的一种手段，水电获得了强有力的发展。在跨江设置坝堰一类障碍物后，河流生态系统的特征和性质深深地受到了影响。建坝筑堰导致被改造成蓄水水库的整个江段一片汪洋，并失去其河流的特征。而且这些障碍物中断河流的纵向连通性，以致于水生生物的无障碍通过不再得到保障。这同其他因素如水污染一起导致某些鱼类（如鲑、鲟、西鲱）种群大小下降，有时到了接近灭绝的程度。

人们早就知道坝堰一类人造障碍物对洄游鱼类的负面影响。例如，在 13 世纪，于利希（北莱茵-威斯特法伦州）的伯爵为鲁尔河（马斯河在北莱茵-威斯特法伦州的支流）发布一道命令，命令开启所有的堰（Tichelbäcker, 1986）让鲑洄游，当然，这种解决问题的办法在今天不再切合实际，但是建造鱼道，是能够使今天的障碍物可通过的。虽然建造鱼道不能消除大坝引起的对生态的破坏，如河流生境的丧失或纵向连通性的丧失，但是这一措施在一定程度上减缓了这些障碍物对生态的负面影响，从而增强其生态相容性。例如，始于 20 世纪 80 年代的旨在北莱茵-威斯特法伦州的河流中重新引进鲑和海鲢计划的成功，不应仅归功于因建造污水处理厂而引起的水质改善，还应归功于在关键性的障碍物处修建鱼道将潜在的产卵水域（齐格河水系）与主要河流（莱茵河）连接（Steinberg 和 Lubieniecki, 1991）。而且，水生生态系统的这种重新连接对促进濒危鱼类在河流中重新建群的尝试，及更一般地说对物种保护和生境保护是一个重要贡献。今天，河流纵向连通性的恢复是一个公然宣称的社会政治目标。通过使不再需要的潜堰退役，代之以底坡，或通过建造鱼道，这是可以实现的。

鱼道是便于水生生物溯河洄游或降河洄游越过坝堰一类洄游障碍物的建筑物。尽管重新连接两个水体的目的决非限于有利于鱼类，毋宁说旨在适合于所有水生生物。但在没有包含除鱼类以外其他水生生物更适合的一般术语的情况下，这些指南通篇都将使用“鱼梯”（fish ladder）“鱼路”（fishway）“鱼道”（fish pass）“鱼阶梯”（fish stair）之类的术语。还将看到这一术语是违背历史背景的，因为过去强调助鱼溯河，今天“鱼路”这一术语是在更广泛的意义上使用的，不仅涉及鱼类区系，而且涉及进行洄游的所有水生生物。它将其意义进一步扩展，还包括降河洄游——一个正在成为越来越重要的方面。

鱼梯可采用技术上实用的方法或模仿自然的方法来建造，旁路水道和鱼坡就在更自然的解决办法之列，而技术性更强的解决办法则包括普通的水池型鱼道和狭槽鱼道，除普通类型外，还采用鳗鲡梯、升鱼机和水力鱼闸之类的特殊形式。这些指南仅提供了关于溯河洄游鱼道知识的现状，并且对其建造、运行、维护及其功能测试给予忠告和说明。

现在还需要管理关于鱼类行为障碍物（如气泡幕、光屏、电流屏，防止鱼被吸入涡轮机或抽水点）及助鱼降河的装置（即保证降河洄游的旁路系统）方面的信息，因为目前关于这些课题方面的信息相当缺乏，DVWK 已着手这一领域的研究，并开始编写与这些问题有关的其他专门指南。因此，在这本小册子中将只是涉及降河洄游的主题，但并未深入展开讨论。

2. 生态学原理

2.1 流水生态系统

流水把不同的生态区域自然地相互连接起来，有极其重要的生态学意义。因此，流水被称为“自然界中维持生命所必需的通讯线路”。任何其他生态系统几乎都未显示出如此大的结构多样性，从而表现出不同种植物和动物如此丰富和多样的建群特征。但是，很可能也没有其他生态系统因为人类的活动被利用到如此同样的程度，或如此高地受到污染或结构多样性的影响。

未受损伤的流水生态系统的性质自然由一个含有许多非生物（无生命）因子和生物（有生命）因子的、多元的和非常复杂的结构来确定。因此，仅一个参数的改变就对流水生物群落引起一连串极不相同的影响。目前，我们对产生这些影响的机制几乎一无所知。

地球物理因子、气候因子和其他非生物因子的组合对河流内不同生境的结构和质量有决定性的影响。因此下面将叙述这些基本参数中的若干参数。

2.1.1 地质与气候

不同的生态区，例如海岸附近的低地、高地及高山区在其地质与气候性质方面根本不相同。因此毫不奇怪，这些区域的流水性质也相应地不同。河流的水文学特征及水本身的水化学性质由这类因子如海拔高度、降水量及露头岩的组成决定。岩层的坡度也是一个地形因子，并且对其他非生物因子如水速和底质组成的特征及侵蚀过程和沉积过程具有决定性的影响。

2.1.2 水速

水速在生态学上是流水中最重要的决定因子。流水的动物（区系）生活在被水流冲走的永恒危险中，因此流水的永久建群仅对于产生了抵抗漂移机制或处于逆流运动位置的这类生物才是可能的。

在适应流水各种流动特征的过程中，水生动物（区系）形成不同的生物对策来避免因降河漂移而失去地盘。

体型的适应

鱼类和底栖无脊椎动物的体形最适应其各自水生环境的流动状态。快速流动河流上游中的鱼类，体型呈鱼雷状，因而对水流仅产生很低的阻力 [如鳟 (*Salmo trutta*) 或鳊 (*Phoxinus phoxinus*)], 而高背鱼如欧鳊 (*Abramis brama*) 和鲤 (*Cyprinus carpio*) 则在水流较平缓的水域建群 (图 2.1)。

行为的适应

许多水生生物采用积极的行为适应，以避免被冲到下游。一个明显的例子是四节蜉蝣属 (*Baetis*) 的蜉蝣。蜉蝣在水流流动较快时将其躯体贴在底质上，从而仅产生微小的阻力 (图 2.2)。

附着对策

许多底栖无脊椎动物借助于吸盘 [水蛭和蚴 (*Simulium* spp.) 幼体], 或通过分泌纺丝 (摇蚊幼体), 或借助于其肢上的钩、爪或刚毛将自己附着在底质上。

生活在缓流中的水生生物

较大的石头后面和下面形成缓流区。例如，杜父鱼 (*Cottus gobio*) 利用这类区域作为隐蔽处。杜父鱼寻求与底质直接接触，并且随着杜父鱼生长，喜爱不同大小的隐蔽处，视其个体大小而定。鱼类和许多无脊椎动物在河流的缝隙，即在底质颗粒的间隙中找到躲避高水速和掠食者的隐蔽处。例如，茴鱼 (*Thymallus thymallus*) 的卵黄囊仔鱼钻入缝隙，深达 30 厘米，保护自己不被掠食。

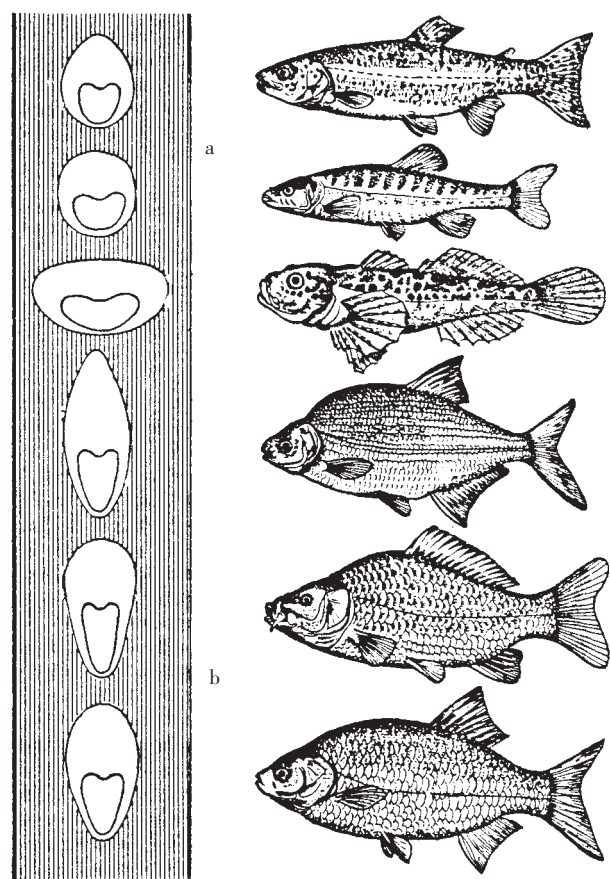


图 2.1 各种体型的鱼对不同流速的适应 (依 Schua, 1970)

(a) 快速流动河流上游中出现的种类：鳟、鲑、杜父鱼

(b) 河流缓流区中出现的种类：欧鳊、鲤、红眼鱼

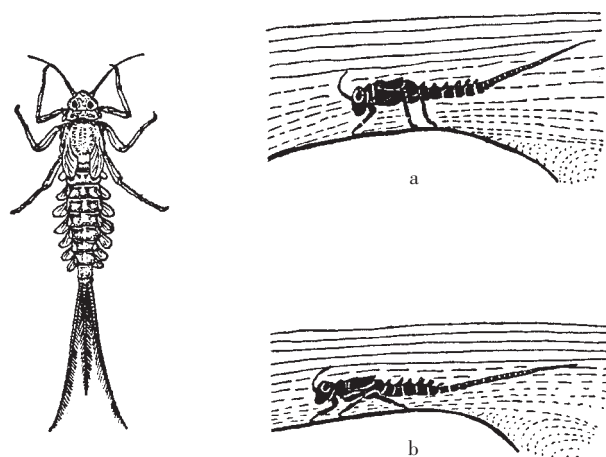


图 2.2 四节蜉蝣属 (*Baetis*) 的蜉蝣幼体的体态 (依 Schua, 1970)

(a) 在弱流中 (b) 在强流中

补偿性洄游

补偿性洄游是平衡主要由漂移引起位置丢失的定向运动。例如，幼杜父鱼，当其游泳能力尚未充分形成时，作为幼苗被动顺流迁移后，溯河游泳达 2 千米 (Bless, 1990)。若干昆虫种类的成虫飞向上游，以补偿它们因幼虫漂移而遭受的领地损失 (Pechlaner, 1986)。已知淡水跳跃者 (钩虾科 Gammaridae) 进行类似的补偿性洄游 (Hughes, 1970; Meijering, 1972)。

坡度是决定形态上未受损害河流的水速 (及水流)，以及河床一般结构的主要因子。水速在河

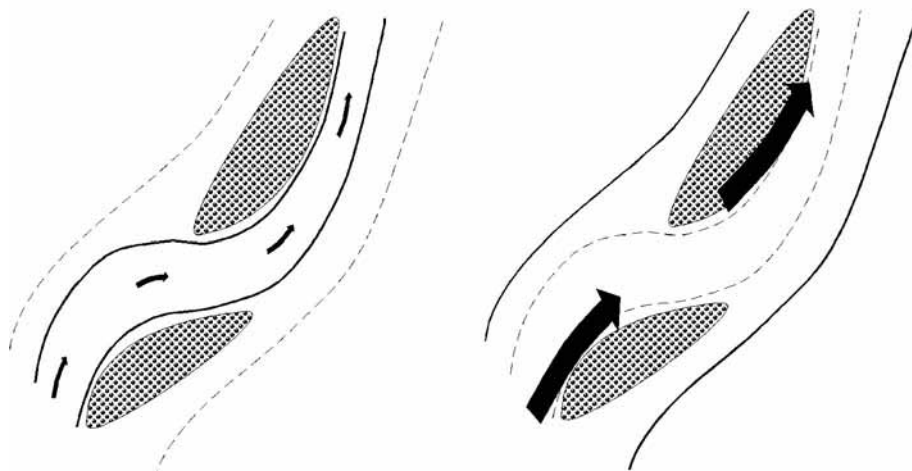


图 2.3 不同流量条件下河流流动特征的改变

(a) 低水位时：慢速；水绕障碍物流动 (b) 高水位时：高速；水流过障碍物

床宽度局部差异的影响下亦能有相当大的改变。河流结构的这些动态改变伴随有不同流态的形成。不同流态处于具有多形嵌花状特征水生生境的底部。

流态的改变也改变流水中的生活条件。例如，一些区域，水位正常时，缓流占优势，但发洪水时流速很高（图 2.3）。洪水期间，水生生物更容易被冲到下游，洪水退去后，水生动物必须通过补偿性运动平衡领地损失。

2.1.3 切应力和底质分布

流水的能量通过侵蚀和沉积动态地改变自然水流的河床。水的切应力引起固体大规模的迁移（推移质）及位移。这导致不同底岸结构及不同流态的形成：

- 在蜿蜒曲折及乱流的河道中，由于侵蚀，通过底岸物质的切削，在河湾外缘形成陡切岸，而由于物质的沉积在内缘形成平坦岸沉积物。
- 砾石、沙和淤泥的沉积局部会降低水深，从而形成浅滩。
- 固体物质的移动引起更大的水深（深坑，深洞）。
- 在较短距离内，缓流段与急流段交替出现（水池式结构与急流结构交替出现）。
- 河道的动态改变形成河湾、静水湾及回水。

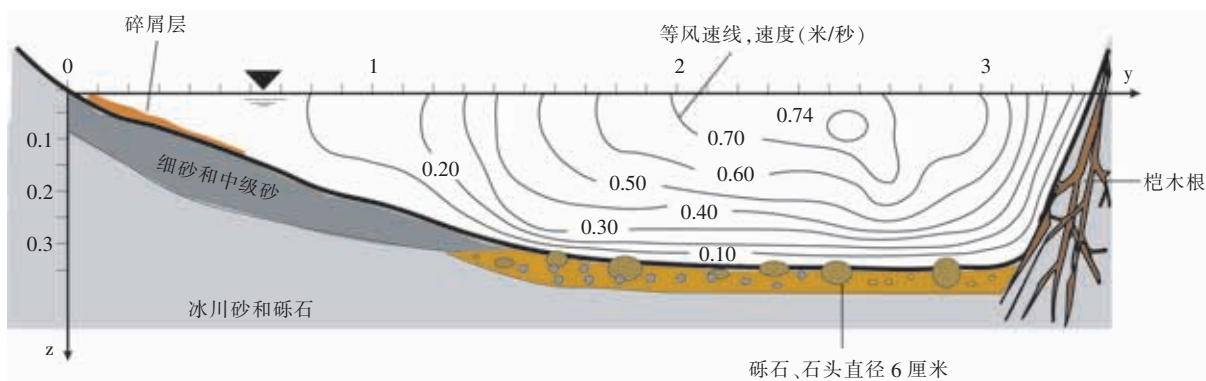


图 2.4 视流速而定的底质分布

流水迁移固体视其粒径而定（图 2.4）。在水速高及底部切应力相应高时，甚至大底质颗粒被水流冲走。切应力下降后，粗大底质首先沉积出来，而细小碎块被继续携带直至在流速减缓区沉积。因此，在自然或近似自然的河流中，底质显示与不同水流相对应的镶嵌分布，并被不同的生物群落建群，每个群落都有其自己特殊的生境要求。由于许多物种的生境要求在其生活史中可能改变很大，这种有差异的底质是许多物种在流水中形成群体的一个必不可少的先决条件。

- 许多种鱼类，例如鳟（*Salmo trutta f. fario*）、茴鱼（*Thymallus thymallus*）、鲃（*Barbus barbus*）、拟白鱼（*Alburnoides bipunctatus*）要求由特殊底质粒径组成的砾石床产卵。
- 此外，溪七鳃鳗、河七鳃鳗和海七鳃鳗（*Lampetra planari*、*Lampetra fluviatilis*、*Petromyzon marinus*）的仔鱼（幼七鳃鳗）需要细的沉积性沉积物。七鳃鳗仔鱼从流经它们的水中滤食有机物，在沉积物中隐藏并发育多年。
- 软口鱼（*Chondrostoma nasus*）刮食岩石上生长的藻类，因此软口鱼摄食时需要石头和蛮石，并需要砾石底质产卵。

2.1.4 温度

流水的温度对湖沼生物群落具有特殊意义。许多种类由于其代谢功能和正常行为适应温度范围狭窄。这样的种类仅能忍受有限度地偏离其最适温度。热污染对流水的甚至轻微预热（池塘中预热的水、热电厂等冷却水的输入）或太阳强烈辐射对水库水的预热，都能限制这类温度敏感生物在流水和水库水中建群。相反，鱼类生殖与最低温度相联系，各种鱼的最低水温不同。尽管鳟（*Salmo trutta f. fario*）在低于 5℃ 的温度产卵，可是软口鱼（*Chondrostoma nasus*）的生殖在 8℃ 才被触发，而鳊（*Phoxinus phoxinus*）的生殖始于 11℃。江河下游的典型种类，如鲤（*Cyprinus carpio*）和丁鲷（*Tinca tinca*）在温度大大超过 20℃ 时才产卵。水温和温度变化在鱼类的洄游行为中也起十分重要的作用（Jonsson, 1991）。挪威的伊姆萨河中鲑和海鳟的 2~3 龄幼鲑选择在 10℃ 以上的温度降河洄游，而大多数成鳟在 9℃ 和 12℃ 之间的温度顺河流而下洄游。升高水温也触发鱼类溯河洄游，然而，太高的水温妨碍溯河洄游。这是因为温度超过一个物种的特定界限后，鱼类代谢的负担可能加重，鱼类的体力可能受到限制。

2.1.5 氧

溶解氧在水生环境中起重要作用。在流水的湍流条件下，通过水面吸收氧（即氧的自然输入）是有效的，但是浮游藻类、附生藻类及高等水生植物，通过光合作用过程（生物供氧）也产生氧。氧的溶解度在很大程度上取决于水温，高温时溶解于水中的氧比在低温时少得多。尽管江河自净过程中耗氧的微生物分解消除有机污染物，但有机污染物能相当多地降低水中氧的水平。在极端情况下，这能引起水生生物死亡。鱼类死亡常常不是有毒物质（氰化物、农药等）造成的，毋宁说是有机物如污水或液体粪肥的耗氧分解造成缺氧引起的。水的含氧量本身又与水速和水流密不可分。水的含氧量对水生生物在流水中建群产生相当大的影响。

- 适应河流上游水中高氧水平的无脊椎动物，通过水流在体表扩散满足其总需氧量。由于水流急，要满足呼吸需要就要保证富氧水的充分供应，以致不同的石蝇幼虫尚未形成吸收氧的任何特殊器官（鳃）。
- 生活在水流较缓河段中的种类，如贝类（双壳类）、蜉蝣（蜉蝣目 Ephemeroptero）和石蚕蛾（毛翅目 Trichoptero）的幼体有鳃作为氧交换的呼吸器官。
- 若干底栖生物，如摇蚊幼虫（摇蚊科 Chironomidae）和正颤蚓（*Tubifex tubifex*）在其体液中有血红蛋白作为对慢性缺氧生境的一种特殊适应。血红蛋白有很高的结合氧的能力，因此具有血红蛋白的生物即使在低氧环境中也能满足其需氧量。
- 若干鱼类还增强了对水中不同氧水平的适应性，生活在溪流（rhithron）上游中的种类如鳟（*Salmo trutta f. fario*）和鳊（*Phoxinus phoxinus*），由于水在夏季仍然很凉，如果水是天然的且未被污染，全年都有充足的氧供其使用。因此，这些种类具有性能比较低的鳃，从而不得不依赖于来自水体的充足氧供应。鳟不能长期忍受显著低于 9 毫克/升以下的含氧量。
- 然而，缓慢流动河流（potamon）下游中的种类适应于自然发生的氧缺乏。鲤（*Cyprinus carpio*）能在 2~3 毫克/升的含氧量中生存。鳅科（Cobitidae）的若干土著种，如花鳅（*Cobitis taenia*）或欧洲泥鳅（*Misgurnus fossilis*）及条鳅（*Noemacheilus barbatulus*）具有肠呼吸能力，作为对慢性氧缺乏生境的适应。水的含氧量低时，这些种类能吞下空气，通过特

殊呼吸器官，在其肠道中从空气吸取氧。

2.2 河流连续统一体

VANNOTE 等 (1980) 提出的“河流连续统一体概念”描述了河流作为线性生态系统的生态功能及其连通性中断的后果。这一能流模型为要求河流系统线性连通性的完整性提供了理论基础。如节 2.1 所述，根据河道中非生物因子的特征改变，水生物种显示适应任何特定河段中占优势的特殊生活条件，并且形成沿水流自然演替随非生物因子改变而改变的特有生物群落。根据下列假设可构建一个基于物理因子梯度和影响河流中生物群落组成的生物机制间基本关系的理想化模型。

- 河流流量从源头到河口不断增加。
- 坡降陡度通常随着离源头的距离增加而降低。
- 流速在上游非常高并朝河口逐渐下降，河口潮水流向定期反转。
- 底质以流速决定的特有方式沿河流的上中下游分级。上游底质主要由砾石、小卵石和粗砾石组成；中游以细砾石和沙为主；河口区特点是细沙、淤泥和黏土。
- 温带河流上游的年平均温度大大低于 10°C ，是比较低的，但沿河流的上中下游升高。同样，温度改变的范围沿河流的上中下游不断增大。虽然温度在源头附近通常全年是准恒温的，但在下游可能变动于冬季 0°C 和夏季 20°C 之间。
- 在河流上游，含氧量饱和或过饱和。由于水流湍急，恒吸收大气氧。河水中的含氧量随着河流行程的长度而下降，不只是由于水温较高和流速较缓的原因。在下游，水生植物，尤其是浮游植物愈来愈影响水的含氧量。

这一广义模型中未考虑特例，如坡的不连续发育的影响，流入的支流较大，流量急增，或流经湖泊时，输入的能量增加。

河流连续统一体的概念说明，与不同非生物因子在河流上中下游中的改变相对应，同样也形成特有的生物梯度。这一梯度依据河流中的生物能流变化是可以理解的，并且是河流及其生物群落中有机质的输入、迁移、利用和存储的固定模式的表示。这种生物梯度是可识别的，因为一定种类的生物以沿河流上中下游特有的顺序被其他种类取代。一条河流的某一河段或甚至整个水系的生物群落于是以一种固定的模式被特别地相互连接起来，并且根据河流连续统一体理论使整个系统内的能量损失最小化。于是下游的生物群落利用上游生物群落对有机质能量的不完全转换，被迁移到下游的有机质主要借助于能量转换被进一步分解（图 2.5）。

这一理论得到河流不同区段（上、中、下游）中无脊椎动物利用不同食物成分并显示不同营养对策的事实所支持。生物能沿河流连续统一体的主要影响，除从上游和从流入中、下游的支流漂移来的有机质外，由包括有机质在内的、局部流入的外来物质和光组成。

- 上游受到两岸植被的强烈影响。一方面，由于荫蔽减少了河流自身中的自养生产，但另一方面为河流提供了大量外来死有机质，尤其以落叶的形式。
- 从陆生植物区流入的重要性随河流宽度的增加而减小，同时水体自身中的自养初级生产及从上游顺流迁移来的有机质显著增加。
- 河流不同区段生物群落间生理差异反映在初级生产（P）对生物群落的呼吸活动（R）之比（P/R）中。在上游呼吸活动起支配作用，在中游初级生产更重要。然而，在下游由于水的混浊度和水深增加，初级生产显著减少。同时，大量细有机质，虽然在上游最初以落叶形式产生，但被水流输入，以致这里呼吸活动超过初级生产，再次起支配作用。

水生生物的不同形态和生理对策可被认为是它们对不同河段中存在的食物成分和主要营养状况适应的一种表现。可区分下列摄食者类型：

- “碎食者”，利用粗有机质（ $>1\text{mm}$ ）如落叶，并依赖于微生物的支持活动；
- “收集者”，从流水滤食小（ $1\sim 50\text{mm}$ ）或非常小（ $0.5\sim 50\text{mm}$ ）的颗粒或从底质中取食之，同碎食者一样，收集者也依赖于微生物及其代谢产物，它们将微生物及其代谢产物同食物颗粒一起摄入。

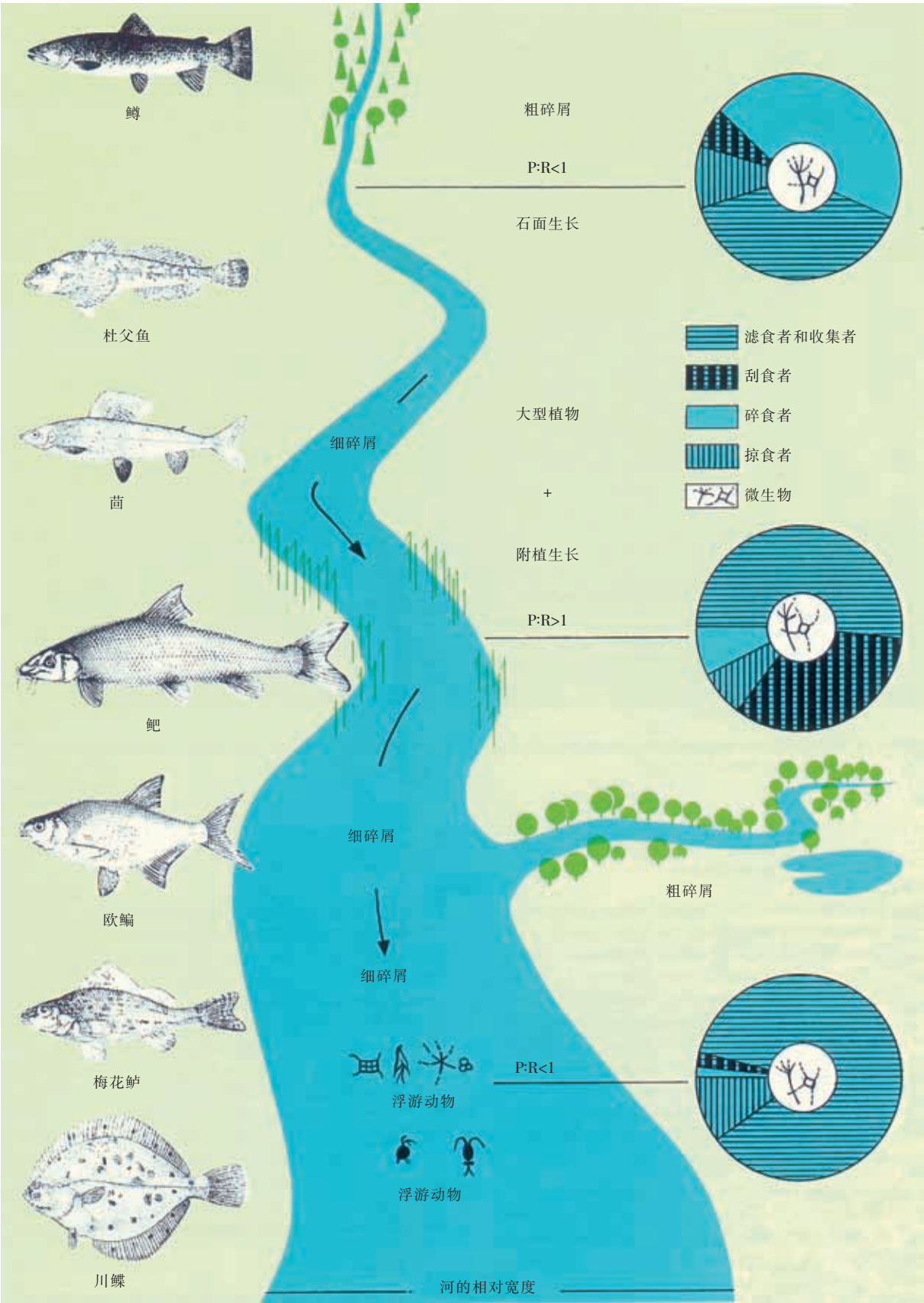


图 2.5 河流连续统一体概念：流水生物群落结构和功能特征的改变是河流宽度的一个函数（巴伐利亚地区水管理局，1987）。P=初级生产；R=呼吸活动；P/R=初级生产对呼吸活动之比

- “刮食者”，专门刮食生长在底质上的藻类。
- “掠食者”，掠食其他功能型摄食者。

根据特定的营养状况 ($P/R < 1$)，碎食者和收集者共同在上游的无脊椎动物群落中占优势。刮食者主要存在于中游 ($P/R > 1$)，随着河流宽度增加及随着食物颗粒大小显著下降，收集者在较大河流的生物群落中再次占优势。掠食者的比例在河流的上中下游仅略有改变，但种类组成不同。于是我们有：

上游：碎食者和收集者

中游：刮食者

下游：收集者

鱼类群落也显示沿河的上中下游特有的顺序。由为数不多的几个种类组成的上游冷水性鱼类群落被具有高度物种多样性的温水性鱼类群落陆续取代。上游中的种类主要摄食无脊椎动物（系无脊椎动物食者），而中游的鱼类群落由无脊椎动物食者和鱼食者（食其他鱼类）组成。食浮游生物的种类（浮游生物食者）限于大河的下游。于是我们有：

上游：食无脊椎动物的鱼

中游：食无脊椎动物的鱼和食鱼的鱼

下游：食浮游生物的鱼

这一模型运行的基本前提是，根据系统的动态分析，毫无疑问，动物群落可以改变和适应当地条件，例如，各个种能根据其生活史和季节条件自由地寻觅合适的索饵场。这要求相关河段中的生物无障碍溯河和降河通过。例如，由于两岸缺少灌木引起的生物能流入的干扰，或由于拦河筑坝引起的能流、物流的干扰及在生物群落形成过程中某个生态系统特有的干扰，无疑对整个水系的建群都具有负面影响。河流连续统一体的阻断，引起河流中物质循环的中断，导致能量平衡的改变。

2.3 流水的生物分区

运用河流中非生物因子和生物因子间相互作用的知识，可划定河流连续统一体内多个典型生物群落生境相互的界限，从而可将该河流分成各个不同的区。这样分区具有相当大的实际意义。例如，它可为生态渔业提供必要的基础，并能清楚地证明人类在河流中干预的负面影响。在渔业上，各江段在传统上由商业上重要的并成为某一江段鱼类组成特点的主要指示鱼种类来区分。经验表明，上游中的鱼类群落由鳟 (*Salmo trutta f. fario*) 和茴鱼 (*Thymallus thymallus*) 组成，而中游主要由鲃 (*Barbus barbus*)，下游由欧鳊 (*Abramis brama*) 形成种群。各江段典型伴生鱼类种类可能与这些指示种有亲缘关系。鱼类群落的这一纵向演替（即分区）遵循一个截然不同的模式。MÜLLER (1950) 对富尔达河示范性地证明了鱼类群落的这一纵向演替。在莱茵河水系和易北河水系有相同的鱼类群落顺序，但种类组成有若干微小差异（见表 2.1）。

- 上鳟区^{##}由 3 种鱼形成种群，即除了指示种鳟 (*Salmo trutta f. fario*) 外，仅有溪七鳃鳗 (*Lampetra planeri*) 和杜父鱼 (*Cottus gobio*) 作为伴生种类。

- 下鳟区（图 2.6）除了上述种类外，还有条鳅 (*Noemacheilus barbatulus*) 和鱖 (*Phoxinus phoxinus*)。

- 茴区（图 2.7）亦由鳟区所有的种类形成种群，但茴 (*Thymallus thymallus*) 对鳟占优势。此外，也有多种其他鱼类，如圆鳍雅罗鱼 (*Leuciscus cephalus*)、拟鲤 (*Rutilus rutilus*) 及鮡 (*Gobio gobio*)。

- 鲃区（图 2.8）仍可能有上鳟区的种类，但并非作为繁殖种群，鲤科鱼类如鲃 (*Barbus barbus*)、欧白鱼 (*Alburnus alburnus*)、粗鳞鲃 (*Blicca bjoerkna*) 及软口鱼 (*Chondrostoma nassus*) 和掠食性鱼类白斑狗鱼 (*Esox lucius*) 与鲈 (*Perca fluviatilis*) 共同占优势。该区中种的范围比茴区的种的范围大得多。

- 欧鳊区的鱼类群落（图 2.9）缺乏鲃区和茴鱼区的那些喜欢急流的伴生种类如拟白鱼 (*Alburnoides bipunctatus*) 和鱖 (*Phoxinus phoxinus*)。鲃 (*Barbus barbus*) 也仅在更强水流的江段中



图 2.6 富尔达河的鳟区（黑森州）



图 2.7 伊尔茨河的茴鱼区（巴伐利亚州）



图 2.8 拉恩河的鲃区（黑森州）



图 2.9 奥得河的欧鳊区（勃兰登堡）

局部存在。而欧鳊（*Abramis brama*）和其他典型静水种类如丁鲋（*Tinca tinca*）、鲤（*Cyprinus carpio*）和红眼鱼（*Scardinius erythrophthalmus*）占优势。

● 河口区被称为梅花鲈-川鲮区。该区已受到潮水的影响，可同时观察到湖沼种类如梅花鲈（*Gymnocephalus cernua*）和欧鳊区的种类与海水种类如川鲮（*Platichthys flesus*）和大西洋鲱（*Clupea harengus*）在一起。

因此，河流生物群落的特征是指示鱼种类和伴生种类。这一区分不仅适用于鱼类，也适用于水生无脊椎动物，因此，即使没有指示鱼种类（在严重污染的水域或人类活动严重改变的水域情况可能是这样），根据伴生鱼类种类和无脊椎动物能够正确鉴别鱼区。例如，鲃区，其特征是等足类（Slaters）、双翅目（蝇类）幼体及医蛭科（水蛭）的比例高，沙蚤（端足类）及石蚕蛾（毛翅目）的种群密度低以及缺乏襃翅目若干种类（石蝇），可与茴鱼区可靠地区分开（Illies, 1958）。

为了强调这一事实，Illies（1961）采用国际通用的流水命名法取代基于指示鱼种类的分区。他最早将流水分为两个大类：溪（rhithron）和河（potamon）。每一大类又进而分成 3 小类。对于中欧水体，ILLIES 的命名法与用指示鱼区的分类法意义相同（表 2.2）。

Illies（1961）证明，堪与中欧水体典型的富尔达河生物群落顺序相比的生物群落顺序，也存在于亚马孙河流域及秘鲁水体和南非水体中。但是毫不奇怪，组成种类不同。然而，那些水体的土著指示鱼类种类和伴生鱼种类在河流内形成的生存对策与在中欧河流中对应种类逐渐形成的生存对策类似。它们也显示出与欧洲鱼类相同的摄食习性，从而占据类似的生态位。因此，河流连续统一体模型及河流的生物分区，在原理上可被认为具有世界范围内的有效性。

表 2.1 莱茵河、威悉河和易北河 3 个水系主要鱼区中主要鱼类的分布

	上鳊区	下鳊区	茴鱼区	鲃区	欧鳊区	梅花鲈 川鲮区
鳊 (<i>Salmo trutta f. fario</i>)						
杜父鱼 (<i>Cottus gobio</i>)						
溪七鳃鳗 (<i>Lampetra planeri</i>)						
条鳅 (<i>Noemach. barbatulus</i>)						
鲃 (<i>Phoxinus phoxinus</i>)						
三刺鱼 (<i>Gasterosteus aculeatus</i>)						

(续)

	上 鳟 区	下 鳟 区	茴 鱼 区	鲃 区	欧 鳊 区	梅 花 鲈 川 鳊 区
茴鱼(<i>Thymallus thymallus</i>)						
拟白鱼 (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)						
雅罗鱼 (<i>Leuciscus leuciscus</i>)						
鮡 (<i>Gobio gobio</i>)						
圆鳍雅罗鱼 (<i>Leuciscus cephalus</i>)						
拟鲤 (<i>Rutilus rutilus</i>)						
鲃(<i>Barbus barbus</i>)						
软口鱼 (<i>Chondrostoma nasus</i>)						
欧白鱼 (<i>Alburnus alburnus</i>)						
粗鳞鳊 (<i>Blicca bjoerkna</i>)						
鲈 (<i>Blicca bjoecna</i>)						
白斑狗鱼 (<i>Esox lucius</i>)						
欧鳊(<i>Abramis brama</i>)						
梅花鲈 (<i>Gymnoceph. cernua</i>)						
圆腹雅罗鱼 (<i>Leuciscus ideus</i>)						
红眼鱼 (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)						
鲤 (<i>Cyprinus carpio</i>)						
丁 鲃 (<i>Tinca tinca</i>)						
溯河洄游种类						
海 鳟 (<i>Salmo trutta f. trutta</i>)						
鲑 (<i>Salmo salar</i>)						
河七鳃鳗 (<i>Lampetra fluviatilis</i>)						
海七鳃鳗 (<i>Petromyzon marinus</i>)						
西 鲱 (<i>Alssa alosa</i>)						
芬塔西鲱 (<i>Alosa fallax</i>)						
鲟 (<i>Acipenser sturio</i>)						
降河洄游种类						
鳗 鲡 (<i>Anguilla anguilla</i>)						
川 鳊 (<i>Platichthys flesus</i>)						
繁殖群体的主要分布区						
繁殖群体的次要分布区						

表 2.2 河的分区 (依 Illies, 1961)

溪	上游	上 鳟 区	上 溪
	中游	下 鳟 区	中 溪
	下游	茴 鱼 区	下 溪
河	上游	鲃 区	上 河
	中游	欧 鳊 区	中 河
	下游	梅 花 鲈-川 鳊 区	下 河

表 2.3 河区的坡降分类（依 Illies 修改，1949）

	不同宽度河流的坡度（%）				
	<1m	1~5m	5.25m	25~100m	>100m
上溪	10.00~1.65	5.00~1.50	2.00~1.45		
中溪	1.65~1.25	1.50~0.75	1.45~0.60	1.250~0.450	
下溪		0.75~0.30	0.60~0.20	0.450~0.125	—0.075
上河		0.30~0.10	0.20~0.05	0.125~0.033	0.075~0.025
中河		0.10~0.00	0.05~0.00	0.033~0.000	0.025~0.000
下河	受潮水影响的河口区				

HUET（1949）通过主要对法国、比利时、卢森堡和德国多条河流的理化参数及鱼类分布的系统研究证明，河区的形成主要由水流决定。HUET 采用河流坡度作为流量的近似值，河流宽度作为水流的度量标准。表 2.3 显示了这两个参数和河流分区间的关系。在该表中，根据威悉河水系和莱茵河水系的经验，区分了上溪和中溪，补充了 HUET 原来的数据。图 2.10 提供了根据坡度和河宽对河区分类的简单方法。这种分类适用于中欧的温和气候，从而也适用于德国所有水系（HUET，1949）。

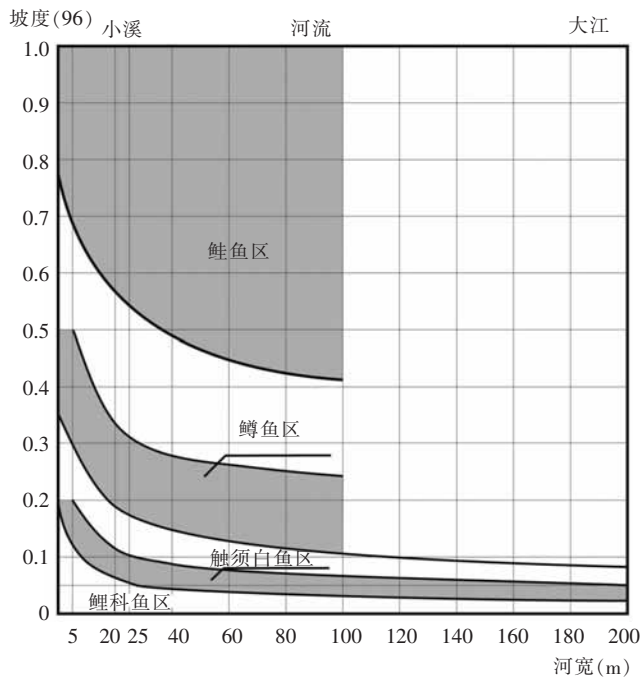


图 2.10 坡度、河宽和决定河流指示鱼区分区关系的图示（修改自 HUET，1959）。典型核心区用灰色表示，灰色区域间的区段是过渡区，然而，这些过渡在河流中是逐渐发生的

2.4 潜在的自然种类组成

在考察欧洲淡水鱼类总谱时，显然目前若干鱼类种类在许多河流中未找到适宜的生境条件。例如，理论上可能在德国存在的总共 70 种土著鱼类中，51 种出现在德意志联邦共和国灭绝或濒危物种的红色目录中（BLESS 等，1990）。由于水质持续不断的改善和水生群落生境生态提升的广泛努力，能够在失去的范围中重新建群的鱼类种类的数量正在增加。

近几年来，关于洄游鱼类返回到它们阔别了数十年的各个水系的报告的数量日益增多。海鲢（*Salmo trutta f. trutta*）、川鲮（*Platichthys flesus*）与河七鳃鳗（*Lampetra fluviatilis*）的种群不断增加的事实说明，假定甚至严重濒危物种群体正向发展是有理由的。而且，有报告称海七鳃鳗（*Petromyzon marinus*）在齐格河产卵，在莱茵河的荷兰河口捕捉到了鲟（*Acipenser sturio*）（VOLZ 和 DE GROOT，1992）。因此，即使“生态上苛求的”鱼类种类也能在荒水中重新建群的愿望似乎是现实的。

在规划水域管理和水利工程措施时，必须考虑实际存在的动物区系及能够在适当的时间内在江河的某一区段重新建群的那些种类，确保充分考虑生态效益。为了便于这种规划，可采用某一鱼类群落的“可能自然鱼类种类组成”的概念。这里应当包括在河流的某一区段原来土著的、及目前在那里找到、或在可预见的将来能在那里找到合适生境的所有种类。通过改善水质、修复河流结构及恢复水系纵向连通性，可实现适宜生境的再创造。

在确定可能自然鱼类种类组成时，应考虑方方面面。由于鱼类的可能自然区系的准确确定是一条河流生态正确评价的重要前提，一般应由渔业专家根据下列标准来进行：

- 河流分区：确定可能自然鱼类种类组成的第一个要求是河区的准确鉴定（参看节 2.3）。确定所选区域的指示鱼种类和伴生鱼种类，即可大致上得到潜在的自然物种谱。
- 生物地理方面：在确定任何河流的可能自然鱼类区系的种类时，必须考虑该流域中鱼类群落特殊种类组成，而这取决于典型区域的特征和该河流的特殊性。例如，软口鱼（*Chondrostoma nasus*）存在于中欧的水系（从卢瓦尔河水系到维斯图拉河水系）中，但在威悉河水系和易北河水系及石勒苏益格-荷尔斯泰因地区的河流中则完全没有。另一方面，多瑙哲罗鱼（*Hucho hucho*）（图 2.15）和鲈科的几个种如金吉鲈（*Aspro streber*）和条纹梅花鲈（*Acerina schratzer*）仅分布于多瑙河水系。
- 地形特殊性：水生生物群落反映了特殊的地貌状况，这在确定可能自然鱼类区系时是必须考虑的。例如，对于流经湖泊或其起点从湖泊算起的河流不能确定指示鱼区，因为在这样的条件下，在河流静水区出现有静水鱼类种类特征、在湖泊出口区出现有河流性种类特征的混合生物群落。
- 生境质量：潜在自然种类谱的加或减可能是由人的大规模介入或人的活动对河流形态改变引起的。例如，许多河流如摩泽尔河和美因河的鲃区，几乎其整个水道都被梯级坝拦住。同样，如果也没有侧向洄游入有鲃区和茴鱼区支流的可能性，现居种类的生境将被破坏到这些种类在可预见的将来重新建群似乎不现实的程度。相反，静水种类如鲤，虽非本地种，通常在被拦截的河流中找到适宜产卵条件并在这些水域建立永久繁殖群体。
- 史料：可能自然鱼类区系的迹象通常获自史料（v. SIEBOLD, 1863; WITTMACK, 1876; LEUTHNER, 1877; v. d. BORNE, 1863 及其他人），或渔获物历史报告。后者的典型例子是 KINZELBACH（1987）为重建鲟在莱茵河水系以前的分布区而进行的一个例子，或 KLAUSEWITZ（1974a, 1974b, 1975）通过仔细研究过去采集的鱼类标本对美因河原有鱼类区系的调查研究。在解释这类历史记录时需要相当谨慎，因为上述种类通常是那些渔业利用得最多的种类，而像丝鲃（*Rhodeus sericeus amarus*）、欧洲泥鳅（*Misgurnus fossilis*）和小赤梢鱼（*Leucaspis delineatus*）这么小的鱼，虽然在生态上重要，却罕被提及。而且，缺乏跨越德国不同区域涉及异物同名的标准德文术语，解释史料时引起相当大的困难。例如德文单词“Schneider”（Cutter）和“WeiBfisch（White fish）”各自用来区分不同地区不同种的鱼。

