

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.04.010

水库健康效应评价指标体系初步研究

魏海¹, 沈振中¹, 赵斌²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京自动化研究院大坝及工程监测研究所, 江苏 南京 210003)

摘要 从大坝安全、水库效益和水库生态效应的角度对水库健康效应进行探讨, 提出水库健康效应的概念, 分析水库健康评价的意义、特征以及影响水库健康状况的因素。初步建立了水库健康评价的结构指标体系和评价方法, 提出了水库健康综合指数的概念和计算方法, 并利用水库健康综合指数对水库健康状况进行评价。

关键词 病险水库; 水库健康效应; 指标体系; 水库健康指数

中图分类号: TV697 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2008)04-0032-05

Primary study on evaluation index system for reservoir health // WEI Hai¹, SHEN Zhen-zhong¹, ZHAO Bin² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Dam and Engineering Monitoring Institute, Nanjing Automatic Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract : On the basis of a discussion on dam safety and the benefits and ecological effects of reservoirs, a concept of reservoir health is proposed. The significance of reservoir health evaluation as well as its influencing indexes is analyzed. Then, a preliminary evaluation approach and its index system are established. Finally, the calculation methods for the evaluation index are also put forward.

Key words : danger reservoir; reservoir health effect; index system; index for reservoir health

1949 年以来我国兴建了大量的水库, 在建坝方面取得了举世瞩目的成就。这些水库在防洪、灌溉、供水、发电、航运、水产养殖及旅游等方面产生了巨大效益, 为促进我国国民经济发展、提高人民生活水平、保障社会稳定、改善生态环境作出了巨大贡献。但由于许多水库兴建时的设计标准偏低、施工缺陷、管理不善以及维护资金不足等原因, 使得目前大量水库存在病险和老化现象, 水库的功效受到损害, 甚至影响国家的经济发展和人民的生命财产安全。据 2000 年统计, 在水利系统管理的 83 725 座大坝中, 病险大坝有 30 381 座, 约占已建大坝总数的 36 %。其中大型水库病险大坝 143 座, 约占大型水库大坝的 42 %; 中型水库病险大坝 1 092 座, 约占中型水库大坝的 41 %; 小型水库病险大坝 29 146 座, 约占小型水库大坝的 36.1 %^[1]。如何维持这些水库的健康, 保障其效益, 在我国具有重要的现实意义。因此, 21 世纪将是老坝加固和处理的高潮^[2]。本文正是基于此背景, 从大坝的安全、水库的效益和水库生态效应的角度对水库健康效应进行了探讨, 提出了水库健康效应的指标体系和评价方法。

1 水库健康效应评价的特点和意义

水利水电工程技术复杂, 投资巨大, 影响面广, 受许多自然和社会因素的影响, 工程一旦失事, 将会给国家和人民生命财产安全造成严重的损害。因此, 在水利水电工程的建设和运行管理活动中进行风险分析和安全评价, 避免风险的发生或减轻风险损失是十分必要的^[3]。而水库健康效应分析正好满足此目的。

水库健康效应评价是分析、预测水库建成后水库性能随时间的变化规律, 然后将结果与可接受标准(规范)进行比较, 并把这些结果提交有关管理部门作为水库性能判断的参考准则, 最终根据水库的健康程度提出维护建议。总之, 水库健康效应评价的目的就是评价水利枢纽工程的安全性。因此水库健康效应评价也应该属于水利工程安全评价的大范畴。

水库健康效应评价有别于一般建筑物的安全评价。首先, 水利工程安全评价所考虑的时间长, 一些重要水利工程通常要达百年以上, 超越了一般建筑物的服务年限; 其次, 水库安全评价所涉及的空间范

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAC14B03)
作者简介: 魏海(1977—)男, 四川巴中人, 工程师, 博士研究生, 从事工程渗流和大坝安全评价研究。E-mail: weihai2005@hhu.edu.cn

