

文章编号:1672-3031(2012)01-0041-07

## 环境友好的近自然型鱼道

孙双科, 张国强

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 鱼道是帮助鱼类顺利通过闸坝等障碍物的专用设施, 在维系河流连续性与生物种群交流方面具有不可替代的作用。近自然型鱼道是目前国际上十分流行的鱼道布置形式, 其典型特点是利用漂石与天然河道床沙质构建尽可能接近于天然河流的水流流态。与传统的工程鱼道相比, 近自然型鱼道由于构建了鱼类熟悉的水流流态, 因而往往具有更高的过鱼效率。本文全面介绍了近自然型鱼道的设计理念、类型、构造布置特点、设计原则、以及水力计算方法, 并对我国鱼道技术的进一步发展提出了若干建议。

**关键词:** 近自然型鱼道; 漂石; 加糙坡道; 旁通过鱼水道; 过鱼副坝

**中图分类号:** U643.2

**文献标识码:** A

### 1 近自然型鱼道技术的提出

鱼道是帮助鱼类顺利通过闸坝等障碍物的专用设施, 在维系河流连续性与生物种群交流方面具有不可替代的作用。

最初的鱼道往往是为了解决特定鱼类的上溯而设计建造, 其典型代表为比利时人发明的丹尼尔式鱼道, 之后相继出现了堰流式鱼道与竖缝式鱼道<sup>[1]</sup>。上述鱼道都是人类为鱼类通过闸坝等障碍物而主观拟定的过鱼建筑物, 一般多采用钢筋混凝土结构, 也有少数采用木质结构的, 均属于工程鱼道的范畴, 其结构布置与水流流态与天然河流有显著差异。堰流式鱼道、丹尼尔鱼道、竖缝式鱼道是工程鱼道的典型代表。该类鱼道发展历史较早, 目前已得到广泛的实际运用。

就工程鱼道的运行实践看, 尽管有不少取得成功的鱼道工程, 但运行效率欠佳甚至无效的鱼道工程也不在少数, 国内外均是如此。

实际上, 鱼道的过鱼效率乃至成败不仅取决于鱼道进出口与鱼道内的水流流态与水力学指标, 更主要的是取决于过鱼对象与鱼道水流之间的协调性。工程鱼道与天然河道在水力特性上的本质差异无疑是影响工程鱼道过鱼效率的关键之所在。

基于上述考虑, 20世纪70年代, 德国人提出了一种近自然型鱼道技术(close-to-nature style), 这种鱼道采用天然漂石构建阶梯水池或过鱼竖缝, 尽可能模拟天然河流的水流流态。与工程鱼道相比, 近自然型鱼道由于构建了鱼类更为熟悉的水流流态, 因而具有更高的过鱼效率。

近自然型鱼道是符合人与自然和谐共处原则的典型技术, 其诞生与发展具有历史的必然性。自问世以来, 在德国、瑞士、芬兰、澳大利亚、日本等国得到了较多的实践运用, 其设计方法也日趋完善。1996年, 德国水资源与国土开发协会对近自然型鱼道的设计方法进行了技术总结并出版了德文版的设计导则, 2002年, 联合国粮农组织出版了该设计导则的英文版<sup>[2]</sup>。

我国目前仍处于水利水电工程建设的高峰时期, 环境保护问题受到来自社会各方面的高度重视, 过鱼设施已成为工程环境影响评价的主要内容之一, 许多在建或待建的水利水电工程都已着手开展针对过鱼设施的设计与研究, 有些河流已在开展河道生态修复措施的研究。作为鱼道技术的重要组成部分之一, 近自然型鱼道对于我国的鱼道建设、改善河道生态环境和河道生态修复, 无疑具有重要的参考应用价值。

