

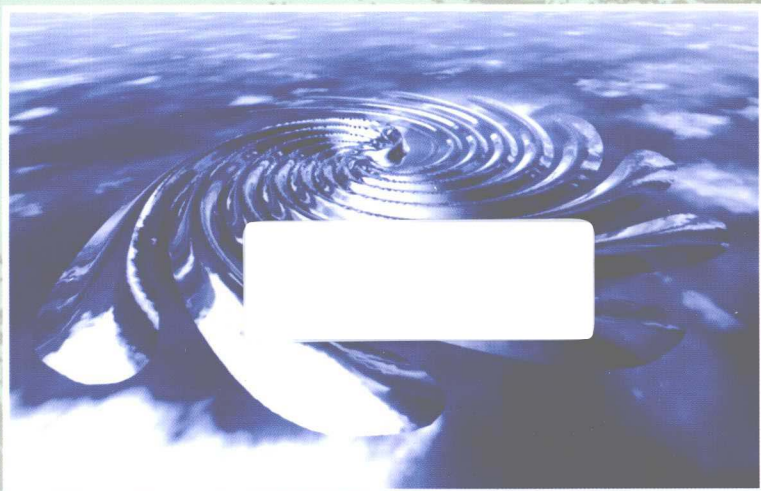


中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION

技术专著系列

水轮机的环保与防腐

田树棠 刘国峰 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION

技术专著系列

水轮机的环保与防腐

田树棠 刘国峰 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

水力发电虽是最清洁的绿色能源,但也存在一定的环保问题,如水轮机振动与噪声的环保、水轮机防腐、水轮机过鱼等。本书主要内容包括水轮机设计中的环保问题、水电站水轮机的环保设计、水轮机振动与噪声的环保、水电站运行环境的环保设计、水轮机防腐、亲鱼水轮机简介等。

本书具有较高的实用价值,可供水轮机设计、制造、安装、水电站运行等技术与管理 人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水轮机的环保与防腐 / 田树棠, 刘国峰编著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 4

(中国水电顾问集团西北勘测设计研究院技术专著系列)

ISBN 978-7-5170-0776-0

I. ①水… II. ①田… ②刘… III. ①水轮机—环境污染—污染控制—研究②水轮机—防腐—研究 IV.

①X77②TK73

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第077498号

书 名	中国水电顾问集团西北勘测设计研究院 技术专著系列 HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION 水轮机的环保与防腐
作 者	田树棠 刘国峰 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	145mm×210mm 32开本 6.75印张 176千字
版 次	2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

环境保护问题无所不在。水力发电虽是最清洁的绿色能源，但也存在一定的环保缺陷。如水轮机的过鱼问题，即如何使鱼类通过旋转的水轮机时尽量不受损伤，国外称为亲鱼水轮机。这个课题国外早有研究并取得一定成绩，国内也有探讨，只是工程上实现的不多，从 21 世纪初在南方一些低水头电站才有鱼道设计要求。鱼道，即让鱼类穿过水工建筑返回上游产卵繁殖的通道。另外还有水轮机的防腐问题，如潮汐电站防腐、灯泡机组一次冷却防水生物要求等。防腐也从利用化学方法扩大到物理方法，效果亦比过去大有进步。古人说“它山之石可以攻玉”是有道理的，当代许多技术是可借鉴的。

当今社会方方面面深受环保之限，水轮机也不例外。国外早在 20 世纪就开展了有关研究，国内稍慢一点，但也有所动作，只是未能引起大家的重视。笔者不再坐班之后，事情不多，整理过去的资料，发现国内外一些有关水轮机环保问题的文章，读后深受启发，不揣高深就写了这本小书，如今拿出来供同行们参考，希望达到“风乍起，吹皱一池春水”的愿望，最终能“惊涛拍岸卷起千堆雪”就更好了。总之，水轮机的环保问题迟早会提到设计工作中来，鱼道设置过去在水电站设计