2.5 水生生物的洄游行为

鱼类依靠洄游来满足不同生活期它们对群落生境结构的要求。鱼类和较少移动的底栖无脊椎动物都进行洄游（图 2.11）。洄游或可在主河道中是纵向的，或在主河道与次要水域间是侧向的。河流沿其上中下游反复形成湖泊时，例如在德国北部低地，需要将这些不同的生态系统相互连接起来，让这些生物洄游，以满足其洄游和生境要求。因此，除种群扩散和种群灭绝河段的重新建群外，河流的纵向连通性在生殖交换方面扮演极其重要的角色。

补偿性溯河洄游

漂移引起的范围损失可由溯河运动主动平衡。

迁移于不同生境间

一些鱼类在其索饵生境和休眠生境间进行年内洄游，或在其生活史中栖息在一条河流的可提供特殊条件的不同区段，以满足其不同发育阶段的要求。这在考察杜父鱼（*Cottus gobio*）的生活史时



图 2.11 多林河鱼道中石蚕蛾 (*Anabolia nervosa*) 的幼体 (勃兰登堡)

尤为明显 (图 2.12) (BLESS, 1982)。杜父鱼昼伏夜动。它寻觅底质中与其大小正好相符合的洞穴。成鱼喜欢有急流的河段及与之相符合的粗糙底质, 幼鱼在其生长阶段在有缓流和细颗粒底质的区域找到其最适生境。通常不会有如此不同的底质条件在位置上相互靠得很近, 尤其在受人为活动影响的水域, 因此在生活史的不同阶段运动于生境间可能需要长距离洄游。业已证明, 软口鱼 (*Chondrostoma nasus*) (图 2.13) 和鲃 (*Barbus barbus*) 的活动范围达 300km (STEINMANN, 1937)。



图 2.12 杜父鱼 (*Cottus gobio*)



图 2.13 软口鱼 (*Chondrostoma nasus*)

夏末不同种的鱼钻入冬季生境。这些生境通常位于河流下游, 从而位于水流较缓、较深的区段。鱼从那里向下迁移至江底, 在江底冬眠, 降低其代谢。

产卵洄游

产卵洄游是一个物种不同区域间的一类特殊洄游。产卵洄游由生活于水系内的固有鱼类进行。



图 2.14 鲑 (*Salmo salar*)



图 2.15 多瑙哲罗鱼 (*Hucho hucho*)

著名的例子是鲃 (*Barbus barbus*) 和鳟 (*Salmo trutta f. fario*)。如产卵洄游被不可逾越的障碍封锁，鱼可能在河流的条件不太适宜的区段产卵 (应急产卵)，这导致补充量较低，或生殖完全失败，随后该物种从生境中灭绝。

海淡水洄游行为

海淡水洄游鱼类的生活史包括海水生态系统和淡水生态系统间必须进行的运动。根据这类海淡水洄游鱼类的生物学要求，可充分证明需要无阻碍通过河流系统。洄游路线的中断不可避免地导致种群灭绝。就洄游方向而论，可分为两类洄游鱼类。

- 降海性产卵洄游种类，如鳗鲡 (*Anguila anguilla*)，降海洄游，成鱼在大海中生殖。对于鳗鲡而言，生殖仅发生在马尾藻海 (大西洋)，且柳叶仔鳗 (*Leptocephali*) 随海流被动漂流进入沿海区域。变态后，色素尚未沉着的幼鳗 (玻璃鳗) 溯河洄游，它们在河流的上游发育直至性成熟 (图 2.16)。
- 溯河性洄游产卵种类，如鲑 (*Salmo salar*)、鳟 (*Salmo trutta f. trutta*)、鲟 (*Acipenser sturio*)、西鲱 (*Alosa alosa*)、海七鳃鳗 (*Petromyzon marinus*) 和河七鳃鳗 (*Lampetro fluviatilis*)。它们性成熟后从海洋洄游入河流，到河流的上游产卵。幼鱼经过一段时间后又返回到海洋，然后在那里生长直至性成熟 (图 2.17)。

种群交换

相邻河段中不同种群密度的平衡，是通过溯河洄游或降河洄游发生的，并导致种群间遗传交换。

降河洄游

除鳗鲡的降河性产卵洄游或鲑及海鳟的 2~3 龄幼鲑的降海洄游外，降海洄游还履行另一种基本生物学功能。例如生态灾难如严重的洪灾或排污发生后，底栖无脊椎动物尤其能降河漂移 (即所

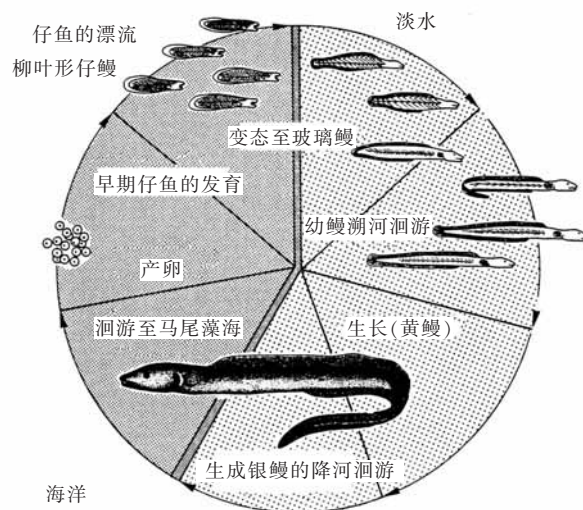


图 2.16 降海性产卵洄游鱼类的生活史：以鳗鲡 (*Anguilla anguilla*) 为例

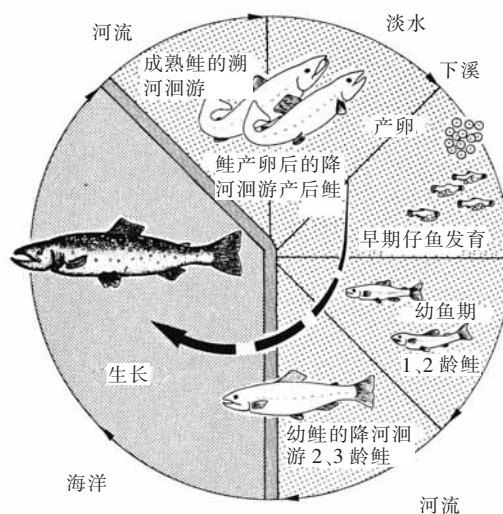


图 2.17 溯河性产卵洄游鱼类的生活史：以鲑 (*Salmon salar*) 为例

谓的灾难性漂移)。在所有的情况下，不论洄游是主动进行的（即逃避）还是被动持续，水生生物都依赖于充分的、畅通的、纵向连通性。

繁殖

水生生物的迁移率在整个水体和水系，或其几个长期荒芜或一次灾难性事件中种群被灭绝的区段重新建群的过程中起决定性作用。于是在桑多斯 (Sandoz) 事故后的很短时间就发生了莱茵河荒漠区段的重新建群 (MÜLLER 和 MENG, 1990)，而事故后仅两年就恢复了鱼类种群，并不再显示损害的迹象 (LELEK 和 KÖHLLER, 1990)。这一迅速恢复尤其归因于从支流移入莱茵河的水生生物。

大淡水贻贝繁殖方式奇特，它们在其整个幼体阶段（钩介幼体）分散。这些幼体寄生在土著鱼的鳃上皮或鳍上，因此能在水系中被其宿主长距离迁移后落到泥沙上并发育成性成熟的贻贝。

2.6 坝堰引起的对水生动物区系的危害

德国土著鱼类区系遭受到许多威胁。这些威胁导致多种鱼的资源严重减少。对土著鱼类危害的主要原因是人类对水生群落生境的下列干预：

- 生活污水和工业污水排放及农业径流（肥料、农药、侵蚀）和大气辐射（SO₂、酸雨等）引起的水污染。

- 导致生态退化或生境破坏的水道形态改变。
- 不可逾越障碍引起的纵向连通性中断。
- 渔捞活动对鱼类资源的影响。

BLESS 等（1994）发现，由于这些危害，在德国 70 种土著淡水鱼类中：

- 4 种灭绝或失踪；
- 9 种受到灭绝的威胁；
- 21 种严重濒危；
- 17 种濒危。

在灭绝、失踪或受灭绝威胁的鱼类中，82% 是洄游性种类，或要求清洁砾石产卵并只能生活在有急流的群落生境中的需氧量高的种类（BLESS 等，1984）。因此，对这些种类最危险的威胁之一是拦河筑坝。这些种群的灭绝可归咎于障碍物引起的畅通通行的中断及坝堰后人工蓄水的形成。这些障碍物无疑在一定程度上改变了河流的水力学性质和形态学性质。改变的程度取决于水库的大小和范围。对水生生物群落进一步的威胁（LWA，1992）是：

- 坝堰蓄水后横截面增大显著降低水流的流速和变异性。
- 细沙在覆盖粗糙底质蓄水水中的沉积增加，改变不同粒径的原有嵌花（*original mosaic*）。
- 由于水流不能调整泥沙，许多水生生物失去其低流变的缝隙式生境。
- 降低流经底质缝隙的流量和氧的可获量，沉积的有机物愈来愈多地被厌氧分解，腐泥（即腐烂淤泥）尤其在富营养水体中堆积。
- 由于流速降低，水在水库中的滞留时间延长，水温升高。
- 水库发生缺氧可能是因为水预热时水结合氧的能力下降，及由于湍流度降低，空气/水界面处吸收的大气氧减少。
- 水库中水的流动减少伴随以流入水体中的营养物增加，有利于水生植物生长，通常导致藻华或水草的过度生长。植物生物量过大，光合作用生产可导致 pH 增加相当多，有死鱼的危险，尤其在太阳的强烈光辐射下。此外，秋季水生植物大量腐烂，导致缺氧或氧耗尽而死鱼。
- 水较深处大大降低了光至江底的穿透率，从而减弱了附生于水生植物的藻类的生长。
- 如河流连续统一体概念中所述，能流被沉积日渐增多的有机质中断，这导致对河流中的代谢过程干扰。

筑坝和蓄水造成的对河流中生境的这些改变对生物群落具有持久的如下的负面影响：

- 特别是喜流的（*rheophilic*）种类和需氧量高的生物失去其生存环境，尤其在较大的水库中更是如此。
- 需要清洁砾石产卵的种找不到合适的产卵场，生活在石缝中的生物及底栖鱼类失去其隐蔽处。
- 摄食附生于水生植物的藻类的种类，如无脊椎动物中的草食动物或鱼类中的软口鱼（*Chondrostoma nasus*）失去其索饵场。
- 因无脊椎动物的范围变动或缩小，鱼类的饵料供应减少。
- 重要区域的生境丧失导致鱼类种群年龄结构混乱，从而使物种濒于灭绝。
- 生物群落减少，只剩下那些能忍受改变后的非生物条件、适应性强的种类。

旁路电站抽水引起河道坝下游（即原天然主河道）干涸对水生生物是一个深层次的问题。由于旁路电站通常在更下游的一些距离才将水重新引入河道，原天然河道中仅剩很少的水，或河道甚至可能长期完全干涸。与未拦河筑坝的河段相比，这些干涸的河段因对生物群落的下列威胁而受到了极大损害：

- 严重减少的流动状态使水流的变异性下降到最低程度，仅河道底部是湿的，且形成静水池（所谓的存水弯效应），河流种再也找不到适当的生境了。
- 受影响河段（即原天然主河道）中的水夏季严重预热，有河段完全干涸，水生生物随后有脱水的危险。

- 此外，冬季形成的底冰能杀死生物。
- 其他河流中的常态决定因子，如理化参数亦因没有水流而改变，而这引起进一步改变，例如藻华和耗氧量增加。
- 超过水电站的流经涡轮机最大能力时，即河中水比能流经涡轮机的水多时，进入当时几乎干涸的原天然主河道的流量急增，可导致水生动物（区系）漂移增加。

通过确定坝下游河道最低流量要求可以减少这些问题（DVWK，1995），但是最低流量的确定有不同的方法，区域间的过程也不相同，这些本指南都未能进一步涉及。

3. 鱼道的一般要求

满足水生物种洄游的各种需要，河流的纵向连通性在生态上至关重要（见第 2.5 节）。因此，对于洄游种类是土著种的所有水域，这都是一个基本要求。恢复一个水系的纵向和横向连通性，主河道与回水及次要群落生境，如取出固体物（洪水淹没后残留的瓦、石、玻璃片、砾石坑、泥炭制品等）后形成的水体，连接起来在生态上是正确的做法。无论河流的大小、河道结构改变的程度、目前的水质或现在用户的利益，都必须保持或恢复纵向连通性。许多例子表明，污染程度和对水体的利用都可在极短的时间内改变，而且可迫使人为的影响进入背景。因此，甚至对于生态现状仅允许水生生物有限种建群的河段，纵向连通性的恢复也变得非常重要了。在此基础上，水系相互连接概念的详尽阐述，有利于对河流进行更加合理、有效的管理。不过，各个减缓措施对于所有在生态上与纵向连通性恢复有关的概念都是适用的（Schiwevers & Adam, 1991）。



图 3.1 本图所示的跌水，即使不很高，也对小鱼的洄游是一个不可逾越的障碍。
位于加尔德莱根的劳格溪（萨克森-安哈尔特）

河流的纵向畅通主要受到水生生物不可逾越的人工跌水（图 3.1）堰坝的阻碍，或因其变得不可能。除了这类结构外，混凝土铺筑的水道、铺砌的河底或预制混凝土半壳构件彻底改造过的涵洞（图 3.2）或河段也都能充当洄游的障碍物。在规划鱼道前，第一步应该是研究维持现有跨江障碍物的必要性，因为一个鱼道的建造永远只是恢复江河无障碍通道的次佳解决办法，尤其在较小的河流中，有许多堰坝，如磨坊和改良堰，其最初的目的已被舍弃，但仍妨碍水生生物的洄游。在试图恢复纵向连通性时，应首先拆除这类障碍物而非插入一个鱼道。在与其他生态要求（如高位蓄水保护有价值湿地）或与区域的社会文化需要发生冲突时，可能出现这一原则的例外。

下面的基本考虑与主要特征（如鱼道在河流中的最佳位置）与设计标准有关，而主要特征与特殊类型的鱼道无关。鱼道应满足的一般标准包括洄游性水生生物的生物学要求与洄游行为，这是设计鱼道的重要方面。然而，必须指出，今天关于触发或影响这类生物洄游的生物学机制的认识仍然较少，需要深入研究作为鱼道建造标准的依据。

鱼道的一般标准包括在规划建造一个新坝时，在评估一个现有鱼道时或在规划给现有坝装配鱼道时必须考虑的各个不同的方面。这些要求应优先于经济方面的考虑。为了确保所有的物种都很好通过，很可能需要在一个坝建造几条鱼道，视当地情况而定。这里普遍有效的观点应优先于个别



图 3.2 具冲刷邻近溪底的射流涵洞是水生物洄游不可逾越的障碍。位于斯托贝尔的普里奇哈格内尔磨坊（勃兰登堡）

情况的具体解决，因为每一座坝都不同，因其外形和整合入河流而产生的特殊性。

3.1 鱼道的最佳位置

在未筑坝的河流中，河道的整个宽度皆可供水生生物洄游，但堰坝处的鱼道通常将洄游生物限制在河道横截面的一小部分。鱼道通常都只是比较小的结构，因此具有“针眼”的特点。尤其在河流和大江大河中（图 3.3）。实际上，任何鱼道的可能尺寸都要受到工程、水力和经济的严格限制，尤其在较大的河流中，因此，鱼道在坝上的位置具有至关重要的意义。

鱼类和水生无脊椎动物通常在或沿干流溯河洄游（图 3.4 和图 3.5）。为了让大多数溯河洄游的生物察觉到鱼道的入口，鱼道入口必须位于水流最高的河岸处。这还有一个优点，即位置在河岸附近，能够较为容易地将鱼道与河底底质或河岸底质连接。



图 3.3 摩泽尔河（莱茵兰-法尔茨）上尼夫坝的鸟瞰图，显示与坝的总体大小相比鱼道的大小（白箭头）。

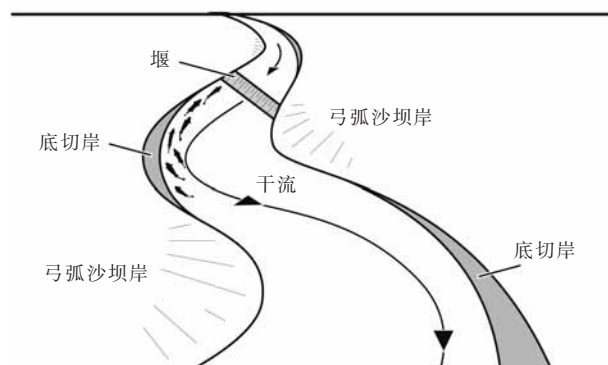


图 3.4 有底切岸和弓弧沙坝岸的河流中流态示意图。在或沿干流游泳的鱼将沿底切岸侧到达堰。因此，鱼道应尽可能靠近鱼遇见障碍物的位置（依 Jens 修改，1982）

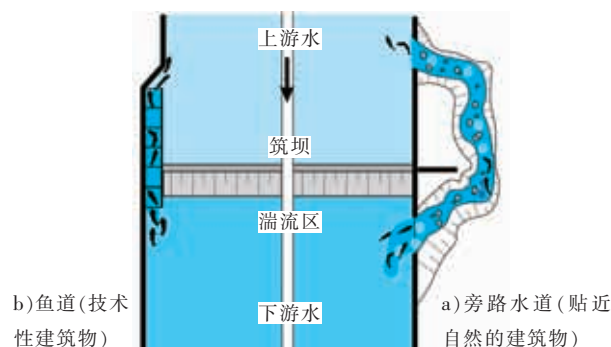


图 3.5 a) 旁路水道的最佳位置和 b) 技术性鱼道的最佳位置：溯河洄游的鱼被干流引导，向上游到正好在坝下的下游水中最湍流的区域或涡轮机出口。在岸附近鱼寻找到一条继续溯河运动的路。最重要的是，必须保证鱼能通过消力池的底槛（依拉瑞尼尔修改，1992）

鱼道在水电站的最适宜位置通常也与发电厂在江的同一侧。鱼道的出水口（即入口）应尽可能靠近坝或涡轮机出口。将鱼道出水口紧靠坝堰，能使障碍物与鱼道入口间形成的死水区减少到最小；这是很重要的，因为溯河洄游的鱼可能不易察觉到入口并仍留在死水区被困住。一条延伸远远进入坝下游水的鱼道大大限制了鱼找到入口的可能性，是一个应对许多鱼道失败负责的错误设计。

若坝堰为跨江斜置，并沿其整个堰顶皆有溢水时，溯河洄游的鱼通常在堰和岸间的上游狭窄夹角处集中（图 3.6）。因此，鱼道显然应设置在这一区域。

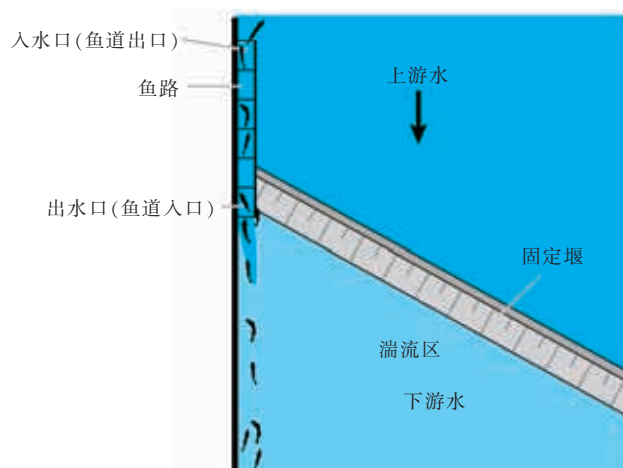


图 3.6 溯河运动的鱼在堰和岸的狭窄夹角中聚集，这是建造鱼道的最适宜位置（依拉瑞尼尔，1992d）

关于旁路水电站，鱼道位置的选择有两个方案可保证纵向连通性。其一，鱼道可建在电站旁，在下游水河道和上游水河道间提供一个连接。其二，可建在堰旁，充当原天然主河道和水库上游水间的一个连接，通常鱼道仅建在这些位置中的一处。因为通常鱼顺着最强的水流而上，它们往往沿下游水河道向上游至涡轮机出口，而非进入流量通常较低的原主河道。因此，在这种情况下，需要建造从下游水河道到上游水河道的鱼道。然而，如果超过发电厂涡轮机的额定功率，过量的水溢坝流入原主河道，将鱼道设置在拦河坝处也是可行的。只要流量足够高，来自这第二鱼道的水亦可用于提供原河道中的最小环境流量，这样就维持了原河道的流水条件。因此，从生态学的观点看，建议在这样的情况下可建造两条鱼道，一条在水电厂旁，一条在拦河坝旁（图 3.7）。

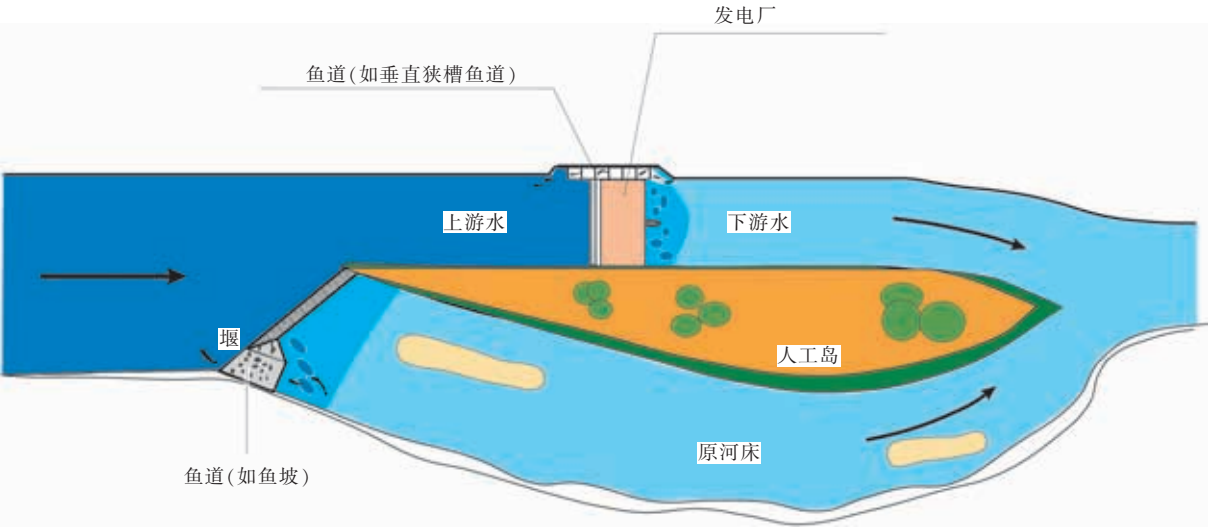


图 3.7 通过建造两条鱼道（即一条正好在水电厂旁，另一条在堰旁），确保旁路水电站附近的纵向连通性

3.2 鱼道入口和吸引流

水生生物对水流的察觉对它们在河流中辨别方向起决定性作用。溯河洄游的成鱼通常逆干流游泳（正趋流性）。然而，它们不一定在最大水流内洄游，视其游泳能力而定，它们可能沿着最大水流的边缘游泳。如果洄游被一个障碍物封锁，鱼试图在坝的一侧侧向寻找前进的通道。这样做时，它们继续对正趋流性起反应，并且在察觉到从鱼道中出来的水流时被导入鱼道。

坝下泄水道的性质（水速及湍流度）影响鱼道入口处形成的吸引流，水流的吸引力亦受到从鱼道流出水的速度、角度及河流流量对鱼道流量之比的影响。吸引流必须是可察觉的，尤其在泄水道为目标种喜欢的那些区域，或由于下游水的特点鱼被迫游到的那些区域。吸引流流出鱼道的速度应在 0.8~2.0m/s 的范围内（SNIp, 1987）。

尤其在下游水位波动处，可用一个特殊旁路直接从上游将额外水流引导到鱼道入口，以增加吸引流的强度。采用旁路避免了鱼道中的水流特性受到鱼道内事实上仅在鱼道入口处所需增大流量的负面影响。旁路可呈压力管的形式，但通常最好有一个明渠。无论如何，从旁路出来的这一水流的速度决不应妨碍鱼游入鱼道。除特殊情况外，流速不应超过 2m/s。俄国鱼道标准（SNIp, 1987）和法国、美国许多设施，都有一个前室使得来自鱼道和旁路的水汇集于此。从鱼道流出的水流和从旁路流出的水流在这一前室混合后流出鱼道形成（图 3.8）吸引流。在这种情况下，出水口处（即鱼道入口）的速度即使在低水时不应超过 2m/s。

有一个未经证明的假设认为，或进入水体的大气氧流入量增加，或鱼道中水发出的溅水的声音，都产生可用来使鱼道设计最佳化的引诱效应，遗憾的是，这尚未被证实。定向导鱼的技术装置，如行为栅栏或机械制导装置，本指南都未涉及，因为尚无关于这类装置效率的可靠数据。关于侧向导引的实验室实验及关于鱼类在运行良好鱼道处行为的观察，为下面的观点提供了依据。采用计算确定吸引流传播特征的理论探讨，是由俄国标准工作局（SNIp, 1987）和 KRAATZ（1989）提供的。

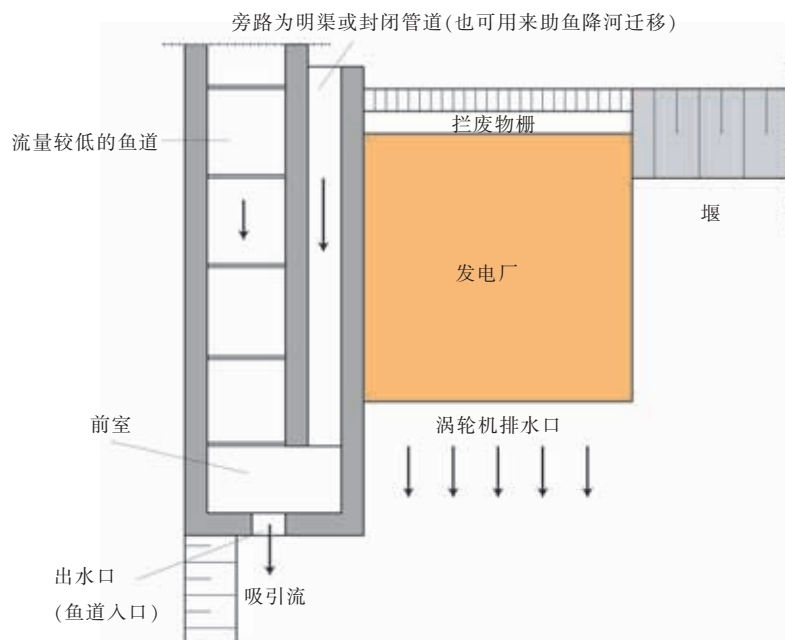


图 3.8 通过旁路将额外流量送入鱼道第一水池下游的前室，以增加鱼入口处的吸引流

鱼道的入口必须定位在鱼类溯河运动时集中的地方。下游水流的特征及水电站结构详情决定集中区，在许多情况下，这就直接在堰坝下，在拦河坝脚下或在涡轮机出口处。因此，必须以将逆水而行的鱼引导到鱼道入口并使之进入鱼道的设计方向，把任何吸引鱼的水流从鱼道入口引导到集中区。

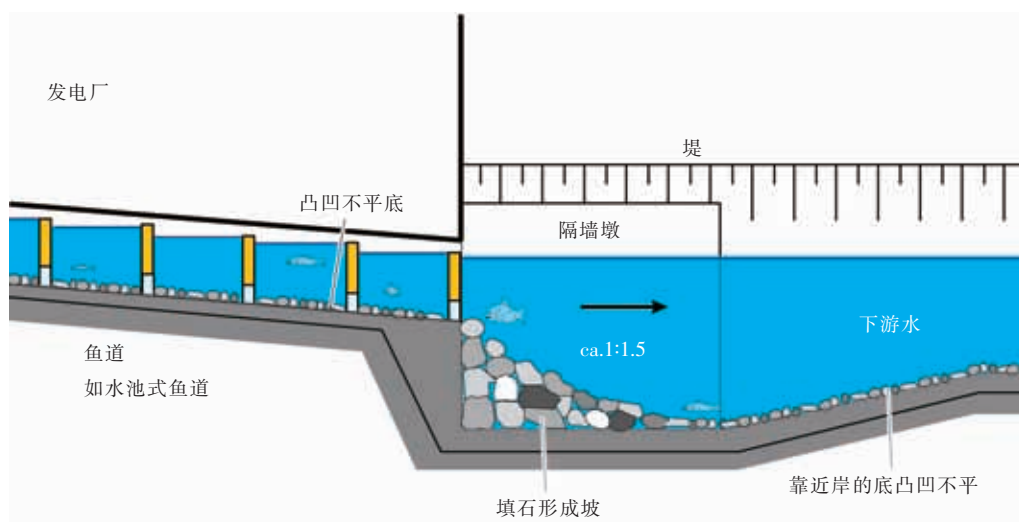


图 3.9 连接鱼道入口和河底的水下填石坡

如可能，鱼道的入口应在岸边，与主要流向平行，以便鱼不改变方向就能游入，如果鱼道的入口离障碍物下游太远，鱼找到鱼道入口就会有困难。

吸引流流入河流的位点离坝的下游愈远，这一水流对于溯河运动的鱼就愈容易察觉到。增加鱼道入口处的流速，或使高流量通过鱼道本身，或使额外吸引水通过旁路，都可获得充足的吸引流。模型实验显示，假定有足够的水，使高流量能以足够快的速度通过鱼道，以最大角度 45° 离开鱼道入口的吸引流对鱼最有效。大于 45° 的角将射流远远地射向江心，但随之产生的风险是，吸引流不再沿岸而流，在岸边游泳的鱼，只有在它们恰好在鱼道入口时才会注意到这一吸引流。

关键的问题是，如何建造鱼道入口，使鱼甚至在低水位时能游入鱼道。将鱼道与河川底床连接起来，甚至对于底栖鱼类和大型底栖生物，进入鱼道也较为容易。采用最大坡度为 1:2 的抛石坡，

就能连接鱼道和天然河底了（图 3.9）。现有的一些鱼道使其入口朝向堰，从而与河中的水流呈 180° 的角。在这样的情况下，入口是不合适的，因为它不能产生使鱼找到鱼道入口的吸引流。

在美国，有一类特殊的鱼道入口，将集鱼道附设在电厂尾水端作为鱼道入口（CLAY, 1961）。这类构造，受到许多鱼因溯游徘徊在发电站涡轮机排水口处湍流区，而直接来到障碍物处的事实启发。位于涡轮机排水口上方的集水道刚好在这一点延伸过障碍物的整个宽度。该集水道有许多出水口，一个挨一个，吸引流经由这些出水口被排出。进入集水道的鱼通过集水道被导入实际鱼道。实际鱼道也有其自身的直接入口（图 3.10 和图 3.11）。然而，这类构造不适合于底栖鱼类。

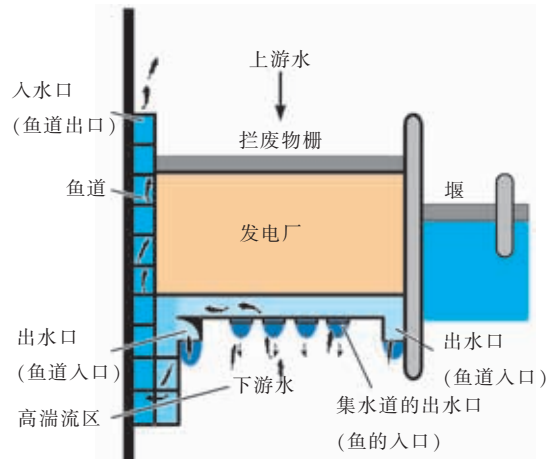


图 3.10 美国一座有集水道的水电站示意图（依拉瑞尼尔，1992d）

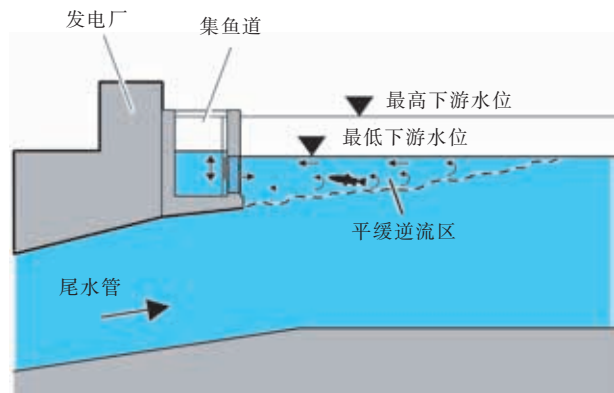


图 3.11 集水道的横截面（依拉瑞尼尔，1992）

由于白昼活动的鱼类避免游入暗渠，鱼道应处于日光中，因而鱼道上面不应被覆盖。如不能做到这一点，应给鱼道人工照明，照明尽可能接近自然光。

3.3 鱼道出口和出口位置

在水电站旁设置鱼道时，其入水口（进入上游水的出口）的位置必须离堰或涡轮机取水口足够远，使从鱼道出来的鱼不被水流卷入涡轮机。鱼道出口和涡轮机取水口或拦废物栅间应保持最少 5m 的距离。如果上游水的流速大于 0.5m/s，鱼道出口区域得以隔墙延伸入上游水。

一般，如果水库的上游水位是恒定的，入水口的设计不是一个问题。然而，在上游水位变动的坝旁必须采取特殊预防措施。这里，鱼道应属于这样一种类型：其运行仅略微受到变动的上游水位的影响，或为必须改变其相关结构，使其适应其入水口区域的类型。业已证明，如果上游水位变动最大在 0.5~1.0m 之间，垂直狭槽出口适合于技术性鱼道。若水位变动超过 1m，必须为鱼道在不同标高修建几个出口，让鱼道保持运行状态（图 3.12）。

对于某些类型的鱼道，机械调节径流量对于鱼道维持运行可能是必需的。出口（即进水口）处孔口的简单控制可能是合适的。若上游水位变动较大时，可能需要有控制系统或栅栏装置的较复杂结构。遗憾的是，或因这类装置易于出故障，或因工作人员可能对控制系统操作不当，皆可能引起鱼道效率下降。

在鱼道出口区必须避免强湍流和超过 2.0m/s 的流速，以便鱼更容易离开鱼道游向上游水。而且，借助抛石斜坡将鱼道出口和自然底床或河岸底质连接，便于洄游的底栖生物从鱼道进入上游水。应该用浮梁保护鱼道进水口，避免碎屑落入。

接近鱼道出口可设置一个控制装置来监测其效率。这些可能是一个笼子和一个相邻的提升机构。为便于检修也可关掉通过鱼道的水流。

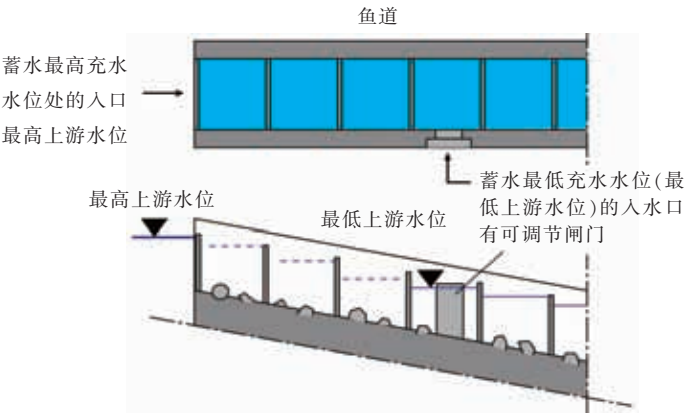


图 3.12 在蓄水侧面，几个不同标高的入水口保证鱼甚至在上游水位变动（较低的）时能离开鱼道

3.4 鱼道中的流量和水流状况

为保证鱼道内的最佳水力条件所要求的流量，一般低于形成吸引流所需要的流量。然而，必须使可使用的总流量通过鱼道，让迁徙动物尤其在低水期能够无障碍通过。这对于不是用于水力发电的坝尤其重要。如果用来供给鱼道的水多于现有的或设计中的鱼道类型水力上正常运行所需要的量，则应考虑其他替代的结构类型，例如，建造一个尽可能宽的石坡。在一些情况下，例如在洪水期，为了能有效运行，需要改造鱼道出口区的结构，限制通过鱼道的流量。

对于不是来自鱼道所在河流的补充水，如分水或污水处理厂排出的水，应避免采用。不同理化性质的水体的混合扰乱了鱼类嗅觉的敏感定向能力，从而降低其继续洄游的强烈愿望。

通过鱼道的水流的湍流度应尽可能低，以便所有水生生物都能依靠其游泳能力独立地洄游通过鱼道。拉瑞尼尔（1992b）建议，水池式鱼道的每个水池容积能量散逸不应超过每立方米水池容积 150~200W。

一般，鱼道中的流速在任何窄点如在孔口或狭槽中都不应超过 2.0m/s，对流速的这一限制应由鱼道的恰当设计来保证。然而，鱼道中的平均流速必须显著低于该值。鱼道应安装有形成足够休息区的结构，让游泳能力弱的鱼在其溯河洄游期间能够休息。而且如果鱼道底凹凸不平，可以降低底附近的流速。通常，应该有亚临界流通过鱼道，因为仅在局部特殊条件下，如在蛮石槛上，超临界流才是可接受的。

3.5 长度、坡度、休息池

鱼道正确尺寸的说明应包括关于坡度、宽度、长度和水深及孔口和休息池的尺寸这类特征的信息。这些说明主要取决于待建造鱼道的特殊类型及可用流量。类型特异的说明可在本指南涉及不同类型鱼道的相关章节中找到。本指南中给出的所有说明都是最低要求。

存在或可预期存在的最大鱼类种类的体长（根据可能自然鱼类区系的概念）是确定鱼道尺寸时需要考虑的一个重要依据。在收集关于鱼类的可能尺寸的信息时，必须考虑鱼类能终生生长这一事

实。表 3.1 显示的体长是平均尺寸，未提供最大尺寸，如可生长至 6.0m 的鲟的尺寸。

表 3.1 若干较大鱼类种类成鱼的平均体长

	鱼类种类	体长 (m)
鲟	<i>Acipenser sturio</i>	3.0
欧鲇	<i>Silurus glantis</i>	2.0
白斑狗鱼	<i>Esox lucius</i>	1.2
鲑	<i>Salmo salar</i>	1.2
多瑙哲罗鱼	<i>Hucho hucho</i>	1.2
海七鳃鳗	<i>Petromyzon marinus</i>	0.8
海鳟	<i>Salmo trutta f. trutta</i>	0.8
西鲱	<i>Alosa alosa</i>	0.8
鲃	<i>Barbus barbus</i>	0.8
湖鳟	<i>Salmo trutta f. lacustris</i>	0.8
欧鳊	<i>Abramis brama</i>	0.7
圆腹雅罗鱼	<i>Leuciscus idus</i>	0.7
鲤	<i>Cyprinus carpio</i>	0.7
圆鳍雅罗鱼	<i>Leuciscus cephalus</i>	0.6
茴鱼	<i>Thymallus thymallus</i>	0.5
芬塔西鲱	<i>Alosa fattax</i>	0.4
河七鳃鳗	<i>Lampetra fuviatilis</i>	0.4
鳟	<i>Salmo trutta fario</i>	0.4

在确定鱼道尺寸时，必须考虑河流中预计存在的最大鱼类种类平均体长及允许水位差（参数看第 4.5 章）。由于在孔口和隔板处，0.2m 的水位差造成的最大流速是 2.0m/s，因此建议鱼道中水池间水位差亦应低于 0.2m（图 5.4）。这个水位差引起的靠近粗糙底部处的流速，可以保证游泳能力弱的鱼通过。基本上必须避免可形成含气射流的水跌。

对于技术性鱼道构造，最大允许坡度范围为 1：5 至 1：10，视所选择的施工原则而定，而贴近自然的构造最大坡度应低于 1：15，与急流的自然形态相符（参看第 4 章）。然而，外观自然的鱼道与其河流的自然坡度不相符是可以接受的。

在确定鱼道的长度时，必须考虑可能自然鱼类区系种类的游泳能力及其所有生活期。然而，这里未列出鱼类的游泳速度，因为不同研究中测定的值相互差异显著，甚至是矛盾的（JENS，1982；STAHLBERG 和 PECKMANN1986；PAVLOV，1989；GEITNER 和 DREWES，1990）。总之，在确定鱼道的尺寸时必须考虑最弱的种类或最弱的生活阶段的要求。

鱼道中必须设置有休息区或休息池，鱼可在这里中断其上溯并得以恢复。在若干类型的鱼道，如狭槽鱼道或水池式鱼道中，休息区是设计本来就有的。在其他类型鱼道中，例如石坡这类设计上没有休息区的鱼道，可在其间插入湍流强度弱的休息池（图 3.13）。休息池的尺寸应使水池的容积耗散功率不超过 50W/m³。一般得不到关于鱼道最大允许长度的有效数据。然而，对于没有休息区和过长、鱼一次努力通不过的鱼道，建议以水池间不超过 2.0m 的水位差确定的长度间隔来设置休息池。丹尼尔通道必须由对

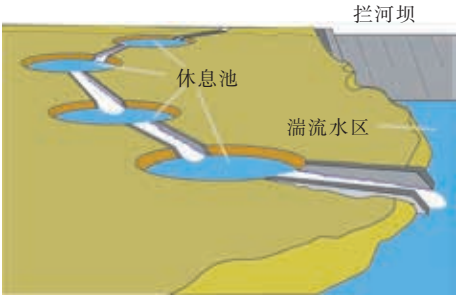


图 3.13 具休息池的技术性鱼道，以弯曲形状绕过障碍物（据 Tent 修改，1987）

鲑科鱼类至少每隔 10m、对鲤科鱼类至少每隔 6~8m 一段直线距离后的休息池来中断。

3.6 鱼道底部设计

鱼道底应沿其全长覆盖一层至少 0.2m 厚的粗底质（图 3.14）。理论上，粗底质的组成应和该河流底质相近。从水利工程学的观点看，粗底质对于抗侵蚀底的形成是必不可少的。然而，用于这一目的底料应尽可能接近自然，并且由于粒径不同，应形成各种不同大小的缝隙。小鱼、幼鱼、尤其是底栖无脊椎动物可以进入水流较为静稳的这种间隙躲避起来，然后可上溯，几乎完全受到保护，免被水流冲下。在贴近自然类型的鱼道中，粗糙底的形成较不困难。