收稿日期: 2011-08-30

作者简介: 孙双科(1966-), 男, 河南南阳人, 教授级高级工程师, 主要从事水工水力学研究。E-mail: sunsk@iwhr.com

## 2 近自然型鱼道的类型与技术特点

如图1所示,近自然型鱼道大致可分为如下三大类型:(a)加糙坡道;(b)低坝的旁通过鱼水道;(c)过鱼副坝。

加糙坡道是近自然型鱼道最初的一种布置形式,一般采用大型漂石构建尽可能平缓的坡道,以替代低堰或落差工,从而帮助鱼类顺利通过闸坝等障碍物。

当闸坝不具备改建条件,而地形条件较为有利时,可在河道岸边开凿仿自然河流的明渠以帮助鱼类顺利通过闸坝,此即近自然型鱼道的第二种类型——旁通过鱼水道。

对于宽度较大的闸坝工程,也可考虑将部分非溢流坝段改建为加糙坡道,以帮助鱼类过坝,此即近自然型鱼道的第三种类型——过鱼副坝。

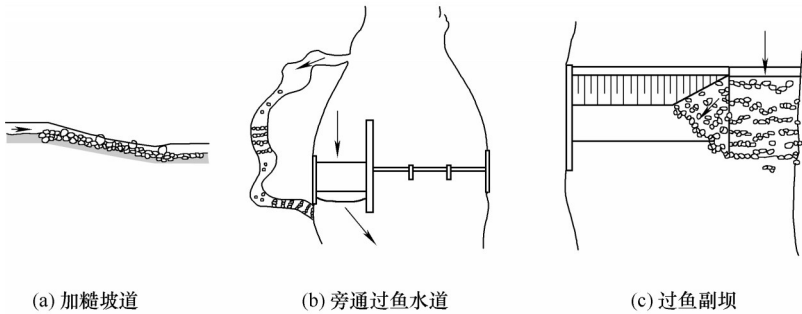


图1 近自然型鱼道的三大类型

上述三大类型的近自然型鱼道,尽管在布置形式上有一定差异,但其内核是相近的,都具有如下共同的技术特点:(1)利用漂石错落布置,形成深浅各异、流速大小不一的水流流态,构建接近于天然河流的水流流态;(2)适用于各种鱼类上溯或下行,过鱼效果佳;(3)对于亲流性鱼类而言,本身就是良好的栖息地;(4)具有良好的景观功能;(5)不易堵塞,运行管理费用低;(6)易于改建,大多数近自然型鱼道在完建之初,都需要进行试运行,根据试运行的效果,可以很方便的对细部结构进行相应调整。

有必要强调指出的是,相对于工程鱼道而言,近自然型鱼道也有其自身的缺陷,主要包括难以适应上下游水位比较大的变动、过流流量偏大、占用空间较大等,因此在选择时需要根据每个工程的具体特点,灵活掌握,切忌生搬硬套。

## 3 加糙坡道的构造特点与设计方法

如图2所示,根据漂石布置方式的不同,加糙坡道可分为如下3种构造类型:(a)规则码放的嵌石结构;(b)较为松散的堆石结构;(c)漂石交错布置结构。

第一类为规则码放的嵌石结构,该布置中漂石沿坡道底层规则码放,紧密嵌连在一起,漂石直径一般为0.6~1.2m,坡道底层可以是碎石层,也可以是多级配的砂砾层,嵌石结构的首尾两端均需进行特别的加固处理,可选用排桩等木质结构或钢筋与钢筋网等金属材料。此类加糙坡道,由于漂石紧密相嵌,构造十分坚固,能够抵抗较为强烈的水流剪切力作用,其底坡坡度可以达到1:8~1:10。为防止长期运行可能引起的下游冲刷破坏,嵌石结构的下游端3~5m范围内可堆放一些块石以抗冲刷。

第二类为堆石结构,即在碎石结构的基础上零散布置一些漂石,布置漂石的目的是为了提高加糙效果。从生态学角度看,此类结构由于拥有更为丰富的底质,而且水流结构更富多样化,因此要优于前述的嵌石结构。此类加糙坡道,碎石层的厚度一般要求达到最大漂石直径的2倍以上,漂石直