围比较大,包括整个库区范围,有时还会涉及库区下游河道。这种长时间尺度和复杂的非均质空间系统给水库健康效应评价带来了许多不确定因素。因此,对水库健康效应评价在现有经济、技术条件下的技术方法,从精度和工程经验上都是一次严峻的考验。水库健康效应评价所涉及的不确定性因素可分为3大类:情景的不确定性、模型的不确定性和数据资料的不确定性。

a. 情景的不确定性主要来自人们知识或认识水平的局限性,包括:①系统中一些速度缓慢的演化过程(如混凝土材料与库水的化学反应、土石料与库水的化学反应、溶质在岩土体中的迁移等)的不确定性;②影响未来地质环境稳定性以及气候变化事件发生的时间和频率的不确定性;③未来人类活动的不确定性。

b. 模型的不确定性主要来自2个方面:①在一定条件下某些自然现象的过程或结果可以同时用多个不同概念的模型来进行描述或解释,但当用这些模型来推测或预报较长时间尺度和较大空间范围的结论时,往往会产生较大的误差;②公式或数学方程的简化过程以及程序设计所产生的误差,也是模型不确定性的主要原因。因此,水库健康评价的模型必须经过充分的检验和对比。

c. 数据资料的不确定性主要来自4个方面:①数据的观测误差;②地质体、坝体空间分布的非均质特性;③实验、试验结果解释和推断的不合理性;④比拟研究在时间和条件上的差异。

水库健康效应评价一般包括3个基本组成部分:①确定有哪些因素能够影响水库的健康状况,或者能够影响水库健康状况恶化的速率;②估算这些现象发生的概率,并定量地表示其对水库健康的影响;③计算水库的健康程度(健康指数),即先计算单个建筑物的健康程度(分指数),然后对其汇总得出水库健康综合指数,再根据水库健康综合指数评价整个水库的健康状况,并建立整个水库的健康状况档案表。

2 影响水库健康的因素

健康水库是指生态系统健康、工程功效良好的水库。因此健康水库的含义应包括4方面的内容:①水库的安全问题,这是水库存在的基础,也是健康水库的前提;②水库对人类社会经济系统的支撑程度,这是人类建造水库的初衷,也是人类维护其健康的意义所在;③水库对库区及其周围生态系统的支撑程度,这是健康水库生命活力的主要体现;④水库对河流下游生态环境的影响程度,这是下游

河流以及河口生态是否能够得以维持的主要体现,也是流域生态、经济是否能保持可持续发展的重要内容之一^[4]。于是,水库健康效应评价应综合考虑大坝安全、水库经济效益和生态环境等多方面的因素。影响水库健康的因素很多,比如:温度、水质、淤积、溶蚀、渗流、冲刷、碳化、漫顶、库岸滑坡、坝基失稳、冻融和冻胀等。

2.1 影响大坝安全的因素

影响大坝安全的因素可以分为内部因素和外部因素。对于混凝土坝,内部因素主要包括混凝土的徐变、炭化反应和碱-骨料反应、钢筋锈蚀反应等;而影响大坝安全的外部因素主要有物理、化学、生物等方面的因素。

a. 物理因素。影响大坝安全的物理因素主要有:荷载、温度、溶蚀、渗流、淤积、冲刷、漫顶、滑坡、坝基失稳、冻融和冻胀等。

b. 化学因素。土石坝坝体主要是由土石料堆积而成,黏土矿物由岩石经风化而成,化学性质稳定,抗酸、碱、盐的能力比较强,因此土石坝坝体因化学侵蚀而破坏的可能性比较小,国内外有关这类的报道也很少。这里所说的化学侵蚀主要是指对钢筋、混凝土的破坏,包括: O_2 侵蚀、 CO_2 侵蚀^[5]、硫酸盐侵蚀^[6]和镁盐侵蚀^[6]等。

c. 生物因素。坝体和坝基长期处于水下环境,可引起微生物繁殖、贝类生物的赘生,对坝体和坝基产生侵蚀。对于土石坝来说,一些蚁穴、虫穴、腐烂植物的根等也会大坝产生危害。