图 3.14 狭槽鱼道中的粗糙底质，下施普雷瓦尔德地区的下普赫尔河堰（勃兰登堡）

粗糙底部应是连续的，直至包括鱼道出口区，以及在狭槽和孔口处。在一些技术类型较强的构造如丹尼尔鱼道中，不可能形成粗糙底。这就是说，底栖无脊椎动物不可能通过丹尼尔通道，于是对鱼道的基本生态要求，这些构造有一项未达到。

3.7 运行时间

全年的不同时间都发生土著鱼类的洄游。鲤科鱼类的许多种类主要在春、夏季洄游，而鲑科鱼类种类的产卵洄游主要发生在秋、冬季。底栖无脊椎动物的洄游性运动大概在整个营养期都发生。一天之中水生生物在河流中运动的时间，对于不同的类群也是不同的。因此，众多的底栖无脊椎动物主要在黎明、黄昏和夜间活动，而不同种类鱼最佳活动时间差异很大，而且可能事实上甚至在一年之中改变（MÜLLER, 1968）。由于洄游时机选择的这一变异性，鱼道必须全年运行。仅在极低和极高水期间才能容许限时运行（即一年中 30 天水位最低和 30 天水位最高的时期），因为在这样的时间鱼通常显示洄游活动减少。

必须保证 24 小时连续运行，因为，如果仅定期运行，一旦很少移动的无脊椎动物进入鱼道，即使鱼道仅是短期干燥，它们也不可能逃避，并不可避免地死亡。

3.8 维修

从开始规划鱼道起就必须考虑对定期维修的需要，因为维修不良是鱼道功能故障的主要原因。鱼道出口（即入水口）和孔口的阻塞、鱼道结构的损坏或流量控制装置出故障并非罕见，但通过定期维修是可以克服的。鱼道必须使人员可以无障碍且安全地接近，以便能保证维修。贴近自然类型

的构造如石坡比高技术结构易于维修，因为碎屑很少完全堵塞入水口区或蛮石栅栏，并不至于立即停止运行。因此高技术结构需要更频繁的维修。可根据对特定类型鱼道的操作经验及该鱼道出故障的频率拟定并调整维修时间表。无论如何，洪水后务必进行维修。

3.9 避免干扰和保护鱼道的措施

渔业主管部门应在鱼道上下建立禁捕区，以保护洄游鱼类免受干扰。这类章程是可根据装配鱼道的行政管理机构的渔业法制定的。游泳和划船之类的休闲活动也必须远离鱼道的最近邻区。仅在特殊和有充分理由的情况下，方可接近划船道、船失事处或船闸处修建鱼道。而且，出入鱼道应限于维修工人、操作人员和进行科学研究的科学家。

例如在观察洄游的监测站中，在鱼道中修建观察窗时，应使用单向玻璃并弄暗观察室。如要深挖水道，加高坝高，或建造水电站，改变拦河坝或附近任何一段水域，鱼道的运行都不应受到负面影响。

3.10 融入周围的景观

应尽一切努力使鱼道尽可能协调地融入周围景观，尽管鱼道的正确运行必须优先于环境美化。在这一方面，尤其是贴近自然类型的鱼道能将功能和环境美化最佳地连接起来，对于作为喜流生物的替代性群落生境亦可能起重要作用。

理所当然，在建造鱼道时应使用具有当地条件特征的天然建筑材料或结构材料。使用的木料不应经过化学处理。应让草木尽可能自然繁殖，形成洄游鱼类的可能隐蔽处并为鱼道遮阴。不过刚开始可能要种植适应环境的当地植物和灌木，使植物开始繁衍。

4. 贴近自然型鱼道

贴近自然型态建筑的槛和鱼道，如石坡，利用底坡尽可能逼真地模仿坡度变化丰富的天然河流急流或溪流（图 4.1）。而且，所选建筑材料与自然条件下的河流也应一致。

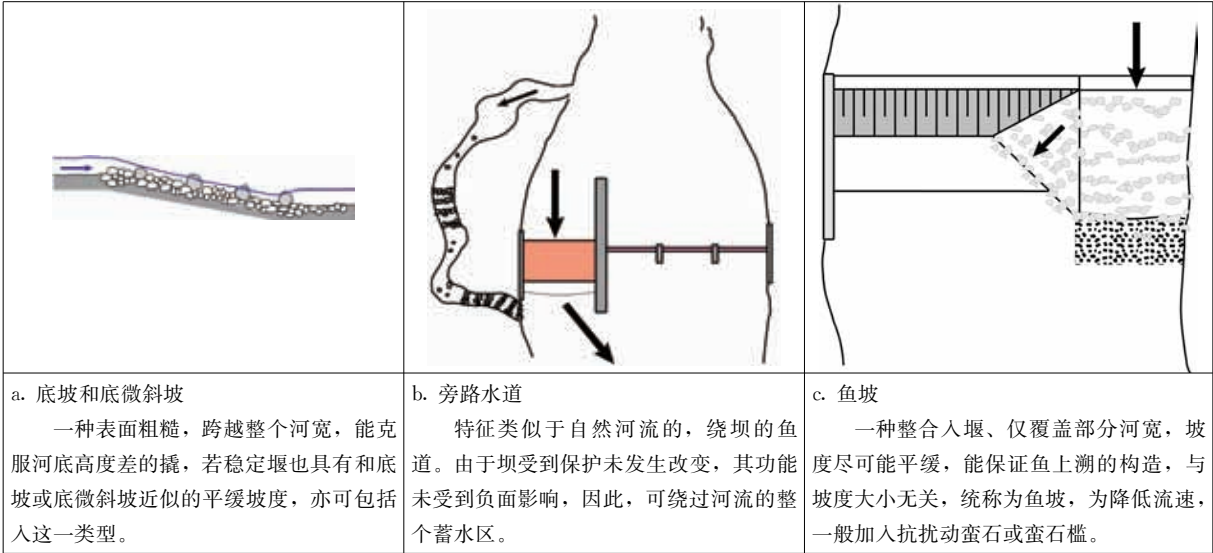


图 4.1 三类外观自然的鱼道

下述设施通常是地点特异的，因而不能普遍适用。然而，就河流的连通性而论，它们比第 5 章中所描述的技术性设施更能满足生物学要求。而且贴近自然的设施在令人愉快地融入周围景色的同时，在水流中能产生新的流水生物群落。

对于本指南来说，下列建筑物被定义为贴近自然型鱼道（图 4.1）。

- 底斜坡和底微斜坡。
- 旁路水道。
- 鱼坡。

各类贴近自然的设施其设计都有相似之处，而且存在混合形式。例如，采用蛮石槛或单个蛮石提高底质的粗糙度，可阶梯式建造底微斜坡、鱼坡和旁路水道。节 4.4 将以简明扼要的形式处理与贴近自然设施水力学有关的水力计算。

4.1 底斜坡和底微斜坡

4.1.1 原理

底斜坡或底微斜坡是通过使坡的水力梯度尽可能平缓，在一定距离内均分水头（即坝上蓄水面和下游水面间的水位差）的一种装置。

最初构筑底斜坡和底微斜坡是为了使河流底床稳定。之所以将它们同鱼道一并在这里介绍，主要是因为倾斜平缓的石斜坡或微坡度石斜坡，其结构多样，是恢复河流连续统一体的最有利的手段，它们最好地模仿了结构多样性和梯度自然丰富河段的状况（图 4.2）。

要符合河流中纵向连通性的要求，通常必须改造传统槛的结构，才可以让鱼通过。光滑混凝土底斜坡和陡跌是不适合的，它们不可能让鱼溯河洄游，本指南不予涉及。

根据第 4047 号德国工业标准第 5 部分，底斜坡和底微斜坡间的区分是仅依据坡斜度。坡度为 1:3 至 1:10 的人工结构被定义为“斜坡”，而 1:20 至 1:30 更平缓坡度的人工结构被称为“底



图 4.2 一个特征贴近自然，坡度富于变化的河段，为外观自然底槛的设计提供了一个模式。这种河段的特征是，坡度不规则，通常被分成阶梯。蛮石槛上的低跌水后是鱼找到隐蔽处并能存活数个低水期的水池

微斜坡”，坡度为 1 : 15 或更为平缓的构造在本指南中被归类为底微斜坡。

底斜坡和底微斜坡作为河流中垂直跌水或非常陡斜坡跌水的替代物是非常有用的，如果不再需要流量控制系统，它们可作为可调节堰的替代物，在这种情况下，它们是作为保持上游水位的保护结构或保护槛而运行的。从一般的生态学观点来看，这一方法有一个重要优点，即由于堰的上游蓄水区中长期淤积，甚至将在该区域恢复自然流动条件。

4.1.2 设计与尺寸

4.1.2.1 构造样式

底斜坡和底微斜坡构造（图 4.3）可分类如下：

- 蛮石固定式或嵌入式构造（以表面平整、排列有序的建筑样式修建的传统斜坡）
- 填石构造（松散岩石构造）
- 分散或阶梯式构造（嵌入式岩槛构造）

应仅在水应力非常大的地方采用坡度为 1 : 8 至 1 : 10 和其上流速相应高的传统蛮石斜坡，从生态学的观点看，宁可选择松散填石构造，尤其是岩槛构造。

蛮石嵌入式构造（图 4.3.a）一般限于坡度接近 1 : 10 的斜坡。将大小为 0.6~1.2m 并通常相互连接各个蛮石竖放。该结构一般坐落在基层上，而基层则是由一层碎石或一个多级砾石基层构成，视岩石露出层而定。根据一般的基层设计规则确定基层厚度和宽度。这种斜坡的最上游和最下游的蛮石通常用板桩墙、数排桩或钢制固定构件（夯入式铁轨、钢梁或诸如此类）固定在应有的位置。

下游河床的稳定区相当短，仅长 3~5m。然而，若下游河床有侵蚀的危险，需要进一步进行固定。这些通常采取填石的形式，施工通常要求干挖。这样形成的结构比较坚固，且由于蛮石的砌合和加固效应，能经受非常大的水应力。

从生态学观点看，填石构造（图 4.4）可能被认为比蛮石嵌入式构造更令人满意。其主体是由多层填石构成的，主体的厚度是使用最大石头的最大直径的至少 2 倍。加入专用大蛮石可增加粗糙度。采用岩槛的阶梯式构造也是可以的，其主要目的是在低水情况下仍保证有足够的水深，并增加结构多样性。填石亦可用数排木桩或型钢钢筋组成的构件固定。若原有的天然河床本身便具有抗侵蚀的特性，在过渡到下游水时不需要进一步稳定。在这种情况下，用恒定坡度将填石延伸至下游河

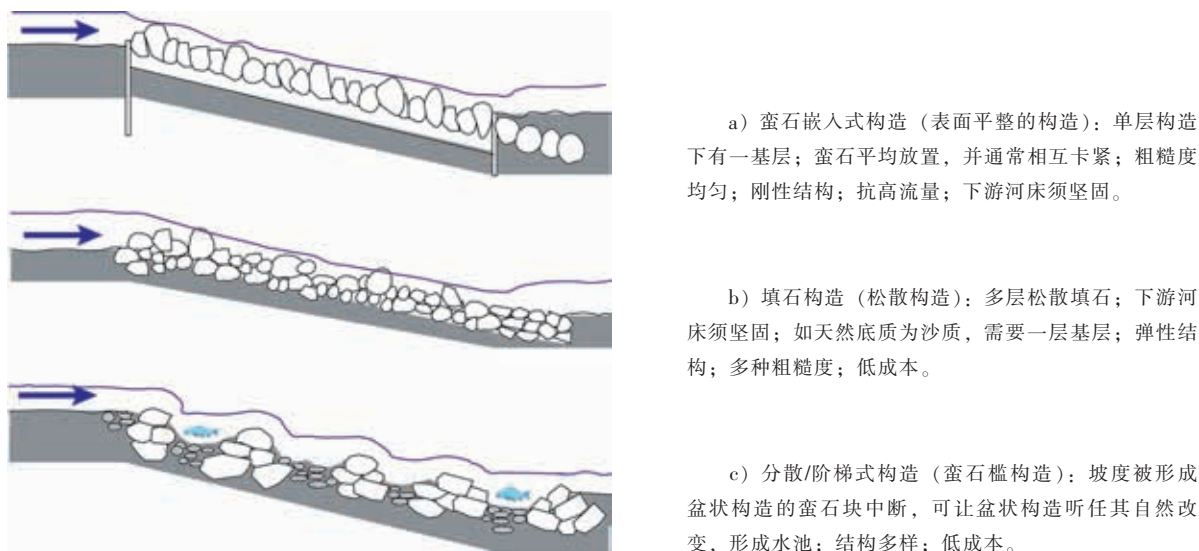


图 4.3 底斜坡和底微斜坡的构造（据 GeblerR 修改，1991）

底高度以下，并使下游加固区短，即仅约 3~5m。如图 4.4 所示，在底质不抗侵蚀或为沙质或粉土的低位区，应在结构下游形成有槽形底水池的无间断过渡区，并相应延长固定底的下游邻近区。

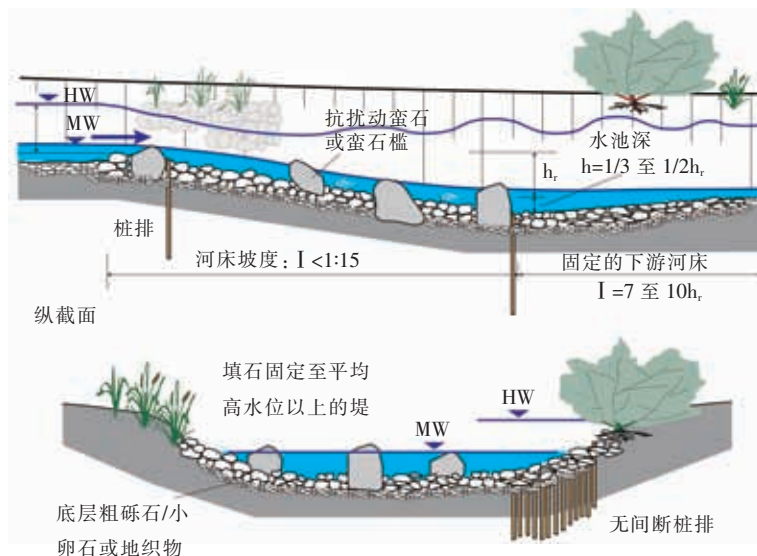


图 4.4 底微斜坡为填石构造（据 Gebler 修改，1990）

沿斜坡至下游加固区两边的堤，也必须用达到平均高吃水线以上的填石固定。在堤上种植适当草木，增加其对侵蚀的抵抗，并在洪水期间使主流轴在河心。

修建松散填石坡的工作，可在不截流的状态下进行。然而，与蛮石构造相比若斜坡的总长愈长，则愈抵消了成本的任何节省。

河流动物区系的所有成员都能通过填石斜坡。

嵌入式岩槛构造（阶形水池或分散/阶流式斜坡）（图 4.5）主要由许多蛮石块构成，而蛮石块则由直径为 $d=0.6\sim1.2\text{m}$ 的大蛮石或江蛮石组成。为了提高稳定性，蛮石块可呈拱形排列（顶视图），以便蛮石相互依靠，固定就位。同在山中溪流的情形一样，在抗侵蚀的石底或粗砾石底的情况下，蛮石块嵌入深达 2.5m（亦参看图 4.3c），并用数排桩或钢构件固定。在另一种情形中，基层用填石建造，蛮石块砌入河底。在这类情况下，毋须蛮石块嵌入如此之深。其结果是一个与图 4.4 所示相近的构造。填石构造附加岩槛形成一种差异模糊的过渡式结构。

蛮石块形成填充有砾石和大卵石的盆状构造，并可听任其自然改变，甚至低区域中河流特有的沙底质通常留在盆状构造中。虽然高流量时可除去沙底质，但如再次降低流速，沙底质很快

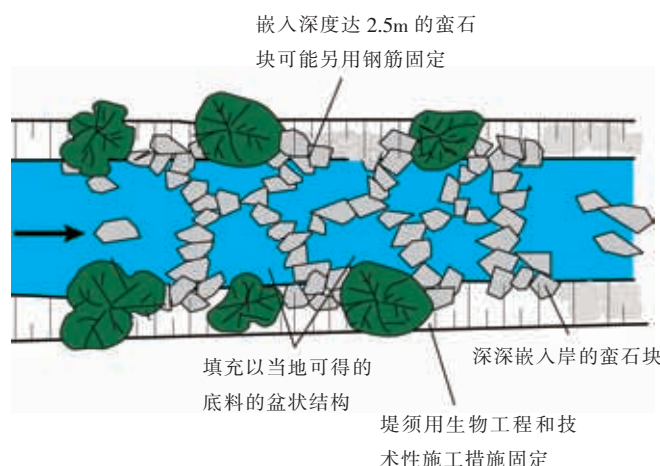


图 4.5 蛮石块构造式的槛（平面图）

重新累积。

应确保不超过 $\Delta h=0.2\text{m}$ 的水位差来选择块间距和蛮石排列。

应当强调的是，嵌入式岩槛构造的结构多样性有时高得几乎认不出坡是人工结构。这类斜坡的设计和施工比其他贴近自然鱼道类型要求更多的经验。

河流动物（区系）可不受限制地在两个方向通过砌成蛮石块构造的底微斜坡。

4.1.2.2 平面图

在底宽 $b_{\text{bot}} > 15\text{m}$ 的大河中，底斜坡用图 4.6 所示的空间曲率建造。斜坡顶外形横截面矢高 $0.3 \sim 0.6\text{m}$ 。底宽小于 15m 的河流中的斜坡一般没有任何空间曲率，而是建造直线顶。结构下游面的固床区能保护该结构抗逆行侵蚀，应安装低水水道，保护斜坡在低流量期间不干涸，或水深不至于太浅。

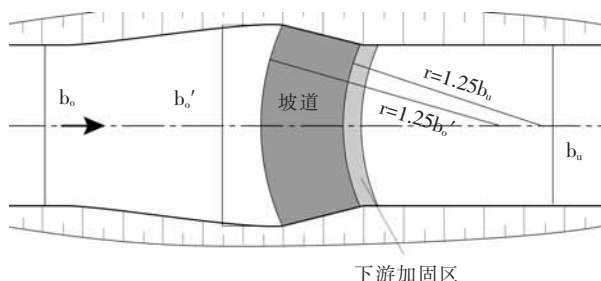


图 4.6 曲面底斜坡平面图（依 Schaubberger, 1975）

4.1.2.3 纵截面

一般，用 $1:8$ 至 $1:10$ 的坡度设计建造蛮石构造的底斜坡（构造表面平整）。用 $1:15$ 至 $1:30$ 较平缓的坡度设计砌成填石构造和嵌入式构造。

蛮石斜坡坡度为 $1:10$ 时出现的流速对于许多鱼类种类和底栖种类是过高了。采取朝河岸升高的外形，在边缘区域产生较平静的流动区，可改善这一状况。

甚至在低流量时，平均水深不应少于 $h=0.3 \sim 0.4\text{m}$ 。形成休息池的大蛮石和相当深的盆状结构使鱼上溯较为容易，并产生一种非常多变的、而且也在视觉上有吸引力的流态。嵌入式构造可以最好地达到这些标准。

鱼道中最大许可流速为 $v_{\text{max}}=2.0\text{m/s}$ 。

4.1.3 跌水的重新造型

通常，可用较少的成本即可将水生动物（区系）不可逾越的陡跌水改造成底微斜坡。在小跌水的情况下（图 4.7），所需一切只是将蛮石块嵌入倾角较小的抛石坡。这样的石坡坡度应约为 $1:20$ 。跌水的边缘应是削平的，或用石头覆盖，确保底质的连续性。

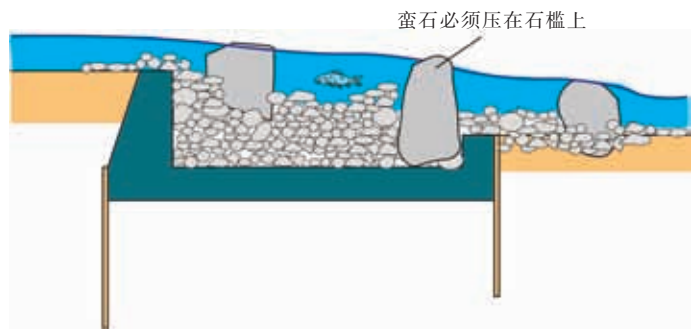


图 4.7 人工跌水改建成底凹凸不平的微斜坡

4.1.4 可调节堰改造成分散式或阶流式斜坡

如果水管理条件允许，宁可将堰改造成一个分散式或阶流式斜坡，而非建造一条单独的鱼道。

一个分散式或阶流式斜坡可保持上游水位，并避免河边低地地下水位任何非所要求的下降。然而，水位不再是可调节的了，也不再能在洪水期通过降低堰来提高流量横截面了，因此，水位在流量大时会升高，加宽斜坡顶可改善槛的运转性能。如果低地农业利用强度是已经降低了，或如果其他用途如水力发电或航运是已经放弃了，用分散式或阶流式斜坡替代堰是非常适合的。

这一方法的一个优点是，允许槛上游蓄水区淤积并能中长期重新建立自由流动条件。无论如何，要永远研究确定是否需要保持地下水位，或当地条件是否允许降低地下水位，与保有较小的蓄水区。

斜坡结构应尽可能采取简单填石的形式，顶层亦能加入大蛮石或蛮石槛（图 4.8）。经由河川的冲洗作用，换言之，沙与砾石的连续重造过程，可让岩间间隙陆续被填满，从而减少低流量时水损失并防止斜坡干涸。沙质/黏土质材料的初始浇灌证明作为封闭层有效。槛顶和与下游河床的连接都可用排桩固定。

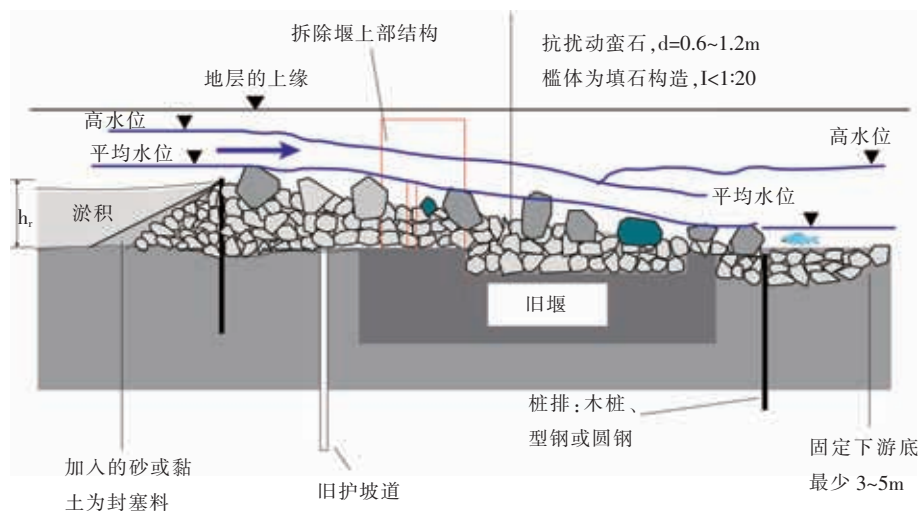


图 4.8 可调节堰改建成保护槛

可调节堰的上层结构（流量调节元件）必须拆除，下部结构（消力池）必须填盖。

4.1.5 综合评价

从生态学观点看，建造低倾角粗糙底斜坡是在不可能完全拆除障碍物的河流中恢复鱼类通道的最佳方法。宁可采用松散构造（填石）和岩槛构造，而不采用较传统的蛮石斜坡。混凝土的使用应限制在最少量。

填石或底槛亦可用来改造河流中的跌水及可调节堰。

底斜坡所需的维修成本较低，可能限于偶尔除去浮渣和废物，以及对可能的损坏尤其在洪水泛滥后定期检查。

整个水生动物区系可溯河和降河两个方向自由通过这些构造。

4.1.6 实例

大魏尔底斜坡	
河流详情	底斜坡详情
河流：洛伊萨赫河，巴伐利亚州 流量：平均低水流量=8.68m³/s 平均流量=23.1m³/s 高水流量 ₁₀₀ =400m³/s 负责单位：魏尔海姆水管理局	构造：蛮石嵌入式构造 宽度：b=72m 水头差：h=2.7m 坡度：1：10，边缘区 1：15 建造年份：1973/1974
结构设计： 该建筑物呈粗糙蛮石斜坡状（蛮石重 3~5t），表面平整，排列有序，上、下游各有一道板桩墙，结构下游面的固床区短。由于建造时对于鱼能否上溯这类斜坡的经验甚少，在靠船滑道旁的斜坡右边三分之一处加入一个 4m 宽的鱼道，该鱼道用不同高度的蛮石建造，形成水池。 该斜坡朝左岸方向变得非常浅，这导致这一边缘区中水深与流速皆较低的多样流态。这使游泳能力弱的鱼也能上溯。相反，由于在几乎无吸引流的鱼道入口处有高湍流条件，鱼很难找到实际鱼道。因此水浅的边缘区有效得多，完全足以准许鱼通过。根据这里收集的正面经验，魏尔海姆水管理局（WWA）在其管辖区建造了无单独鱼道的其他底斜坡，运行效果极好。 这条河流的渔业承租人可以观察到该河流鱼类群体的良性发展。	
	
图 4.9 大魏尔/洛伊萨赫底斜坡（下游视图）。较浅边缘区中降低了的流速和流态的多样分化，提供底栖动物区系和鱼类种类中的弱游泳者皆能够通过斜坡的可能性，以致不需要其他改善设施（即单独的鱼道）	

比绍夫斯韦达保护槛	
河流详情	保护槛详情
河流：多林溪，勃兰登堡 流量：平均低水流量=0.44m³/s 平均流量=0.9m³/s 高水流量 ₂₅ =51m³/s 槛高：h=1.0m 负责单位：勃兰登堡 LUA	构造：填石槛 宽度：b=4.0~6.0m 坡度：I=1:20 长度：I=20m 水深：平均流量时 h=0.3~0.6m 最大流速：v _{max} =1.3~2.2m/s 建造年份：1992
构造描述： 这一保护槛取代了木板隔墙（养殖堰），是作为填石坡建造的。坡体由江蛮石（直径=25cm）构成，并用开始施工时浇注的黏质沙填实。大蛮石（直径=50~100cm）降低流速并在鱼上溯时提供隐蔽处。溯河洄游监测证实，该斜坡是能够通过的。多林溪斜坡上游那些水生动物资源曾经枯竭的区段，由于从哈弗尔河迁入，现在形成了种类丰富的、密度很大的鱼类群落。	
	
图 4.10 改建前的木板隔墙——水生动物不可逾越的一个障碍	
	
图 4.11 改建后的比绍夫斯韦达保护槛	

马克斯勒磨坊底槛	
河流详情	底斜坡详情
河流：芒法尔河，巴伐利亚州 流量：平均低水流量=1.16m³/s 平均流量=4.83m³/s 高水流量 ₁₀₀ =270m³/s 负责单位：巴伐利亚自治州罗森海姆水管理局	构造：岩槛构造 宽度：b=约 15m 阶高：h =1.7m 坡度：I=1：26 建造年份：1989

构造描述：

许多水生动物区系无法通过有陡跌水的建筑物，在芒法尔河恢复区段，在马克斯勒磨坊旁（韦亚恩公路附近）被贴近自然构造的底坡取代。

下图示斜坡系岩槛构造类型，坡体由嵌入深度为 2.5~3m 的各横槛组成。横槛呈曲面，且不重合，它们相互依靠。由此形成的盆状构造填充以当地的底料，并听任其自然改变（形成水池、淤积）。采用这一方式设计的底斜坡非常好地融入河流景色，几乎认不出是人工构造。这类人工构造整个水生动物区系都可通过。

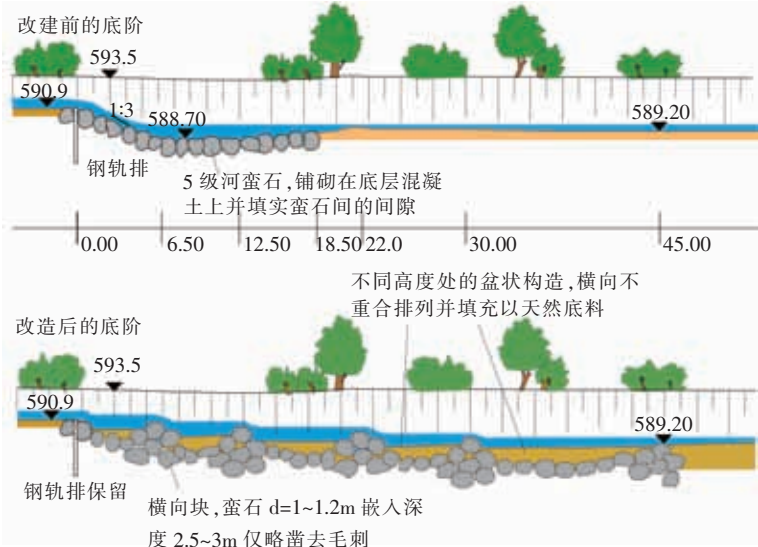


图 4.12 芒法尔河中一个底阶的纵截面，蛮石块构造（示意图）



图 4.13 芒法尔河中的底阶。本例中所采用的岩槛构造产生可观的结构多样性。为了恢复洄游，应认为，改造河底中宽度与整个河宽相同的跌水是最佳解决办法，胜过任何单独的鱼梯

米伦哈根底槛	
河流详情	底斜坡详情
河流：米伦哈根附近的戈尔德巴赫/梅克伦堡/西波美拉尼亚地区 流量：平均流量=0.38m ³ /s 已知最高流量=2.8m ³ /s 高度：h _{tot} =1.70 m	构造：填石构造 宽度：b=3.4m 坡度：I=1：20 长度：l=38m 建造年份：1992 负责单位：旧特雷普托区
柳枝层基础用束柴和石筐固定 戈尔德巴赫 底宽:b=3.4m I=1:20,h=1.7m 17个蛮石槛 拆除堰上层结构并填满渠使之地层平 戈尔德巴赫 沙洲 地织物上有双层填石 图 4.14 显示米伦哈根/戈尔德巴赫底斜坡位置的平面图  图 4.15 米伦哈根/戈尔德巴赫底斜坡 被废弃的磨坊堰不再存在使用权。加了旁路的磨坊塘虽已淤积，但仍是一个值得保护的水生群落生境。仅拆除堰设施会导致底床受到相当大的侵蚀和上游区地下水位下降。为了恢复过去数个世纪的实际上游水位，因而用坡度很小的粗糙底微斜坡取代了该堰。斜坡总高 1.7m，坡度 1：20。蛮石块形成阶流式盆状构造，将流速控制在允许范围内。池中水深 30~40cm。水道横截面用一层石头固定，石头下有一地织物基础。采用直径 40~50cm 蛮石形成岩槛结构。	

4.2 旁路水道

4.2.1 原理

术语“旁路水道”用于描述绕过一个障碍物、并模仿自然河流外观、呈现自然水道形式的鱼道。旁路水道的长度可能相当长。旁路水道尤其适合于需要放置鱼道以恢复鱼类洄游的已存在坝的改型，因为一般这不要求改变坝本身结构。

通常，通过旁路水道仅分流一部分流量。然而，在较小河流上被废弃的养殖堰、保护槛或坝设施的情况下，达到预定值（通常平均水位）的总流量是可以通过旁路水道传送的。坝本身仍有功能，但是仅用来排泄洪水。

旁路水道的主要缺点是，构造需要的表面面积相当大，因此，能否使用这类鱼道，在很大程度上取决于当地的特定条件。另一方面，这种水道长度延伸为融入周围景色的贴近自然构造提供了一个理想机会。

建造旁路水道不仅意味着为洄游鱼类提供了通道，而且意味着为喜流种类利用旁路水道作为生境创造了必要条件。在狭适、喜流的河流种类的生活和生殖条件受到负面影响的那些拦河筑坝的河流恢复过程中，这一方面更加需要密切关注。

而且，旁路水道保持和恢复河流连续统一体，因为它们提供的流动条件类似于未受干扰河流的流动条件，从而允许迁徙动物绕过整个蓄水区域，有时上溯达到回水的边界线，同时亦无非生物性之边界条件的任何突然改变。

4.2.2 设计与尺寸

在设计旁路水道时必须运用“贴近自然”河流恢复的原理（DVWK, LANGE 与 LECHER, 1993）。然而，由于坡度较陡，通常需要稳定河底和两岸，并采取措施降低流速。

一个坡度变化丰富的自然溪流，如图 4.2 所示的溪流，可当作设计旁路水道的模型。如下给出的尺寸是最低适宜要求，可根据这一模型得出旁路水道的下列设计标准：

坡度：

$I=1:100$ 至最大 $1:20$ ，根据河流的性质；

底宽：

$b_{\text{bot}} > 0.80\text{m}$ ；

平均水深：

$h > 0.2\text{m}$ ；

平均流速：

$v_m = 0.4 \sim 0.6\text{m/s}$

（大多数地方的水深及平均流速视河流的大小与性质而定）；

最大流速：

$v_{\text{max}} = 1.6 \sim 2.0\text{m/s}$ ，限于局部；

底：

粗糙、无间断、缝隙式空间连通，如能够使用当地可得的天然底质，不进一步填封或另外固定底；

形状：

弯曲或笔直，可能是蜿蜒曲折的，有水池和急流；

横截面：

多变，两岸最好采用生物工程的方法来保护，大蛮石、蛮石槛中断微斜坡。

宽度有关的流量：

$q > 0.1\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$

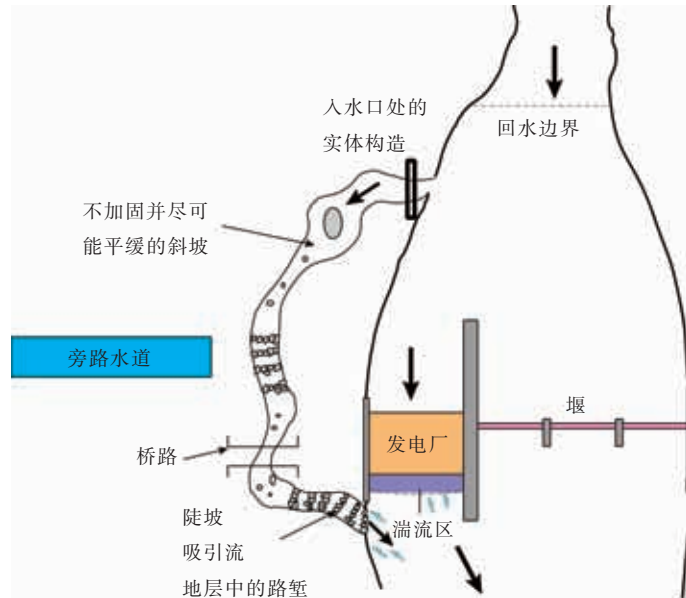


图 4.16 旁路水道。绕坝的旁路：普通结构实例

4.2.2.1 平面图

应根据当地的空间情形和地质及坡度特征选择所采取的形状。水道可以是笔直的，或弯弯曲曲的，或甚至弯弓形的。坝下旁路入口的定位受到那些适用于技术性鱼道的相同原理的支配。有时旁路水道必须折回 180°，确保将旁路鱼道的入口直接置于堰或涡轮机房下。由于若干旁路水道相当长，通常必须在上游相当远的地方设置进入上游水的出口。

旁路水道的一种特殊形式是一个接一个经过加宽的池塘状区段组成的所谓塘道。这些加宽了的池塘状区段，通过人工河中的跌水（蛮石槛）或通过短而陡的水道相互连接（JENS, 1982, JÄGER, 1994）。

旁路水道亦可与其他构造相结合，例如，可用技术性鱼道（水池、丹尼尔通道或垂直狭槽通道，参看第 5 章）克服水道中局部困难的区段，连接到下游尾水。

4.2.2.2 纵截面

旁路水道的坡度应尽可能平缓。坡度上限指导值为 $I_{\text{bot}} = 1 : 20$ ，加入岩槛可中断陡坡。流动较平静的区域，水池或水塘状加宽部分能使鱼上溯较为容易，尤其当它们在较长陡坡区段后，并亦充当庇护所时。

如果有足够的空间修建旁路水道，只应加入几个坡度较陡区段（图 4.16）。一个坡度较陡区段对于连接下游水、产生吸引流是有用的。其他区段则可建在那个特殊区域河流的自然坡度后，且毋需广泛加固。

临界水深必须依据可能自然鱼类区系及其游泳能力（取决于鱼区），但不应少于 $h = 0.2\text{m}$ 。

4.2.2.3 水道横截面

横截面宽度、水深及水流应尽可能多种多样。然而，底宽应不少于 0.80m，收窄和加宽水道都会对外观自然的构造产生影响。横截面的加固在一般情况下是必需的，在坡度特别陡的区段更不可缺少。在决定拟采取的加固类型时，应使用给出了贴近自然地形特征的河流恢复法指南。一般用粗砾石或大卵石置于基层或地织物之上以固定底床。由此形成的缝隙式空间也为底栖无脊椎动物（区系）的建群及洄游提供了相当大的可能性。而且，粗石留住较细小的泥沙颗粒，天然底质可在缝隙中累积。

最好采用混合建造法固定坡基和两岸，例如采用活的植物结合以岩石、束柴等等。图 4.18 显示了用束柴护坡板、固定块、柳枝层、矮林种植或采用柳条种植及其组合固结的若干例子。

如果固有底足以抗侵蚀，而且如果对邻近财产没有危险，可让旁路水道听任其自然改变，底毋需人工固定。



图 4.17 旁路水道使得采用贴近自然的构造及与水道所在地点很好地融合成为可能。
本例中，水道的线形是依原有植被而定的。拉普瑙磨坊（勃兰登堡）

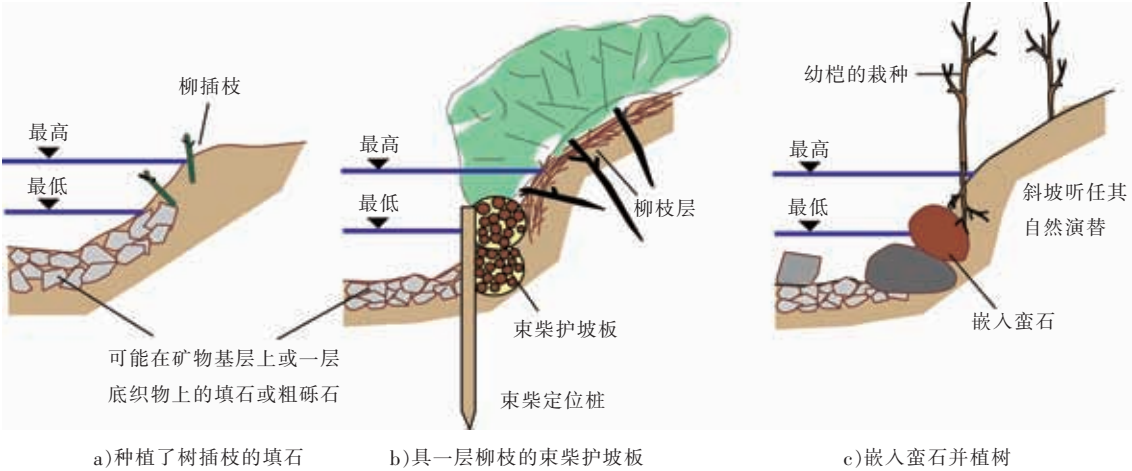


图 4.18 加固旁路水道的底和两岸的例子

植树或种植灌木略微给水道遮荫，鱼能躲藏并能找到隐蔽处，对鱼类洄游有有利影响。同时树或灌木令人愉快地融入周围的景色，且有助于岸坡稳定。

4.2.2.4 大蛮石和蛮石槛

对于 1:20 至 1:30 之间的微斜坡，如没有外加的控制结构，一般就不可能保持旁路水道中允许的 0.4~0.6m/s 的平均流速。大蛮石是这类外加结构的天然且视觉上最具吸引力的材料。

可采用下列方法：

- 在导致粗糙度增大、偏置、不规则排列中加入大蛮石，在中低流量期间，水环绕这种蛮石流动或仅在其上略微流过。蛮石还增加水深，降低流速。上溯鱼可在蛮石的间隙中寻找隐蔽处。在横截面变窄处可能发生流动状态的局部改变（图 4.19）。放置蛮石的指导值为： $a_x = a_y = 2 \sim 3$ 倍 d_s （关于 a_x 、 a_y 和 d_s 的定义，见图 4.19）。这些大蛮石间的净距离应至少为 0.3~0.4m，应将蛮石嵌入底达其深度的三分之一或二分之一。蛮石必须足够大，防止任何未经许可的移动，例如，小孩玩耍时的移动。

- 横向槛的加入能使流动横截面变窄，在水被挡住的横向槛间形成水池。横向槛由以不同深度

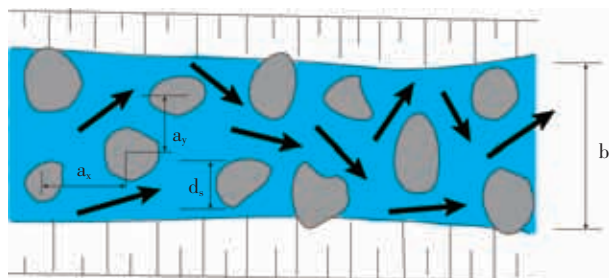


图 4.19 放置了抗扰动蛮石的旁路水道

嵌入被加固底的大蛮石形成。图 4.20 在原理上图解了这一方法。蛮石在这里呈块状交错排列，且必须是带有直角边的大岩石（方琢石）。

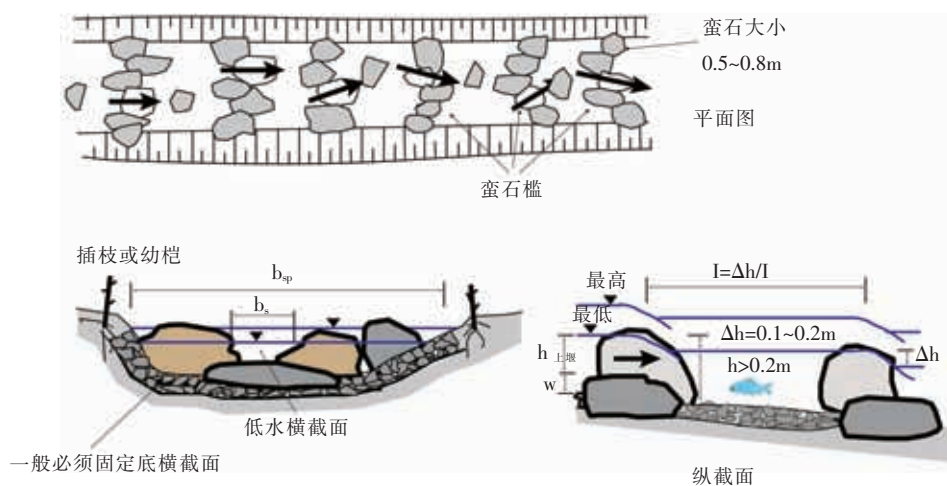


图 4.20 中断旁路水道的蛮石槛

● 可浸没蛮石槛的加入（阶流式布置）。这些槛，全部或仅部分浸没，是由底中嵌入的大蛮石形成的。由于拦截效应降低了水的流速，形成水深应在 $h=0.3\sim0.6m$ 之间（视水流的性质而定）的水池。槛间距（水池净长）不应小于 $1.5m$ ，由于底微斜坡，各个块彼此之间呈阶梯式，形成阶流式小瀑布（阶梯式水池型通道）。跌水在各槛的高度不应超过 $\Delta h_{max}=0.20m$ 。在河流区段，应采取 $\Delta h=0.10\sim0.15m$ 的较小跌水，允许施工偏差、碎屑的轻微堵塞等。槛间距的选择应当是不产生孤立的、自由的、溢流式射流，上一个槛永远处在下一个槛的回水区中。此外，在水池中亦可加入单个大蛮石（图 4.20）。槛间间隔和水深必须足以形成呈盆状构造中的休息区。因此，建议容积耗散功率在河流段应限制在 $E=150W/m^3$ ，在溪流段在 $E=200W/m^3$ （关于盆状构造中的能量转换亦见节 4.4）。这一构造类型甚至能够在盆状构造中保留细泥沙，形成类似于自然条件的底质条件。