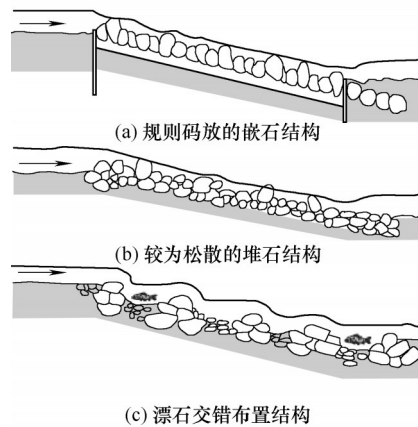


图2 加糙坡道的三种布置结构

径仍为 0.6~1.2m；由于抗水流冲刷能力相对较弱，要求底坡坡度较小，一般为 1:15~1:30；为提高结构体的稳定性，可采用木桩或金属网进行加固处理。同样为防止长期运行可能引起的下游冲刷破坏，堆石结构的下游端 3~5m 范围内可堆放一些块石以抗冲刷。

需要指出的是，此类加糙坡道，当横断面接近河槽形态时，对于两侧岸坡同样需要进行堆石防护处理，防护范围应达到平均水面线，另外，平均水面线与最高水位之间，可种植适当的植物以提高岸坡的抗冲刷能力并确保洪水期主流居于河槽中央(如图 3 所示)。

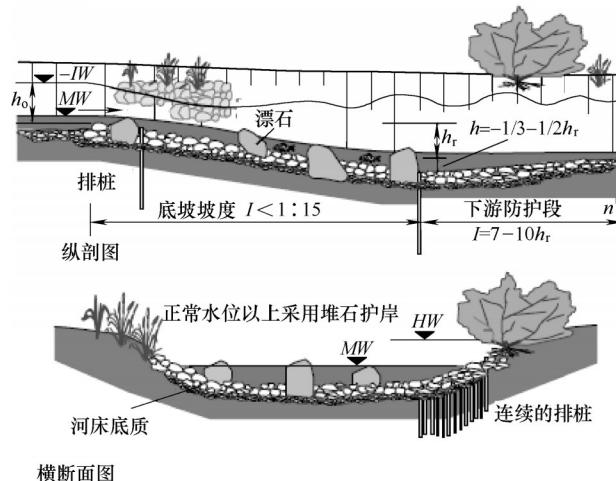


图3 横断面为河槽形态的堆石结构

第三类为漂石交错布置结构，即采用适当的漂石布置方式，在坡面上形成大小不一数量众多的水潭，以模拟天然河道中多变的水流流态。如图 4 所示，此类加糙坡道中，漂石直径大致为 0.6~1.2m，为提高抗冲刷能力与坡道的稳定性，水潭周边的漂石应紧密码放，且嵌入河床的深度要求不低于 2.5m，而在水潭中可选择当地的河床质如鹅卵石等予以填充，这些填充材料可能会在大洪水期间被冲离原有位置，但当水流流速降低后，仍会重新塑造回原有形态。当河道宽度大于 15m 时，加糙漂石宜按拱形码放，以提高坡道的抗冲刷能力。

加糙坡道的水深越大，越有利于鱼类上溯，因此在小流量条件下通常要求坡道的平均水深不低于 0.3~0.4m。另外，通常要求坡道中的最大水流流速不超过 2.0m/s。

#### 4 旁通过鱼水道的构造特点与设计方法

旁通过鱼水道是建于闸坝等过鱼障碍物的外侧并尽可能模拟天然河流的一种鱼道布置方式，一

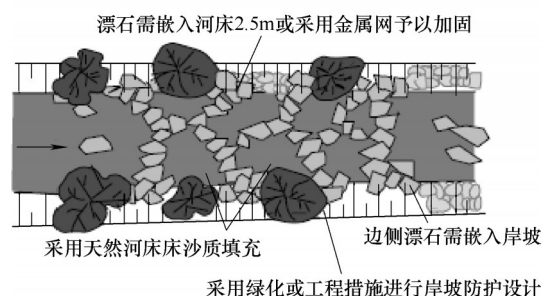


图4 漂石交错布置的加糙坡道平面示意

一般而言，这种鱼道的长度都比较长。旁通鱼道的建设不需要对闸坝工程进行任何改造，因而通常运用于需要增建鱼道的已建闸坝工程。此类鱼道的主要缺陷在于往往需要占用较大的场地，这往往是制约其工程运用的主要因素。但另一方面，这种蜿蜒悠长的近自然水道也具有良好的景观功能。