中是没有的，但从 21 世纪初广西长洲水电站设计时开始有了要求，湖南湘江流域梯级开发中开始没有鱼道设计，但现在的长沙枢纽设计中就有了鱼道设计要求，南方的一些水电站也有同样要求，有些电站甚至还要补作鱼道设计。国外有亲鱼水轮机要求，即要求水轮机能够过鱼。笔者建议最好不让鱼进入水轮机而从安全水域游走，甚至设想让机器鱼引导鱼远离危险水域，以及减少漏油等，都是为了保护鱼类，而减少电焊工作量与避免机组过大的振动与噪声也是为了保护人类，这就形成了水（轮机）—鱼—人三者之间的循环锁链，缺一不可。

本书由田树棠编写并统稿，书中许多观点仅代表笔者个人意见，欢迎共同探讨。书中有关外文资料，由西北勘测设计研究院刘国峰同志负责编译。另外，西北勘测设计研究院印刷厂田鸣亦从网上下载了许多有用资料。需要感谢网上那些无名作者和其他支持者。特别要感谢东方电机有限公司戴庆忠先生的大力支持。

需要说明的是，本人年过七旬，已无意名利，撰写本书的目的无非是想将有关资料与信息收集起来，便于有心者阅读参考。所以，引用部分资料（文中多有注明），在此向原作者表示感谢。

还要感谢西北勘测设计研究院的大力支持，才使本书得以出版。

田树棠

2012 年 8 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第二章 水轮机设计中的环保问题*	3
第一节 影响环保的因素	3
第二节 水轮机增加鱼类生存率的设计	4
第三节 其他有关环保设计	13
第三章 水电站水轮机的环保设计	15
第一节 水轮机选择设计优化	15
第二节 水轮机优化	20
第三节 水轮机运行环保与检修环保	28
第四节 水电站的环保设计	40
第四章 水轮机振动与噪声的环保	56
第一节 振动与噪声的危害	56
第二节 振动的环保问题	59
第三节 系统振动的控制	66
第四节 噪声的计量	72
第五节 声源分析	79
第六节 噪声控制	82
第七节 水电机组防噪声措施	87
第五章 水电站运行环境的环保设计	92
第一节 设计依据	92
第二节 防振防噪声的环保要求	93

第三节 其他设计环保要求	95
第六章 水轮机防腐	112
第一节 海洋能利用	112
第二节 潮汐电站防腐与防污	122
第三节 常规水电站的防腐	165
第七章 亲鱼水轮机简介	186
第一节 国内外亲鱼水轮机研究概况	186
第二节 辩证对待亲鱼水轮机的运用	194
附录 美国福伊特公司提供的相关图资料	200
参 考 资 料	207

绪 论

水力发电是一种不耗费自然资源（如煤、石油、天然气、核原料等）的“知识经济”，又有能适当储藏、调节性能好、运行灵活、可靠性能较高的特点。而水轮机则是水力发电的原动机——将水能变成旋转的机械能，再通过发电机变成电能。文明社会是离不开电能的，很难想象没有电，社会会乱成什么样。

水轮机代表着一种最天然的发电方法。在当前世界技术进步的 trends 下，通过优化水轮机设计与水电站设计及其技术管理，可以进一步减少已经极小的污染，改变水电站建设对环境的影响。例如，为增加水电站水流中溶解氧的含量的设计及提高河流生态流量的设计，可以使水轮机更加符合环境的要求。如今，在国外的一些水电站中，重新设计水轮机以改善其性能时，亦考虑了环保性能——水轮机能够过鱼。为了提供一个了解为什么某些设计具有更好的环境适应性，本书讨论了不同水轮机设计的流场物理性质以及水电站各种水头范围和流量范围对鱼类生存的影响，也探索了水轮机运行对环境、对人类的影响等。

水轮机利用自然能量发电。在利用这种可再生的资源过程中（发完电的水又流回河道），通过专门的设计和运行措施可以更加增强它们已有的良好环境适应性。这不仅可以提高鱼的生存率，而且可以改变河流水流的水质。通过改善水轮机与水电站的设计可以减少污染，造福人类。

在国外，几十年前已开展水轮机与水电站的环保设计探索，国内亦有这方面的学者在做研究，只是限于客观条件尚无法开展



大量工作。

另外，还要探索、考虑水轮机与人类之间的环保问题。水轮机运行中过大的振动与噪声会给人类造成身体的损害。水轮机检修时，大量的电焊工作量（有的电站检修水轮机用的电焊条数以吨计），也会给电站职工带来身体的危害。对此，必须要有清醒的认识与必要的防护措施。