4.2.2.5 旁路水道进水口区 and 出水口区的设计

尤其在上游水位波动的地方或两岸有洪水泛滥危险的地方，在旁路水道的进水口（即鱼道出口）处要求构造坚固和流量控制装置。用这一方法操作，可限制通过水道的流量，甚至可堵住水道进行维修。装配有尺寸适当控制装置的简单支撑混凝土墙或粗石墙能令人满意地形成这样一种机制。孔的高度必须确保鱼道甚至在低水时不干涸——旁路水道中必须避免的一种情况，因为它不仅阻止鱼上溯，而且对水道中的底栖动物（区系）带来负面影响。鱼道出口的设计时应兼顾可设置便于监测运行期间使用的鱼笼。

出水口（鱼道入口）的设计必须确保在所有运行的情况下有足够的吸引流，为达此目的，与下游水的连接必须尽可能陡，以便流速产生充分的引导效应。在下游水位波动处，流量横截面可由通过狭槽开口的一个坚固构造变窄（参看狭槽通道节 5.2），从而提高出水口处的流速。

如可能，应将鱼道底直接与河底连接。为了抵消在坝下通常发生的对河岸和河底增大的应力，

需要在出水口（鱼道入口）附近进行充分加固。旁路水道的第一区段（即刚好在鱼道入口后的区段）可能得采取技术性鱼道的形式，尤其在与水电站的大规模加固的尾水渠连接时，或尾水水位波动范围很大时。



图 4.21 拦水坝（竣工前不久）中旁路水道进水口处的控制装置。这一构造限制流入量，且在发生洪水时或对水道进行维修时可关闭。开口必须向下一直延伸到底部，且中断底质的连续性。位于金绍（巴伐利亚州）的莱希坝

4.2.2.6 跨接

旁路水道长意味着，为了交通和其他目的，通常需要某种形式的跨接。这类跨接的设计必须确保不对洄游产生新的障碍物，通常一个桥是最好的解决办法。桥下的一个（干）台坎便于其他动物（两栖类其他动物等）的迁移。

跨接的设计不得弄窄旁路水道的横截面。为了确保小鱼和底栖动物（区系）能够通过，桥下或隧道中也必须有粗糙、不间断底。如果不可能使用天然底质，一层厚 0.20~0.30m 的粗砾石或小卵石就够了。跨接的长度不应超过开口宽度的 10 倍。

4.2.3 综合评价

旁路水道的最重要优点如下：

- 它们令人愉快地融入周围景色。
- 它们可被小鱼和底栖无脊椎动物通过。
- 它们形成新的生境，尤其作为喜流种类的次要群落生境。
- 它们被堵塞的倾向减弱，从而操作上更可靠，维护成本减少。
- 它们通常弯了一个大弯才绕过一个障碍物，因而特别适合于没有鱼道的现有坝的改型，因为通常不要求对坝进行结构改造。

- 它们使洄游种类能够避开整个蓄水区，从坝脚到回水的边界线。

旁路水道亦有以下缺点：

- 需要的表面面积大。
- 水道很长。
- 对上游水位波动敏感，这可能需要在进水口（鱼道出口）处增加一个构造。
- 通常需以技术性鱼道连接尾水及旁路水道。
- 可能需要深挖周围地层。

4.2.4 实例

瓦勒尔贝凯溪旁路水道	
河流详情	旁路水道详情
河流：瓦勒尔贝凯溪，下萨克森州 功能：磨坊坝 流量：平均低水流量=0.35m³/s 平均流量=0.96m³/s 平均高水流量=8.14m³/s 降落高度：h _{tot} =2.9m	长度：I=130m 宽度：b _{bot} ：2.50m 坡度：I=1：45 流量：Q：0.25~0.50m³/s 水深：h=0.30~0.80m 流速：v _{max} =1.3~1.9m/s 建坝年份：1992 年 负责单位：Ochtumverband
	
图 4.22 瓦勒尔庄园（下萨克森州）附近的瓦勒尔贝凯溪中的旁路水道 虽然被废弃的磨房坝不再用于水力发电，但为了底床的稳定及保持地下水位，不得不保留它。供鱼塘用的水在磨房坝上游的一个位置被分流。流量之非供鱼塘所需部分则通过鱼道传送至一上限值为平均低水流量（平均低水位）。 虽然坡度相对平缓，但得加入结构构件来增加水深和降低流速，横撑由立着放并嵌入底槛的蛮石组成。由于蛮石高，即使流量相当高，蛮石对于正面影响水力学仍充分有效。两岸用覆盖一层植被的填石固定至平均水位以上。	

塞弗特氏磨坊旁路水道	
河流详情	旁路水道详情
河流：斯托贝尔·勃兰登堡 流量：平均低水流量=0.15m³/s 平均流量：0.37m³/s 平均高水流量：0.88m³/s 功能：磨坊坝 落差高度=3.30m	长度：I=120m 宽度：b _{bot} =2.4m 坡度：I=1：25 水深：h=0.20~0.50m 流速：v _{max} =1.8m/s 建造年份：1993 年



图 4.23 塞弗特氏磨房坝位置示意图。虽然以前的磨房坝不再用来发电，但磨房塘作为调节池及为了保护已兴盛的湿地群落生境必须予以保留，在磨房坝附近修建了一条长 120m、运送总流量达平均高水流量的旁路水道。总高度差为 3.3m 意味着，水道底必须用卵石槛分段加固。其他区段显示零坡度，没有加固。自然改变能形成水池、陡岸和淤积



图 4.24 塞弗特氏磨房旁的旁路水道。卵石槛的加固段和未加固段交替产生高度可变的流动状态。可让零坡度区听任其自然改变。照片前景显示倾斜岸切割，但这并未危害卵石槛的设置

金绍旁路水道	
河流详情	旁路水道详情
河流：莱希河，巴伐利亚州 流量：平均流量=85m ³ /s 高水流量 ₁₀₀ =1 400m ³ /s 用途：水力电力生产 落差高度：h _{tot} =6.5m 负责单位：巴伐利亚水力发电公司	长度：I≈800m 流量：Q=0.8m ³ /s 宽度：易变，b _{bot} =2.5~4.0m 坡度：易变，平均 I=1：100， 最大约 1：30 建造年份：1992 年

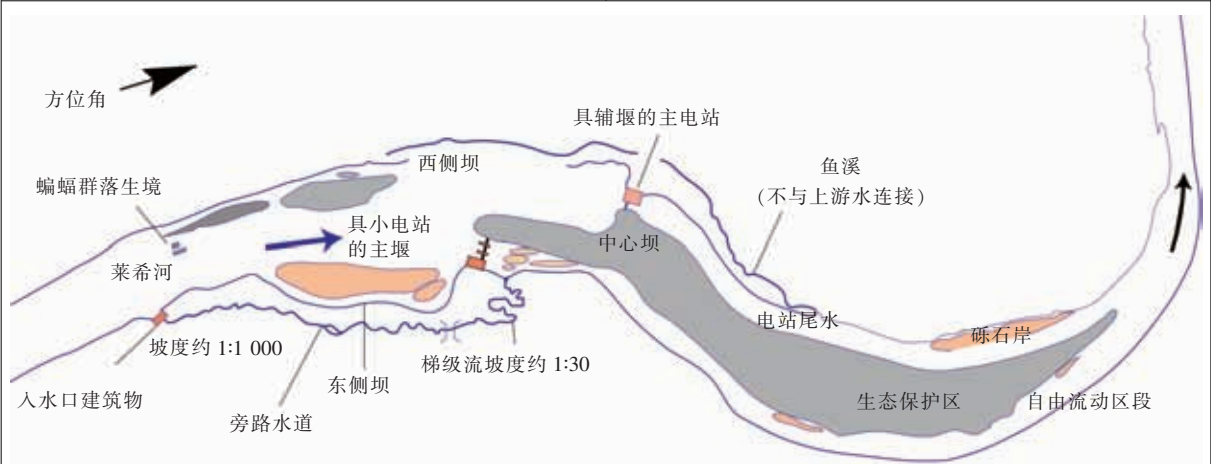


图 4. 25 金绍旁路水道位置示意图



图 4. 26 主堰下旁路水道与老河床连接。为了便于操作，使老河床的最低流量为 20m³/s。照片显示莱希坝旁路水道在金绍的上游段。这一区段施工坡度平缓，不加固水道横截面即可获得波状结构。在下游段克服最大高度差，下游段的构造呈阶流式，坡度为 I=1：20～1：30。流量由旁路水道的入口构造控制，该入口构造床具有保护旁路水道免于洪患之功能，主电站旁若再加设一鱼道则可大大改善这个堰附近的环境

4.3 鱼坡

只有在不需要控制水位并有足够流量的条件下，一个堰才能被改造成一个底坡或底微斜坡（参看第 4.1 节）。由于水力发电、防洪、农业或鱼类养殖场需要水，情况常常并非如此。在这样的情况下，可将一个宽度较小的粗糙底坡（所谓的鱼坡）整合入堰设施的一个区段，确保水生动物（区系）能够迁移（图 4.27）。鱼坡也适合于现有无鱼道堰的改型。

鱼坡设计模型也来源于自然。鱼坡设计的主要目的是，用类似于图 4.2 所示的坡度变化丰富的底坡模仿天然河流急流或溪流的结构变化。

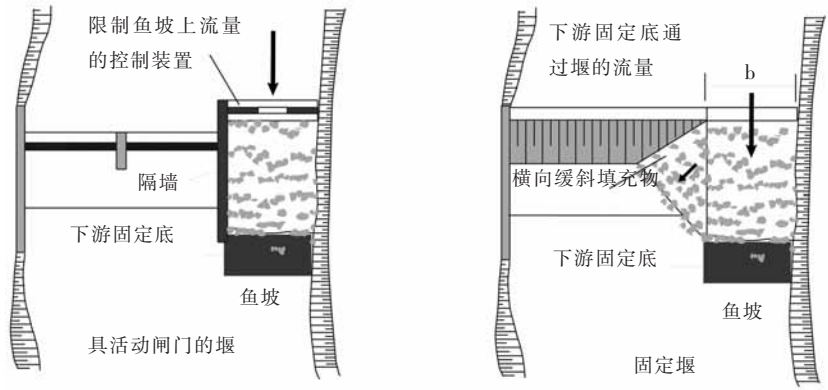


图 4.27 鱼坡在坝旁的定位

4.3.1 原理

鱼坡通常被直接整合于堰构造中，并尽可能集中低水位和平均水位时可得总流量（图 4.27）。例如，在旁路电站，可通过鱼坡传送生态基流，水仅在洪水期间溢出堰顶。

大蛮石或蛮石槛在鱼坡上排列形成阶梯，确保让鱼溯河洄游所要求的水深和流速。

鱼坡的宽度主要由鱼类溯河洄游时的流量来确定。流量很大时，如在涨水的情况下，可能降低鱼坡便于溯河洄游的效率。计算鱼坡的大小时，结构稳定性的计算方面，最重要的是考虑洪水的影响。

4.3.2 设计和尺寸

4.3.2.1 平面图

一般，鱼坡建在河岸旁，而且流量较大一边的河岸是最有利的。应选择上锐角在斜立于河中的潜堰旁建造鱼坡。通常可利用搬空的现有空水道或被废弃泄水道建造鱼坡。设置在坡度很陡固定堰旁的鱼坡、在有垂直跌水障碍物旁的鱼坡或安装有活动闸门的堰旁的鱼坡，通常靠堰的一侧需以承重墙（图 4.27 中的隔墙）分隔。亦参看图 4.28。缓斜堰旁的鱼坡可加上横向缓坡，防止形成死角（参看图 4.27）。

如果流量全部通过鱼坡，那么吸引流会是明显的，因此将鱼坡入口置于较下游处。鱼坡通常在堰顶接合上游水，而这有技术优势，例如，便于施工期间分水。上游进水口（即鱼道出口）的设计可能需要收窄横截面来限制通过鱼坡的流量，尤其在洪水期间。

鱼坡的宽度应视可使用的流量而定，但不应少于 $b=2.0\text{m}$ 。

4.3.2.2 纵截面

鱼坡设计的一般技术要求可规定如下：

- 平均水深： $h=30\sim40\text{cm}$ ；
- 坡度： $I<1:20\sim1:30$ ；
- 流速： $v_{\text{max}}=1.6\sim2.0\text{m/s}$ ；



图 4.28 本例中，鱼坡取代了左手堰槽，总流量达到平均流量，是通过鱼坡传送的，该鱼坡设计采用了抗扰动蛮石偏置的、粗糙水道形式。坡体是一个填石构造。石头砌的矮墙将鱼坡与无障碍堰区分开。克雷韦林堰，多林溪（勃兰登堡）



图 4.29 鱼坡在旁路电站主堰附近的位置。正常情况下，最低总流量通过鱼坡传送。水仅在流量较高时才溢出堰。齐格河（北莱茵-威斯特法伦州）上的艾托夫鱼坡

- 底质：多缝隙、与河床底连接粗糙、不间断；
- 隐蔽处、深区及休息池便于鱼类溯河洄游。

鱼坡要求坡度为 1 : 20 或低于这个比例。一个例外是节 4.3.2.7 中描述的水池式粗糙水道型鱼道。这种鱼道可具有高达 1 : 10 的坡度。

尤其在坡长大于 30m 的情况下，建议建造坡道平缓、休息池较深、纵截面较长的鱼坡。

4.3.2.3 坡体

通常用于底斜坡或底槛的构造类型：

- 填石构造（松散构造）；
- 嵌入式构造（传统的绍贝格尔斜坡，构造表面平整、有序）
- 分散构造（岩槛构造）。

可将之略加改变转置为鱼坡；参看节 4.1 和图 4.3。

对于鱼坡，仅在特殊情况下才使用蛮石嵌入式构造。一般，下部结构由碎填石构成，而碎填石则根据对滤层的规定分层放置，或修建在地膜织物材料或密封层上。整个坡体以厚重的构造方式会增加成本，但鉴于构造上的原因和稳定性的原因则可能是必需的。在这种情况下，在坡体表面的混凝土凝固前将一层砾石或粗石嵌入混凝土，使混凝土坡体表层粗糙。槛状构造型底坡是非常常见的。各个深深嵌入的蛮石槛排列形成阶梯。蛮石槛间的盆状构造可填充以当地可得的底料并听任其自然改变，形成水池和淤积。在沙质底床，盆状构造上必须覆以抛石，否则，经过大流量期间的冲刷，会侵蚀得太深。这样形成的斜坡相当于具蛮石槛的填石斜坡。

河流里的水很少时填石坡体可能出现問題，这可能因通过填石渗漏失水。在极端的情况下，这可能导致坡顶干涸，斜坡不能起到鱼道的作用。在携带大量泥沙及坡顶处于上游底高度的河流中，通过内洗的泥沙，自我封塞发生较为迅速。如果坡顶高而水又没有携带泥沙，自我封塞可能需要很长的时间。在这种情况下，可人工内洗沙和砾石填充间隙。

建议有流量改变的斜坡横截面为楔形或抛物线状。这种横截面能在低水期间集中小流量，而在高流量时，在流速相应较低的两侧形成较浅的区域。

4.3.2.4 大蛮石和蛮石槛

对于坡度为 1:20 和 1:30 的常规平缓的斜坡，尽管底粗糙，也难以将流速控制在最大允许限度以下。由于这一原因，可将能降低流速和增加水深的附加构件加入鱼坡坡道中，大蛮石又是最适合于这一目的的材料。如同旁路水道一般，下列结构也可以用于鱼坡：

- 能增加斜坡粗糙度，为鱼提供休息池和隐蔽处的、水环绕其流动的单个抗扰动大蛮石。
- 横向延伸整个坡宽的不规则蛮石槛。水能够或流经或溢出这些蛮石槛，这些蛮石槛形成水池式结构（参看图 4.20）。

该设计与节 4.2.2.4 给出的旁路水道设计相一致。蛮石槛的优点是，即使在低流量时，在盆状结构中提供足够的水深并且保留细沙。

水力计算在第 4.4 节中叙述。

4.3.2.5 护坡

鱼坡的两个边坡必须以有效的方式给予保护，这样它们才能经受高流速的冲击。蛮石槛和抗扰动蛮石需要特殊措施将其固定并防止流水的侵蚀，否则流水的侵蚀会危及设施的功能效率和稳定性。两个边坡必须用乱石或规则的石块稳定，而且保护必须延伸在平均吃水线以上。在这一吃水线以上，坡可用活的植物固定。图 4.18 给出了实例，这些例子的组合也是可行的。

4.3.2.6 鱼坡的下游稳定区

在坡基形成水池、水池启动逆行侵蚀处，鱼坡的稳定性会受到冲刷的危害。而设在鱼坡下游的稳定区必须能对抗这一侵蚀。这样做最简便的方法是采用多层填石，可能的话下部结构加以滤层。

必须固定的下游区的长度与底斜坡或底微斜坡的长度一致（GEBLER；1990；KNAUSS，1979；PATZNER，1982；WHITTAKER 和 JÄGGI；1986）。对于可抗侵蚀的河床，固定底区的最低长度在 3~5m 之间。对于可能受到侵蚀危害的沙质河底，Gebler（1990）建议下游固定区长度应为坡高的 7~10 倍，填石材料的粒径往下游递减（参看图 4.4），还建议在坡基下游面建造一个消能池。

4.3.3 特例

4.3.3.1 水池式粗糙水道型鱼道

一个水池式粗糙水道型鱼道是一个技术性鱼道和一个鱼坡的组合，这一组合中，水池的横墙被立着放的柱状岩取代。这一排列可获得比普通鱼坡大得多的水深和可使用一个陡得多的斜坡（最高达 1:10）。这一情况下的一个决定性特征是，水池间水位差不得超过 $\Delta h = 0.2\text{m}$ ，以维持 $v_{\max} = 2.0\text{m/s}$ 的最大允许流速。一般，一个水池式粗糙水道型鱼道要求一个实体圪工或混凝土隔墙将通道与堰体分隔开（参看图 4.30）。

这类鱼道对于可用空间有限的溪流尤其有用。

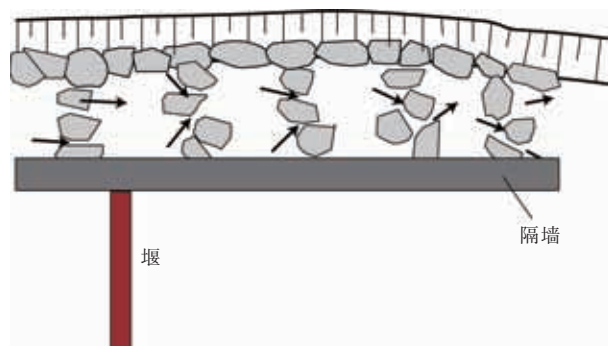


图 4.30 水池式粗糙水道型通道（平面图）

水道的宽度应不少于 1.5m，蛮石槛间的净距离应为 1.5~2.5m。要求的最低水深为 $h=0.4\text{m}$ 。仅在预计洪水流量大时，水道底才使用混凝土建造，填石底更佳。

用嵌入鱼道底层的大而细长的蛮石（粗石）建造横向槛（图 4.31）。在填石底中将蛮石嵌入约 0.4m，在水道混凝土凝固前或嵌在混凝土槛上之前，将蛮石嵌入填石底约 0.4m，视预计流量而定。必须以水仅环绕蛮石流动而非由蛮石顶溢流的方式嵌入蛮石。蛮石间开口的净宽度应不小于 0.20m，使较大的鱼能上溯并降低被残渣堵塞的危险。

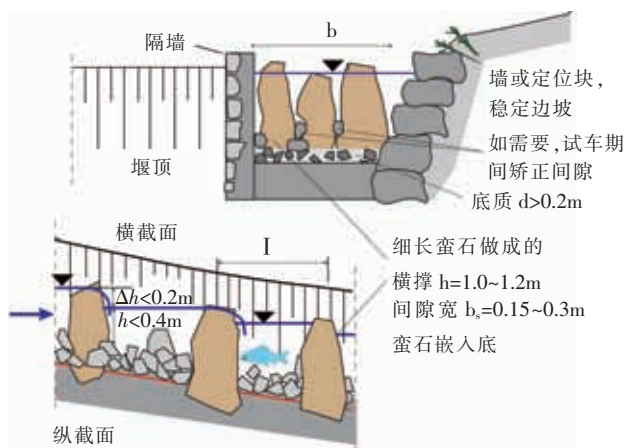


图 4.31 水池式凹凸不平水道型鱼道（水道的横截面与纵截面）

蛮石块在纵向和横向两个方向都应偏置，才能使流量更好地输出，水池中的能量更好地散逸。喷出流应总是射落到下游下一个横向块的一个蛮石上，而不应不喷经下一个横向块，不形成短路流。

这种不规则结构的特征是不可能事先精确计算的，因此未经调试的鱼道有或许不会立即运行良好的危险。因此，更加重要的是在施工阶段便进行测试，由此改善横向块中蛮石的排列。

4.3.3.2 桩道

鱼道的另一种特殊形式是以木桩降低流速至足以让鱼溯河洄游的所谓“桩道”（图 4.32）（GEITNER 和 DREWES, 1990）。如果大岩石与河流的自然特征不相配，不准备使用大岩石时，特别推荐这种桩道。

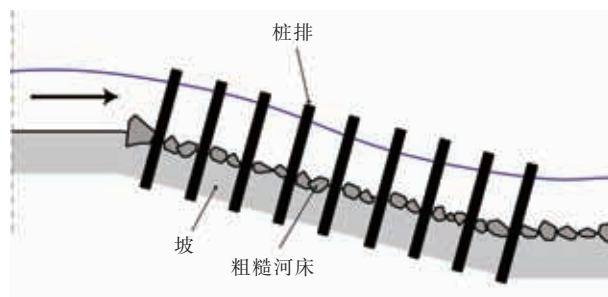


图 4.32 桩道（纵截面示意图）

在桩道中，桩以 5~10 倍于桩直径的间隔成排排列或偏置，并在下部结构坚固的情况下夯入坡体或嵌入混凝土。桩的直径应为 10~30cm。桩的长度应是，正常水位时，水仅环绕桩流动而非由桩顶溢流。为了提高其自净，建议桩应朝着流向略倾斜，并允许洪水时暂时性地溢流。

与其他构造相反，如果桩足够长，桩道对波动的上游水位相对不敏感。根据线性阻力定律，斜坡上的水深不同时，流速仍保持相等。

4.3.4 综合评价

鱼坡是“贴近自然”的构造，具有下列特征：

- 它们适合于低固定堰设施的改型。
- 它们甚至能被小鱼、鱼苗和底栖无脊椎动物通过。
- 它们还适合于鱼类的降河洄游。
- 它们具有外观自然、视觉上吸引人的设计。
- 与其他构造相比，它们所需要的维护成本较低。
- 它们不易被堵塞；漂浮物的沉积物和洪水残渣不立即影响设施的效率。
- 其导流良好，易于被鱼类探测到。
- 它们提供喜流物种之栖息地。

其缺点是：

- 对波动的上游水位敏感；
- 其运行需要的流量大；
- 它们占据大量的空间。

4.3.5 实例

埃塞尔斯布吕克鱼坡	
河流详情	鱼坡详情
河流：埃尔茨河，巴登—符腾堡州 携带泥沙 流量：平均流量=2.0m³/s 高水流量=147m³/s 落差高度：h=1.20m 坝：固定斜堰 功能：保护槛	宽度：b=2.5~3.5m 坡度：I=1：20 长度：l=30m 水深：h=0.20~0.4m 最大流速：v _{max} =1.5m/s 流量：Q=0.3 于 0.4m³/s 建造年份：1993 年
构造描述： 埃尔茨河上埃塞尔斯布吕克堰旁的鱼坡被插入在与河轴斜交的堰的上游区。将鱼坡置于现有岸坡和堰体之间，鱼坡很好地融入周围的景色和堰的现有构造中。 在堰顶开一个约 4m 宽的口子，该开口将鱼坡与上游水连接。坡体构架由 10 个横槛组成，横槛则用分组排列的蛮石（h=1.0~1.5m）制作。横槛间的区域填充以河石和砾石的混合物。中间盆状构造中允许导致水池形成和砾石沉积的有限水力动力活动。  图 4.33 埃尔茨河上的埃塞尔斯布吕克鱼坡（下游水视图）。该斜坡坡度平缓，和谐地融入堤及现有堰构造	

达腾费尔德鱼坡	
河流详情	鱼坡数据
水流：齐格河·北莱茵—威斯特法伦州 流量：平均低水流量=3.0m³/s 平均流量=21.0m³/s 已知最高流量=612m³/s 拦河坝：实体堰槛 高度：h=1.80m 宽度：b=90m	宽度：b=10m 坡度：I=1：20 长度：l=50m 流量：Q=2.0m³/s 最大流速：V _{max} =1.5~2.0m/s 建造年份：1987年 负责单位：国家水和废物管理局波恩分局

构造描述：

该鱼坡已整合入河右岸和现有实体堰槛间的夹角，坡体被建立为有嵌入粗石的混凝土实体结构，并在顶层湿混凝土凝固前，用一层粗砾石嵌入其中，使坡体粗糙。此外，扰动大蛮石（直径达 80cm，蛮石间留有约 1.5m 的净距离）可降低流速，并在鱼上溯鱼坡时，为鱼产生隐蔽处。该鱼坡朝向岸的一边水流相当平缓，允许较弱的鱼类和底栖动物（区系）上溯。



图 4.34 达腾费尔德/齐格河鱼坡（有鱼坡的底槛全视图）

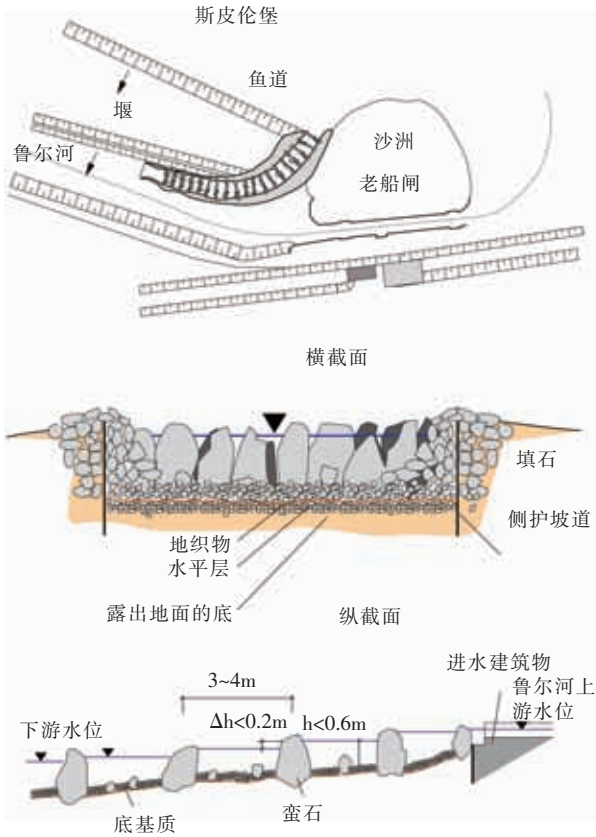


图 4.35 下游水视图

德尔门霍斯特鱼坡	
河流详情	河流详情
水流：德尔姆溪，下萨克森州 流量：平均低水流量=0.3m³/s 平均流量=1.0m³/s 平均高水流量=5m³/s 降落水头：h=0.8m 用途：以前用于引水	宽度：b=2.4~4.5m 坡度：I=1：41.5m 长度：l=27m 水深：h=0.30~0.7m 最大流速：v _{max} =1.3~1.4m/s 建造年份：1993 负责单位：Ochtumband
构造详情： 堰的三个现有排水闸中的一个，已用坡度平缓的鱼坡取代。鱼坡上排放至多达平均低水流量的流量，水仅在流量较大时才由堰顶溢出。 鱼坡设置在堰的上游水区域，因此没入下游水的出口（即鱼的入口）直接邻近于溢流的堰脚处。混凝土墙被选择用来作为靠水侧的边界。该鱼坡由大蛮石形成的横槛组成，以4~5m的间隔排列。蛮石位于石筐之上。横梁处上下游形成约10cm的水位差。横撑间形成槽形水池。水池和蛮石间通道皆覆盖以一层厚约25cm、不间断的粗砾石和石头。粗砾石和石头形成填隙式空间。 借助进水口区中的闸门可关闭鱼坡进行维修。水通过闸门流到鱼坡上，同时闸门不让残渣进入。	
	
图 4.36 德尔门霍斯特鱼坡。竣工前不久上游水端视图。坡度平缓的鱼坡覆盖以一层不间断的砾石和石头的衬底层。对于建在堰的上游水区、出口（鱼的入口）直接邻接堰的鱼坡，避免形成死角。这类表面粗糙、坡度平缓的鱼坡，整个河流的动物区系都可毫无限制地通过	

乌英根水池式粗糙水道型通道	
河流详情	鱼道数据
水流：菲尔斯河，巴登—符腾堡州 构造类型：管式堰 高度： $h_{\text{tot}}=3.6\text{m}$ 流量：平均流量 $=9.8\text{m}^3/\text{s}$ 高水流量 $_{100}=284\text{m}^3/\text{s}$ 用途：水力发电	流量： $Q=0.34\text{m}^3/\text{s}$ 宽度： $b=1.90\text{m}$ 坡降： $I=1:9$ 长度： $l=32\text{m}$ 水深： $h=0.6\sim 0.8\text{m}$ 建造年份：1989 年
构造详情： 菲尔斯河是一条改建的、携带底床质的山地小河，坡度为 $I=2\text{‰}$，底宽 $b=10\sim 15\text{m}$，石底或砾石底。 鱼道与左岸现有墙连接，并由一道低混凝土隔墙与堰体分开。将蛮石立着放，嵌入混凝土基础，混凝土基础上铺设有一层厚约 0.20m 的砾石衬底，有几块较大岩石。蛮石槛的间隔在 $1.65\sim 3.15\text{m}$ 之间。最初担心，由于流量横截面不规则，在各横撑处会出现变化很大的水深（及流速），但在运行试验时这却未被证实。虽然在安装方面需要一些额外后续施工，包括狭槽的扩大或缩减，但开始时拟定的水深和水位差在规定的范围内。 	

图 4.37 乌英根/菲尔斯水池式粗糙水道型通道，下游水端视图

斯皮伦堡堰旁的鱼坡	
河流详情	鱼道数据
水流：鲁尔河·北莱茵—威斯特法伦州 流量：平均低水流量=20m ³ /s 平均流量=70m ³ /s 已知最高流量=2 300m ³ /s 建筑类型：二级固定堰 高度：h=2.6m 用途：水力发电、饮用水	流量：Q=1m ³ /s 宽度：b=10m 坡度：I=1：25 长度：l 约 102m 水深：h=0.6~1.0m 建造年份：1993 年 负责单位：国家水和废物管理局赫尔腾分局
构造详情： 该鱼坡建在斯皮伦堡堰的左侧，低水时水位差约 2.6m，钢制护坡道提供该设施的侧向边界，它们亦在施工期间起防洪的作用。护坡道用粗石覆盖，不再能看见。 该鱼坡分成 17 个水池，每个水池长 3~4m，用蛮石块制作而成，蛮石块由大蛮石组成（每个蛮石重达 1.5t）。蛮石直接放置在坡体上，且相互依靠。水池填充以一层 20cm 厚的砾石和石料。不使用混凝土。用一个可调节进水建筑物控制流量。	
	
图 4.38 放置蛮石块	图 4.39 布局与坡结构

斯皮伦堡堰旁的鱼坡



图 4.40 斯皮伦堡堰；施工中的鱼坡

从进水建筑物到下游水都铺砌了横撑。试运行期间，缩减或扩大蛮石槛中的间隙，校正水池中的水深。注意最大水位差不超过 $\Delta h=20\text{cm}$ 。



图 4.41 斯皮伦堡堰；竣工后的鱼坡

北莱茵—威斯特法伦州渔业局的鱼类及水生生物研究所于 1994 年 5 月进行的监测证实了该设施的功能，竣工后几个月，包括贻贝、蜗牛、石蚕蛾幼虫和蜻蜓幼虫在内的种类丰富的底栖动物已在该鱼坡建群。

4.4 水力设计

在鱼道的水力设计中必须区分两种基本类型的流量：

a) 运行流量：不言而喻，运行流量的范围为一年之中仅几天超过或是低于该范围，平时必须保证鱼道运行的正常流量范围。在这样的流量范围内设计鱼道时，必须考虑鱼上溯时所需要的水深，且不超过所允许的流速。

b) 临界流量：这是每隔几年才重现一次某洪水规模的重现洪水流量，鱼道应依此设计以保持其稳定性。在这么大的流量期间，毋需考虑鱼类洄游这一因子。鱼道的临界流量，只能用适当的进水（鱼道出口）建筑物或调节装置限制或调节。

4.4.1 流量公式

1991 年 DVWK 指南 220 号“流水的水力计算”中汇编了现在推荐的流水水力设计计算法。明渠中平均流速的计算系根据达西—魏斯巴赫（Darcy-Weisbach）流量公式：

$$V_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gr_{hy}I} \quad (4.1)$$

式中
$$r_{hy} = \frac{A}{l_u} \quad (4.1a)$$

渠底凹凸不平，稳态、均匀流动下流水的阻力系数是根据（4.2）式计算的：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k_s / r_{hy}}{14.84} \quad (4.2)$$

（有效范围： $k_s < 0.45r_{hy}$ ）

为便于计算，在填石底的情况下，（4.2）式中砂粗糙度的当量直径 k_s 被岩石平均直径 d_s 所取代；在混合基质的情况下，被粒径 d_{90} 取代。

SCHEUERLEIN（1968）给出了底部粗糙的渠道和蛮石嵌入式底坡上超临界流阻力系数的一个函数。不考虑水中的空气含量，并假定嵌入排列有序石头的堆砌系数为 0.5，该函数可写成下列形式：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -3.2 \log \left[(0.425 + 1.01I) \frac{k}{h_m} \right] \quad (4.3)$$

有效范围： $I = 1:8 \sim 1:15$

$$d_s = 0.6 \sim 1.2m$$

嵌入石块的粗糙度 k 可估计为：

$$k \approx \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} d_s$$

由平均流速 v_m 和流动表面积 A ，得到流量 Q 为

$$Q = v_m \cdot A \quad (4.4)$$

4.4.2 抗扰动蛮石的流阻

如图 4.4.2 所示，在具嵌入抗扰动蛮石的旁路水道和鱼坡中，底床粗糙的影响会被蛮石的流阻所掩盖，方程（4.1）中的阻力系数 λ_{tot} 可由下式计算，参看 Rouve（1987）：

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_s + \lambda_o (1 - \epsilon_o)}{(1 - \epsilon_v)} \quad (4.5)$$

式中

$$\epsilon_v = \frac{\sum V_s}{V_{tot}} = \frac{\text{抗扰动蛮石的浸没体积}}{\text{总体积 } A \cdot l} \quad (4.5a)$$

$$\epsilon_o = \frac{\sum A_{0,s}}{A_{0,tot}} = \frac{\text{抗扰动蛮石表面积}}{\text{基底总面积 } l_u \cdot l} \quad (4.5b)$$

$$\lambda_s = 4c_w \frac{\sum A_s}{A_{0, \text{tot}}} \quad (4.5c)$$

式中 $c_w \approx 1.5$ 是形状阻力系数，而 $A_s = d_s h^*$ 是抗扰动蛮石的浸湿面积 (4.5d)

这里如果水仅环绕蛮石流动，则变量 h^* 成为平均水深 h_m ，若蛮石被完全浸没则采用蛮石高度 h_s 。

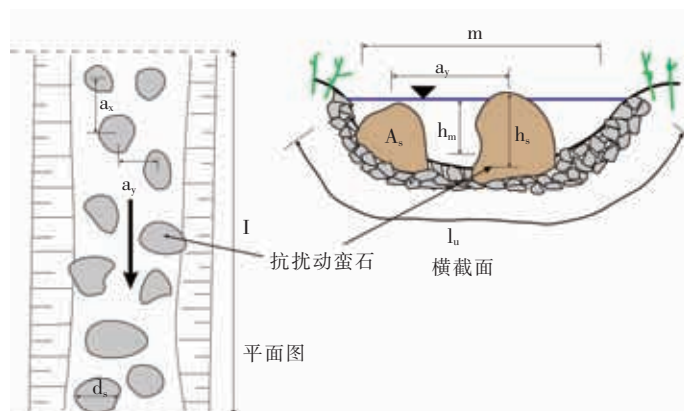


图 4.42 具抗扰动蛮石的旁路水道

根据方程 (4.2)，底的阻力系数 λ_o 可由总横截面的水力半径 r_{hy} 大致确定。与抗扰动蛮石的阻力系数相比，底的阻力系数很小。

为便于实际应用，通常将方程 (4.5) 中的 ϵ_v 和 ϵ_o 忽略不计，而根据方程 (4.6) 由单个阻力的叠加来计算总阻力系数

$$\lambda_{\text{tot}} = \lambda_s + \lambda_o \quad (4.6)$$

式中 $\lambda_s = C_w \frac{4A_s}{a_x a_y}$ (抗扰动蛮石的阻力系数) (4.6a)

$$A_s \approx d_s \cdot h^* \quad (4.6b)$$

d_s 、 a_x 、 a_y 如图 4.42 所示， a_x 和 a_y 是朝流向 (a_x) 的蛮石间的平均间隔和跨流向 (a_y) 的蛮石间的平均间隔，而在横截面仅有一个蛮石的、粗糙的小水道中， a_y 被水道宽 b 所代替。对于桩式鱼道，可取 $c_w = 1.0$ (GEITNER 和 DREWES, 1990)。

平均流速仍然从方程 (4.1)，流量从方程 (4.4) 获得。蛮石间狭窄间隙的最大流速对于允许鱼通过是具有决定性的，且可由 (4.7) 式近似计算出。

$$v_{\text{max}} = \frac{V_m}{1 - \frac{\sum A_s}{A_{\text{tot}}}} \quad (4.7)$$

式中 A_{tot} 是无障碍流动横截面 (无抗扰动蛮石)，而 $\sum A_s$ 是极狭窄横截面内所有蛮石浸湿面积之和。

所选择坡降、蛮石间隔和蛮石直径应当是，平均而言，出现亚临界流。仅在蛮石间狭窄间隙中才允许流动类型的改变。

鉴于目前的知识水平，考虑上述值在 $c_w \approx 1.5$ 时的有效性，这些计算不得不限制在以下的范围之内：

蛮石间隔 $a_x = a_y = 1.5 \sim 3$ 倍 d_s ，

$a_y - d_s > 0.3m$ ，

水深 $h_m/h_s < 1.5$ ，

坡降 $I \leq 1 : 20$

备注

除蛮石的形状外，方程 (4.5c) 和 (4.6a) 中的形阻系数 c_w 受位于刚好在上游的蛮石后发生流动类型效应的决定性影响。如果蛮石被浸没，阻力系数亦改变。现有关于这些问题不多的资料显

示，大于和小于 $c_w=1.5$ 的值都有。然而，尚不能确定一般的计算方法，例如同样决定水所环绕流动的木头的阻力系数的算法。这方面尚有许多的研究工作需要做，因此试运行仍有其必要性。

计算实例

在一个旁路电站的主堰旁拟建一个最低要求流量为 $Q=1.2\text{m}^3/\text{s}$ 的鱼坡。该鱼坡坡降拟为 1 : 25 (坡度 $I=0.04$)，水深拟为 $h=0.4\text{m}$ 。坡体拟用在 $k_s=0.12\text{m}$ 时凹凸不平的粗石建造。应用边缘长度 $d_s=0.6\text{m}$ 的抗扰动蛮石降低流速，产生鱼的隐蔽处。该鱼坡将有一个如图 4.43 所示的梯形横截面。因此，下面基本的特征数据为：

流动面积：

$$A=2.6 \cdot 0.4 + 2 \cdot 0.4^2 = 1.36\text{m}^2$$

浸湿周长：

$$l_u = 2.60 + 2 \cdot 0.4 \sqrt{1+2^2} = 4.39\text{m}$$

水力半径：

$$r_{hy} = \frac{A}{l_u} = \frac{1.36}{4.39} = 0.31\text{m}$$

水位坡宽：

$$b_{sp} = 2.6 + 2 \cdot 2 \cdot 0.4 = 4.20\text{m}$$

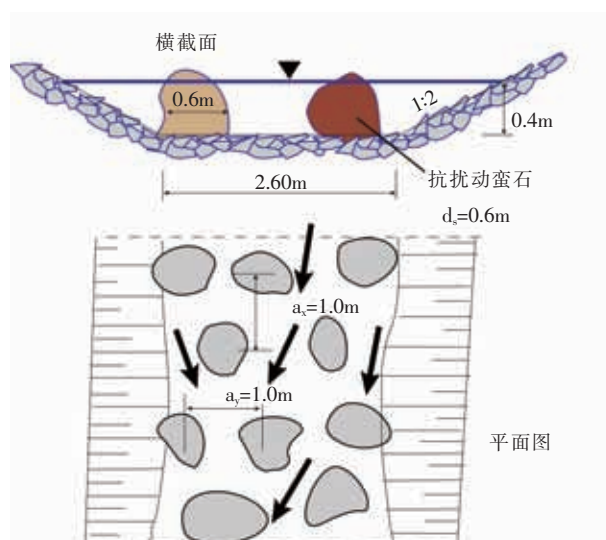


图 4.43 计算实例说明示意图

如图 4.43 所示，应按平均轴距 $a_x = a_y = 1.0\text{m}$ 设置抗扰动蛮石。对于一段长 $l=10\text{m}$ 的水道，约需 28 块蛮石。各个抗扰动蛮石的浸湿表面为：

$$A_s \approx 0.6 \cdot 0.4 = 0.24\text{m}^2$$

由于是对一段长 $l=10\text{m}$ 的水道进行计算，其容积比和表面积比为：

$$\epsilon_v = \frac{28 \frac{\pi}{4} d_s^2 h}{lA} = \frac{28 \frac{\pi}{4} 0.6^2 0.4}{10 \cdot 1.36} = 0.233$$

$$\epsilon_o = \frac{28 \frac{\pi}{4} d_s^2}{l \cdot l_u} = \frac{28 \frac{\pi}{4} 0.6^2}{10 \cdot 4.36} = 0.18$$