旁通过鱼水道不仅具有过鱼功能，而且鱼道本身就是良好的水生生物栖息地，这一点对于幼鱼而言更具吸引力。旁通过鱼水道能够给鱼类顺利过坝提供一个接近于天然河流的水流流态，因而在维系和再造河流连续性方面具有显著作用。另外，旁通过鱼水道的上游出口往往可以布置在水库回水区的末端附近，从而使鱼类免受闸坝工程所导致的种种不利影响(如图5所示)。

旁通过鱼水道的主要技术参数如下：(1)鱼道底坡较缓，一般为 $i=1:20\sim 1:100$ ；(2)鱼道宽度一般要求大于0.8m；(3)鱼道的断面平均流速 $V=0.4\sim 0.6\text{m/s}$ ；而最大流速 $V_{\max}=1.6\sim 2.0\text{m/s}$ ；(4)通常，单宽流量要求大于 $0.1\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ ；(5)鱼道的单位体积消能率应控制在 $150\sim 200\text{W}/\text{m}^3$ ，过鱼对象为虾蟹时宜取下限值，过鱼对象为大型鱼类时可取上限值。

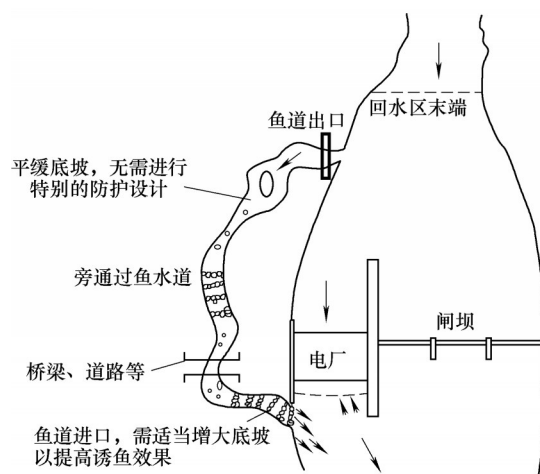


图5 旁通过鱼水道的平面布置

另外，在旁通过鱼水道的设计与建设中，需要注意如下事项：(1)河道蜿蜒，底坡坡度多变，断面形态各异，缓急相间，尽可能接近天然河道流态；(2)河道两侧需进行岸坡防护设计并进行绿化；(3)采用堆石结构时，漂石间距应为漂石直径的2~3倍，漂石间过水宽度宜大于0.3~0.4m；(4)鱼道进水口附近可采用相对较大的底坡，适当增大流速，提高诱鱼效果；(5)当上下游水位变化较大时，水道上游端需增设调控装置以便在水位过高或过低时关闭鱼道运行；(6)桥梁等横穿建筑物占用的河道长度应不超过河道宽度的10倍。

## 5 过鱼副坝的构造特点与设计方法

对于已建闸坝工程，只有当不再需要控制上游水位时，才可以废弃闸坝而改建为前述的加糙坡道式鱼道，这类鱼道占用了整个闸坝宽度。然而，上述情况并不多见，实际工程中往往出于发电、



防洪、农业灌溉、以及渔业等综合利用的需要，只能在保持闸坝功能的前提下，选择枢纽的一部分宽度设置过鱼通道，在此类情况下修建的近自然型鱼道，即为过鱼副坝。

过鱼副坝的构造特点与加糙坡道和旁通过鱼水道相类似，主要是利用漂石的合理布置以尽可能模拟天然河流中富于变化的水流流态。由于在高水位情况下，过鱼副坝的过流流量较大，反而不利于鱼类上溯，因而过鱼副坝通常都在上游最低水位与平均水位之间发挥作用。出于结构稳定的考虑，通常需要计算过鱼副坝的结构尺寸以抵御洪水期的水流冲刷。