再者，鱼类是人类的健康美食。人类对此也应有充分的认识，保护鱼类就是维护人类的美好生活。

因此，本书的主题就是探讨水（轮机）—鱼—人三者之间的错综复杂而又互相关联的系统工程。希望能有更多的有心人关心这一工作，当然更需要有关部门的大力支持。

水轮机设计中的环保问题*

第一节 影响环保的因素

影响水轮机环保问题的主要因素有以下几个方面。

1. 水轮机的污染问题

(1) 污染源。例如,水轮机泄漏的润滑油、润滑脂、含铅的油漆,其他有毒的涂料以及有关的其他油类,甚至扑灭火灾所用的泡沫灭火剂等。

(2) 减少污染的设计因素。例如,采用无润滑油的活动导叶轴套,可利用生物分解的油,漏油控制,充水的转桨式水轮机(含轴流或贯流,甚至斜流式水轮机)轮毂,无油轴套,用于高压系统的非油基流,无铅油漆,无毒涂料,水电站漏油及其他有害流体的收集系统的设计与运用等。

2. 过机鱼类生存率

鱼类分为迁移的鱼类与不迁移的鱼类;鱼类死亡有直接的死亡与间接的死亡。

(1) 影响过机鱼类生存率的水电站设计因素。

1) 电站水工结构设计特点,包括电站水头、进水口设计、水轮机安装高程在尾水下的位置、水轮机运行水头范围以及一定水头下的运行范围。

2) 水轮机型式与尺寸。

* 引用 1996 年 4 月在北京召开的《希科水电服务研讨会》资料。



- 3) 水轮机同步转速和相应的比转速及比速系数。
- 4) 水轮机叶片数目。
- 5) 水轮机导叶和转轮叶间的绝对间隙。
- 6) 水轮机运行特性、效率水平以及与水头和流量成函数关系的效率特性的均匀性, 水轮机的空蚀特性。

(2) 影响过机鱼类死亡的基本因素。

- 1) 叶片碰撞/间隙流。
- 2) 流动平稳/紊动。
- 3) 压力变化率。
- 4) 空蚀和空泡破裂以及由此而产生的强烈的局部压力波。

(3) 水电站机组运行对过机鱼类存活率的影响。

- 1) 机组应尽量运行于水轮机高效率区。
- 2) 水电站水流中的溶解氧不可太少, 而氢气含量又不可太多。
- 3) 要治理被工业和生物污染的河流。

(4) 采用先进的仪器和现代化的数控系统可以在提高过机鱼类存活率方面发挥作用。如利用仿生技术制造的“机器鱼”引导鱼类避开危险。

另外, 水轮机运行中的振动、噪声对人类的影响, 水轮机检修工作中的电焊作业对人类危害及如何防护等环保问题也是需要考虑的。

第二节 水轮机增加鱼类生存率的设计

一、概况

关于水轮机对环境影响的争论, 经常讨论的是与过机鱼类生存率有关的问题。过机鱼类生存率与水电站水头、水头运行范围和流量及水轮机型式有密切关系。如果大量的鱼可以安全通过水轮机, 那么表明水轮机的设计较符合环保的要求。对那些性能较差的机组, 采用当今的技术可以获得显著的改善。用一台新设计



的不会对鱼产生危害的水轮机更换旧的水轮机转轮也可以大幅度地提高过机鱼类的生存率。

提高过机鱼类生存率的最有效办法是利用旁路使鱼迁移时不经过水轮机。不论这种解释是否合适，这都是一个较大的题目。目前对诱鱼装置、拦鱼栅和驱鱼装置已进行研究。最近的研究表明，过机鱼类生存率可能比以前想象的要好得多，鱼类生存率记录达到了95%。例如，法国罗纳河开发后，记录到的鱼种约有25类，与开发前基本相同。其中有4种鲤科鱼占生物总量的90%。这4种鱼在自然状态下占有的优势，在开发计划实施后仍保持这种状态，因此鱼类平衡方面的变化很小^[1]。