根据 $\Sigma A_s = 28 \cdot 0.24 = 6.72\text{m}^2$

及 $A_{o,tot} = l \cdot l_u = 10 \cdot 4.39 = 43.9\text{m}^2$

抗扰动蛮石的阻力系数被计算为

$$\lambda_s = 4c_w \frac{\Sigma A_s}{A_{o,tot}} = 4 \cdot 1.5 \frac{6.72}{43.9} = 0.92$$

考虑底的粗糙，根据方程 (4.2)，阻力系数的计算如下：

$$\frac{1}{\lambda_o} = -2 \log \frac{0.12/0.31}{14.84} = 3.16 \rightarrow \lambda_o = 0.10$$

因此, 根据方程 (4.5), 总阻力系数为 λ_{tot}

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_s + \lambda_o (1 - E_o)}{1 - E_v} = \frac{0.92 + 0.1 (1 - 0.18)}{1 - 0.233} = 1.31$$

由方程 (4.1) 获得的平均流速为

$$v_m = \sqrt{\frac{8 g r_{hy} I}{\lambda_{tot}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 9.81 \cdot 0.31 \cdot 0.04}{1.31}} = 0.86 \text{ m/s}$$

因此流量

$$Q = v_m \cdot A = 0.86 \cdot 1.36 = 1.17 \text{ m}^3/\text{s} \approx 1.20 \text{ m}^3/\text{s}$$

于是, 如此处所示, 该斜坡能应付练习说明中所要求的流量。

最大流速将出现在三个抗扰动蛮石成直线嵌入的最狭窄流动横截面处。由方程 (4.7) 得:

$$v_{max} = \frac{V_m}{1 - \frac{\sum A_s}{A_{ges}}} = \frac{0.86}{1 - \frac{3 \cdot 0.4 \cdot 0.6}{1.36}} = 1.83 \text{ m/s}$$

$v_{max} < v_{perm} = 2.0 \text{ m/s}$ (v_{perm} = 最高允许流速)

为了预测在斜坡上 (无障碍横截面中) 发生的流动类型, 计算弗劳德数:

$$\begin{aligned} Fr^2 &= \frac{V_m^2 b_{sp}}{g A_{tot}} = \frac{0.86^2 4.20}{9.81 \cdot 1.36} = 0.233 \\ &\rightarrow Fr = 0.48 \end{aligned} \quad (4.8)$$

由于弗劳德数为 $Fr < 1$, 该状态就是亚临界流状态。

在最狭窄横截面, 式中

$$\begin{aligned} b_e &= b_{sp} - 3 \cdot d_s = 4.2 - 3 \cdot 0.6 = 2.4 \text{ m} \\ A_e &= A_{tot} - \sum A_s = 1.36 - 3 \cdot 0.24 = 0.64 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

弗劳德数成为:

$$\begin{aligned} Fr_e^2 &= \frac{V_{max}^2 b_e}{g A_e} = \frac{1.83^2 \cdot 2.4}{9.81 \cdot 0.64} = 1.28 \\ &\rightarrow Fr_e = 1.13 \end{aligned} \quad (4.8a)$$

这意味着超临界流已经出现, 但是由于弗劳德数为 $Fr < 1.7$, 未发生显著水跃。能量转换必定是通过射到低于缩口的下一个抗扰动蛮石上的水流而产生的。为便于比较:

根据方程 (4.6) 简化的计算方法产生相当类似的结果。正如已确定的那样, 当水道底的阻力系数为 $\lambda_o = 0.10$, 且

$$\lambda_s = 4 c_w \frac{A_s}{a_x a_y} = 4 \cdot 1.5 \frac{0.4 \cdot 0.6}{1.0 \cdot 1.0} = 1.44 \text{ 及 } \lambda_{tot} = \lambda_s + \lambda_o = 1.54$$

平均流速为

$$v_m = \sqrt{\frac{8 g r_{hy} I}{\lambda_{tot}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 9.81 \cdot 0.31 \cdot 0.04}{1.54}} = 0.79 \text{ m/s}$$

和最大值 $v_{max} = 1.68 \text{ m/s}$ 及流量 $Q = 1.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 与第一个结果相比, 差仅约为 8%。

4.4.3 蛮石槛的设计计算

蛮石槛由蛮石组成, 并由于其滞留效应形成一个水池系统。将蛮石置于横撑的间隙上, 即水流仅通过蛮石间的间隙。在流量低且水道较宽时, 通常需要如图 4.44 所示, 装上由扁平石形成的矮槛, 部分封闭较大蛮石间的间隙。采用这一方法, 在低水流期间可获得较高的保水能力和较大的水深。

依据水力学定律, 绕过和溢出蛮石槛的水流特征与溢出固定堰的水流特征一致, 但必须区分完全溢流 (非淹没状态) 和不完全溢流 (淹没状态) 两种基本情形。完全漫顶流和不完全漫顶流间的界限主要由 h/h_{hend} 之比和槛的形状来确定, 参看 PREISSLER/BOLLRICH (1992), 第九章。

对于初步设计计算, 采用 Poleni 公式确定流量。

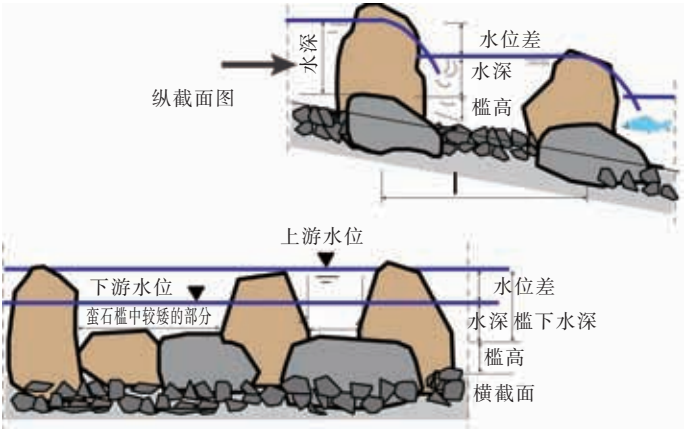


图 4.44 具蛮石槛的旁路水道和斜坡的水力设计计算

$$Q=\frac{2}{3}\mu\sigma\Sigma b_s/\sqrt{2g}h_{head}^{3/2} \tag{4.9}$$

式中 Σb_s ——蛮石间隙净宽度之和。



图 4.45 莱希河金绍坝附近的鱼溪。其陡坡被用蛮石制做的横槛中断。槛间盆状构造的底未加固，经过冲刷能形成水池

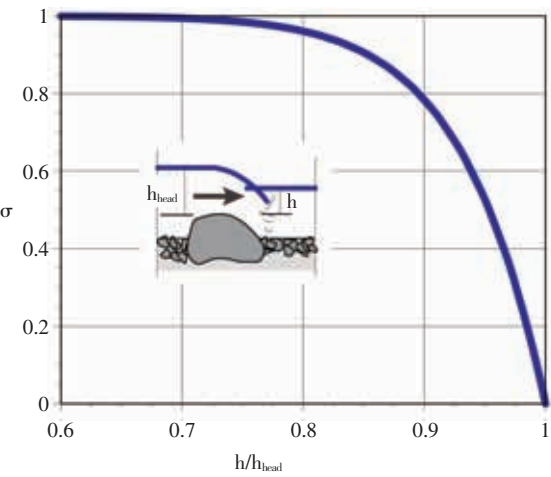


图 4.46 淹没流衰减系数

当蛮石间隙的断面积变化很大时，或蛮石槛横跨其全宽，完全被浸没（包括大蛮石）时，必须逐段测定流量 Q 。关于溢流系数 μ ，可以使用锐缘宽顶堰或圆堰顶的已知值，视各种情况下槛的类型和使用的石料而定。总之，必须严格考虑值或公式的有效范围。一般推荐下面的值：

钝缘宽岩、碎料：

$$\mu \approx 0.5 \sim 0.6$$

锐缘块石：

$$\mu \approx 0.6 \sim 0.8$$

淹没流衰减系数考虑了下游水位 h （即溢流蛮石下游的水位）的影响，可从图 4.46 中取得。其值大约与开合式闸堰或宽顶堰的值相同，参看 PREISSLER/BOLLRICH（1992）。在完全漫顶流（非淹没状态）的情形中，该系数为 $\sigma=1.0$ 。

蛮石槛处的最大流速受水位差 Δh 的支配并等于

$$v_{\max} = \sqrt{2g\Delta h} \quad (4.10)$$

槛间水池的大小和深度应确保低湍流度流动，以便洄游鱼类能找到足够的隐蔽处和机会，恢复其体力。容积耗散功率的指导值为 $E=150 \sim 200 \text{ W/m}^3$ ，并可由下式计算：

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{b h_m l_w} = \frac{\rho g \Delta h Q}{A l_w} \quad (4.11)$$

式中 h_m ——水池中的平均水深

b ——水池平均宽度

A ——水池平均横截面

l_w ——水池净长度， $l_w \approx l - d_s$

在水池式、底凹凸不平水道型鱼道中用无底槛竖放的柱状岩制作的蛮石槛处（参看图 4.47），在低下游水位时或间隙相当窄时，在蛮石间的狭窄横截面中会发生流态改变。在这样的情况下，通过比较总水头，亦可确定各特定阶形成的上游水深：

通过净横截面携带流量 Q 所需最低水头等于

$$h_{E, \min} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \sum b_s^2}} \quad (4.12)$$

狭窄处的水头与上游水中水头的比较

$$h_{E,0} = h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = h_{E, \min} + h_v \quad (4.13)$$

并相对于临界水深考虑水头损失

$$h_v = \xi \frac{V_{gr}^2}{2g} = \frac{\xi}{3} h_{E, \min} \quad (4.14)$$

在堰槛上的上游水位的水头为

$$h_{E,0} = (1 + \xi/3) h_{E, \min} \quad (4.15)$$

对于入口损失系数 ξ ，可假定值 $\xi=0.5$ ，这适用于锐缘入口的情形。

在该计算中，上游水深与槛下水位无关。

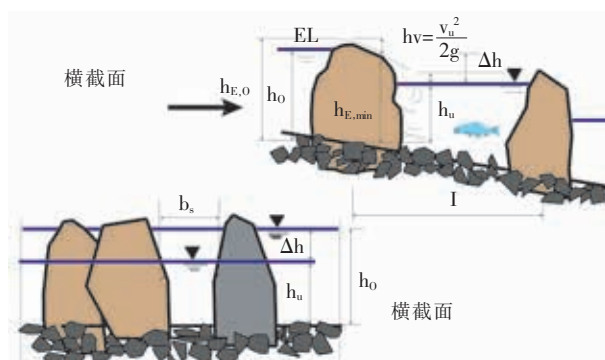


图 4.47 绕过蛮石的水流

计算实例

河流的江段中坝旁的旁路水道可承受低水流的最小流量 $Q_{\min} = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大流量 $Q_{\max} = 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ 。将蛮石槛加入水道中，以便形成水池系统。在低水流时，也应保持鱼道中的水位在 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ 之间。

将水位差调节至 $\Delta h = 0.10 \text{ m}$ ，蛮石间的间隔调节至 $l = 2.5 \text{ m}$ ，坡降的计算于是为

$$I = \frac{\Delta h}{l} = \frac{0.1}{2.50} = 1 : 25 \text{ 或 } 4\%$$

由 $v_{\max} = \sqrt{2g\Delta h}$ 获得最大流速 $= \sqrt{19.62 \cdot 0.10} = 1.40 \text{ m/s}$

其低于允许流速

$$v_{\text{permissible}} = 2.0 \text{ m/s}$$

蛮石槛由直径 $d_s = 0.6 \text{ m}$ 的大块石组成，其放置方式应是能集中低水流量。其净横截面用扁平石部分封闭，扁平石应被至少 $h_{\text{head}} = 0.2 \text{ m}$ 的水垫（水舌）浸没。

在净横截面中，约 $d_s = 0.4 \text{ m}$ 的石头嵌入底的方式是高出底约 20 cm 。这导致水头为

$$h_{\text{head}} = 0.4 - 0.2 = 0.2 \text{ m}$$

由于 $h/h_{\text{head}} = 0.10/0.20 = 0.5$ ，根据图 4.46，可以假定 $\sigma = 1.0$ 的自由流的流量，由方程 (4.9) 计算溢流系数 $\mu = 0.5$ 的开口所需宽度（对于较锐缘的蛮石）为：

$$\sum b_s = \frac{Q_{\min}}{\frac{2}{3} \mu \sigma \sqrt{2gh_o}^{3/2}} = \frac{0.1}{\frac{2}{3} 0.5 \cdot 1.0 \sqrt{19.62 \cdot 0.2}^{3/2}} \approx 0.75 \text{ m}$$

石间间隔呈左右交错排列，以产生蜿蜒的池式流。亦可分两个、每个宽约 0.4 m 的开口。间隙旁较大蛮石的放置应是槛高 0.4 m ，水池甚至在低水流时水满。因此，嵌入底深度为 20 cm 大蛮石的直径应为约 60 cm 。

水道底宽度为石间间隔宽度的 2.5 倍，便于形成交错、平行排列的开口，不在水池中产生短路流。底宽于是为

$$b = 2.5 \cdot 0.75 \approx 1.9 \text{ m}$$

由此计算渠道两岸坡降为 $1 : 2$ 的槛的总宽为

$$b = 1.9 + 2 \cdot 2 \cdot 0.4 = 3.5 \text{ m}$$

图 4.48 为由这种构造形成的整个水道的横截面示意图。

重要的是知道最大水流时的水位，以确定护坡高度。于是产生的相应水头必须通过试验来确定，因为溢流分布图类型多种多样，不可能提出直接的解决方法。

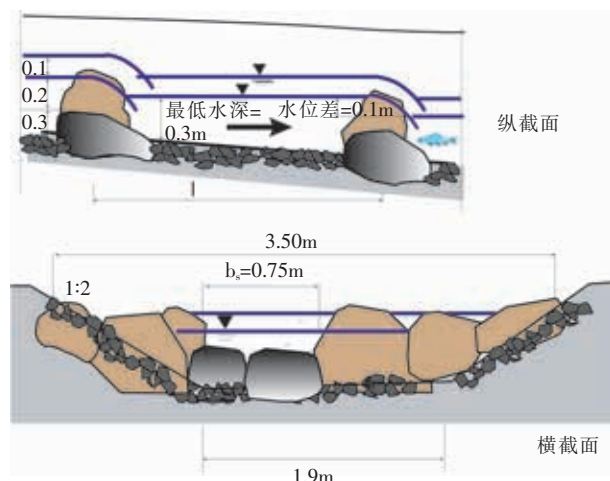


图 4.48 计算实例示意图

经过数次试验，计算表明水位升高约 0.10 m

假定水头 h_{head} 为

$$h_{\text{head}} = 0.2 + 0.1 = 0.30\text{m}$$

且淹没流衰减系数为 $\sigma \approx 1.0$ ，对于 $h/h_{\text{head}} = 0.20/0.30 = 0.66$ ，根据图 4.46，计算间隙中的流量 Q 为

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sigma \sum b_s / \sqrt{2g h_{\text{head}}}^{3/2} = \frac{2}{3} \cdot 0.5 \cdot 1.0 \cdot 0.75 \cdot \sqrt{19.62} \cdot 0.30^{3/2} = 0.18\text{m}^3/\text{s}$$

堰槛余宽为 $b = 3.50 - 0.75 = 2.75\text{m}$ ，式中 $h_{\text{head}} = 0.10\text{m}$ ， $\mu = 0.5$ （因 $h = 0$ ，无淹没流衰减），通过的流量为

$$Q = \frac{2}{3} \cdot 0.5 \cdot 2.75 \sqrt{19.62} \cdot 0.10^{3/2} = 0.13\text{m}^3/\text{s}$$

这样，总流量等于

$$Q_{\text{tot}} = 0.182 + 0.128 = 0.31\text{m}^3/\text{s}$$

由于本例中的水位差不变，与低流量相比，甚至连最大流量时仍出现相同最大流速 $V_{\text{max}} = 1.40\text{m/s}$ 。水池中仅平均流速改变。在低水及平均水深为 $h_m = (0.3 + 0.4) / 2 = 0.35\text{m}$ 时，它们等于

$$v_{m,\text{min}} = \frac{Q_{\text{min}}}{A} = \frac{0.1}{1.9 \cdot 0.35 + 2 \cdot 0.35^2} = 0.11\text{m/s}$$

而在最大流量时，它们增加至

$$v_{m,\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}}}{A} = \frac{0.31}{1.9 \cdot 0.45 + 2 \cdot 0.45^2} = 0.25\text{m/s}$$

水池中的低平均流速导致相对低湍流度水池流动并使细砂至少在周边低流区沉积。尽管如此，需要保护底，因为溢流区中产生的应力大得多。

根据方程 (4.11) 估计水池中的湍流状态。在 $Q_{\text{max}} = 0.31\text{m}^3/\text{s}$ 时，且对于 $A = b \cdot h_m + m \cdot h_m^2 = 1.90 \cdot 0.45 + 2 \cdot 0.45^2 = 1.26\text{m}^2$ 及 $l_w = l - d_s = 2.50 - 0.60 = 1.90\text{m}$

则容积耗散功率的结果为

$$E = \frac{\rho g Q \Delta h}{A l_w} = \frac{9810 \cdot 0.31 \cdot 0.1}{1.26 \cdot 1.90} = 127\text{W}/\text{m}^3$$

$$< E_{\text{permissible}} = 150 \sim 200\text{W}/\text{m}^3$$



图 4.49 艾托夫—温克尔米勒鱼坡的试运行，不可能精确设计计算这类不规则蛮石堰。因此，蛮石的最佳排列在这里最初是借助于沙袋。在这次试验后，蛮石才被固定。必须认为这类试运行是施工过程的一个必不可少的部分，因而在设计阶段其成本就已被考虑

4.4.4 底斜坡和底微斜坡上的临界流量

对于填石型底斜坡和底微斜坡，WHITTAKER 和 JÄGGI (1986) 认为下面的方程是稳定性的一个标准。

$$Q_{\text{permissible}} = 0.257 \sqrt{g \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} I^{-7/6} d_{65}^{3/2}} \quad (4.16)$$

由于 $d_{65} \approx d_s / 1.06$ 和 $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$, (4.16) 式可写成 (4.16a) 的形式

$$Q_{\text{permissible}} = 0.307 \sqrt{g I^{-7/6} d_s^{3/2}} \quad (4.16a)$$

方程 (4.16) 已含有 20% 的安全限度。

块石坡受到的负载应力比以填石方式嵌入之底槛大得多。根据 GEBLER (1990), 已知尚无经过确认的稳定性标准。WHITTAKER 和 JÄGGI 的实验给出的表面平整和排列有序蛮石的允许流量比方程 (4.16) 增加 0.7~1 倍。然而, 必须指出, 允许冲击大大受到工程质量的影响 (如块石铺砌的失误), 尤其对于块石坡而言, 故障的其他情形如下游水冲刷、斜坡侵蚀等, 也影响结构稳定性。

各暴露岩 (抗扰动蛮石、蛮石槛) 的立足点稳定性必须得到证明。这里必须考虑两类冲击力, 由水位差 Δh 引起的水压和由最大流速引起的力。

4.4.5 试运行

外观自然旁路水道和鱼坡的水力设计计算, 永远只能被认为是初步估计。其原因首先在于, 对所使用的建筑材料 (如蛮石)、横截面、流动条件等要求的 (亦即目标) 多样性, 其次在于, 直到现在仅有不完全的研究和结果。因此, 在设计公式的系数 (如粗糙度、流量系数、进水损失) 的选择中有不确定性。尽管如此, 为了估计所要求蛮石和横截面大小的数量级及预期的流速和流量, 必须进行水力设计计算 (初步概算)。由于无法估量的影响, 永远需要试运行, 在试运行中可检查是否遵照了流量、流速及水深的阈值和设计指标, 只要不合适就可以予以校正。还应测试几个不同的流量, 即在几个不同日期进行试运行, 因为鱼道中和导流在下游水中的形成过程中, 水的条件差异很大。尤其是, 如允许结构上的动态发展, 应进行检查, 如果需要, 甚至在正规运行之后, 进行必要的改进。

在试运行期间, 尤其应检查下面的设计指标:

- 流动类型和水深: 必须避免水非常浅的区段、湍流度非常高的区域、短路流动区及孤立射流区。
- 最大流速不应超过 2.0 m/s , 尤其在临界位置 (即狭窄横截面、浸没式蛮石槛)。
- 跌水及槛附近的水位差: $\Delta h < 0.2 \text{ m}$ 。

5. 技术性鱼道

技术性鱼道包括下列类型：

- 水池式鱼道
- 垂直狭槽鱼道
- 丹尼尔鱼道（逆流道）
- 鳗鲡梯
- 鱼闸
- 升鱼机

本章仅描述水力效率和生物学效率已得到充分研究的普通类型的技术性鱼道。

5.1 水池式鱼道

5.1.1 原理

水池式鱼道的原理是，通过安装隔板，将连接上游水到下游水的水道以一个接一个的阶梯式水池分隔开。水通常流过隔板上的开口（孔），水的势能在水池中逐步被耗散（图 5.1）。

鱼通过隔板上位于底部（浸没孔）或顶部（凹口）的开口，从一个水池迁移到下一个水池。洄游鱼类仅在其通过隔板时遭遇高流速，而水池中流速较低之处可提供隐蔽处和休息机会。粗糙的底部是保证底栖动物（区系）通过水池式鱼道的先决条件。

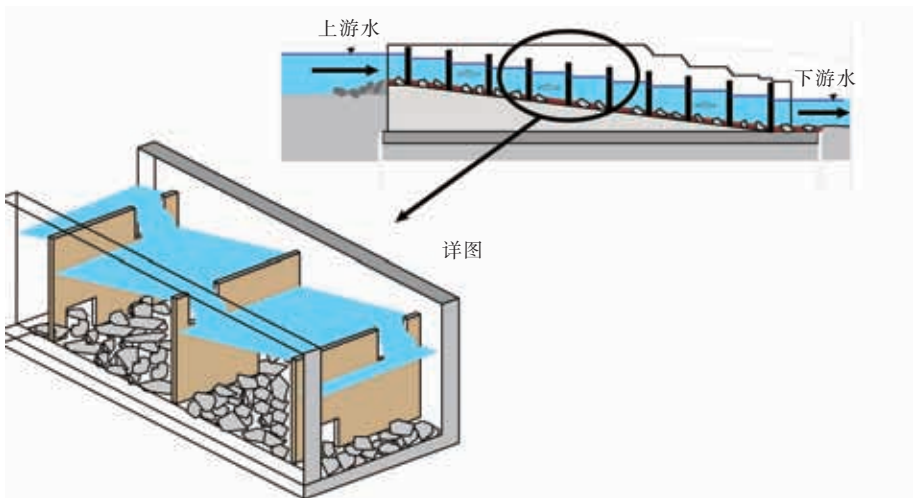


图 5.1 传统水池式鱼道（纵载面与水池结构）（依 Jens 修改并补充，1982）

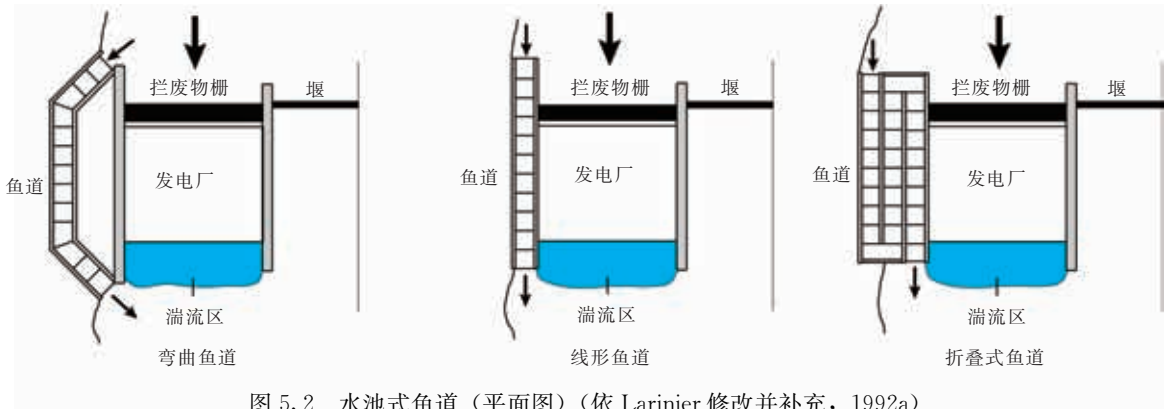


图 5.2 水池式鱼道（平面图）（依 Larinier 修改并补充，1992a）

5.1.2 设计与尺寸

5.1.2.1 平面图

水池式鱼道的结构，从上游到下游通常都是笔直的；然而，弯曲鱼道或向后迂回 180°一次甚至多次的折叠式鱼道（图 5.2）也经常采用，后者的结构一般较短。只要可能，堰或涡轮机出口下面的出水口（鱼道的下游入口）所在位置应不形成死角或死端。这些用来调节鱼道入口相对于堰或涡轮机出口的距离的基本原理与第 3 章中提出的类似。图 5.3 显示了另一种可供选择的水池结构与排列。



图 5.3 在贝尔讷河（下萨克森州）胡德磨坊坝附近用砖建造的、具交错水池的水池式鱼道。该建筑物与过去磨坊总画面非常相配

5.1.2.2 纵截面

各水池间的水位差决定最大流速。因此水池间的水位差是鱼能够通过鱼道难易程度的一个限制因子，在最不利的情况下，水位差（ Δh ）不应超过 0.2m；然而，在正常运转蓄水位时， $\Delta h = 0.15\text{m}$ 的水位差更适合。水池式鱼道的理想坡降由水位差和水池的长度（ l_b ）计算：

$$I = \Delta h / l_b \quad (5.1)$$

式中 l_b 如图 5.4 所示为水池长度；

这样，如果值 l_b 的范围从 1.0~2.25m，则获得的坡降的值为 $I = 1 : 7$ 至 $I = 1 : 15$ 。如果考虑允许水位差，只有缩短水池的长度，才能获得较陡的坡度。然而，这导致水池中的湍流度相当大，应尽可能避免。

由待克服的总水头（ h_{tot} ）和两个水池间允许水位差（ Δh ）获得所需水池数（ n ）（图 5.4）：

$$n = \frac{h_{\text{tot}}}{\Delta h} - 1 \quad (5.2)$$

式中总水头 h_{tot} 由坝上游最高蓄水位（最大高度）和鱼道设计计算所依据的下游最低水位之差获得。

5.1.2.3 水池尺寸

水池式鱼道的渠道一般用混凝土或天然石建造。分隔构件（隔墙或隔板）可用木料或预制混凝土制作。

水池尺寸的选择必须使上溯鱼类有足够的运动空间，并使水中含有的能量随低湍流耗散。另一方面，流速不应降到使水池淤积的程度。为了确保水池流动不是湍流的，不应超过 $150\text{W}/\text{m}^3$ 的容积功率耗散， $200\text{W}/\text{m}^3$ 的容积耗散功率在鲑科鱼类区是允许的（LARINIER, 1992a）。

水池大小的选择必须适合自然鱼类区系的潜势行为特征，并应与洄游鱼类的大小和期望数相适应。表 5.1 给出了各种文献报道的适合于运行鱼道水力设计标准和经验值的水池大小与隔板结构的最小推荐尺寸（关于术语的定义见图 5.5）。较小的水池尺寸适用于较小的水体，较大的值适用于较大的水体。若推荐的水池长度和流量无法实际履行时，就必须考虑其他类型的鱼道。

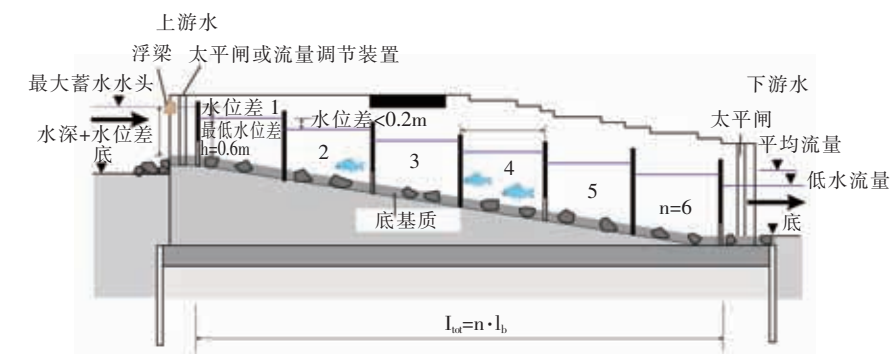


图 5.4 水池式鱼道的纵截面（示意图）

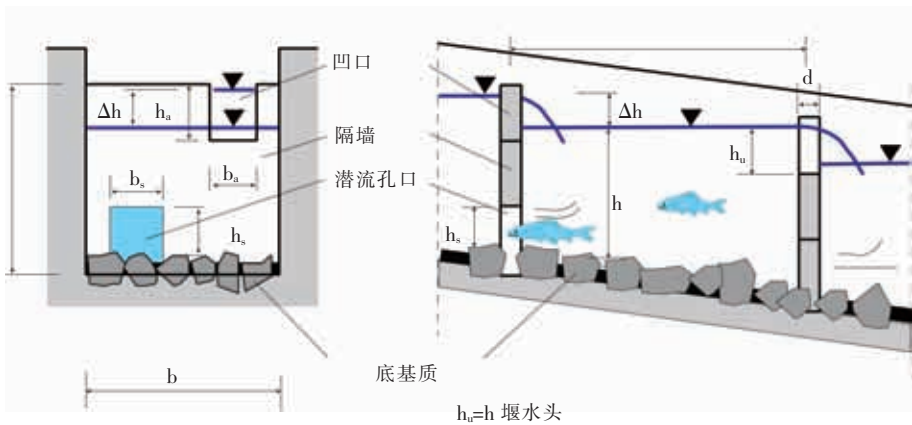


图 5.5 水池式鱼道术语

为了降低水池底附近的流速并使底栖动物（区系）和小鱼上溯较为容易，水池底应是粗糙的。在混凝土凝固前，将石头相互紧靠嵌入混凝土，可产生凹凸不平表面。

5.1.2.4 隔板结构

5.1.2.4.1 传统水池式鱼道

传统水池式鱼道的特点在于垂直的横墙或隔板，这类横墙或隔板竖立，与水池轴垂直（参看图 5.1 和图 5.5），材质可为固体（混凝土或砖石）或木头。木质隔板便于以后的改建，但它们得在数年后更换。

隔板的潜流孔口在底部交错排列（潜流孔尺寸见表 5.1），鱼通过潜流孔口游入下一个水池而上溯。潜流孔口延伸至水池底，因此在铺设底质后，可形成一个连续的粗糙底部。

表孔（凹口）的重要性通常被过高地估计了，因为上溯鱼类总是首先通过游泳来力图溯河洄游，仅在特殊情况下才试图跳过障碍。从表孔出来的溢流水产生的湍流对水池中的水流条件有负面影响。而且，由于上游水位变动，浸没隔板（横墙）在流量最佳化方面引起问题。尽管如此，如果有表孔，为了避免卷流并让鱼游过障碍物，其下缘仍应被下游水池的水位淹没。

表 5.1 给出了孔口和凹口的推荐尺寸。

表 5.1 水池式鱼道的推荐尺寸

待考虑的鱼类种类	水池尺寸 (m) ¹⁾			潜流孔口尺寸 (m)		凹口尺寸 ³⁾ (m)		通过鱼道的流量 ⁴⁾ (m ³ /s)	最大水位差 ⁶⁾ Δh (m)
	长 l _b	宽 b	水深 h	宽 b _s	高 h _s ²⁾	宽 b _a	高 h _a		
鲟 ⁵⁾	5~6	2.5~3	1.5~2	1.5	1	—	—	2.5	0.20
鲑、海鲑、多瑙哲罗鱼	2.5~3	1.6~2	0.8~1.0	0.4~0.5	0.3~0.4	0.3	0.3	0.2~0.5	0.20
茴鱼、圆鳍雅罗鱼、欧鳊、其他鱼	1.4~2	1.0~1.5	0.6~0.8	0.25~0.35	0.25~0.35	0.25	0.25	0.08~0.2	0.20
上鳟区	>1.0	>0.8	>0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05~0.1	0.20

附注：1) 水池尺寸较大，则潜流孔口尺寸亦应较大。2) H_s—孔口在底部衬底以上净高。3) 如计划建造一个既有顶凹口又有潜流孔口的鱼道，应采用较大的水池尺寸。4) 采用节 5.1.3 所示的公式确定 Δh=0.20m 的流量。较低的值与无顶凹口水池的潜流孔口尺寸较小有关；较大的潜流孔口加凹口 (Ψ=0.65) 可获得较高的流量。5) 鲟鱼水池尺寸取自 SNIP (1987)，因为没有关于这种鱼的其他资料。6) 水位差系指水池间的水位差。

一般，只要可能，应避免隔板被淹没，使水仅流经孔口（或表面凹口）。出水口（鱼道入口）处的浸没隔板具有显著负效应，不利于形成充足的导流。

5.1.2.4.2 长菱形鱼道

长菱形鱼道与水池式鱼道的区别在于，隔板与此水池轴倾斜排列并指向下游（参看图 5.6 和图 5.7）。由于连续隔板在其与水道壁的连接时呈交错状，即，一个来自水道的右隔板，一个来自水道的左隔板，每个水池都有一条长边和一条短边，短边的长度不应短于 0.3m，长边的长度应至少为 1.8m，潜流孔口永远设置在隔板的 upstream 端，而表面凹口总是在下游角 (JENS, 1982)。

隔板相对于鱼道底部的倾角约为 60°，和水池轴线（鱼道纵向轴线）之间的夹角在 45°~60°之间。这使得隔板呈非常不规则的形状，长菱形，从而起名“长菱形鱼道”。左、右侧隔板的建造需要单独的模型，因为左、右侧隔板不是十分对称，它们反向倾斜。

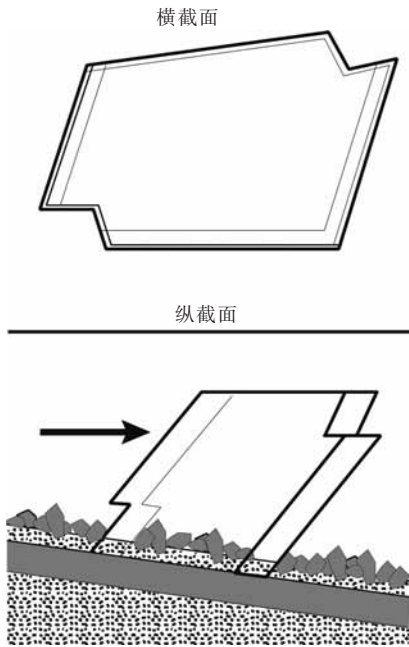


图 5.6 长菱形鱼道隔墙的结构 (依 JENS, 1992)



图 5.7 长菱形鱼道实例（摩泽尔河上的莱赫芒堰，下游水视图）

另外，表 5.1 所示的水池式普通鱼道的水池、孔口及水深的平均尺寸的推荐值同样适用于长菱形鱼道。

这一结构的优点是水池中更良好的流动特征及自净状况改善。倾斜的隔板充当将上溯的鱼引导

到下一个孔口的导向器。

5.1.2.4.3 弓形鱼道

SCHIEMENZ 创制的弓形鱼道是一种特殊形式的水池式鱼道。在这种形式的鱼道中，孔口被设计成加宽的流线型水通道。参看图 5.8（HENSEN 和 SCHIEMENZ, 1980）。同其他水池式鱼道不一样，孔口不是相互偏置的，而是排成一条线。在水力模型实验中，通道的形状被最佳化到实际在水池中不形成旋涡涡流或巨浪。由此在水池形成的流动总是定向的，这使鱼容易通过鱼道找到其路线。

弓形鱼道要求较长的水池，并仅允许水池间 $\Delta h=0.14\text{m}$ 的小水位差。因此弓形鱼道只有在下列条件下才是适合的：

- 必须克服的水头较低及
- 有足够的空间建造这么长的建筑物。

建造弓形鱼道的经验表明，它们也适合于弱游泳者的鱼类种类。如果加入的底凹凸不平，这种鱼道也能确保底栖动物（区系）通过。这类鱼道的主要缺点是所需要的空间广阔及流线型通道孔口形状的技术要求高。

5.1.3 水力设计

如果水池式鱼道要正常运行，下列参数至关重要，必须予以考虑：

- 孔口中的流速不应超过 $v_{\max}=2.0\text{m/s}$ 的阈值；
- 鱼道的流量及
- 容积耗散功率一般不应超过 $E=150\text{W/m}^3$ ，或在鲑科鱼类区内 $E=200\text{W/m}^3$ ，以保证水池中的低湍流度流动。

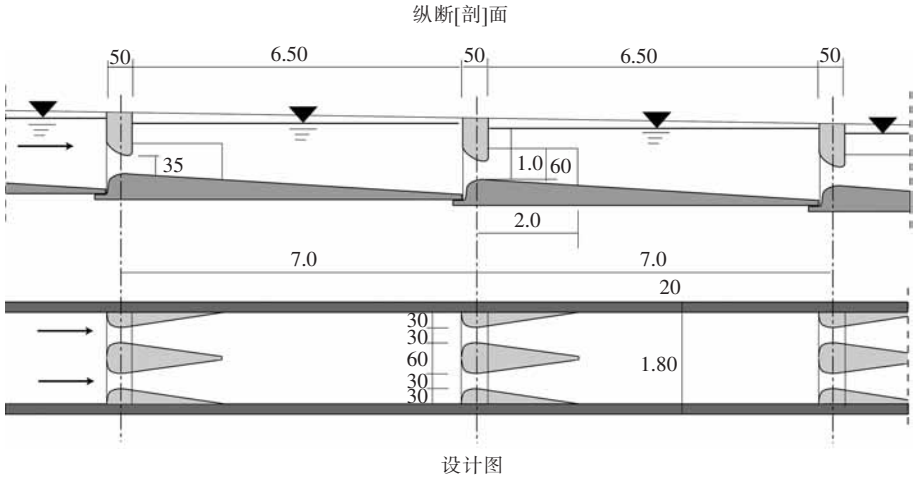


图 5.8 易北河上盖斯特哈赫特坝旁弓形鱼道的水池结构与尺寸（单位用 m 或 cm）（依 HENSEN 和 SCHIEMENZ, 1960）。另一个弓形鱼道可在上阿勒尔河上的吉夫霍恩中找到。该弓形鱼道小，宽 0.75m，仅有一个 25cm×25cm 的中心潜流孔口

最大流速发生在孔口内并可由 (5.3) 式计算

$$v_s = \sqrt{2g\Delta h} \tag{5.3}$$

如考虑上限 $v_{\max}=2.0\text{m/s}$ ，方程 (5.3) 给出了 $\Delta h=0.2\text{m}$ 隔板处的允许水位差。

方程

$$Q_s = \phi A_s \sqrt{2g\Delta h} \tag{5.4}$$

式中 $A_s=h_s b_s$ （关于术语见图 5.5）

应被用来确定孔口中的流量。流量系数受孔口结构和底部基质的影响，并可估计为 $\phi=0.65\sim 0.85$ 。

顶凹口上通过的流量可由 (5.5) 式计算

$$Q_a = \frac{2}{3} \mu \sigma b_a \sqrt{2g} h_{\text{weirhead}}^{3/2} \quad (5.5)$$

式中 h_{weirhead} 是上游水和下游水之间的水位差，参看图 5.5。

μ 是流量系数 ($\mu \approx 0.6$),

σ 是淹没流衰减系数

依 Larinier (1992a)。表达下游各水池下游水的影响的淹没流衰减系数 σ 可由 (5.6) 式计算。

$$\sigma = \left[1 - \left[1 - \frac{\Delta h}{h_{\text{weirhead}}} \right]^{1.5} \right] 2^{0.385} \quad (5.6)$$

(5.6) 式适应于 $0 \leq \frac{\Delta h}{h_{\text{weirhead}}} \leq 1$ 的情况，对于 $\Delta h > h_{\text{weirhead}}$ ，则有 $\sigma = 1$ 。

方程 (5.4) 和方程 (5.5) 中的溢流系数与流量系数仅为近似值，因为它们取决于孔口的形状。如果需要，应更精确地测定之。

来自顶凹口水流的最大速度同样可由方程 (5.3) 计算。为确保水池内的低湍流度流动和充分的能量耗散，容积耗散功率不应超过 $E = 150 \sim 200 \text{ W/m}^3$ 。功率密度可由方程 (5.7) 计算。

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{b h_m (l_b - d)} \quad (5.7)$$

式中必须引入总流量 $Q = Q_s + Q_a$ 代替 Q 。在弓形鱼道的水力设计计算中必须考虑一些单位的特征。水池中的不完全能量转换使得这些非常必要，应在专业文献中查找 (HENSEN 与 SCHIEMENZ, 1960)。

传统水池式鱼道计算实例

拟进行坝旁水池式普通鱼道的计算。上、下游水位差波动于 $h_{\text{tot}} = 1.6 \text{ m}$ 和 $h_{\text{tot}} = 1.2 \text{ m}$ 之间是针对必须用作设计基础的流量而言的，参看图 5.10。易北河属河流，具典型的河流鱼类区系 (圆鳍雅罗鱼、欧鳊等)，鱼道设计并未考虑海鲢或鲑等大型鲑科鱼类。

从表 5.1 选择的水池尺寸如下：

水池宽 $b = 1.4 \text{ m}$

最小水深 $h = 0.6 \text{ m}$

如图 5.9 所示，采用江蛮石，使水池底表面凹凸不平。隔板拟仅有底孔，孔的净宽度 $b_s = h_s = 0.3 \text{ m}$ ，参看图 5.9。未设计顶凹口。

最高水位差不应超过 $\Delta h_{\text{max}} = 0.2 \text{ m}$ ，根据方程 (5.2)，所需水池数为

$$n = \frac{h_{\text{tot}}}{\Delta h} - 1 = \frac{1.6}{0.2} - 1 = 7 \text{ 个水池}$$

由于下游水位较高，水位差降至

$$\Delta h_{\text{min}} = \frac{1.2}{8} = 0.15 \text{ m}$$

根据方程 (5.3)，计算 $\Delta h = 0.2 \text{ m}$ 时孔口中的流速 (低水状态) 为

$$V_s = \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.2} = 1.98 \text{ m/s}$$

$\Delta h = 0.15 \text{ m}$ 时的流速为

$$V_s = \sqrt{19.62 \cdot 0.15} = 1.71 \text{ m/s};$$

孔口中的流速于是总是低于允许最大流速

$$v_{\text{max}} = 2.0 \text{ m/s}.$$

根据方程 (5.4)，假定系数 $\Psi = 0.75$ ，低水位时，流量等于

$$Q_{s, \text{max}} = \Psi A_s \sqrt{2g \Delta h} = 0.75 \cdot 0.3^2 \cdot 1.98 = 0.134 \text{ m}^3/\text{s}$$