根据上游水位变幅大小的不同，过鱼副坝有两种布置类型：在上游水位变幅较大的情况下，过鱼副坝内侧需设置隔流墙，上游也需增设流量控制装置(如缩窄宽度等)，以控制洪水期通过鱼道的流量不至于过大；在上游水位变幅较小的情况下，因闸坝仅在洪水期过流，平时不过流，因而鱼道内侧不必设置隔流墙，上游也无需设置流量控制装置，不过这种情况较为少见。

过鱼副坝坝体的构造方式与加糙坡道相近，大致也分为松散的堆石结构、规则码放的嵌石结构、以及漂石交错布置结构三大类。

过鱼副坝的主要技术参数如下：(1)宽度一般要求大于2m；(2)底坡坡度一般为1:20~1:30；(3)鱼道内的平均水深一般为0.3~0.4m；(4)最大水流流速  $V_{\max}=1.6\sim2.0\text{m/s}$ 。

德国鱼道工程的运行实践经验表明，大量使用漂石形成池式鱼道的布置方式具有较好的过鱼效果，这种鱼道属于兼具过鱼副坝(近自然型鱼道)、堰流式鱼道与竖缝式鱼道(工程鱼道)技术元素的综合布置体型，其典型布置见图6所示。图7是德国于1989年修建的某过鱼副坝，该鱼道宽1.9m，长32m，上下游水位落差为3.6m，鱼道过流流量为 $0.34\text{m}^3/\text{s}$ ，鱼道内水深约为0.6~0.8m。鱼道布置于橡胶坝的左岸，与主河道之间建有混凝土隔离墙。鱼道底部铺设了厚约0.2m的砂砾层，漂石的纵向间距为1.65~3.15m不等，后经试运行，对漂石的横向间距(相当于竖缝式鱼道的竖缝断面)进行过相应调整。

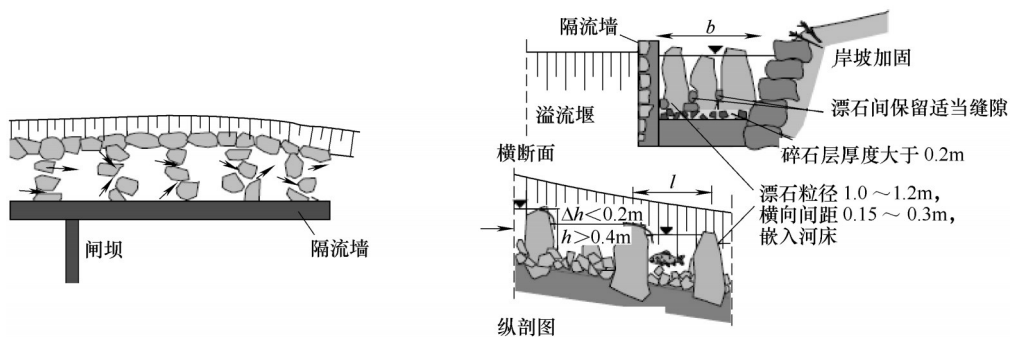


图6 过鱼副坝的典型布置(左侧为平面布置图，右侧为纵剖图与横断面图)



图7 德国乌林根橡胶坝工程的过鱼副坝(河道总宽10~15m)

## 6 近自然型鱼道的水力计算

近自然型鱼道除了前述对水深、宽度等的基本要求之外，对水流流速也有相应的技术要求，最大流速一般不允许高于 2.0m/s。近自然型鱼道的水力计算，最主要的内容也是水流流速的计算。

近自然型鱼道的断面平均流速可沿用明渠水流的达西公式计算：

$$V_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gRi} \quad (1)$$

式中： $V_m$ 为断面平均流速； $R$ 为水力半径； $i$ 为河道底坡坡降，阻力系数 $\lambda$ 由式(2)计算：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{K_s/R}{14.84} \quad K_s/R < 0.45 \quad (2)$$