笔者从水轮机行业中的观点认为叶片数较少，流道平直的贯流式水轮机具有最好的鱼类生存率；轴流式水轮机次之；混流式水轮机因叶片数多，转速较高则较差；而水泵水轮机在它们之间；水斗式水轮机因喷针间隙太小而最差。以上分类只是广义的综述，对特殊的水轮机设计与应用，通过同一种型式水轮机的鱼类生存率却有很大的变化。

当宏观地评估这种观点时必须考虑下列因素：

(1) 电站水工结构特点，包括电站水头、进水口设计、水轮机安装高程在尾水下的位置、水轮机运行水头范围和每一水头下的流量的范围，以及气泡帷幕的运用等。

(2) 水轮机的尺寸。

(3) 水轮机同步转速和相关的比转速及比速系数。

(4) 水轮机转轮叶片数、活动导叶和固定导叶数。

(5) 水轮机导叶和转轮叶片间绝对间隙。

(6) 水轮机运行特性、效率水平及水头和流量成函数关系的效率特性的均匀性、相关的水轮机空蚀特性。

当更加深入地认识这一观点时，了解减少鱼类过机生存率的基本物理现象将有助于获得对鱼类产生更小危害的设计。从微观上看，所要考虑的因素是叶片碰撞、压力变化率、空蚀和由此导



致的空泡破裂以及强烈的局部压力冲击、流动平稳性或逆向大比尺紊动和间隙流动。

二、碰撞影响

鱼与水轮机叶片碰撞的可能性与鱼的大小、水轮机尺寸、叶片数目、活动导叶和固定导叶数目、叶片和活动导叶间间隙及水轮机转速有关。大的鱼与水轮机相碰的可能性较大，因此对于一定大小的鱼，较小的水轮机比大水轮机对鱼的危害更大。

对一定大小的鱼类，活动导叶与转轮叶片间的间隙较大，则会使鱼类的生存率较高。对叶片数目也是如此。传统上的水轮机设计中，叶片数及水轮机形状与比转速成函数关系，如图 2-1 所示，因而较高比转速设计意味着与鱼相碰的机会更小（叶片少之故）。

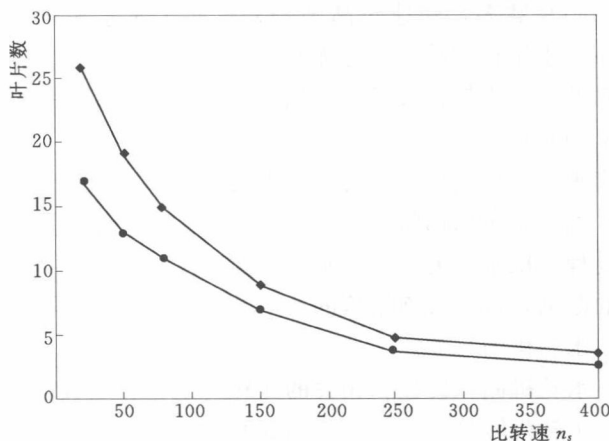


图 2-1 与水轮机比转速与水轮机叶片数呈函数关系

叶片翼型对发生碰撞的可能性亦有影响。传统的水轮机设计采用薄形叶片设计，以便使空蚀和叶片重量最小并有最高的效率。一般较老的水轮机不采用厚的水轮机叶片进水边，因为它们一般对水轮机费用有不利的影响，而且常对最大效率产生不利影响。在现代水轮机设计中，特别是对具有较大水头变化范围水轮



机,适当加厚叶片进口边缘可以为鱼类在叶片进口侧提供较好的导向作用,从而更有利于鱼的生存而且可以减小流动分离的紊流旋涡以及偏离最优效率点运行时的空蚀。如果更好地理解鱼类碰撞的物理过程,那么水轮机设计时在注意传统性能参数的同时,要时刻考虑对鱼类碰撞的影响。

三、压力变化率的影响

鱼所经历的压力变化率对鱼的生存率有相当的影响。快速变化会破坏鱼鳔或导致与一个类似潜水员的“潜涵病”。在水轮机中有两个主要的因素影响整体的压力变化:水头和水轮机尺寸。压力变化与电站水头成正比。对一给定的水头和设计比速,流经水轮机的时间与水轮机尺寸成正比。因此小尺寸高水头水轮机具有最大的 $\Delta p/\Delta t$ 值,大尺寸低水头水轮机的 $\Delta p/\Delta t$ 值最小,如图 2-2 所示。