在下游水位较高时，跌至

$$Q_{s, \text{min}} = 0.75 \cdot 0.3^2 \cdot 1.71 = 0.115 \text{ m}^3/\text{s}$$

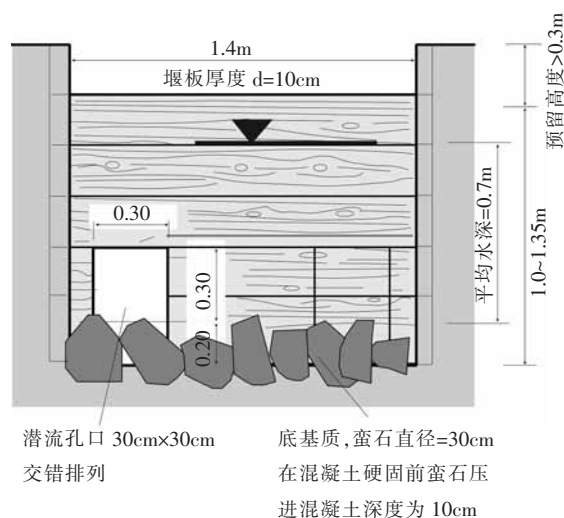


图 5.9 水池的横截面

根据方程 (5.7) (式中 $E=150\text{W}/\text{m}^3$) 得出, 在最低平均水深为

$$h_m = h + \Delta h / 2 = 0.6 + 0.2 / 2 = 0.7\text{m}$$

在板厚为 $d=0.1\text{m}$ 时, 要在流经的水池中产生低湍流度流动, 要求水池长度为

$$(l_b - d) = \frac{\rho g \Delta h Q}{E b h_m} = \frac{9.81 \cdot 1\,000 \cdot 0.134 \cdot 0.20}{150 \cdot 1.40 \cdot 0.7}$$

$$\rightarrow l_b = 1.89 \approx 1.90\text{m}$$

图 5.10 显示了纵截面。在水深为 1.0m , 底衬层为 20cm , $\Delta h=0.15\text{m}$ 时, 下游隔板的高度为:

$$h_w = 1.0 + 0.20 + 0.15 = 1.35\text{m}$$

上游隔板的高度为:

$$h_w = 0.8 + 0.20 = 1.0\text{m}$$

中间隔板的高度为每道隔板降低 5cm 。

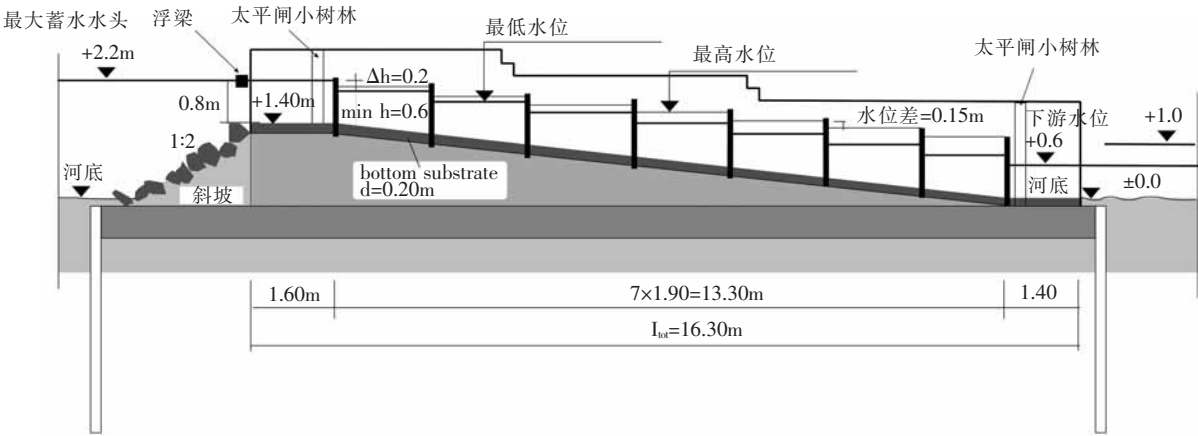


图 5.10 水池式鱼道的纵截面 (伴有计算实例的示意图)

5.1.4 总体评价

水池鱼道是最古老类型的鱼道之一, 并且在适当的设计、布局和维护条件下, 可证明它们的价值。水池鱼道的过鱼类型不但包括游泳能力强的鱼类, 还包括底层鱼类和小型鱼类。在水池鱼道中, 建造连续粗糙的底部可以为底层鱼类种群上溯通过提供机会。

无论对于一般的孔口尺寸还是不同的水位差条件, 水池鱼道所需的均是相对较低的流量 ($0.05 \sim 0.5\text{m}^3/\text{s}$), 这是它有利方面。

另一方面, 由于存在碎屑阻塞孔口的风险, 因此其较高的维护需求也是其不利的方面。实践证明, 仅仅由于碎屑阻塞, 许多水池鱼道在大部分时间不能发挥作用。因此, 水池鱼道需要至少每周做定期的维护和清洁。

5.1.5 实例

位于科布伦茨的水池式鱼道	
水坝详情	鱼道详情
河流：摩泽尔河，莱茵兰-法尔茨州	池宽： $b=1.80\text{m}$
用途：水力发电、航运	池长： $l_b\approx 2.60\text{m}$
流量：低水流量 $_{1971/80}=20\text{m}^3/\text{s}$	水池数： $n=24$
平均流量 $_{1931/90}=313\text{m}^3/\text{s}$	水深： $h=1.0\text{m}$
高水流量 $_{1993}=4165\text{m}^3/\text{s}$	总长： $l_{\text{tot}}=102\text{m}$
降落水头： $h_F=5.30\text{m}$	坡降： $I\approx 1:12$
建造年份：1945—1954	隔板：具顶凹口和底孔口（ $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ ）
负责单位：联邦水道管理局摩泽尔水电公司	的混凝土墙



图 5.11 科布伦茨/摩泽尔鱼道（下游水视图）。该坝的鱼道位于摩泽尔右岸水电站旁，于 1951 年投入运行。GENNERICH（1957）、PELZ（1985）和其他人检查了该鱼道的运行。虽然大量的鱼能够通过该鱼道，但在靠近涡轮机出口附近捕获的鱼多得多，显然是因为它们找不到鱼道的入口。试验表明，鱼道入口和涡轮机出口的距离约为 45m，这是因为鱼道太长，约 102m，应是问题所在。

位于达赫尔的水池式鱼道	
水坝详情	鱼道详情
河流：利珀河，99km，北莱茵-威斯特伐利亚州 流量：平均低水流量=12.3m ³ /s 平均流量：32.3m ³ /s 平均高水流量：179m ³ /s 类型：块石坡 阶高：h _{tot} =2.6m 负责单位：多特蒙德利珀联合会	宽度：b=1.0m 总长：l _{tot} =46.0m 坡降：I=1:11~1:24 构造特征：具底孔口和顶凹口的预制混凝土部件 建造年份：1985
构造描述 在最上游的最下端，底槛已被改造成粗糙的石坡。该鱼道已由左岸整合入底坡；使用有凹槽的混凝土预制部件建造鱼道，将隔板插入凹槽。隔板具有 25cm×25cm 的底孔口和顶凹口。 运行信息 Ruppeit 和 Späh（1992）的监测和对鱼的计数证明，鱼能通过该鱼道。然而，由于混凝土底光滑，底栖无脊椎动物几乎不能上溯。	
 	
图 5.12 达赫尔水池式鱼道（投入运行前不久） 图 5.13 运行中的达赫尔水池式鱼道（下游水视图）	

5.2 狭槽鱼道

5.2.1 原理

狭槽鱼道，或垂直狭槽鱼道，是北美研发的，而且自 20 世纪中叶以来一直在那里被广泛使用 (CLAY, 1961, BELL, 1973; RAJARATNAM 等, 1986)。这类结构在过去的几年中在德国的使用也与日俱增。

狭槽鱼道是水池式鱼道的一种变体，在这种鱼道中，隔板被狭槽弄开一个凹口，凹口的高度正好等于隔板的整个高度，见图 5.14。横墙可能有一或二个狭槽，视水体的大小和可用的流量而定。在一个狭槽的构造中，狭槽总是在同一侧（与孔口在两侧交错排列的水池式普通鱼道形成对照）。

5.2.2 设计与尺寸

5.2.2.1 平面图

水池式普通鱼道的原理同样适用于狭槽鱼道的正确定位及其入口在坝旁的定位。

5.2.2.2 纵截面

狭槽鱼道的纵截面与节 5.1 描述的水池式普通鱼道的纵截面一致，可参见图 5.18 及 5.23。

关于鱼道入口和出口的高程及水深请见 5.2.3 节。

5.2.2.3 水池的尺寸

狭槽的宽度和狭槽的数量（一个或两个）及由此产生的流量一一决定水池尺寸。正如水池式鱼道的情形一样，只有水池的大小确保容积功率耗散 $E < 200 \text{ W/m}^3$ 时，才能实现水池中的低湍流度流动 (LARINIER, 1992a)。表 5.2 中的水池尺寸已经由实验室实验和现场试验证实其适用性 (KATAPODIS, 1990; GEBLER, 1991; LARINIER, 1992a)。有关术语，读者可参看图 5.16。引用的尺寸适用于有一个狭槽的狭槽鱼道。如设计两个狭槽，水池的宽度应相应加倍，使狭槽对面的边墙成为对称轴。

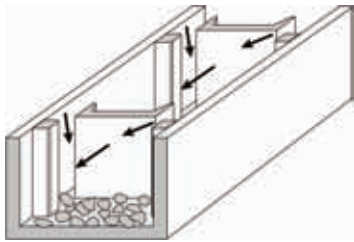


图 5.14 具两个狭槽的狭槽鱼道的实例（示意图）



图 5.15 多尔多涅河（法国）上的贝尔杰拉克堰旁的狭槽鱼道 ($h_{\text{tot}} = 4.0 \text{ m}$, $b = 6.0 \text{ m}$, $l_b = 4.5 \text{ m}$, $l_{\text{tot}} = 73 \text{ m}$, $Q = 2.2 \sim 7 \text{ m}^3/\text{s}$, 通过旁路水道的补充流量 $0 \sim 6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。建造年份, 1984 年)。这类结构证明对大型鲑科鱼类和有经济意义的西鲱 (*Alosa alosa*) 及鲤科鱼类都适合

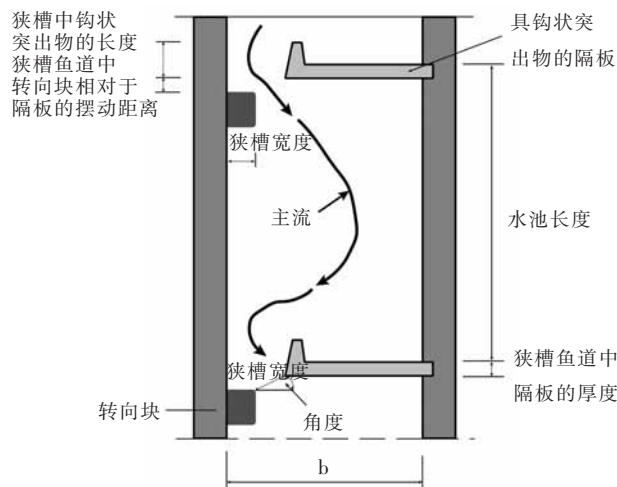


图 5.16 仅有一个狭槽的狭槽鱼道的尺寸和术语（平面图）

根据 GEBLER (1991), 狭槽宽度为 $s=0.15\sim0.17\text{m}$ 的狭槽鱼道的最小尺寸应为 $l_b=1.9\text{m}$ 和 $b=1.2\text{m}$ 。

5.2.2.4 结构特点

狭槽鱼道的最重要特点是其狭槽宽度 (s)，必须根据现有的鱼类区系和可用的流量选择狭槽宽度 (见表 5.2)。对于鳟、茴鱼、鲤科鱼类和小鱼， $s=0.15\sim0.17\text{m}$ 的狭槽宽度就够了。如要容纳大型鲑科鱼类 (例如鲑、海鳟和多瑙哲罗鱼)，并且在流量相应高的较大河流中，根据表 5.3，推荐狭槽宽度为 $0.3\sim0.6\text{m}$ ，水池尺寸也相应较大。然而，在个别情况下，例如，如可用流量低于设计所需流量， $s=0.2\text{m}$ 的狭槽宽度也足够了。如与表 5.2 所示的值比较，要改变狭槽宽度，则必须考虑对水池中流动状态的可能影响。

对隔板形状的要求是，不形成从狭槽到狭槽直线通过水池的短路流，而是形成利用整个水池容积进行低湍流能量转换的、自身回卷的主流。将在狭槽孔前的区域具有转向作用的钩状凸出物插入隔板，促进这种水流状态。隔板壁上的狭槽边界有一个交错状的转向块。转向块相对于隔板而摆动的距离“ a ”，产生了受角 α 偏转的、将主流引向水池中心的狭槽流。根据 GEBLER (1991)，在较小的鱼道中，应以所形成的角至少为 20° 来选择距离“ a ”。在狭槽宽度较大的鱼道中，建议角应较大，角 $\alpha=30^\circ\sim45^\circ$ 之间 (LARINIER, 1992A, RAJARATNAM, 1986)。表 5.2 显示了横墙设计的推荐值。相关术语可在图 5.16 中找到。

由模型和野外试验证明，如不遵守推荐值，就不能保证水池中所要求的水流状态。

表 5.2 仅有一个狭槽的狭槽鱼道的最小尺寸 (m)
(根据 GEBLER, 1991, 和 LARINIER, 1992a)

待考虑的鱼类区系	茴鱼、欧鳊、圆鳍雅罗鱼		鲟
	鳟	鲑、海鳟、多瑙哲罗鱼	
狭槽宽度 s	0.15~0.17	0.30	0.60
水池宽度 b	1.20	1.80	3.00
水池长度 l_b	1.90	2.75~3.00	5.00
凸出物长度 c	0.16	0.18	0.40
摆动距离 a	0.06~0.10	0.14	0.30
转向块宽度 f	0.16	0.40	0.84
水位差 h	0.20	0.20	0.20
最小水深 $h_{\min}$	0.50	0.75	1.30
要求的流量 ¹ Q (m^3/s)	0.14~0.16	0.41	1.40

¹ $\Delta h=0.20\text{m}$ 和 $h_{\min}$ 时计算的流量。

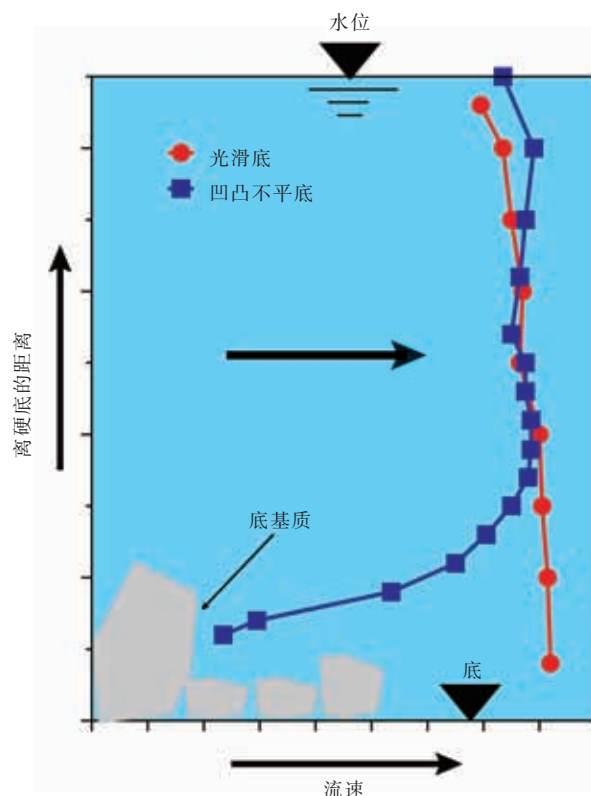


图 5.17 狭槽中的流速分布，光滑底与凹凸不平底间的比较（依 GEBLER，1991）

混凝土预制构件和/或木料是建造横墙（隔板）的适宜建筑材料。由于施工对木质隔板的要求，需要固定在混凝土底中的框架或钢制托架作为支座。以一小块方木的形式，将转向块立着放，固定在隔板上，安装可能很容易。隔板或作为真正的铅垂面或与底垂直进行安装。

隔板必须足够高，在平均流量时，水不至于在隔板上溢流。

5.2.2.5 底部基质

狭槽鱼道使贯穿整个鱼梯的无间断底部基质的形成成为可能。用于鱼道底的材料平均粒径必须至少为 $d_{50}=60\text{mm}$ 。只要可能，材料就应与天然底基质相同。底层最小厚度约为 0.2m 。宜在混凝土凝固前，将能形成支撑结构的几块大石头嵌入混凝土，而细小的基质则可随意添加。

底部基质除便于底栖动物（区系）上溯外，还极大地降低了底附近及狭槽中的流速。图 5.17 显示，流速极大地下降主要可归因于大石头的作用。这些保护区使游泳能力低的种类如泥鳅、鳕或杜父鱼通过鱼道向上迁移成为可能。

重要的是保证鱼道底部基质与水流底部基质相连。如果鱼道底高于河底，鱼道底应用填石与河底相连。

5.2.3 水力计算

在所有运行条件下，都应监测下列指标：

- 水深；
- 狭槽中的流速（临界值）；
- 流量；
- 水池能量耗散的功率密度。

由底部基质的平均高度确定的隔板正下方的水应足够深，以防止狭槽中产生对冲水流。这可由下列条件来保证：

$$h_u > h_{gr} \text{ 或} \quad (5.8)$$

$$V_{\max} > V_{gr} \quad (5.8a)$$

$$\text{式中 } h_{gr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gs^2}} \quad (5.8b)$$

$$V_{max} = \sqrt{2g\Delta h} \quad (5.8c)$$

$$V_{gr} = \sqrt{gh_{gr}} \quad (5.8d)$$

$\Delta h=0.20\text{m}$ 时的最低水深（在狭槽正下方测量的）约为 $h_u=h_{min}=0.5\text{m}$ 。建议采用下面的措施来保证所有运行条件下的这一深度（参看图 5.18）。

- 最低上游水位是决定入水口（鱼道出口）处底部高度的关键性因子。第一水池（来自上游的）前的基质表面处于由上游水位减（ $h_{min}+\Delta h$ ）来确定的高度。

- 低水位（NW），一年的大部分时间的最低水位（可能除了几天以外），决定下游水位。下游最后一个水池底部基质表面的高度（出水口/鱼道入口）应确定到 $NW-h_{min}$ （低水位—最低水深）。

在这样的上、下游水位，所有水池中的水深是一样的，整个鱼道两个连续水池间的水位差是一样的。这一假定对于最高上游水位恒定的蓄水是最坏的情况。所需要的水池数 n 由方程 5.2 求出

$$n = \frac{h_{tot}}{\Delta h} - 1 \quad (5.2)$$

式中 $\Delta h \leq 0.20\text{m}$ 应再次被用作水位差的上限。

最大流速发生在狭槽中并与最大水位差 Δh 相关

$$V_s = \sqrt{2g\Delta h} \quad (5.3)$$

狭槽鱼道中的流量由狭槽中的水力条件来确定，并可用方程（5.9）来估计：

$$Q = \frac{2}{3} \mu_r s \sqrt{2gh_o}^{3/2} \quad (5.9)$$

式中 $\mu_r = f(h_u/h_o)$ ，如图 5.22 所示。

系数 μ_r 由实验室的实验结果（RAJARATNAM, 1986 和 GEBLER, 1991）和野外测量（KRÜGER, 1993）来确定。该系数可由图 5.22 确定。这里，适用范围为 $s=0.12\sim0.30\text{m}$ ， $h_u=0.35\sim3.0\text{m}$ 及 $\Delta h=0.01\sim0.30\text{m}$ 。如果要使用较大的狭槽尺寸，建议进行水工模型试验以决定系数。

方程 5.9 已用于构建狭槽宽度 $s=17\text{cm}$ 、 $\Delta h=0.20\text{m}$ 和 $\Delta h=0.15\text{m}$ 的图 5.21。因此可直接读出这些情形的流量。

如考虑不同的上游水位和下游水位，例如，如下游水池因下游水位导致之回水面有较大水深，或如有不同的上游水位（例如在固定堰或坝上），则流量的计算更复杂。在上述情况下，在隔板处则有非常不同的水深，导致变动的水位差，堪与坝充水线或水面降落线相比。流量的计算必须经由下列步骤的迭代：首先，流量必须通过假定最上游（第一个）隔板处的平均水位差来估计。采用这一估计流量，可逐步由下游最后一个隔板求出每个隔板的上游水深。这一计算也可只通过迭代来求解，因为 μ_r 是 h_u/h_o 的一个函数。如果流量的估计值正确，则第一个（上游处）隔板处的计算值必定与上游水位相符合。如果不是这样，就应采用不同的估计流量重复计算。

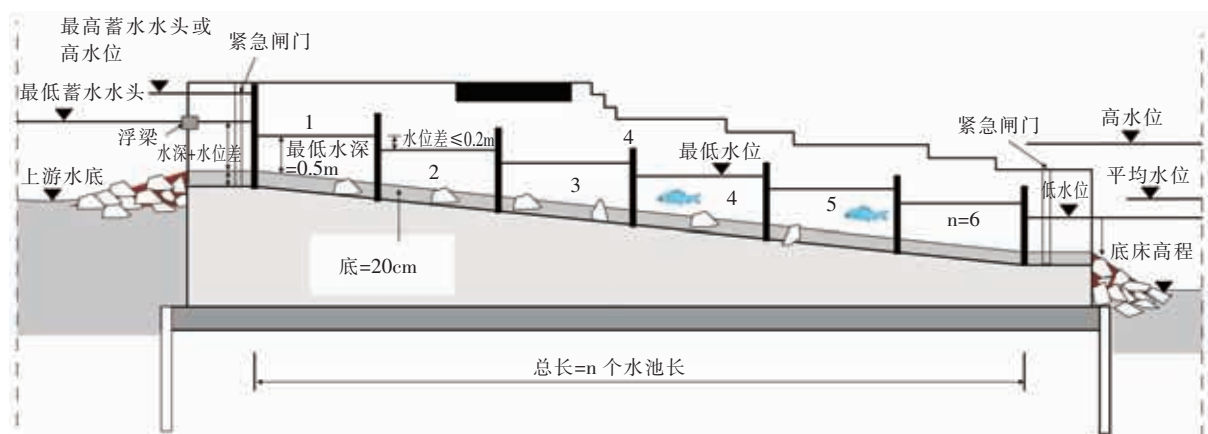


图 5.18 狭槽鱼道的纵截面（示意图）

为了确保水池中的低湍流度水流，水池中容积耗散功率的功率密度不应超过 LARINIER (1992a) 给出的 $E=200\text{W}/\text{m}^3$ 的上限值。容积耗散功率由 (5.7) 式给出。

$$E \approx \frac{\rho g \Delta h Q}{b h_m (l_b - d)} \tag{5.7}$$

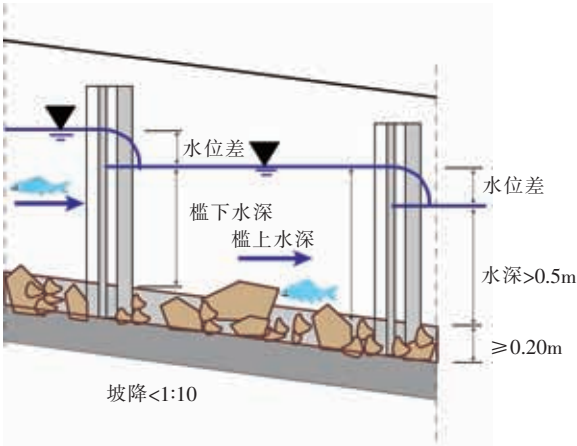


图 5.19 狭槽鱼道详图（纵截面示意图）



图 5.20 狭槽鱼道中的狭槽流。水流必须从狭槽沿对角线形成，防止水池中的短路流（下普赫尔河坝/下施普雷瓦尔德）

狭槽鱼道的计算实例

拟给一个堰装配狭槽鱼道。上游水位变动于 61.95m（夏季上游水位）和 62.10m（冬季上游水位）之间。相关下游低水位是 60.60m，河道底部水位在 60.00m 处，下游鱼道底应处于与河底相同的高度。设计狭槽鱼道时毋需考虑大型鲑科鱼类。

应测定最低上游水位和最高上游水位时鱼道中的流量、流速和湍流状态。

根据表 5.2，选择尺寸如下：

- 狭槽宽度： $s=0.17\text{m}$
- 水池长度： $l_b=1.90\text{m}$
- 水池宽度： $b=1.40\text{m}$

图 5.24 显示了设施（即隔板）结构的一个提案。

在上游和下游间的最大水位差为 $h_{\text{tot}}=62.1-60.6=1.5\text{m}$ 和允许水位差 $\Delta h=0.2\text{m}$ （表 5.2）时，待建造的水池数由方程 (5.2) 计算：

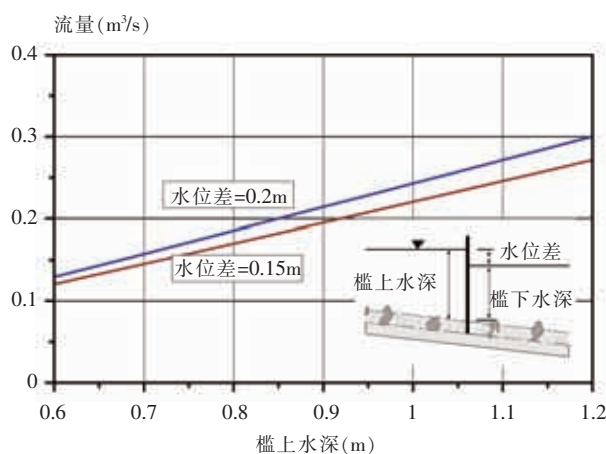


图 5.21 狭槽宽度为 $s=17\text{cm}$ 的狭槽鱼道中的流量

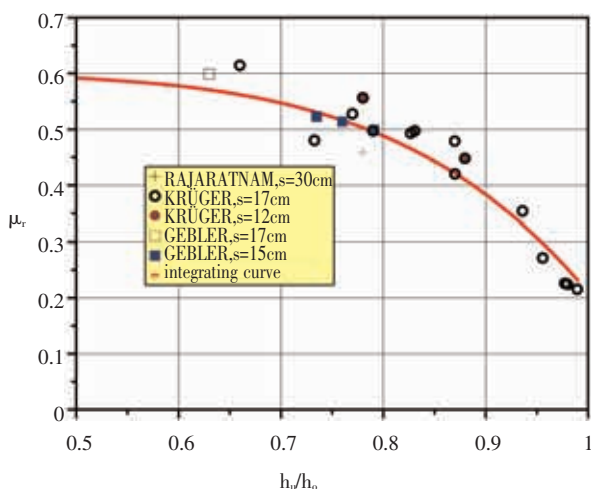


图 5.22 锐缘狭槽边界的方程 (5.9) 中的流量系数 $\mu_r = f(h_u/h_0)$

$$n = \frac{h_{\text{tot}}}{\Delta h} - 1 = \frac{1.5}{0.2} - 1 = 6.5 \approx 7 \text{ 个水池}$$

然而，接着的计算表明，如要不超过高的上游水位（冬季水位）时所允许的水位差，至少需要 8 个水池，即 9 个隔板。

因此，鱼道的总长，包括一个前室和一个后室（每个长 1.0m）为

$$l_{\text{tot}} = 8 \cdot 1.90 + 2 \cdot 10 = 17.20\text{m}$$

水池有一层 0.2m 厚的底基质。为了在较低的上游水位时在所有水池中获得相同的流动状态，选择鱼道中最低水深为 $h=0.60\text{m}$ ，而上游水和下游水的总水位差是由所有隔板均分的。由

$$\text{最低 } h_{\text{tot}} = 61.95 - 60.6 = 1.35\text{m}$$

$$\text{及 } \Delta h = 1.35 \div 9 = 0.15\text{m}$$

上游水侧入水口（鱼道出口）的底质上缘高程为：

$$Z_{\text{c, 基质}} = 61.95 - (0.6 + 0.15) = 61.2\text{m}$$

而上游水入口（鱼道底出口）中鱼道硬底的高度成为：

$$z_{\text{c, 底}} = 61.2 - 0.2 = 61.0\text{m}$$

在低的上游水位，每一个隔板处出现相同的水位差和水深。于是狭槽中的最大流速为

$$v_s = \sqrt{2g\Delta h} = \sqrt{19.62 \cdot 0.15} = 1.72\text{m/s} < \text{允许 } v_s = 2.0\text{m/s}$$

由图 5.21 可读出 $h_0 = 0.75\text{m}$ 及 $\Delta h = 0.15\text{m}$ 时的近似值 $Q = 0.16\text{m}^3/\text{s}$ ，并可通过详细计算证实：

$$h_0 = 0.75\text{m}, h_u = 0.6\text{m}$$

$$h_u/h_0 = 0.6/0.75 = 0.80$$

由图 5.22 可得 $\mu_r = 0.49$

$$Q = \frac{2}{3} \mu_r s \sqrt{2gh_0}^{3/2} = \frac{2}{3} 0.49 \cdot 0.17 \sqrt{19.62 \cdot 0.75}^{3/2} = 0.16\text{m}^3/\text{s}$$

计算容积耗散功率以检验水池中的湍流状态。如计算所示，由于

$$h_m = h_u + \Delta h/2 = 0.6 + 0.15/2 = 0.675$$

$$\begin{aligned} \text{且 } E_{\text{vorh}} &= \frac{\rho g \Delta h Q}{b h_m (l_b - d)} \\ &= \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 0.160 \cdot 0.15}{1.40 \cdot 0.675 \cdot (1.90 \cdot 0.7)} = 138\text{W/m}^3 \end{aligned}$$

未超过 $E = 200\text{W/m}^3$ 的上限值。

在上游水位较高时，应根据以下演算法，通过迭代来进行流量计算。

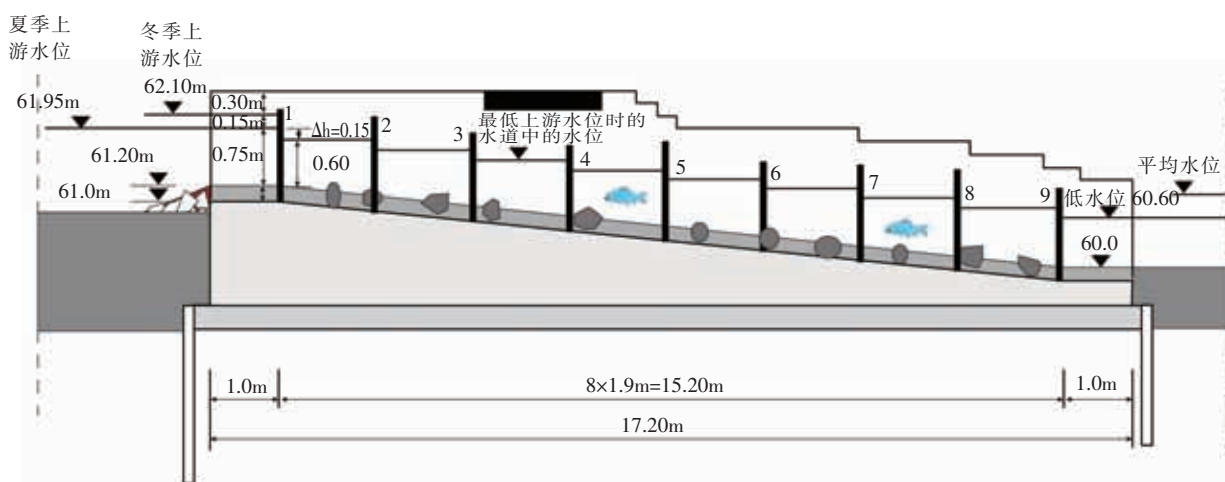


图 5.23 计算实例的示意图（狭槽鱼道的纵截面）

表 5.3 高上游水位时的水位与流速

隔板		1	2	3	4	5	6	7	8	9
鱼道底板 海拔高度		61.20	61.05	60.90	60.75	60.60	60.45	60.30	60.15	60.00
h _u （m）		0.75	0.75	0.75	0.75	0.73	0.72	0.70	0.66	0.60
h _o （m）		0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87	0.85	0.81
Δh（m）		0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.19	0.21
V _s （m/s）		1.72	0.72	1.72	1.77	1.77	1.77	1.83	1.93	2.03 临界！
水池中的 水位	上游水位 =62.10	61.95	61.80	61.65	61.49	61.33	61.17	61.00	60.81	下游水位 =60.60

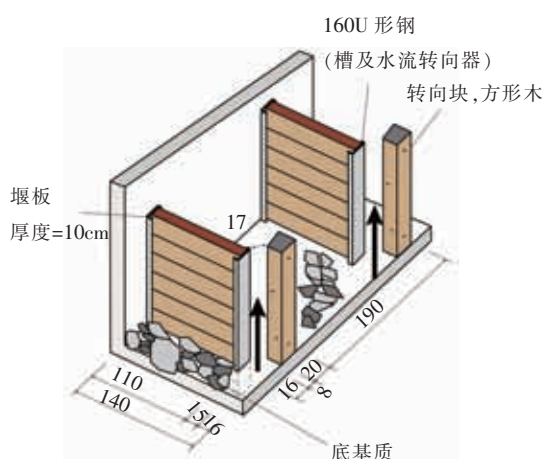


图 5.24 拟采用的狭槽鱼道隔板结构。堰板安装在两侧呈 U 形，而中心钢材截面同时具有钩状凸出物导流的功能。因此，中心钢材截面的宽度应较大 ($b=16\text{cm}$) (根据 KRÜGER 等, 1994b)

检验计算表明，对于高的上游水位，在第一个隔板处 $\Delta h_1=0.15\text{m}$ ，从而

$$h_{o,1}=0.90\text{m 及 } h_{u,1}=0.75\text{m}$$

$$h_{u,1}/h_{o,1}=0.75/0.9=0.833, \text{ 假定 } \mu_r=0.46,$$

可计算流量

$$Q=\frac{2}{3}0.46 \cdot 0.17 \sqrt{19 \cdot 62 \cdot 0.9^{3/2}}=0.197\text{m}^3/\text{s}$$

由于流量取决于 h_o ，而系数 μ_r 取决于 h_u/h_o ，不可能有直接解，因而只能通过迭代求出与水池中的这一流量相对应的水位。为此，估计了第一道隔板处的 Δh ，从而确定了 μ_r ；然后用方程 5.9 计算流量 Q 时的槛上水深（见图 5.21）。迭代的结果示于表 5.3。

湍流状态仅需计算最下游水池，因为这是最高水位差出现处。由于 $h_m = (0.81+0.66)/2 = 0.735$ ，第 8 个水池中的容积耗散功率为

$$E_{\text{vorh}} = \frac{\rho g Q \Delta h_8}{b h_m (l_b - d)} = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 0.197 \cdot 0.19}{1.40 \cdot 0.735 \cdot (1.90 - 0.1)} \\ = 198\text{W/m}^3 < E_{\text{允许}} = 200\text{W/m}^3$$

这正好小于允许 $E=200\text{W/m}^3$ 。

计算显示，对于高上游水位，较低隔板处已出现临界流速 $v \approx 2\text{m/s}$ ，这就是设置 8 个而不是 7 个水池的原因。如果仅有 7 个水池，在较低隔板处将产生最大流速 $v_s = 2.17\text{m/s}$ 。这个例子显示，变动特别大的上游水位应仔细测试狭槽水道中的水力状况，以免错误确定狭槽鱼道的尺寸。

5.2.4 总体评价

狭槽鱼道（垂直狭槽鱼道）非常适合于确保弱游泳者的鱼类种类和小鱼的上溯。

其他优点是：

- 其深度等于隔板整个高度的垂直孔口适合于底栖鱼类和开阔水域的鱼类的游泳行为。
- 狭槽底附近的流速下降亦允许弱游泳鱼上溯。对此的先决条件是设置一层有若干较大抗扰动蛮石的底基质。
- 甚至对于变动的上游水位也适用。
- 对下游水位的变动不敏感。
- 如果底基质具有无间断的填隙式空间，底栖无脊椎动物（区系）亦能洄游。
- 由于孔口垂直深度等于隔板整个高度，狭槽鱼道比之于传统鱼道结构不易堵塞。流量横截面的部分堵塞不引起功能的完全丧失。
- 这类构造既适用于流量低的小溪，也适用于较大的河流。
- 狭槽鱼道能应付超过 100L/s 到几 m^3/s 的流量。

鉴于这些优点，应选择狭槽鱼道而非水池式普通鱼道。现在经验表明，对狭槽鱼道的喜爱应胜于其他技术性鱼道。

5.2.5 实例

新吕伯瑙狭槽鱼道	
底阶详情	鱼道详情
水流：施普雷河，离下施普雷瓦尔德（勃兰登堡）165.3km 流量：平均流量=5.5m³/s 平均低水流量=1.5m³/s 建造年份：1992 功能：堰	坝高： $h_{tot}=1.2\sim1.4\text{m}$ 狭槽宽度： $s=0.17\text{m}$ 水池数： $n=9$ 水池宽度： $b=1.0$ 和 1.4m 水池长度： $l_b=1.6\sim1.9\text{m}$ 总长度： $l_{tot}=19.2\text{m}$
设计结构 除了由于施工原因上部3个水池宽度减小（$b=1.0\text{m}$）外，水池尺寸 $b=1.4\text{m}$ 和 $l_b=1.9\text{m}$。与图 5.24 类似，隔板用 10cm 厚的隔墙板制作，固定在垂直钢支架中的两侧（U 形）。转向块为暗榫垂直接合于边墙的方形木块。 鱼道位于堰和船闸之间，几乎在江心，一般认为这是不利的。最初担心鱼很难找到鱼道入口，但这未被证实，尽管施普雷河窄（15m）可能是避免失败的真正决定因子，然而位于施普雷河左岸肯定要好一些。遗憾的是，鱼道底部仅放入几块大的抗扰动蛮石，而这几块蛮石不可能代替底部无间断的、凹凸不平基质。 鱼计数的调查证实鱼道运行良好。上溯鱼的数量相当可观，即在 1993 年和 1994 年 4/5 月期间超过 10 000 尾，高峰期每天超过 1 800 尾鱼（KRÜGER 等，1994b）。	
图 5.25 新吕伯瑙/下施普雷瓦尔德附近施普雷坝旁的狭槽鱼道（下游水视图）	

5.3 丹尼尔鱼道

5.3.1 原理

大约在 19 世纪末，比利时工程师格·丹尼尔（G. Denil）发明了一种根据其工作方式命名的逆流鱼道，今天根据其发明者的名字命名为“丹尼尔鱼道”（DENIL，1909）。

这种鱼道是一个线性通道，隔板在其中以固定不变且较短的间隔、逆流向倾斜排列（图 5.26）。这些隔板间形成的回流，由于其相互作用，耗散相当大量的能量，并在隔板开口下部产生相对低的流速（图 5.28）。这使丹尼尔鱼道能够具有相对于其他类型鱼道很陡的坡降，并在相对短的距离内克服小到中等高度差。

丹尼尔鱼道结构紧密，能够在无水条件下预制，且安装完成，使这一类型的构造尤其适合于没有鱼路的现有坝的改型及在没有很大空间的地方使用。

丹尼尔设计的早期鱼道具有凹形隔板。起源于这一原型，在随后的年代里进行了许多改进（关于比较见 LARINIER，1992b）。在这些改进中，如图 5.27 所示，隔板呈 U 形截面的所谓标准丹尼尔鱼道，证明功能最好。今天，丹尼尔鱼道几乎只有这一标准类型，乃至随后的描述可仅限于标准丹尼尔鱼道。

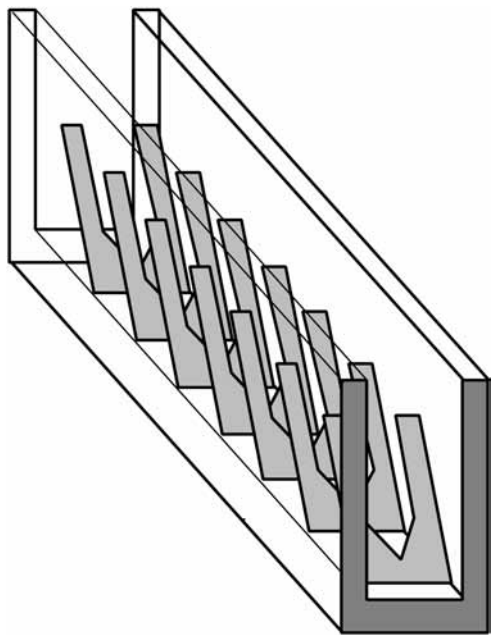


图 5.26 丹尼尔鱼道（示意图）（依 LONNEBJERG 修改，1980）

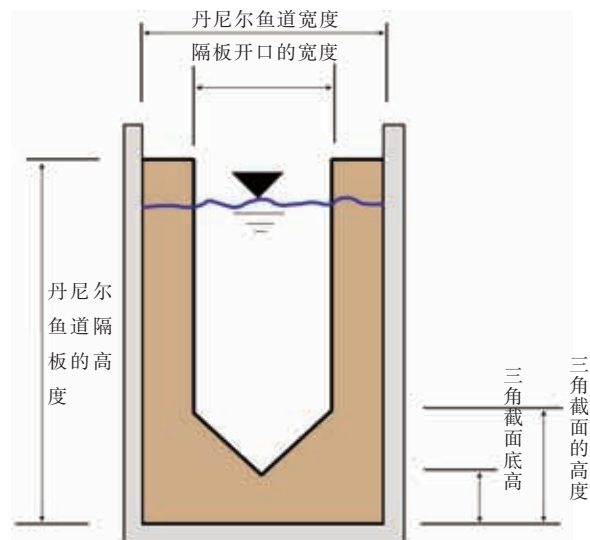


图 5.27 丹尼尔鱼道中的隔板（标准丹尼尔鱼道术语）（依 LONNEBJERG 修改，1980）

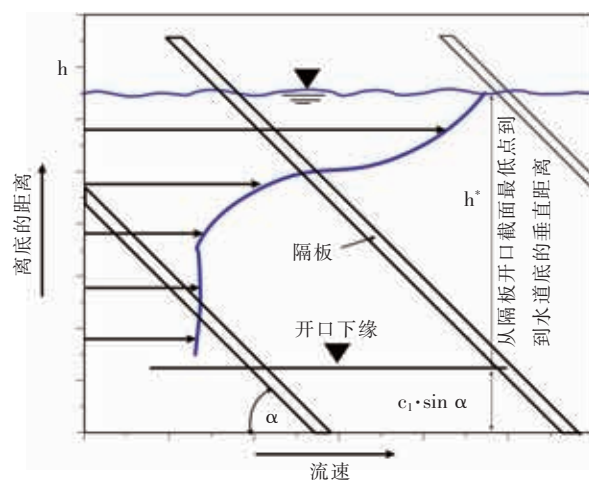


图 5.28 丹尼尔鱼道中特有的速度分布（依 KRÜGER 修改，1994a）



图 5.29 有中间休息池的丹尼尔鱼道。普伦茨劳（勃兰登堡）附近的戈尔米茨磨坊/河的上游水平视图



图 5.30 丹尼尔木制鱼道吉夫霍思/伊塞（下萨克森州）

5.3.2 设计与尺寸

5.3.2.1 平面图

渠道在设计图中总是笔直的。弯曲是不允许的，因为渠道弯曲对水流特征具有负面影响。只有采用中间水池才能实现方向的改变。

必须注意的是，鱼必须在丹尼尔鱼道中一口气完成其上溯，因为它们不能在隔板间休息。因此鱼道的长度太长则仅有较大、较强健的游泳种类可通过。所以，必须根据耐力低的鱼的游泳性能来确定通道的长度。对于鲤科鱼类，必须每隔 6~8m，或对于鲑科鱼类，每隔 10~12m 修建一个休息池。这类休息池尺寸的选择应能将输入能转换成低湍流度流动并形成足够的休息区。可装配能模仿有植物的天然小型水体的休息池的外观自然的结构。休息池的容积耗散功率应小于 $E = 25 \sim 50 \text{ W/m}^3$ 。