d. 其他因素。其他因素包括:人为管理不善、使用不善,气候变化,恐怖袭击,战争等一些不可预见性的破坏。

2.2 影响水库经济效益的因素

影响水库经济效益的因素主要有:防洪能力、发电量、灌溉面积、航运能力、养殖能力、供水量和旅游能力。

2.3 影响水库生态环境的因素

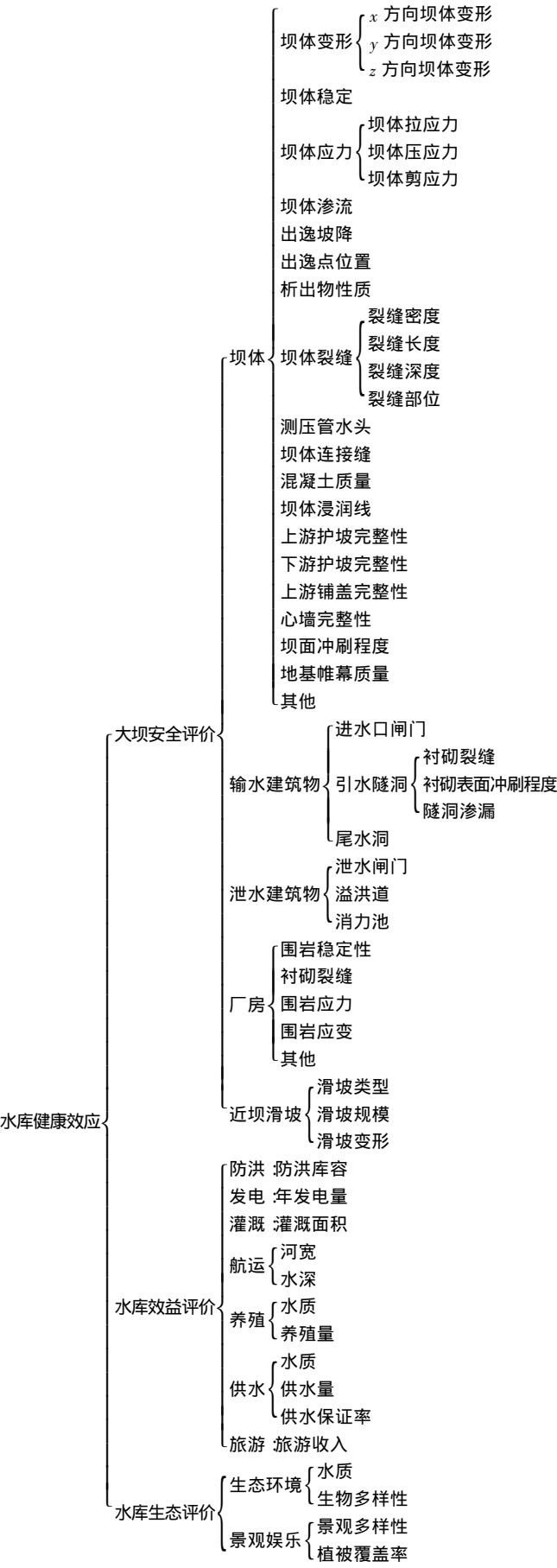
a. 生态功能。水库的修建对库区的气候、河流两岸的植被、诱导滑坡和水生动物的生活产生影响,影响库区的生态环境。

b. 景观娱乐功能。水库的景观娱乐功能大小受景观水质、景观多样性和植被覆盖率等影响。

3 水库健康效应评价指标体系

据上所述,水库的健康效应评价可从大坝安全、水库效益和生态环境3个方面去评价。本文列举了影响水库健康的主要因素,并进行归类,构建了水库健康效应的结构体系,如表1所示。