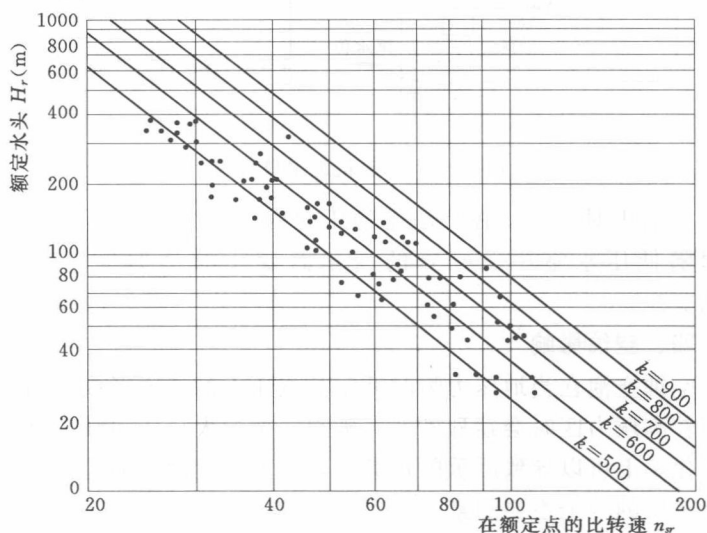


图 2-2 实际安装和不同的比转速

($K = N_q H$, 大于 20MW 的福伊特公司混流式水轮机)



产生“潜涵病”的可能性与鱼在水轮机流道之前的压力环境有关，也与电站水工设计、鱼在水库中的位置及水轮机进口位置有关。水库中的鱼从一个较高的进口位置 [见图 2-3 (a)] 通过压力钢管时首先产生一个压力上升，然后当它们通过水轮机时会产生一个更快速的压力下降。对有底孔进水口 [见图 2-3 (b)] 的水电站，当它们进入压力钢管时压力就高，产生“潜涵病”的危险更大。水轮机压力钢管的长度也影响产生“潜涵病”的可能性：经过长压力钢管的鱼在它们到水轮机前可以适应压力的变化，这样当它们流经水轮机时可以比同样情况下通过压力钢管的鱼更易于承受快速下降的压力的影响。

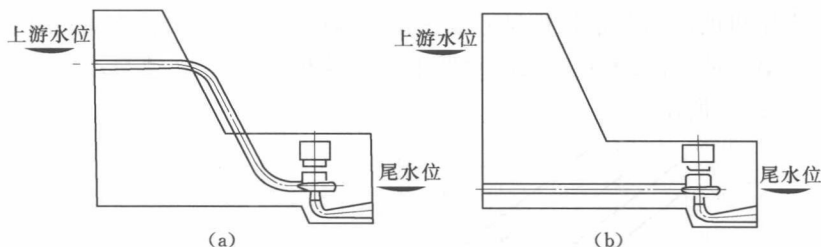


图 2-3 水轮机进水口形式

目前正对一个受控环境中的压力变化率进行基本研究，以便对随低压水室中 $\Delta p / \Delta t$ 的变化而变化的鱼类生存率进行评估。

四、空蚀影响

空蚀空泡在当地压力瞬时低于蒸汽压力的地方形成，当他们流到较高压力区时会猛烈破裂，破裂产生的大量压力波叠加在压力变化率上可以导致严重的鱼类伤害，因此空蚀可能是迁移鱼类生存率低的一个主要因素。

许多旧型水轮机是在认为水轮机叶片的空蚀是一个可以接受的正常结果的时代设计的，电站人员乐于停机进行修理。旧的设计可以通过运行时降低输出功率以减少发生空蚀的可能，如图



2-4所示。对这种旧水轮机转轮进行新型设计可以最大限度地减小空蚀并且一般可以产生较好的效率。这样做时可以产生更多的输出功率。空蚀也受到电站水头和流量范围的严重影响。