用于水池式鱼道出口定位的原理同样适用于丹尼尔鱼道出口的定位。

5.3.2.2 纵截面

通常，丹尼尔鱼道的坡降在 $I=1:5$ (20%) 和 $1:10$ (10%) 之间。如要保证有利于鱼上溯的水力条件，通道的宽度和允许坡降是相互关联的。根据 LARINIER (1983)，可推荐如表 5.4 所示的指导值。

表 5.4 丹尼尔鱼道的通道宽度和坡降的指导值 (LARINIER, 1983)

待考虑的鱼类区系	通道宽度 b (m)	推荐的坡降 I		流量 ¹⁾ Q (m^3) $h^*/b_a=1.5$
		(%)	$1:n$	
鳟	0.6	20.0	$1:5$	0.26
鲤科鱼类及	0.7	17.0	$1:5.88$	0.35
其他鱼	0.8	15.0	$1:6.67$	0.46
	0.9	13.5	$1:7.4$	0.58
鲑	0.8	20.0	$1:5$	0.53
海鳟及	0.9	17.5	$1:5.7$	0.66
多瑙哲罗鱼	1.0	16.0	$1:6.25$	0.82
	1.2	13.0	$1:7.7$	1.17

注：¹⁾ 表 5.5 中推荐的隔板尺寸根据方程 (5.10) 计算。

表 5.5 丹尼尔鱼道中视所选择的通道宽度而定的隔板设计指导值，
依 LONNEJERG (1980) 和 LARINIER (1992b)

	公差范围	推荐指导值
隔板宽度 b_a/b	0.5~0.6	0.58
隔板间距 a/b	0.5~0.9	0.66
开口最低点与底间的距离 c_1/b	0.23~0.32	0.25
三角截面的深度 c_2/c_1	2	2

5.3.2.3 通道

丹尼尔鱼道的通道或用混凝土或用木头制成（图 5.30）。必须将其净宽度确定为可用流量和预期鱼类的一个函数。

如果潜在自然鱼类区系中有大型鲑科鱼类，通道宽度应在 $b=0.8\sim 1.2\text{m}$ 之间。如预期种类仅为鳟和鲤科鱼类， $b=0.6\sim 0.9\text{m}$ 间的通道宽度就够了。如果有足够的流量，敷设两条或多条相互平行的通道也是可以的。

5.3.2.4 横通道结构

隔板最好是用木头制作。偶尔也可用金属制作。所有的边（缘）都应非常圆，以免鱼上溯时受到伤害。

隔板朝上游方向倾斜，与通道底呈 $\alpha=45^\circ$ 的夹角，具 U 形截面，截面下部为三角形。确定隔板开口的尺寸 b_a 、 C_1 、 C_2 和隔板间的距离，取决于通道的宽度并仅能在有限的公差范围内变动，因为它们对水流状况有相当大的影响。丹尼尔鱼道对这些尺寸的变动非常敏感，宜坚持规定的几何形状。第 5.3.3 节中给出的模型计算的有效范围绝对限于这里描述的标准丹尼尔鱼道的尺寸。表 5.5 中的值可用作设计隔板的指导值。

5.3.2.5 丹尼尔鱼道的入水口和出水口

水流应自通道轴上游延伸方向进入鱼道（鱼道出口）。入口前的狭窄处和弯曲处都对流动状况具有负面影响。在入水口处应有一些关闭通道的装置，使得对通道的维修工作变得较为容易。

丹尼尔通道必须伸入下游水中足够远，使出水口（鱼道入口）甚至在低水位时仍处于水下一定深度。在较高的下游水位期间，水倒灌入通道，形成较长的回水区，然而对鱼道中的水流类型没有任何大的影响。

只要可能，丹尼尔鱼道的出水口就应与水体的底床连接，帮助沿底洄游的鱼类更好地找到鱼道入口。在浅的水流中，底应用砾石或粗石固定。然而，事实上，在任何情况下通常都应要求建造减震盆状构造或下游底固定区域。

5.3.3 水力计算

丹尼尔鱼道的水力计算只有借助于经验方法才可能完成。个体试验显示，必须严格遵守结果有效正确范围，将结果外推到其他几何或倾斜条件是不合适的。因此，这里要再次明确地强调，下面的计算仅适用于给定尺寸的标准丹尼尔鱼道。

丹尼尔鱼道中水的深度受到入口处的水位及水头损失的影响。实际上，LONNEBJERG (1980) 给出的图（图 5.32）够精确了。图例里， h_0 系指第一隔板（上游第一隔板）截面下缘起算的高度，而 h^* 则描述与通道底垂直的水深，从水面一直量到隔板截面的下缘（参看图 5.31）。 h^* 的值不应小于 0.35m ，并确保 $h^*/b_a=1.5\sim 1.8$ ，因为在较大的水深时不再确保与图 5.28 相适应的速度类型。

丹尼尔鱼道中的水流特征，已为 LARINIER (1978)、LONNEBJERG (1980) RAJARATNAM (1984) 和 KRÜGER (1994) 等人所研究。研究结果再次显示，丹尼尔鱼道对几何形状的改变敏感（亦参看 KATOPODIS, 1990）。考虑了表 5.4 和表 5.5 中所示的通道和隔板推荐尺寸的丹尼尔鱼道的流量，可采用 KRÜGER 氏 (1994) 方程来计算：

$$Q=1.35b_a^{2.5}\sqrt{gI\left[\frac{h^*}{b_a}\right]^{1.584}} \quad (5.10)$$

表 5.4 显示了作为通道宽度和坡降的一个函数的丹尼尔鱼道的流量。建议进行水力模型试验，找出待使用的几何特征不同于标准丹尼尔鱼道的最佳结构。

正如上述，在需要克服高度差的地方，必须每隔 6~8m 通道长（对于鲑科鱼类约 10m）之后修建休息地。水池容积必须足够大，允许输入的流动能量能以低湍流度耗散。因次，所选择水池的大小应满足下面的条件：

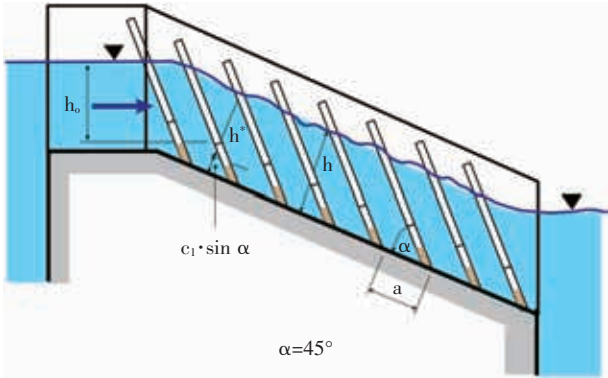


图 5.31 丹尼尔鱼道（纵截面，施工原理和术语示意图）（依 LARINIER 修改，1992b）

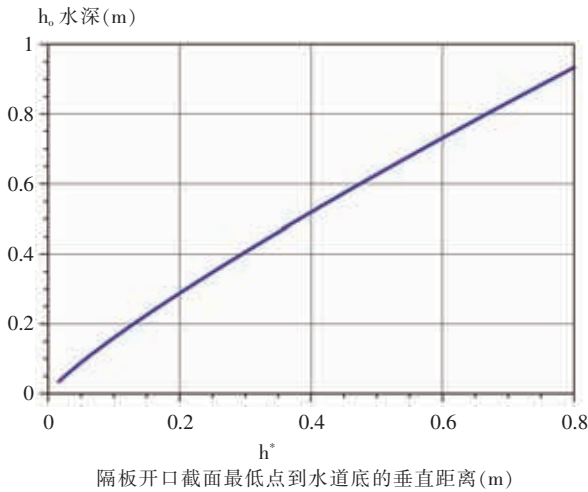


图 5.32 $h^* = f(h_0)$ 的关系（依 LONNEBJERG 修改，1980）

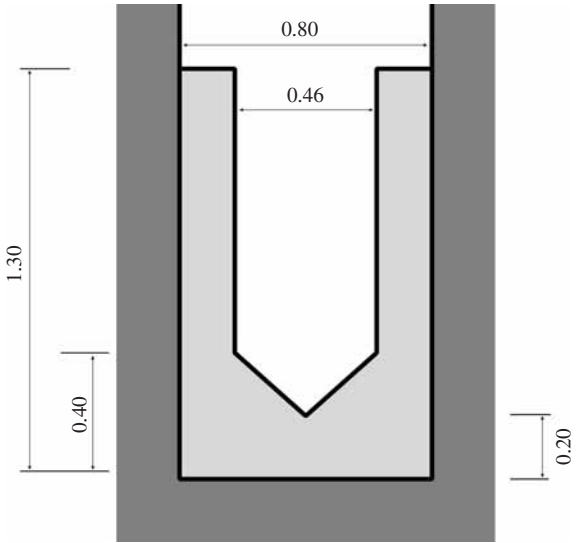


图 5.33 隔板的尺寸

$$E = \frac{\frac{\rho}{2} Q V^2}{b_m h_m l_b} < 25 \sim 50 \text{ W/m}^3 \quad (5.11)$$

式中, b_m 、 h_m 、 l_b 是休息池的平均宽度、平均水深和平均长度且 $v = Q / (h^* \cdot b_a)$ 。

在丹尼尔鱼道中, 很难证明允许流速。图 5.28 中给出的流速分布必须通过正确的隔板设计来保障。

计算实例

拟给一个上、下游最大水位差为 3.0m 的坝安装一个丹尼尔鱼道。这个丹尼尔鱼道的制作应适合于鲤科鱼类和多瑙哲罗鱼。在所有可能的运行条件下, 都能将上游水位控制恒定在 +63.0m 的高度, 最低下游水位在 +60.0m 的高度。

从表 5.4 选择通道宽度为 $b = 0.8\text{m}$, 通道的坡降应为

$$I = 15\% = 1 : 6.66$$

由下式获得隔板间隔 (a):

$$a = 0.66 \cdot b = 0.66 \cdot 0.8 = 0.53\text{m}$$

要克服 3m 的高度差, 需要两个中间水池, 因此将通道总长分成每段长 $l = 6.75\text{m}$ 的 3 段通道 (参看图 5.34)。两个中间水池的水深应约为 $h_m = 1.20\text{m}$ 。隔板尺寸是根据表 5.5 选择的并示于图 5.33 中。

h^* 的值为

$$h^* = 1.5 \cdot b_a = 1.5 \cdot 0.46 = 0.7\text{m}。$$

因此, 隔板的高度为

$$h_a = 0.7 / \sin 45^\circ + 0.2 + 0.1 \text{ (超出水高)} = 1.29 \approx 1.3\text{m}。$$

图 5.32 给出了进水水位

$$h_o = 0.83\text{m}$$

这样就由 (5.12) 式计算出第一个隔板的底高

$$\begin{aligned} h_1 &= h_o + c_1 \cdot \sin (\alpha + \tan^{-1} I) \\ h_1 &= 0.83 + 0.2 \cdot \sin (45^\circ + 8.53^\circ) \\ &= 0.99 \approx 1.0\text{m} \end{aligned} \quad (5.12)$$

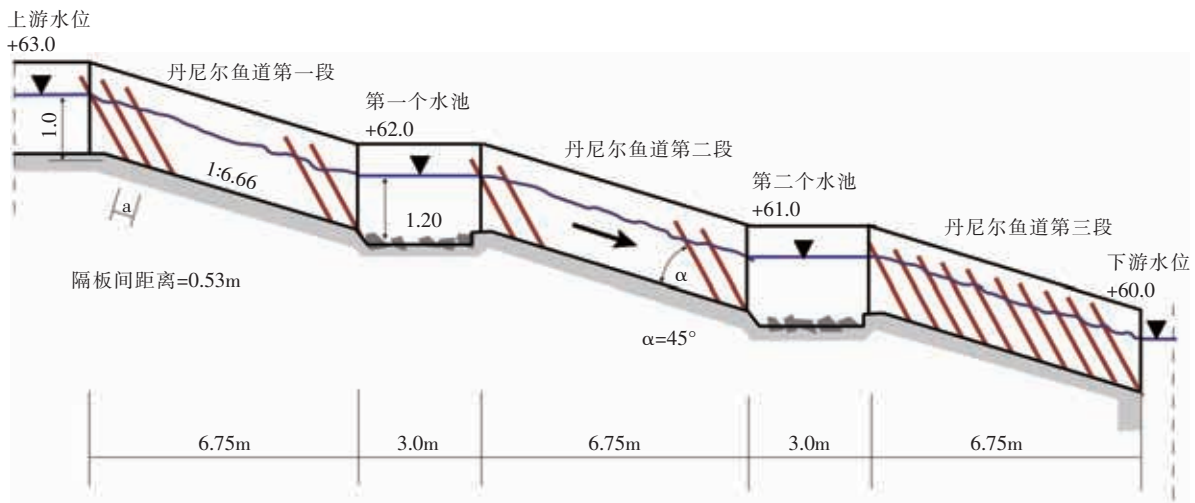


图 5.34 丹尼尔鱼道的纵截面

采用方程 (5.10) 计算流量

$$Q = 1.35 b_a^{2.5} \sqrt{gI} \left[\frac{h^*}{b_a} \right]^{1.584} = 1.35 \cdot 0.46^{2.5} \sqrt{9.81 \cdot 0.15} \left[\frac{0.7}{0.46} \right]^{1.584}$$

$$Q = 0.457 \text{ m}^3/\text{s}$$

采用方程 (5.11) 可求出休息池的尺寸。如 $E = 35 \text{ W/m}^3$, 且流速

$$v=Q/A\approx\frac{Q}{b_a\cdot gh^*}=1.42\text{m/s}$$

则休息池所需面积为

$$A_{\text{需要}}=l_b\cdot b_m=\frac{\frac{\rho}{2}QV^2}{h_m\cdot E}=\frac{\frac{1\,000}{2}\cdot 0.457\cdot 1.42^2}{35\cdot 1.20}=10.97\text{m}^2$$

水池宽度为 $b_m=4.0\text{m}$ 及水池长度为 $l_b=3.0\text{m}$ 给出的底面积为 12.0m^2 。图 5.34 显示了丹尼尔鱼道的纵截面。

5.3.4 总体评价

丹尼尔鱼道具有以下优点：

- 丹尼尔鱼道可以有空间要求小的陡坡；
- 可预制通道构件；
- 可很容易用于改型后的现有水坝；
- 对下游水位变动不敏感；
- 通常在下游水中形成有效的吸引流。

这类构造的缺点是：

- 对上游水位变动高度敏感。实际上仅允许几厘米，至多约 20cm 的变动；
- 与其他类型的构造相比需要相对高的流量；
- 碎屑堵塞容易扰乱其运行。丹尼尔鱼道需要定期检修。

上溯鱼的计数监测充分证明，丹尼尔鱼道尤其对于鲑科鱼类和鲤科鱼类如游泳能力较强的鲃是成功的。另一方面，迄今进行的监测表明，小鱼和游泳能力低的鱼，尤其是在丹尼尔鱼道结构太长时，通过的可能性是非常有限的。因此，这类鱼道具有对更大、更强健的游泳种类和个体选择的效应。

同样，必须认为微生物和无脊椎底栖动物（区系）的上溯是不可能的。

鉴于这些原因，应仅在缺乏空间、不能够建造其他结构时才使用丹尼尔鱼道。

5.3.5 实例

温克尔米勒丹尼尔鱼道	
水坝详情	鱼道详情
水流： 齐格河、北莱茵-威斯特伐利亚州 流量： 平均低水流量=1.5m³/s 平均流量=22m³/s 已知最高流量=700m³/s 用途： 水力发电 建造年份： 1930 经营者： 莱茵兰·威斯特伐利亚州电能股份有限公司	宽度： b=0.64 及 0.74m 长度： l=6.60 和 9.50m 坡降： I=1：4.5 降落水头： h _F =3.2m 流量： Q=0.3 至 0.38m³/s 负责单位： 国家水和废物管理局 波恩分局

设计结构

温克尔米勒水电站厂房周围 1930 年修建的水池式普通鱼道，在国家水和废物管理局波恩分局的监督下被丹尼尔鱼道取代。这是因为前一种鱼道水池尺寸小、坡太陡，以至于运行不正常。新的鱼道是由一个休息池连接的两个丹尼尔通道组成。该休息池被建造成具粗石包层的、不透水的钢筋混凝土槽，且种植了水生植物。上通道长 6.60m，下通道长 9.50m，上、下游通道的坡降皆为 1：4.5。上、下通道都用钢筋混凝土制成，具木质外包层，木质隔板固定于木质外包层之上。以 300~380l/s 的流量给鱼道送水。

通过休息池边缘处的观察室中的水下观察窗可观察到上溯鱼。上通道（鱼道出口）的入口处安装了一个监测鱼的装置。

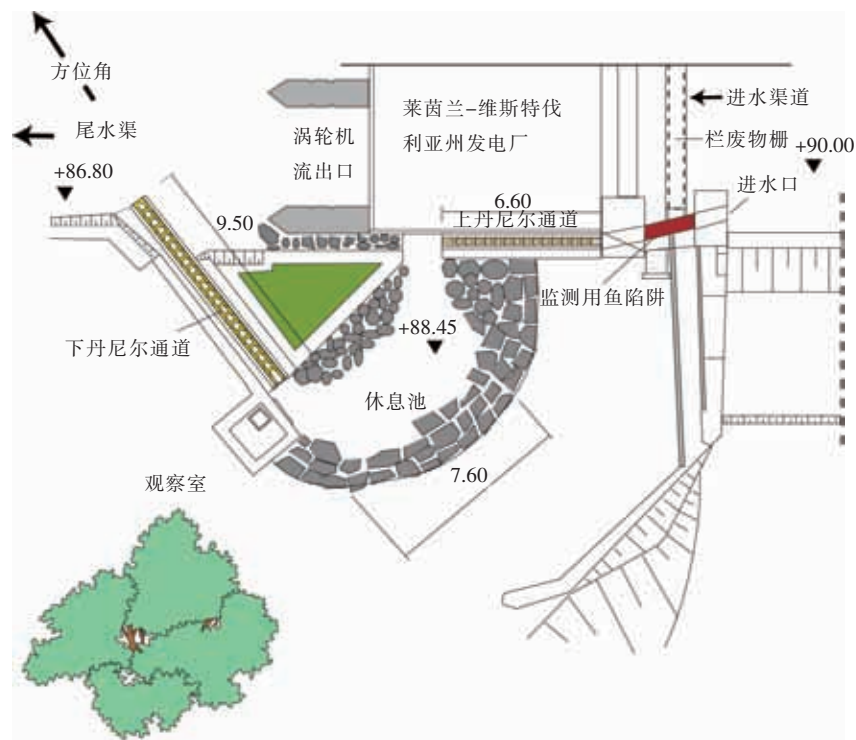


图 5.35 温克尔米勒/齐格河水电站旁的鱼道（北莱茵-威斯特伐利亚州）



图 5.36 下丹尼尔通道及之上的休息池视图。吸引流清晰可见，其在尾水渠处有大范围的影响面积，同时使鱼道入口易于被发现



图 5.37 下丹尼尔通道视图。混凝土制通道覆盖有木板，木板上安装有呈 U 形开口的隔板。水面上的高湍流度水气混合物令观察者误解，然而通道底区附近的流速实际上低得多



图 5.38 齐格河的海七鳃鳗 (*Petromyzon marinus*)

鱼道效能数据：

LUBIENIECKI 等（1993）用诱鱼设施监测鱼洄游，从 1991 年 5 月到 1992 年 5 月测试了鱼道的效率。在某些方面，上溯鱼的数量相当可观。在约 200 个检查日中发现了 1 000 多尾上溯鲃。监测还显示，其他鱼类仅有少数通过丹尼尔鱼道上溯。特别是 1993 年成功地发现海七鳃鳗上溯丹尼尔鱼道。这种鱼在齐格河 40 年前就灭绝了，但新的鱼道使海七鳃鳗重新在齐格河中建群。

5.4 鳗鲡梯

5.4.1 鳗鲡洄游的特点

鳗鲡是一种降海性洄游鱼，生活在几乎所有与海洋连接的静水和流水中，鳗鲡在淡水中生长直至性成熟，然后在性成熟期沿河而下洄游至海，推测大概在马尾藻海产卵。

后期仔鳗鲡（所谓的玻璃鳗）在 2~3 年内到达欧洲海岸，并从那里进入内陆水域。体长 7~25cm 的溯河鳗无疑处于克服表面粗糙、有小裂缝的小障碍的一种境地。然而，幼鳗溯河的能力通常被过高地估计了，许多离奇古怪的攀缘工具，如竖立的柴捆等，证明是不成功的。因此，尤其在溯河鳗鲡仍然非常小的河口区域，除现有鱼道外，另外加入特别适合于玻璃鳗性能的上溯设施可能是有用的。体长超过 25cm 的鳗鲡也使用较常见类型的鱼道，这样就不需要单独的鳗鲡梯了。

5.4.2 设计

两种主要类型的设计是常见的：

1. 管道的敷设穿过堰体，通常接近于江底，江底放有柴捆或其他遮护物以降低流速。这些遮护物通常系于一条链上，便于拉出或替换。鳗鲡要通过装置克服洄游障碍。实际应用上发现这类装置并不适合，因管道迅速被漂浮物所堵塞，不易发现（管道完全在水下），且修补同样困难。



图 5.39 鳗鲡 (*Anguilla anguilla*)



图 5.40 罗斯波特（莱茵兰-法尔茨州）附近绍尔坝上的长菱形鱼道和鳗鲡梯。
上游水视图。鳗鲡梯内放置了柴捆，平行设置于长菱形鱼道靠河岸一方的边墙

2. 较小且较平缓的明渠，以混凝土、钢或塑料制成，内放有帮助鳗鲡向上游迂回的各种配件。根据 JENS (1982)，刷型结构证明非常适合于这一目的。然而，小树枝、砾石及格栅亦用作内插装置。这些明渠应有防护盖来防御鼠和鸱之类的捕食者。

放置鳗鲡梯的方式要保证水仅滴经鳗鲡梯，因此鳗鲡梯只是刚刚被润湿。这意味着它们不可能作为其他鱼类的上溯通道，也非为其而设计。

鳗鲡梯的出口应是在岸边。出口不要求与底床连接，因为玻璃鳗在表水层洄游。必须注意的是，通过鳗鲡梯的小流量几乎不足以提供充足的导流，如有需要，为产生足够的吸引流，必须通过旁路水道另外提供水源。

由于幼鳗游泳能力低，无论如何，都应将鱼道进入上游水的出口置于缓流区，决不可将其置于邻近涡轮机入口的拦污栅处。

5.4.3 总体评价

鳗鲡梯仅适合于允许鳗鲡溯河洄游。由于其选择性，如果其他种类的鱼也必须通过障碍，鳗鲡梯就其自身而言不足以满足改善洄游障碍的要求，因为鳗鲡梯不允许其他鱼种通过障碍。在河口区，除其他技术性鱼道（水池式鱼道、丹尼尔鱼道等）外，特别推荐鳗鲡梯，专门让幼鳗溯河洄游。

5.5 鱼闸

鱼闸的设置技术已有很长的时间，主要应用于荷兰、苏格兰、爱尔兰和俄罗斯（van DRIMMELEN, 1966; JENS, 1982）。在德国的萨尔河和齐格河上也有一些鱼闸。

鱼闸的结构类似于船闸（见图 5.42 和 5.43）。二者基本上由闸室及具闭合装置的下闸门和上闸门组成。然而，就其功能而言，也有一些差异。这也

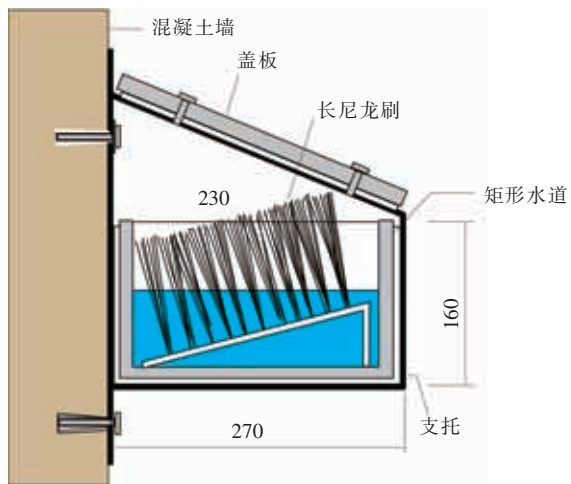


图 5.41 摩泽尔河（莱茵兰-法尔茨州）上采尔廷根坝上的鳗鲡梯适应于鳗鲡的特殊洄游行为。这种梯存在于里面放置了帮助鳗鲡溯河迁移的无端尼龙刷的通道。此外，鳗鲡梯的建造还与另一普通鱼道相连，并平行于这一鱼道的侧面（依 JENS, 1982）

使人们清楚地知道，除其实际用途外，在一般情况下，船闸不足以支持鱼的洄游，也不能取代鱼道。尤其是，持久性导流的缺乏、闸门开启时间短、充水作业期间闸室中的高湍流及闸在坝上的位置，使得鱼类仅在特殊的情况下可经由船闸找到其路线。

然而，在特殊情况下，可考虑能否暂时（例如玻璃鳗或鲑科鱼类的主要洄游季节）改变船闸的操作方式以利于鱼类上溯。

5.5.1 原理

图 5.42 显示了鱼闸的操作原理。可分为 4 个运行期。

1. 鱼闸闲置。下门开启，且闸室中的水位与下游水位同高。鱼必须由导流引路，从下游水进入闸室。轻启上闸门，或通过在闸室入口处连接的旁路（即输水管）送水可达此目的。鱼在闸室中聚集。

2. 闸室充水。关闭下闸门，缓缓开启上闸门至全开。来自上游的水流将闸室中的鱼引导到上出口。

3. 闸室中的水位与上游水位一样高。水通过下闸门中的狭槽或其他管线被引入下游水，从而在上游水的出口处产生吸引流。鱼找到出闸室的路。

4. 关闭上闸门并开启下闸门后，排空闸室，闸又处于闲置状态。

各个运行期的操作时间为自动控制，通常运行间隔时间为半小时至 1 小时。

最有效的周期性变动及必需的季节性调节，仅能通过监测控制确定。

5.5.2 设计

闸室和闭合装置的结构是变化的，而且在很大程度上取决于当地具体条件。在设计闸室时，应有措施防止鱼被留在变干涸的区域。为此，闸室底可为阶梯式结构或是倾斜的（图 5.42）。闸室的尺寸显然应大于普通鱼道的水池，因为很多的鱼必须较长时间留在室内。具有凹凸不平底的构造基本上是允许的，上方开放不加盖的闸室是合乎需要的。

通过旁路送水可产生或加强导流（参看图 5.43）。前室出水口的横截面尺寸应确保有效导流范围在 $v=0.9$ 和最大 2.0m/s 之间（平均 $v=1.2\text{m/s}$ ）。在设计闸室充水阶段和排空阶段的流入量和排出量时，务必使闸室内的流速在任何时候、任何地方不超过 1.5m/s ，闸室内的水位涨落应低于 2.5m/min （SNIP, 1987）。

就鱼闸在坝上的位置和入口及出口的设置而论，可运用与其他鱼道相同的标准。由于其结构轻便，鱼闸可安放在隔墩之间。

5.5.3 总体评价

鱼闸具有替代传统技术性鱼梯的优点，如果

- 没有很大的空间及
- 有非常的高度差待克服。

如果必须考虑非常大的鱼（如鲟）或低游泳性能鱼，鱼闸同样具有结构上的优点。就鱼闸被无脊椎动物、底栖鱼类及小鱼通过的难易程度而论，现在不能排除选择效应。

与传统鱼道相比，活动部件、传动系统和控制系统需要增加维护成本。

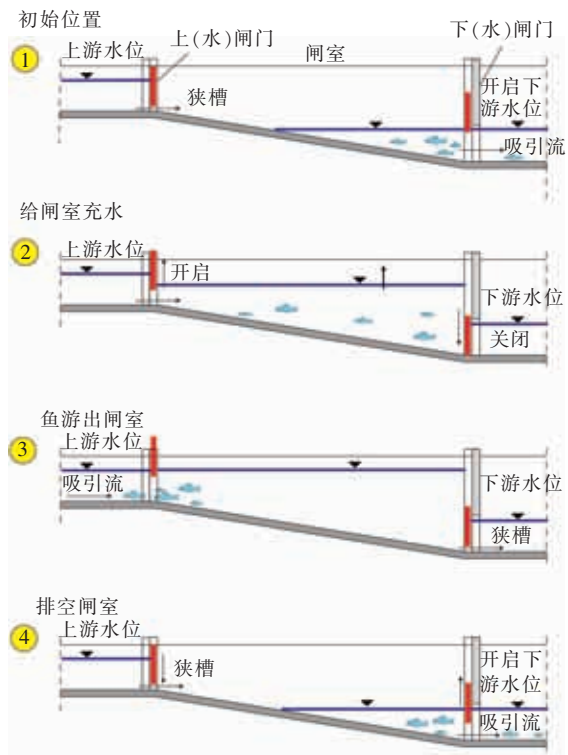


图 5.42 鱼闸运行原理（纵截面示意图）

5.5.4 实例

舍登鱼闸	
水坝详情	鱼闸详情
水道：萨尔河、莱茵兰-法尔茨 流量：低水平均流量=19m³/s 平均流量：80m³/s 已知最高流量：1 200m³/s (资料来自 1946—1993 年) 用途：水力发电、航运 控制流量：Q=2×30m³/s	降落水头： $h_F=5.70\text{m}$ 闸室宽： $b=1.0\text{m}$ 闸室长： $l=3.4\text{m}$ 建造年份：1981 经营者：战时航运局、萨尔桥 负责单位：莱茵兰-威斯特伐利亚电能股份有限公司

结构设计

在萨尔河作为航道开发期间，在舍登坝上建造了一个鱼闸。这个鱼闸安放在发电厂与堰间的隔墩中，闸的入口位于涡轮机排泄口附近，鱼闸入口的横截面为 0.65m×0.80m 并浸没在水中。在上游出口端将鱼释放入蓄水中。

水力驱动的滚动式闸门，可用来关闭朝向下游水的闸，而朝向上游水时闸室则关闭，闸门和出口之间若有监测需要，可安装一个鱼笼。

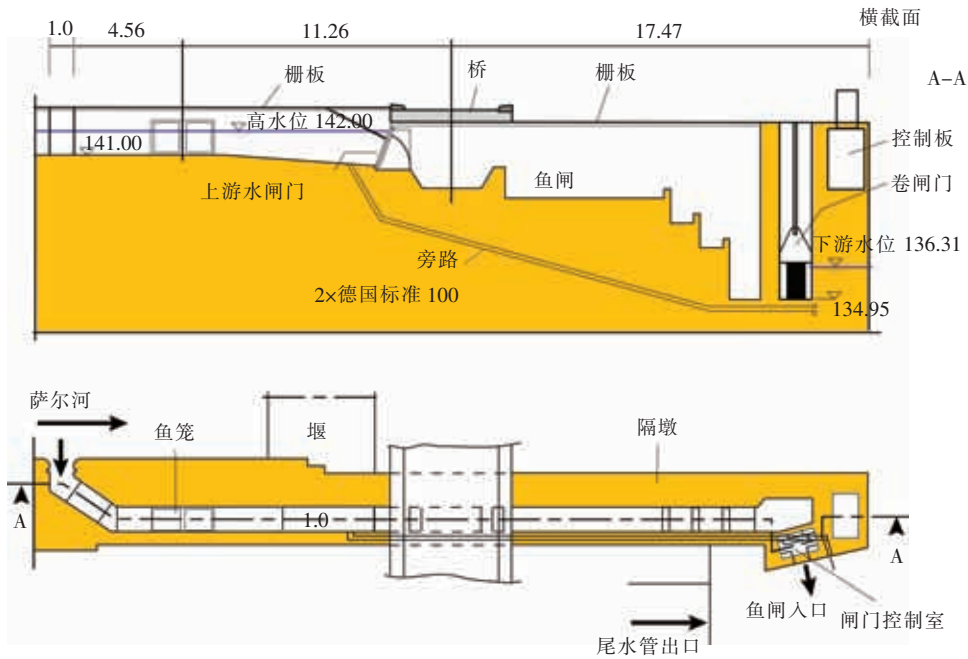


图 5.43 舍登鱼闸（萨尔河）的纵截面图和平面图

舍登鱼闸

效率资料

特雷夫斯地区管理局进行的闸室中鱼类监测确认了鱼闸的效率。从 1992 年 4 月 15 日到 1992 年 7 月 18 日期间，共计超过 50 000 尾鱼迁移过闸（KROLL，1992。1992 年 11 月 16 日和 17 日在科布伦茨举办的“坝调节河流中的长距离洄游鱼类”讨论会上的发言）。涡轮机不同操作方式对鱼闸效率影响的测试显示，进入闸中鱼的数量均无显著差异，与近闸附近的涡轮机运行、或近岸边的涡轮机运行、或两台涡轮机同时运行无关。



图 5.44 舍登/萨尔鱼闸（堰整体图）。鱼闸安装在堰和发电厂间的隔墩中（见箭头）。

5.6 升鱼机

5.6.1 原理

在高度差相当大（>6~10m）和可用流量相当小的地方，由于建造成本、空间需要量，尤其是由于鱼的游泳能力及性能，普通鱼道的适用范围受到了限制。在有很大高度差待克服的地方，已研究出了采用升降机将鱼从下游运送至上游的解决办法。

用一个水槽作为运送器。水槽安装了一个可关闭输出门，或可被翻转。在下位时，水槽被沉入底。必须用吸引流将鱼向升鱼机方向吸引。此外，位于升降机前的一个可移动并可启闭的栅门，可用来将鱼推入升降机中的运送槽上。升降机的下门定时关闭，聚集在槽中的鱼不再能逃脱，而是被上升中的槽“捕获”并运送至顶端。出口处可和上游水体做不漏水连接，也可让水槽在高于上游水位处倾倒入一个渠道中。鱼同从水槽中流出的水一起到达上通道。在上通道同样地也必须有明显的吸引流。

循环操作周期是根据实际洄游活动确定的。操作通常是自动的。

5.6.2 结构

图 5.45 用示意图显示了在美国东海岸和法国建造的升鱼机的结构（Larinier，1992c）。适用于普通鱼道的定位原理同样适用于升鱼机。

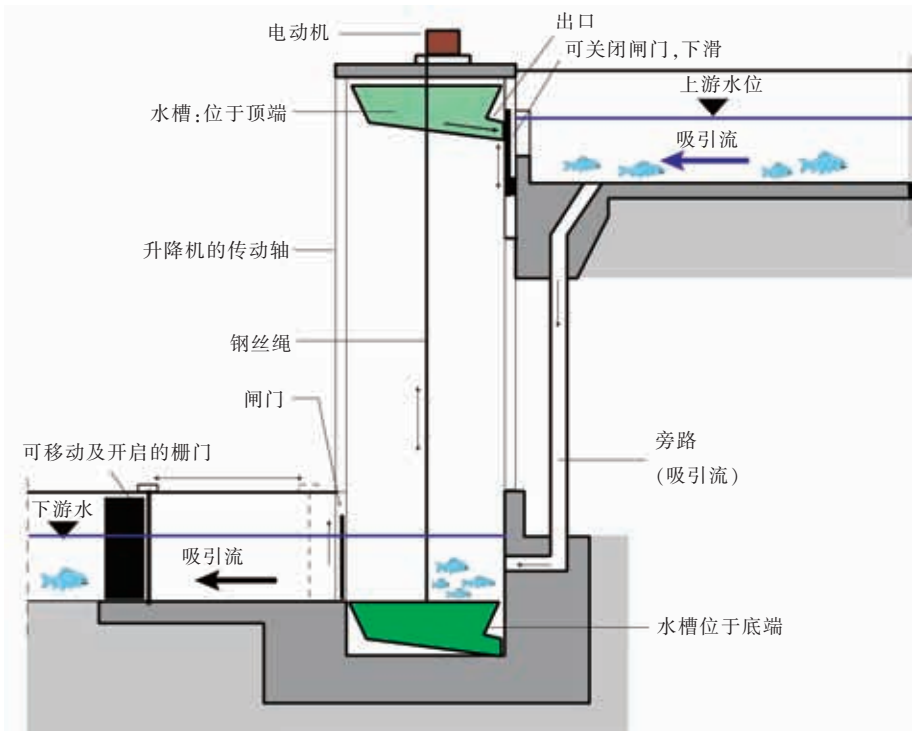


图 5.45 升鱼机结构及功能原理示意图（依 LARINIER 修改，1992c）

5.6.3 总体评价

- 所需空间小，用这种升鱼机，即使在高坝处，也能克服大的高度差。然而，结构方面支出的经费相当高。
- 由于鱼是被动运送到上游的，升鱼机适用于低游泳能力的种类及较大型鱼类的运送。
- 升鱼机不适合于无脊椎动物的溯河洄游和鱼类的降河洄游。
- 下游水位变动大意味着在提供充足吸引流时有结构设计问题。
- 升鱼机的维修费用高于传统鱼道。

5.6.4 实例

图伊列雷斯升鱼机			
水坝详情		升鱼机详情	
水流：	多尔多涅河，法国	升鱼机高度：	$h=10\text{m}$
用途：	水力发电	运送槽容积：	$V=3.5\text{m}^3$
流量：	$Q=285\text{m}^3/\text{s}$	吸引流：	$Q=4\text{m}^3/\text{s}$
降落水头：	$h_F=12\text{m}$	与上游水连接：	狭槽鱼道
发电：	法国电力公司（EDF）		$l_{\text{tot}}=70\text{m}$
			$h=2.0\text{m}$
			$Q=1.0\text{m}^3/\text{s}$
		建造年份：	1990
功能资料： 视频监控获得的证据表明，在 1989 年 5 月 11 日至 7 月 28 日期间，10 万多尾鱼使用了升鱼机。升鱼机不仅为大型鲑科鱼类和西鲱，而且还为鲤科鱼类、海七鳃鳗及河七鳃鳗等所接受。狭槽鱼道与上游水的连接处安装有观察窗，鱼溯河游泳时，可很容易从观察窗看到鱼。			
			
图 5.46 图伊列雷斯升鱼机。升鱼机位于与涡轮轮机出水口直接邻近的右侧，并将鱼提升 10m 高运送到中间池，从中间池到上游水体的最后 2m 高度差由狭槽鱼道克服		图 5.47 图伊列雷斯升鱼机的下进口。关闭可启闭栅门，将聚集在前室中的鱼推向运输槽，然后升起该槽。栅门大大提升了该装置的效率。在照片右上部可看到渠道的开口，通过渠道开口狭槽鱼道获得运行所需水流 ($Q=1\text{m}^3/\text{s}$)。同时，这额外水流改善了升鱼机的吸引力	

6. 鱼道的监测

应当为必须遵守现有水法的所有新设施提供监测鱼道运行的结构条件。尤其在与本书中的指南有相当大的分歧时，审批机关应当要求进行相关监测。下面仅提供溯河洄游监测的评价方法，降河洄游的监测这里不予涉及。

6.1 监测的目的

监测的目的是明确地证明，鱼道入口是可以找到的，并且鱼道能够为鱼所通过。监测的重要性高于对违背设计方向和施工证书的施工的检查，也高于必须做的试运行（见节 4.45），而试运行对外观较自然的鱼道建筑物尤其必要。它的重要性远高于定期维修（见节 3.8）。根据本说明小册子中的指南建造的新鱼道，原则上应可假定为运行良好。

经验证明，由于当地的情况，实际施工往往偏离这些指南中的规则。因此常常很难充分评价对功能的任何可能损害的影响。在这样的情况下，鱼道的监测和结构改进，应尽可能在审批程序阶段被包括在项目中。对于新建的鱼道，如果对所选择的鱼道建筑（新）类型的操作完全没有或没有充分的经验，或如果因其尺寸特殊（如非常高的流量或降落水头），亦建议进行监测。下述方法亦能应用于现有鱼道的监测。

尽管有经过充分检验的监测鱼类溯河洄游的方法，但一般很难证明底栖无脊椎动物在鱼道中的溯河洄游效率。脊椎动物的差异建群对策意味着，其洄游的证据常常不得限于记录鱼道本身内的建群。现有知识表明，仅底部的无间断基质存在可被援引为无脊椎动物溯河洄游可能性的标记。

大多数渔业法禁止在鱼道中捕鱼。如研究需要从鱼道中捕鱼，必须在捕捞前申请豁免许可。只有渔业业主同意后，方才能给予这种许可，通常监测的管理应委托给渔业专家。

6.2 方法

测试时机及持续时间选择对运行的任何控制的可靠性具有重要意义，最好在主要洄游期间进行。主要洄游期因当地自然及气候条件特殊性在地区间可能不同。

在确定监测对策及尔后在评价鱼道的运行时，应考虑下列生物学因素和技术因素。

● 河流中潜在自然鱼类区系及各坝的上、下游水体中鱼类群体的实际定性和定量组成。此外，应对底栖无脊椎动物区系做类似的评价。

- 所有相关鱼类种类洄游发育阶段的无障碍上溯。
- 水系连通性现状。
- 本指南中提出的鱼道设计和施工的一般技术要求。
- 如需要，应提出使鱼道最佳化的建议。

鱼道运行的控制要求，不仅必须对已通过鱼道的所有鱼进行计数，而且对其他一些参数和基本条件也需进行评价。通过将监测结果与被研究河段中鱼类（区系）的自然洄游活动相比较，使用这些资料来评价鱼道的效率。另外的资料包括：

- 按物种、大小组群、性成熟数据分类，计数上溯鱼。
- 关于水位、流量倾向（增加或降低流量）、天气、水的浊度或透明度方面的数据。
- 月相相对于鱼的洄游活动，尤其在鳗鲡洄游期间的详细情况。
- 鱼道中流速及流量的测量。
- 测量含氧量及水温。
- 考虑各段水体的放养措施，确定上、下游水体中鱼的资源量。
- 注意鱼类其他相关细节，如病和损伤。

- 评价鱼道的总体状况及其维护水平。

- 记录河流环境条件的任何改变，并记录对鱼道中的洄游活动有影响的特殊事件，如维修措施、鱼类死亡率等。

建议在鱼道施工期间，提供内置的捕获室，或在鱼道出口处直接安装至少供移动鱼张网使用的提升装置。这在技术性鱼道中测试鱼类上溯时特别需要。控制鱼道运行的方法应适合于鱼道的类型。如需要，得将几种方法结合起来，抵销各种方法的不同缺点。下面列举了好几种传统监测方法，这些方法如以适当方式使用，可有助于提供鱼道运行的可靠数据。

6.2.1 张网法

测试外观自然鱼道和技术性鱼道的标准方法是用张网捕上溯的鱼。如果鱼道的横截面可被鱼张网完全拦截，并且与底部紧密连接，可使用张网。鱼张网应直接安装在鱼道的入水口（即鱼道出口，图 6.1）处，并可根据当地情况建成箱式、台座式或特殊鱼张网。箱式张网最适合于在水池式鱼道或狭槽鱼道中使用，其大小由水池的尺寸决定。张网应放置在最上面的水池中。放置在休息池或不直接放置在入水口处的对照张网，无法提供鱼能通过鱼道全长的任何明确的证据。