式(2)中的 $K_s$ 为当量糙度，对于河床底质为松散的堆石结构， $K_s$ 可按砾石的平均直径 $d_s$ 进行计算。

对于漂石规则码放的加糙坡道，阻力系数 $\lambda$ 可由式(3)计算：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -3.2 \lg \left[ (0.425 + 1.01i) \frac{k}{h_m} \right] \quad k = \left( \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \right) d_s, \quad d_s = 0.6 \sim 1.2m, \quad i = 1:8 \sim 1:15 \quad (3)$$

对于漂石相间布置的旁通鱼道(如图 8 所示)，相关计算要复杂一些，具体计算方法如下：

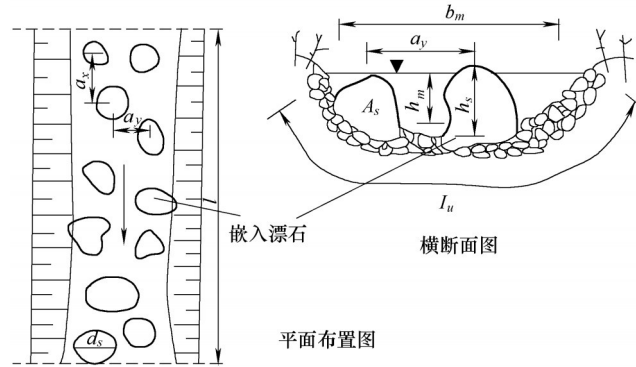


图8 漂石相间布置的近自然型旁通鱼道

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_s + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon_v} \quad (4)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sum V_s}{V_{tot}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sum A_s}{A_{tot}} \quad (6)$$

$$\lambda_s = 4C_w \frac{\sum A_s}{A_{tot}} \quad C_w = 1.5 \quad (7)$$

式中： $\lambda_0$ 为未计入漂石影响时的阻力系数，可由式(2)、(3)计算； $\lambda_s$ 为反映漂石影响的附加阻力系数； $A_s$ 、 $V_s$ 分别代表漂石的阻水面积与体积； $A_{tot}$ 、 $V_{tot}$ 分别代表鱼道断面面积与总体积。

确定断面平均流速 $V_m$ 后，可按式(8)计算鱼道内的最大水流流速 $V_{max}$ ：

$$V_{max} = \frac{V_m}{1 - \frac{\sum A_s}{A_{tot}}} \quad (8)$$

## 7 对我国鱼道建设的一些考虑与建议

(1)与工程鱼道相比,近自然型鱼道具有独特的技术优势,在地形、河流落差等条件允许的条件下,鱼道工程选择时应优先考虑采用。

(2)在今后的工程鱼道设计中,可部分吸纳近自然型鱼道的技术特点与技术元素,如采用加糙技术等,进一步提高过鱼效率。

(3)无论是工程鱼道还是近自然型鱼道,在布置形式上要根据工程特点与过鱼对象的实际需要灵活选择,切忌千篇一律。

(4)鱼道技术的相关研究工作,既包括针对鱼类生理特点与生活习性的研究,也包括鱼道水力学问题研究,都需要重视。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] ダム水源地環境整備センター編.最新魚道の設計—魚道と関連施設—[M].信山社サイテック,1998.
- [ 2 ] Fish passes—Design, dimensions and monitoring[R]. Published by FAO of the United Nations in arrangement with DVWK, Rome, 2002.

### Environment-friendly fishway in close-to-nature types

SUN Shuang-ke, ZHANG Guo-qiang

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** As a special releasing structure, fishway can help the fish species migrate through the dam & gate successfully. It is essential to maintain the river continuum and intercommunion between different fish species. Close-to-nature type of fish passes is one of the most popular layout of fishways in the world, its marked characteristics are that individual boulders and locally substrates are adopted for the fishway construction in order to imitate as closely as possible the flow pattern of natural river, and therefore it has higher running efficiency for fish migration than traditional technical fishways. This paper introduces the close-to-nature type of fish passes in detail including its principle, constructions styles, method of design, and hydraulic calculations etc., and proposes some advice for the improvement of our country's fishway technology in the future.

**Key words:** close-to-nature type of fish passes; individual boulder; bottom ramp and slope; bypass channel; fish ramp

(责任编辑:李福田)