表 1 水库健康效应指标系



3.1 各层指标的定量描述

表 1 中底层各单项指标为影响水库健康状况的基本要素。各单项指标信息是通过监测得到的定量或定性数据,这种信息不能直接用于健康评价,必须通过量化处理后才能使用。由于底层健康项目健康状况评价结果是中上层健康项目评价信息的依据,所以底层单项指标原始信息的量化极其重要,将直接影响中上层诊断项目健康状况的评价结果。

各基本指标信息的处理也有很多不同的方法。吴中如等^[2]、侯玉成^[7]采用健康值描述混凝土坝各基本要素对大坝健康状况的影响,倪晋仁等^[8]用功能指标阈值描述河流各项功能对河流健康状况的影响。在水质评价时采用分指数描述各单项对整个水质的影响^[9]。本文采用分指数描述各单项指标对水库健康的影响。

3.1.1 大坝安全评价

在对大坝进行安全评价时,可采用参数相对质量叠加型指数确定大坝安全指数,首先确定各指标分指数,根据参数实测代表值(C_i)及该参数的评价标准(S_i) (可以选择设计目标值作为评价标准),求出该指标分指数,即 $P_i = C_i/S_i$,然后采用加权总和法求出大坝安全指数。步骤如下:

a. 确定底层各指标分指数(以坝体变形为例)。假设坝体在 x, y, z 方向设计的允许变形量为 u_{x0}, u_{y0}, u_{z0} ,实测变形量为 u_x, u_y, u_z 。3 个方向变形的权系数分别为 w_x, w_y, w_z 。 x, y, z 方向的分指数分别为 $P_{ux} = u_x/u_{x0}, P_{uy} = u_y/u_{y0}, P_{uz} = u_z/u_{z0}$ 。其他各指标可用同样的方法求得。

通常各指标的观测值或计算值越小离设计允许值越远坝体就越安全。因此,分指数越小说明该项指标健康状况越良好。也有个别要素例外,比如安全系数,当然安全系数越大坝体就越安全,因此取稳定分指数的倒数,使稳定分指数对坝体安全的影响和其他指标保持一致。

b. 确定坝体变形分指数。坝体变形分指数可表示为

$$P_u = w_x P_{ux} + w_y P_{uy} + w_z P_{uz} = \sum w_i P_{ui} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: w_i 为第 i 种指标的权系数; P_{ui} 为第 i 个变形分指数。

坝体其他指标分指数可用同样的方法求出。

c. 大坝安全评价。求出坝体各项指标分指数后,就可采用加权总和法求出大坝安全指数。大坝安全指数可用下式计算:

$$P_S = \sum w_i P_{Si} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中 P_{Si} 为第 i 个安全分指数。

大坝安全指数是对大坝安全状况的一个定量描述,由以上叙述可知大坝安全指数为一非负实数,数值越小,大坝越安全。当安全指数逐渐增大时,说明大坝安全状况和健康状况在下降。

3.1.2 水库效益评价

水库的效益包括防洪、发电、灌溉、航运、养殖、供水和旅游等方面的效益。通常水库效益的各单项指标越大效益就越好,这与水库安全指标的趋势相反,因此需要作一定的变换使其与安全指标保持一致。

a. 防洪分指数(P_f)。防洪分指数可用设计防洪库容与实际防洪库容之比表示,即

$$P_f = Q_{f0}/Q_f \quad (3)$$

式中: Q_{f0} 为设计防洪库容; Q_f 为实际防洪库容。

b. 发电量分指数(P_e)。发电量分指数可用设计发电量与实际发电量之比表示,即

$$P_e = Q_{e0}/Q_e \quad (4)$$

式中: Q_{e0} 为设计年平均发电量; Q_e 为实际年发电量。

其他指标分指数包括灌溉分指数、航运分指数、养殖分指数、供水分指数和旅游分指数等。因此,水库效益指数(P_b)可用下式计算:

$$P_b = \sum w_i P_{bi} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: P_{bi} 为第*i*种水库效益分指数。