图 6.1 设置鱼张网监测施托伯河（勃兰登堡）上普里茨哈格内尔磨坊旁鱼道的运行

鱼张网应用结实的、深色塑料丝制成，最大网目大小为 10~12mm，便于在控制期间捕获幼鱼。箱式张网是一个轻便铝框，其侧面装填以塑料网织品或镀膜金属丝网。

使用张网的控制试验需由经过培训的人员频繁管理。鱼由于在张网中的密度高可能受伤害，尤其在洄游活动增强时。频繁排空张网可防止这一点。将鱼从张网中捞出，测量并根据规定的方案记录其参数，最后将鱼释放入上游水中。由于张网按其放置的方式阻止了从上游水道进入鱼道的降河洄游，这一方法能提供溯河迁移的可靠数据。

6.2.2 堵截法

这一方法就是用一张网或一拦鱼栅堵住鱼道的入水口（即鱼道出口），防止鱼从上游水游入。然后，通过电捕或排干鱼道，将所有的鱼从鱼道中全部捞出。过一段时间后进行的控制捕捞能证明从下游水进入鱼道的鱼。

该法可应用于所有为鱼提供足够休息场所的鱼道，因此它不适合于丹尼尔鱼道。碎屑和漂浮固体对拦截装置的阻塞是一个需要重视的问题。

除非鱼道的入水口（即鱼道出口）一开始就被堵截，否则采用普通方法或电捕在鱼道中试捕作为鱼道效能监测是不适合的，因为不能确定鱼从哪一个方向洄游入鱼道，即它们是来自下游还是上游水体。

6.2.3 标志

鱼的标志可用来监测更自然鱼道的运行效能，而且通常用来研究水生系统中的洄游。鱼的标志必须向或经由适当的管理机关报告或批准。标志鱼的方法有许多不同的种类，如编码标志的使用或染料注射（图 6.2），每一种方法都有明确的优、缺点。



图 6.2 用红色刺花染料标志并放流入米尔巴赫河。种群恢复计划框架
〔兰河（莱茵兰-法尔茨）一条支流〕的鲑

采用这一方法时，在相关水体中捕获的土著鱼，经标志后释放入所研究坝的下游水体中。鱼道的监控就是证明，标志鱼是否出现在鱼道入水口区（鱼出口区）或上游水中。关于标志鱼回捕的信息，或通过采用普通方法如张网或电捕直接获得，或由垂钓者告知。由于回捕率一般很低，各个鱼种和各种鱼大小标志后释放入下游水体中的鱼的数量必须很大。评价效果时，必须考虑标志鱼总数和回捕数间的关系。

6.2.4 电捕

电捕通常用于鱼类群体的定性和定量研究。在水中电场影响下，鱼首先游向阳极（趋电性）然后被暂时麻醉（电麻醉），使鱼被捕获，然后可按种类、鱼的大小等对鱼进行研究（图 6.3）。如电捕设备使用正确，鱼不会受到伤害。电捕必须经专业培训的人员来进行，并要求获得相关管理机构的批准及捕鱼权持有者的同意（在德国）。

电捕可以对坝上、下游水体中的鱼类群体给予定性和半定量估计。群体大小的确定可用来评价监测时鱼类（区系）的上溯活动，而且是评价鱼道运行的基础（见节 6.3）。与其他方法如堵截鱼道入水口或鱼的标志相结合，电捕能够提供证明鱼设法通过鱼道的可能性。

6.2.5 自动计数设备

自动计数设备可在不干扰鱼的情况下观察到上溯的鱼。不同的方法基于不同的原理，包括运动传感器、光栅或视频控制，许多方法在很大程度上仍处于探索阶段。只有在有充分的观测深度时才可应用光系统。光栅和运动传感器仅许可不分种类和大小计数鱼。视频监测系统和图像处理系统的更高级组合可差异评价鱼道功能（TRAVADE 与 LARINIER, 1992）。

在大多数情况下，自动计数设备的应用必须首先在鱼道入水口处（鱼出口）设置有单独的观察室、观察装置或观察设施。如果要采用这些方法，应在设计的早期，在修建鱼道之前做好准备。自动计数设备定期检修费用很高。



图 6.3 齐格河（北莱茵-威斯特伐利亚州）中温克尔米勒堰旁鱼坡上的监测性电捕

6.3 结果评价

鱼道运行监测效果的评价必须有详尽记录的数据。除河段的地点特异数据及可能影响试验结果的其他因素外，要正确评价，就需要有关于所采用方法的资料，包括张网暴露的持续时间或排空这些张网的循环时间。

鱼道不受限制的运行和完全失灵都是容易证明的，但是对于特定的种类和个体大小而言，受限或选择性运行的证明则难得多。应采用下列标准，通过分析和评价鱼上溯的数字来证明鱼道的完全运行：

- 应相对于物种和水体特有的主要洄游期来评价监测结果。这里应考虑流量状况、水温、月相等伴随因子。

- 应相对于坝的上、下游水体中的群体密度来评价通过鱼道洄游的鱼。这可通过比较鱼道监测结果与水体中实际存在的物种的自然优势度关系（如百分率数据）及大小范围来进行。

根据节 3 中定义的一般技术要求，如果潜在自然鱼类区系的所有种类，在不同的发育阶段及在反映其在水流中相对资源量的数量上，都能找到鱼道入口并通过鱼道，一条鱼道可被认为是有功能的。然而这常常带来方法学上的问题，因为：

- 水体中常常并没有潜在自然鱼类区系的所有种类，
- 尤其是用张网等传统方法很难证明小型鱼类种类的存在，
- 尽管河流中极珍稀的种类在理论上能够通过鱼道，但监测期间可能检测不到这些种类。

因此，如果有下列情况可以认为鱼道运行良好：

- 可以证明受影响河段中实际存在的所有鱼类，在其不同阶段并以相对资源量，能够找到入口并通过鱼道。如果个体大小对鱼道尺寸之比相同和游泳性能相似的其他种类能够通过鱼道，对于极稀有种类因方法上难于捕捉而未记录的种类也可认为该鱼道是有功能的。

- 对于水流居群中现在没有的潜在自然鱼类区系的鱼类种类，也似乎可能察觉鱼道入口和通过鱼道。

7. 法律要求

设计、建造和管理鱼道时必须遵守相关法律。正如在德国宪法第 70 款中所述，内陆渔业服从于各州（联邦州）的司法权。因此，联邦各州有其自己的渔业法规。各州渔业法规与其他州的类似法规在条款数量上往往差异很大。所有联邦渔业法规都包含有可直接实施并与其他规章或法律独立的关于鱼道建造和管理的细节。

另一方面，就水权而言，有等级较高的法律纲要，水资源管理法（WHG）。这一法律在第 1 条款 § 1a 中，包含了应该用水体增加大众福利且在不妨碍公共利益的情况下亦有利于个人的方法管理水体的原则。这一条款还指出，必须避免所有负面影响。根据 § 4 及 § 8，对于申请许可和审批的使用若产生对水体的不利影响必须防止或进行补偿。

这一原则也是和联邦自然保护法 § 8 和 § 20 及州的自然保护相关法规相吻合的。欧洲联盟委员会提交的关于水体生态质量指标的议案包括了人类活动不得阻碍洄游性鱼类的条款。

7.1 新设施

在水体中筑坝建堰之前，必须向有关管理机关申请必要的水权许可或计划程序审批。根据水资源管理法 § 31，这类建筑物通常意味着对水体的相当大的结构改变，因为它们导致生境根本性改变，因此，根据 § 31 第一款必须进行计划程序审批。此外，当然还应考虑州的补充法律条例。

根据环境影响评价法 § 3 的附件（此处第 6 款），及水资源管理法 § 31 执行的计划程序应要求进行环境影响评价。

环境影响评价包括拟采取的计划对人、动植物、土壤、水、空气、气候和风景的影响的调查、描述及评价，包括在各种情况下它们的相互作用及其对文化资产和其他资产的影响。

在环境影响评价的大前提下，纵向连通性的保护或恢复通常是一个目标，尽管一些州的渔业法亦预先考虑到是否修建鱼道的例外情形。

在不进行计划程序审批而进行审查、批准和同意程序时，还必须考虑渔业要求。在相关法律的框架内，计划程序应平衡渔业的利益和计划项目有关的利益。

7.2 现有设施

由于现有坝堰在法理上的情况不同，其改造不需经过审批。首先，旧法律及其辅助条款适用。正如宪法第 14 款财产权保障所规定的那样，没有权利持有人的同意，旧法律的修改通常是不可能的。然而，当继续使用这些旧的法律可预期对大众的福利产生相当大的损害时，可根据水资源管理法 § 15 取消这些旧的权利，作为补偿的交换。如果坚持建造鱼道的第三方能负担建筑成本和任何可能补偿的要求，州的大多数渔业法规提供了责成坝的所有者用鱼道对坝进行改型的可能性。

在黑塞、北莱茵-威斯特伐利亚、莱茵兰-法尔茨、萨克森安哈尔特和图林根州，如果责任方的措施具有合理的成本/效益比及合理的成本对生产力之比，州才能要求用鱼道对障碍物改型。如果责任方支付不起，州不得不提供部分改型资金。

8. 参考文献

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1987): Grundzüge der Gewäsepflge – Fließgewässer. – Schriftenreihe Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft 21.
- BELL, M. C. (1973): Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Fisheries Engineering Research Program, Corps of Engineers North Pacific Division, Portland, Oregon.
- BLESS, R. (1982): Untersuchungen zur Substratpräferenzen der Groppe, *Cottus gobio* LINNAEUS 1758 (Pisces: Cottidae). – *Senckenbergiana Biol.* 63, 161 – 165.
- BLESS, R. (1990): Die Bedeutung von gewäsebaulichen Hindernissen im Raum – Zeit – System der Groppe (*Cottus gobio* L.). – *Natur und Landschaft* 65, 581 – 585.
- BLESS, R., A. LELEK & A. WATERSTRAAT (1994): Rote Liste und Artenverzeichnis der in Deutschland in Binnengewässern vorkommenden Rundmäuler und Fische (Cyclostomata & Pisces). In: NOWAK, E., J. BLAB & R. BLESS (Hrsg.): Rote Liste der gefährdeten Wirbeltiere in Deutschland. – Greven (Kilda – Verlag), 137 – 156.
- BORNE, M. V. D. (1883): Die Fischereiverhältnisse des Deutschen Reiches, Oesterreich – Ungarns, der Schweiz und Luxemburgs. – Berlin (Moeser – Verlag).
- CLAY, C. H. (1961): Design of fishways and other fish facilities. – Department of fisheries and oceans, Ottawa (Queen's Printer), 301 S.
- DENIL, G. (1909): Les Éhelles à poissons et leur application aux barrages de Meuse et d'Ourthe. – *Annales des travaux publics de Belgique* Série II/XIV, 66, 253 – 395.
- DRIMMELEN, D. E. van (1966): Fischtreppen in den Niederlanden. – *Arch. für Fischereiwiss.* 16, 38 – 54.
- DVWK (1991): Ökologische Aspekte bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern – DVWK-Merkblatt 204, Bonn, 188 S.
- DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. – DVWK – Merkblatt 220, Bonn, 70 S.
- DVWK (1995): Gesichtspunkte zum Abfluß in Ausleitungsstrecken von Wasserkraftanlagen. – Gelbdruck, 155 S.
- GEBLER, R. – J. (1990): Naturgemäße Bauweisen von Sohlenstufen. – In: *Handbuch Wasserbau*; Heft 3, Min. f. Umwelt, Stuttgart.
- GEBLER, R. – J. (1991): Naturgemäße Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fließgewässer. – Diss. Univ. Karlsruhe, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik, Nr. 181.
- GEITNER, V. & U. DREWES (1990): Entwicklung eines neuartigen Pfahlfischpasses. – *Wasser und Boden* 42, 604 – 607.
- GENNERICH, J. (1957): Fischaufstiegskontrollen am Moselfischpaß Koblenz. – *Z. Fischerei* N. F. 6, 53 – 60.
- HENSEN, W. & F. SCHIEMENZ (1960): Eine Fischtreppe in Stromlinienform. Versuche mit lebenden Fischen und Modellversuche. – *Mitteilungen des Franzius – Institutes für Grund – und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover* 18, 162 – 177.
- HUET, M. (1949): Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux cou-

- rantes. – Schweiz. Z. Hydrol. 11, 322 – 351.
- HUET, M. (1959): Profiles and biology of western European streams as related to fish management. – Trans. Am. Fish. Soc. 88, 155 – 163.
- HUGHES, D. A. (1970): Some factors affecting drift and upstream movement of *Gammarus pulex*. – Ecology 51, 301 – 305.
- ILLIES, J. (1958): Die Barbenregion mitteleuropäischer Fließgewässer. – Verh. int. Verein. theoret. angew. Limnol. 13, 834 – 844.
- ILLIES, J. (1961): Versuch einer allgemeinen biozönotischen Gliederung der Fließgewässer. – Int. Rev. ges. Hydrobiol. 46, 205 – 213.
- JÄGER, P. (1994): Zum Stand der Technik von Fischaufstiegsanlagen. – Österreichs Fischerei 47 Jg., 50 – 61.
- JENS, G. (1982): Der Bau von Fischwegen. – Hamburg, Berlin (Verlag Paul Parey), 93 S.
- JONSSON, N. (1991): Influence of water flow, water temperature and light on fish migration in rivers. – Nordic J. Freshw. Res. 66, 20 – 35.
- KATOPODIS, C. (1990): Advancing the art of engineering fishways for upstream migrants. – Proc. Intern. Symposium on Fishways '90, Gifu, Japan, Okt. 1990.
- KINZELBACH, R. (1987): Das ehemalige Vorkommen des Störs, *Acipenser sturio* (Linnaeus, 1758), im Einzugsgebiet des Rheins (Chondrostei: Acipenseridae). – Z. angew. Zool. 74, 167 – 200.
- KLAUSEWITZ, W. (1974a): Die frühere Fischfauna des Untermain. – Natur und Museum 104, 1 – 7.
- KLAUSEWITZ, W. (1974b): Der Strömer, *Leuciscus souffia agassizi*, ein nachträglicher Neunachweis für den Main. – Natur und Museum 104, 238 – 240.
- KLAUSEWITZ, W. (1975): Die Bioindikatorfunktion einer alten Fische Sammlung aus dem Main. – Aus Hessischen Museen 1, 55 – 58.
- KNAUSS, J. (1979): Flachgeneigte Abstürze, glatte und rauhe Sohlrampen. – Versuchsanstalt für Wasserbau TU München, Bericht 41, 1 – 55.
- KRAATZ, W. (1989): Flüssigkeitsstrahlen. In: BOLLRICH et al.: Technische Hydromechanik Band 2, Kap. 5.
- KRÜGER, F., P. LABATZKI & J. STEIDL (1993): Naturnahe Gestaltung von Fischaufstiegsanlagen; Beispiele in Brandenburg. – Wasserwirtschaft/Wassertechnik, 1/93, 27 – 33.
- KRÜGER, F. (1994a): Denil – Fischpässe. – Wasserwirtschaft/Wassertechnik, 3/94, 24 – 32.
- KRÜGER, F., LABATZKI, P. & J. GÖRLACH (1994b): Fließgewässer – Biotopverbund in Brandenburg. – ZALF, Institut für Hydrologie, unveröff. Studie im Auftrag des LUA Brandenburg.
- LANGE, G. & K. LECHER (1993): Gewässerregelung, Gewässerpflege. – Hamburg (Verlag Paul Parey).
- LARINIER, M. (1978): Etude du fonctionnement d'une passe à poissons à ralentisseurs plans. – Bull. Fr. Pêche Piscic. 271, 40 – 54.
- LARINIER, M. (1983): Guide pour la conception des dispositifs de franchissement des barrages pour les poissons migrateurs. – Bull. Fr. Pêche Piscic. Numéro special 56, 1 – 39.
- LARINIER, M. (1992a): Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles. – Bull. Fr. Pêche Piscic. 326/327, 45 – 72.
- LARINIER, M. (1992b): Les passes à ralentisseurs. – Bull. Fr. Pêche Piscic. 326/327, 73 – 94.
- LARINIER, M. (1992c): Ecluses et ascenseur à poisson. – Bull. Fr. Pêche Piscic. 326/327, 95 – 110.

- LARINIER, M. (1992d): Implantation des passes à poissons. – Bull. Fr. Pêche Piscic. 326/327, 30 – 44.
- LARINIER, M. & F. TRAVADE (1992): La conception des dispositifs de franchissement pour les Aloses. – Bull. Fr. Pêche Piscic. 326/327, 125 – 133.
- LELEK, A. & C. KÖHLER (1990): Restoration of fish communities of the river Rhine two years after a heavy pollution wave. – Regulated rivers; research and management 5, 57 – 66.
- LEUTHNER, F. (1877): Die mittelhheinische Fischfauna mit besonderer Berücksichtigung des Rheins bei Basel. – Basel (H. Georg's Verlag) .
- LONNEBJERG, N. (1980): Fiskepas af Modströmstypen. – Ingeniörhöjskolen – Horsens Teknikum.
- LUBIENIECKI, B. , L. STEINBERG & W. FETTWEIS (1993): Fischaufstiege an der unteren Sieg in Nordrhein – Westfalen; erste Funktionsüberprüfungen. – 7. SVK – Fischereiseminar in Bad Godesberg.
- LWA (Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein – Westfalen) (1992): Biotopgestaltung an Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken und Flußstauen. – Merkblatt Nr. 9.
- MEIJERING, M. P. D. (1972): Experimentelle Untersuchungen zur Drift und Aufwanderung von Gammariden in Fließgewässern. – Arch. Hydrobiol. 70, 133 – 205.
- MÜLLER, K. (1950): Fische und Fischregionen der Fulda. – Jahresb. limnol. Flußstation Freudenthal 1, 18 – 23.
- MÜLLER, K. (1968): Die Tages – und Jahresperiodik der Bachforelle (*Salmo trutta* L.) am Polarkreis. – Aquilo, Ser. Zool. 8, 50 – 62.
- MÜLLER, R. & H. J. MENG (1990): The fate of the fish populations in the river Rhine after the Schweizerhalle accident. – Limnologie aktuell 1: Biologie des Rheins, 405 – 421.
- PATZNER, G. (1982): Kriterien für den zulässigen spezifischen Abfluß über breite Blocksteinrampen. – Österr. Wasserwirtschaft 34.
- PAVLOV, D. S. (1989): Structures assisting the migration of non – salmonid fish; USSR. – FAO Fisheries Techn. Pap. 308, 98 S.
- PECHLANER, R. (1986): „Driftfallen“ und Hindernisse für die Aufwärtsbewegung von wirbellosen Tieren in rhithralen Fließgewässern. – Wasser und Abwasser 30, 431 – 463.
- PELZ, G. R. (1985): Fischbewegungen über verschiedenartige Fischpässe am Beispiel der Mosel. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg 76, Frankfurt/M. , 190 S.
- PREISSLER, G. & G. BOLLRICH (1992): Technische Hydromechanik. – 3. Auflage, Berlin (Verlag für Bauwesen) .
- RAJARATNAM, N. & C. KATOPODIS (1984): Hydraulics of Denil Fishways. – Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110, 1219 – 1233.
- RAJARATNAM, N. , G. van der VINNE & C. KATOPODIS (1986) . – Hydraulics of Vertical Slot Fishways. – Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112, 909 – 927.
- ROUVÉ et al. (1987): Hydraulische Probleme beim naturnahen Wasserbau. – DFG – Forschungsbericht, Weinheim (VCH Verlagsgesellschaft) .
- RUPPERT, J. & H. SPÄH (1992): Wirksamkeit und fischökologische Bedeutung einer Fischtreppe an der Lippe. – Wasser und Boden, 44, 34 – 36.
- SCHAUBERGER, W. (1975): Die räumliche Krümmung von Gefällestufen und Sturzbettenendschwellen. – Wasser und Boden, Heft 10.
- SCHEUERLEIN, H. (1968): Der Rauhgerinneabfluß. – Bericht der Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München 14.
- SCHUA, L. & R. (1970): Lebensraum Wasser. – Stuttgart, 88 S.

- SCHWEVERS, U. & B. ADAM (1991): Ökomorphologische und fischereibiologische Untersuchungen im Gewässersystem der Lahn. – unveröff. Studie im Auftrag des rheinland – pfälzischen Ministeriums für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten. 4 Bände, zus. 827 S.
- SCHWEVERS, U. & B. ADAM (1993): Erstellung von Hegeplänen gemäß § 25 ThürFischG. Hrsg. : Thüringer Ministerium für Landwirtschaft und Forsten, Erfurt, 46 S.
- SIEBOLD, C. T. E. von (1863): Die Süß wasserfische von Mitteleuropa. – Leipzig (Wilh. Engelmann) .
- SNiP 2. 06. 07 – 87 (1987): Wehre, Schiffsschleusen, Fischaufstiegs – und Fischschutzanlagen. – Gosstroj U dSSR. – ZITP Gosstroja UdSSR (in russ.) .
- STAHLBERG, S. & P. PECKMANN (1986): Bestimmung der kritischen Strömungsgeschwindigkeiten einheimischer Kleinfischarten. – Wasserwirtschaft 76, 340 – 342.
- STEINBERG, L. & B. LUBIENIECKI (1991): Die Renaissance der Meerforelle (*Salmo trutta trutta* L.) und erste Versuche zur Wiedereinbürgerung des Lachses (*Salmo salar* L.) in Nordrhein – Westfalen. Fischökologie 5, 19 – 33.
- STEINMANN, P. (1937): Die Wanderungen unserer sogenannten Standfische in Fluß und Strom. Rev. Suisse de Zoologie 44, 405 – 409.
- TENT, L. (1987): Der Denil – Fischpaß als Beitrag zum Artenschutz an Fließgewässern. – Wasser und Boden 39, 119 – 123.
- THOMPSON, S. M. & P. L. CAMBELL (1979): Hydraulics of a large channel paved with boulders. – J. of Hydr. Res. , I. A. H. R. , 17/4, 341 – 354.
- TICHELBÄCKER, H. (1986): Der Freiungsritt der Grafen von Jülich entlang der Rur zum Schutze des Laichzuges der Lachse. Beiträge zur Jülicher Geschichte 54, 1 – 15.
- TRAVADE, F. & M. LARINIER (1992): Les techniques de contrôle des passes à poissons. – Bull. Fr. Pêche Piscic. 326/327, 151 – 164.
- VANNOTE, R. L. , G. W. MINSHALL, K. W. CUMMINS, J. R. SEDELL & C. E. CUSHING (1980): The river continuum concept. – Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37, 130 – 137.
- VOLZ, J. & S. J. DE GROOT (1992): Erster Nachweis des Störs (*Acipenser sturio*) im niederländischen Rhein seit 40 Jahren. – Fischökologie 6, 3 – 6.
- WHITTAKER, J. & M. JÄGGI (1986): Blockschwellen. – Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich 91.
- WITTMACK, A. (1876): Beiträge zur Fischereistatistik des Deutschen Reiches. – Circular des Deutschen Fischereivereins, Berlin.

9. 符号表

符号	单位	用来表示
a	m	丹尼尔鱼道中隔板间的距离；狭槽鱼道中转向块相对于隔板的摆动距离
A	m ²	面积，水流断面
A _{tot} , A _{ges}	m ²	总水流断面面积
A _o	m ²	基部面积
A _s	m ²	水池式鱼道中潜流孔口的横截面；浸没物体（如抗扰动蛮石）的浸湿面积
a _x , a _y	m	抗扰动蛮石间的纵向距离（a _x ）和横向距离（a _y ）
b	m	宽度，水道宽
b _a	m	丹尼尔鱼道隔板截面宽度；狭槽鱼道凹口宽度
b _m	m	平均宽度
b _s	m	水池鱼道潜流孔口宽度；蛮石槛（阶梯式斜坡）中间隙的宽度（便于排水）
b _{so} , b _{bot}	m	底宽
b _{sp}	m	水体在其表面的宽度
c	m	狭槽鱼道中钩状突出物的长度
c ₁ , c ₂	m	丹尼尔鱼道中隔板三角截面的高度
c _w	—	形阻系数
d	m	厚度，如基质层的厚度；水池式鱼道或狭槽鱼道中隔板的厚度
d _s	m	蛮石或石头的直径
d ₉₀	m	90%物质筛分的粒径
E	W/m ³	容积功率耗散
f	m	狭槽鱼道中转向块的宽度
Fr	—	弗劳德数
g	m/s ²	重力加速度，g=9.81m/s
h	m	高度或水深，一般指最小水深
h★	m	在丹尼尔鱼道中：从隔板开口截面最低点到水道底的垂直测量距离
h _a	m	水池式鱼道中凹口的高度；丹尼尔鱼道中隔板的高度
h _E	m	能级
h _{E,min}	m	最小能级

(续)

符号	单位	用来表示
h_F	m	跌水水头
h_{gr}	m	最低能级流量时的限制深度、水深
h_m	m	平均水深
h_0	m	坝上、隔板上或槛上水深(知道参考水位)
h_s	m	水池式鱼道中潜流孔口的高度(从底表面或衬底表面测量)
h_u	m	坝下或隔板下或槛下水深(知道参考水位)
$h_{\bar{u}}$	m	堰水头(有时写作 $h_{堰水头}$)
h_v	m	排水引起的能级损失
h_w	m	水池式鱼道中隔板的高度
I	-	坡度
k	m	绝对粗糙度
k_s	m	砂的等效粗糙度
l	m	长度、距离
l_b	m	水池长度
l_u	m	水道浸湿横截面实际长度
n	-	水池数
Q	m^3/s	流量或水流
Q_n	m^3/s	通过水池式鱼道凹口的流量
Q_s	m^3/s	通过水池式鱼道潜流孔口的流量
r_{hy}	m	水力半径, $r_{hy} = A/l_u$
s	m	狭槽鱼道中狭槽的宽度
V	m^3	容积
v	m/s	流速
v_{gr}	m/s	临界流深时的流速
v_m	m/s	平均流速
v_{max}	m/s	最大流速
v_s	m/s	狭槽中或潜流孔口中的最大流速
w	m	堰高, 槛高
x, y, z	-	笛卡儿坐标系中的 3 条轴

(续)

符号	单位	用来表示
α	°	角
$\triangle h$	m	水位差，例如水池间水位差
ϵ_v	—	容积比
ϵ_0	—	面积比
λ	—	达西-韦斯巴赫流动定律中的阻力系数
$\lambda_{\text{tot}}, \lambda_{\text{ges}}$	—	总阻力系数
λ_0	—	底凹凸不平引起的阻力系数
λ_s	—	抗扰动蛮石或类似物体的阻力系数
μ	—	计算溢流的溢流系数
μ_r	—	狭槽鱼道中的流量系数
ρ	kg/m ³	密度（水的）， $\rho=1\,000\text{kg/m}^3$
ρ_s	kg/m ³	石头密度， $\rho_s\approx 2\,700\text{kg/m}^3$
σ	—	回水系数，考虑下游水位的影响
ψ	—	流出系数
ζ	—	损失系数

水文信息及缩略语

缩略语	意义
OW	上游水位：坝上的水位
UW	下游水位：坝下的水位
MNW, MNQ	平均低水位和平均低水流量
MW, MQ	平均水位和平均流量
MHW, MHQ	平均高水位和平均高水流量
HW, HQ	高水位和高水流量
$\underline{n}W, \underline{n}Q$	一年中 n 天未达到的水位/流量
$\overline{n}W, \overline{n}Q$	一年中 n 天超过的水位/ 流量
HHW, HHQ	已知最高水位，已知最高流量

10. 专业术语解释

非生物因子 (Abiotic factor): 影响生物系统和生物群落的无生命的化学和物理因子, 如地质、温度、水平衡。——参看生物因子。

成体 (Adult): 从达到性成熟之时起的生物个体。

引入的 (Allochthonous): 相对于样品采集地环境是外来的活的生物或死的物质。

原地的 (Autochthonous): 相对于样品采集地是本土的活的生物或死的物质。

自养的 (Autotrophic): 对绿色植物和许多微生物利用光合作用将无机物 (矿物质、 CO_2 、 NH_4) 转化成有机物进行生长的生理机制的描述。

底栖区 (Benthic zone): 水体的底部。底栖生物生活于底部。这一栖息地的生物群落称为“底栖生物”。底栖无脊椎动物的生物群落称为底栖无脊椎动物区系。

生物群落 (Biocenosis): 一特定生活空间 (群落生境) 的植物和动物组成的群落。——参看鱼类群落。

生物因子 (Biotic factors): 生物环境所固有的、影响生物系统的因子, 如营养、竞争、寄生物等。——参看非生物因子。

群落生境 (Biotope): 具有自身特殊环境条件的植物和动物等生物群落所占据的空间 (栖息地)。

旁路 (Bypass): 引导水和生物绕过主水道的一种装置。在本指南中通常用来指提供另外的吸引流的一种装置。

旁路电站 (Bypass power station): 水道电站的同义语; 一个旁路电站是位于旁路水道 (水偏离主水道而进入涡轮机的人工渠) 上的一个水电站。为了获得更大的落差或水头来发电, 一般采用旁路人工缩短河道。通过旁路从主水道引水并将水传送到水电站。

临界流量 (Critical discharge): 对于确定鱼道尺寸具有决定意义的、单位时间水的体积。单位: m^3/s 。

定向水流 (Directional current): 无横向环流的水流。

引水电站 (Diversional hydropower station): 存在于坝结构旁的、由于引水增加了可利用落差或水头的一种水电站。

尾水管 (Draft tube): 水电站涡轮机运转中组成从涡轮机旋转器到尾水的连接及延迟水从涡轮机中流出的时间, 从而降低其流速的漏斗状开口。

能量耗散 (Energy dissipation): 从排水能量中回收势能和/或动能并将其转化成热能。——参看容积功率耗散。

广适的 (Eurytypic): 能够忍受非常不同的环境条件及其生活空间 (栖息地) 改变的生物。——参看狭适的。

流变 (Flow transition): 水深从湍流到层流或相反的改变。从层流到湍流的转变总至稳态的, 而从湍流到层流的改变总是以水跃的形式显示地表水位的扰动。

石筐 (Gabion): 主要用来加固河流上、下河岸的装满了石头的长方形金属丝筐。

栖息地 (Habitat): 一个植物或动物物种在一个生态系统内所占据的正常生活空间。

鱼类群落 (Ichthyocoenosis): 活鱼的群落。——参看生物群落。

间隙 (Interstitial): 形成河底或与之邻近的河流泥砂内的充满了水的空间。

无脊椎动物 (Invertebrates): 没有脊椎的动物的集合名词。

无脊椎动物食性鱼类 (Invertivorous fish): 摄食无脊椎动物 (无论它们是水生的、飞的还是陆生的) 的鱼类种类。——参看无脊椎动物。

产后鲑 (Kelts): 产卵后向海洋返回途中的鲑和海鳟。

嗅觉定向 (Olfactory orientation): 由高度发达的嗅觉产生的许多种鱼类的定向。

1-2 龄幼鲑 (Parr): 生活于淡水中的幼鲑。

浮游植物 (Phytoplankton): 在淡、海水中被动生活并通过光合作用生产其自身营养的 (即它们是自养的)、非常小的藻类。

肉食性鱼类 (Piscivorous fish): 摄食其他鱼的鱼类种类。

浮游植物食性鱼类 (Planktivorous fish): 摄食浮游植物的鱼类种类。

群体 (Population): 一个物种在一个特定生活区域中相互有性生殖, 因而在遗传上有联系的所有个体。

水闸 (Sluice): 释放、冲洗或排空坝后蓄水池的装置。

闸门 (Sluice-gate): 堰、水库和水电站旁设置的用以调节水流的可控制构件。闸门一般用在侧向导槽中滑动或滚动的矩形钢板制成。

2-3 龄幼鲑 (Smolts): 具典型银色的初次降海洄游幼鲑。

溢出流 (Spillover jet): 溢出溢洪道后或游离或作为喷出流沿溢洪道回流的水流。

狭适的 (Stenotypic): 狭适种对其生活条件的改变非常敏感。——参看广适的。

种群 (Stock): 一个物种在一个特定生活区域中在遗传上有自我特征的个体。

容积功率耗散 (Volumetric power dissipation): 鱼道水池中单位容积耗散的能量。水能对继续排水不再是可利用的。它是一个水池中湍流状况的一个度量。单位: W/m^3 水池容积。——参看能量耗数。

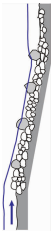
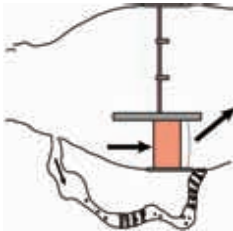
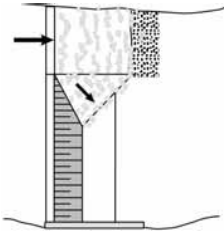
照片拍摄及提供:

Baumann, A. :	图 4.2
BAWAG:	图 4.21, 4.26, 4.45
Gebler, R. - J. :	图 4.33, 4.37, 5.40
Heinrichsmeier, G. :	图 4.38, 4.39, 4.40, 4.41
Krüger, F. :	图 2.9, 2.11, 3.1, 3.2, 3.14, 4.9, 4.10, 4.11, 4.17, 4.24, 4.28, 5.7, 5.15, 5.20, 5.25, 5.29, 5.30, 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 6.1
Lippeverband:	图 5.12, 5.13
Marmulla, G. :	图 4.29, 4.34
Mathis, R. :	图 2.15
RWE AG:	图 3.3, 5.11, 5.44
Schaa, W. :	图 4.49
Schwevers, U. :	图 2.6, 2.7, 2.8, 2.12, 2.13, 5.46, 5.47, 6.2, 6.3
Städtler, E. :	图 4.35
Steidl, J. :	图 4.15
Stolzenburg, H. :	图 2.14
Surhoff, P. :	图 4.22, 4.36, 5.3
Touschek, A. :	图 4.13

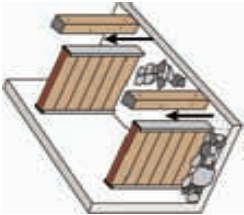
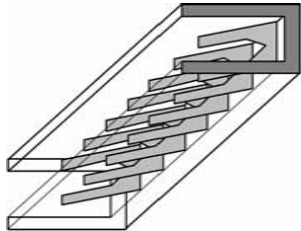
图解设计: Krüger, F. 和 Schaa, W.

附录：最常用鱼道构造类型概况

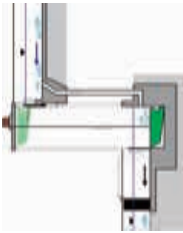
根据功能和生态外形的不同区分鱼道，但是没有考虑限制某些结构使用的当地地理因素。所给的测量数据，均为需求最小值。

贴近自然型构造						
类 型	略 图	原 理	尺寸和流量	应用范围	优缺点	效 果
底坡和底微斜坡 (见节 4.1)		底坡和底微斜坡是一种具粗糙表面且横跨整个河宽的构造。松散填石构造和阶式构造居多。	b 与河宽一样 (b=斜坡宽度), 斜度通常小于 1 : 15。斜度较高之斜坡其边缘部分应平缓一些。水深 $h > 0.3 \sim 0.4\text{m}$, 单位流量 $q > 100\text{l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。多层构造和下游加固区。	推荐在原有结构不再使用且上游水位不需被管制的地方使用。用作陡降和固定 (很陡峭) 堰的修正, 也作为防止底床侵蚀的保护槛。	在低水位时有干涸的危险, 因此底床封闭很有必要。相对低的费用。它们能很好融入当地环境, 看上去很自然, 需较少维护。入口吸引水流不存在问题, 很容易被鱼发现。	所有水生动物可溯河和降河两个方向自由通过。上游蓄水区的长期底质积累也可修复上游典型的流速和底层环境。
旁路水道 (见节 4.2)		提供一个绕过坝并呈模仿自然河流外观、呈现自然水道形式的通道。	$b > 1.2\text{m}$; $h > 0.3 \sim 0.4\text{m}$; $I < 1 : 20$ 。 旁路鱼道应延伸至上游回水区。流量最少为 $q = 100\text{l}/(\text{s} \cdot \text{m})$	适合于所有具有足够空间的障碍, 对于现存的坝堰改善特别有用。在上游设计蓄水水位变化时不适用, 在后者入水口需要调节流量的构造。	费用很低, 但是占地面积很大。由于在地面上做一个深沟, 故需要结合其他技术构造。桥梁和地下通道通常是必需的。	它可以使所有的水生动物种类通过, 为喜流性种类提供生存空间, 是唯一一个能绕过大坝和水库且能很好跟当地环境结合的鱼道。
鱼坡 (见节 4.3)		鱼坡是一种有平缓坡度、粗糙表面并嵌入堰中的构造。其主体由填石构成, 并加入蛮石或蛮石槛来降低流速。	$b < 20\text{m}$; $h < 0.3 \sim 0.4\text{m}$; $I = 1 : 20$ 或更小 必需流量 q 大约为 $100\text{l}/(\text{s} \cdot \text{m})$	它们被用在高度低于 3m 的障碍。通常嵌在堰基石和多个湾堰中作为替代。它不适合在上游设计蓄水水位变化时使用。	该构造需较高的技术要求, 要很高的结构稳定性。存在低水位时干涸的危险, 因此是需要底床封闭的。需要很少的维护, 在洪水期自净能力很强, 具很好的吸引水流。	它可以使所有的水生生物种类向上下游双向通过。

(续)

技术型构造						
类 型	略 图	原 理	尺寸和流量	应用范围	优缺点	效 力
狭槽鱼道 (见节 5.2)		狭槽鱼道通常是具有混凝土或木板的隔板的混凝土通道, 且具有一个或两个高度与隔板与侧墙整个高度相同的狭槽。	水池尺寸: $lb > 1.90 \text{ m}$; $b > 1.20 \text{ m}$; $h > 0.5 \text{ m}$; 狭缝宽度: $s > 0.17 \text{ m}$. 流量可从 $Q = 140 \text{ l/s}$ 直至数立方米每秒。	可应用于中小水头, 适用于可变蓄水位的情况。可被用于小溪流和大河。河流尾水的平均深度必须大于 0.5 m 。	可通过相对较大的流量, 方便形成较好的吸引水流。由于较不会被碎屑阻塞, 因此比普通的水池鱼道更可靠方便。	它们现在是最好的技术型鱼道, 对所有鱼类均适用, 如果底部基质连续, 也可通过无脊椎水生生物。
水池鱼道 (见节 5.1)		通常是混凝土通道, 具有混凝土或木质的隔板, 潜水孔与顶部凹槽交叉设置。	水池尺寸根据河流区域而定: $lb > 1.4 \text{ m}$; $b > 1.0 \text{ m}$; $h > 0.6 \text{ m}$. 潜水孔: $b_s > 25 \text{ cm}$, $h_s > 25 \text{ cm}$ 流量 $Q = 80 \sim 500 \text{ l/s}$.	适用于改良坝和水电站处的中小水头。	所需流量较低, 存在被碎屑阻塞的风险。	如果水池和孔尺寸与要通过的鱼的大小合适, 它可以通过所有鱼类。在低流量时, 常常无法形成足够的吸引水流。
丹尼尔鱼道 (见节 5.3)		木制或混凝土式通道。其间安置了一些 U 形隔板 (通常为木板), 逆着水流方向呈 45° 角设置。	通道: $b = 0.6 \sim 0.9 \text{ m}$; $h > 0.5 \text{ m}$; $l < 1:5$; $Q > 250 \text{ l/s}$. 通道长度为 $6 \sim 8 \text{ m}$, 若水头 $> 1.5 \sim 2 \text{ m}$, 需设置休息池。	适用于低水位, 尤其是那些需要改造的又没有足够空间的老式小水坝。	需要较高的流量; 不适用于上游水位变化频繁的区域; 不受下游水位变动的影响; 需要空间小; 建造成本低; 吸引流容易形成。	根据目前的知识水平, 丹尼尔鱼道不太适用于游泳能力弱的鱼类以及小型鱼类。对过鱼种类具有选择性。底栖动物无法通过。

(续)

特殊构造						
类 型	略 图	原 理	尺 寸 和 流 量	应 用 范 围	优 缺 点	效 力
鳗 梯 (见 节 5.4)		一般来说, 鳗梯是带有刷状装置的小通道, 铺设有多层灌木丛或沙砾, 水流从缝隙缓缓满过。也有鳗鱼管道模式通过坝堰主体, 其间铺设矮灌木丛或者刷状物。	通道: $b=30\sim 50\text{ cm}$ $h=15\sim 25\text{ cm}$ 斜率通常为 $1:5\sim 1:10$, 还可以更大。	通常用来作为水池鱼道的旁道。但是仅仅对幼鳗和稚鳗有用。一般说来, 如果有另外一个鱼道存在, 它不是必需的。	建设成本低, 需要的空间小, 而且流量要求低。	仅仅适用于幼鳗和稚鳗。鳗鱼管道没有得到有效证明, 主要因为经常被碎屑堵住且在维护上存在很大的困难。就它们本身而言, 这些鳗鱼鱼道不能很好地联接上下游的栖息地, 从而无法确保所有鱼类都能自由通行。
鱼 闸 (见 节 5.5)		这是一个凹形通道, 上下游两端都有可控的闸门。通过控制闸门的开关或往通道注水来形成引流。	尺寸大小是可变的。鱼闸的最小高度和水深应该与那些水池通道一致。水流量取决于鱼闸的尺寸、鱼闸运行周期、间隔时间以及形成引流需要的水流强度。	适用于高水头和空间以及流量有限的区域。	较高的设计和建造技术要求。需频繁地维护和运行。建造和维修费用高。但是对水的消耗较低。适用于需要水考虑大型鱼类(如鲟类)的地方。	根据目前的知识水平, 鱼闸适用于鲑鳟鱼类以及游泳能力弱的鱼类, 但对底层鱼类和小型鱼类不适用。
升 鱼 机 (见 节 5.6)		就是配置有运送水槽和机械装置的升降机。通过把鱼从下游吊送到上游, 通过渠道连通上游。通过旁路注水创造引流。	尺寸是可变的。运送水槽的体积大约为 $2\sim 4\text{ m}^3$ 。需要由旁路注入持续的水流来创造引流条件。	适用于跟鱼闸一样的情况。通常是上下游落差在 10m 以上高度的情况下唯一可能建造的鱼道类型, 比如高坝。	需要空间不大。在设计 and 建造上对技术要求较高。需频繁地维护和运行。建造和维修费用高。	根据目前的知识水平, 升鱼机适用于鲑鳟鱼类以及游泳能力弱的鱼类, 但对底层鱼类和小型鱼类不适用。也不适用于大型底栖动物以及向下游迁移的鱼类。

许多种鱼进行或多或少延长的洄游作为其基本行为的一部分。在欧洲最著名的例子是鲑（*Salmo salar*）和鳟（*Acipenser sturio*）。这两种鱼从海洋返回其在河流中的产卵场通常游泳数千米。除了这些长距离洄游的种类外，其它鱼类和无脊椎动物在其生活史的某些阶段进行短期或小规模洄游，从河流的一个区段到另一个区段。

鱼道对于恢复鱼类及其它水生物种在河流中的自由通道具有愈来愈大的意义，因为这类装置是使水生动物区系能够通过妨碍其溯河旅行的障碍物的惟一通路。鱼道于是成为流水生态改良的关键部件。其有效运行是自由通过在河流中恢复的一个前提。然而，现有装置的研究表明，其中许多运行不正确。因此，各类风险承担者如工程师、生物学家和行政官员表示对与现代经验和知识相符合的、普遍有效的标准和说明书有很大的兴趣。

鱼道能够以技术上注重实用的方式或以模仿自然的方式来建造。旁路水道和鱼坡是较自然的解决办法之一，而技术性教强解决办法包括普通的水池式通道、狭槽通道、升鱼机、水力鱼闸及鳗鲡梯。本书涉及了所有这些类型。而且，特别强调了全面监测的重要意义。