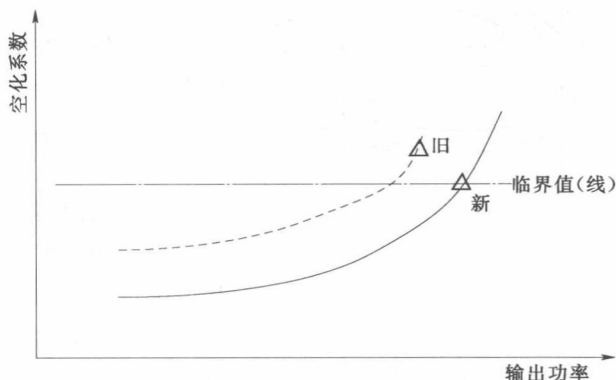


图 2-4 在较高输出时发生空蚀的可能性增加
(亲鱼型转轮)

通过设计优化,将水轮机运行范围限制在一个范围内和将新电站工程水轮机高程取得更低些以便具有一定的抗空蚀安全裕量可以最大限度地减小空蚀。目前,为改善空蚀而进行的过鱼生存率试验已取得了令人满意的结果。

五、流动平稳/紊动的影响

河水流动速度快速度化和高流动紊动在鱼体内会产生外伤性应力,引起生存率下降。高效率(低损失)水轮机设计有弱的二次流和低流动紊动,当效率下降(损失提升)时,二次流的强度和大流速梯度区域以及强烈的大比尺紊动与损失成正比,损失的能量是激励二次流、紊动和相关的速度梯度的动力。试验结果已表明水轮机在最优效率点及其附近运行时,鱼类生存率较高,鱼类生存率随损失增加而下降(参见图 2-5)。

由于转桨式水轮机(含轴流式、贯流式等)的叶片和导叶可

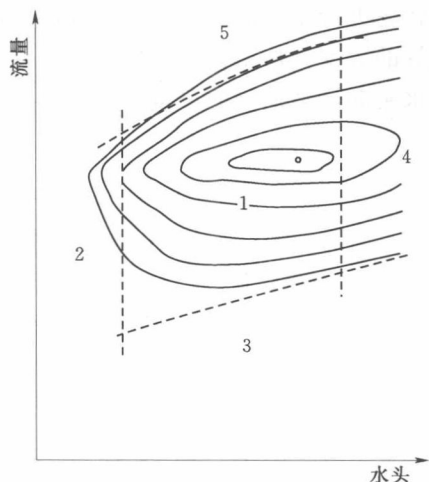


图 2-5 水轮机运行范围

1—优效率区；2—低水头运行危险区（高紊动和速度剪切，空蚀涡流）；3—低输出运行危险区（高紊动和速度剪切，空蚀涡流）；4—高水头运行危险区（高紊动和速度剪切，叶片负压侧进口边空蚀和涡流）；5—高输出运行危险区，由于叶片表面会发生空蚀

以同步进行调节，因此在一个较广的流量范围内效率曲线较平坦，对鱼类的危害小。而混流式或轴流定桨式水轮机在其最优效率点附近具有较高的效率水平，但因是单调节而高效区较窄（参见图 2-6）。如果运行区偏离最优效率点，则紊动水平、二次流和空蚀程度将增加（参见图 2-5）。在限定区外运行，对鱼产生伤害的可能会增加。专门设计的混流式水轮机能比其他水轮机在较宽水头和流量范围内具有更平坦的效率特性，将有助于鱼类生存。

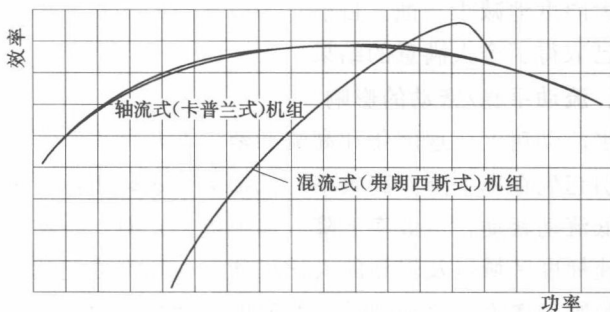


图 2-6 轴流转桨式水轮机效率特性比混流式水轮机平坦

对水泵/水轮机，在最高水头范围或最低水头范围运行时对鱼类更危险。对水泵/水轮机进行专门水力设计可以增加对鱼类