3.1.3 水库生态评价

水库的生态评价包括:生态环境评价和景观娱乐评价等。其中生态环境评价包括水质评价和生物多样性评价,景观娱乐评价包括景观多样性评价和植被覆盖率评价。

a. 水质评价。水质可以通过水质指数(P_w)进行评价^[9]。

$$P_w = 1/n \sum w_i P_{wi} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: P_{wi} 为第*i*种指标的水质分指数。

b. 生物多样性评价。生物多样性可以通过 Shannon-Wiener 多样性指数(P_d)进行评价^[10]。

$$P_d = - \sum P_{di} \log_2 P_{di} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中: P_{di} 为物种*i*的个体占总个体的比例。

c. 景观多样性评价。水库具有景观娱乐功能,包括水面、河岸绿化带以及滨河建筑物等给人们带来的视觉上的美感,可以用景观多样性指数(P_{st})来进行评价。

$$P_{st} = - \sum h_i \ln h_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: h_i 为景观类型*i*的面积占区域总面积的比例。

d. 植被覆盖率(P_v)评价。

$$P_v = S_{\text{植}}/S_{\text{总}} \quad (9)$$

式中: $S_{\text{植}}$ 为植被覆盖面积; $S_{\text{总}}$ 为区域总面积。

上述各式求得的是各指标的绝对指数值,不利于反映水库生态状况好坏的变化。因此,可以采用各指数的相对值来表示,即选择一座健康水库或建库前该区域的生态作为标准进行对比。

$$P_{\text{reci}} = P_{\text{echi}}/P_{\text{eci}} \quad (10)$$

式中: P_{reci} 为第*i*种指标相对生态分指数; P_{echi} 为健康水库第*i*种指标生态分指数; P_{eci} 为水库第*i*种指标实际生态分指数。

综上所述,水库生态指数可用式(11)计算:

$$P_{\text{ec}} = \sum w_i P_{\text{reci}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中: P_{ec} 为水库生态指数。

3.2 各层各指标权系数的确定

由于各层指标在水库健康评价结构体系中的地位、作用不同,从而使得它们对健康评价结果的重要性影响也各不相同。指标权系数反映指标对水库健康状况影响的大小。权系数的取值也比较复杂,难以确定,它与水库的功能有关,一般应通过专家来确定。通常用归一化重要性向量表示:

$$\sum w_i = 1 \quad (0 < w_i < 1) \quad (12)$$

4 综合评价模型的建立

影响水库健康的因素很多,因此可以采用层次分析法去建立评价模型^[11]。

首先对水库健康指标进行分析,结合一定的选定原则和方法确定各层次健康指标集,从而建立起水库综合健康指标结构体系;将底层单项健康指标的原始诊断信息依量化方法转化为各指标分指数,接着采取适当的方法确定各指标的权向量;然后综合考虑各层的健康指数向量与权值向量,采用合理的综合评价方法得到上层指标的健康指数;按照上述步骤逐层计算,最终得到水库健康的综合指数,并以此来评定水库整体的健康状况。水库健康综合指数可表示为

$$I_{\text{RH}} = \sum w_i P_{hi} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (13)$$

式中: I_{RH} 为水库健康综合指数; P_{hi} 为水库第*i*种指标健康分指数。

根据水库健康综合指数就可以对水库的健康状况作出判断。由以上叙述可知水库健康综合指数为一非负实数,数值越小,水库健康状况越好。当水库健康综合指数逐渐增大时,说明水库健康状况在下降。

健康水库是一个相对概念,它随健康的标准不同而变化,因此健康标准的选择是水库健康评价的关键。对于影响大坝安全底层指标的健康标准通常可以选择其设计允许值作为临界值;水库效益各底层指标也可以选择设计目标值作为临界值;生态底

层指标则应选择一座健康水库或建库前该区域的生态状况作为标准。健康综合指数的界限则应通过同类的健康水库或者水库健康运行状况并结合专家的经验进行综合确定。

5 结 语

水库健康评价涉及的范围较广,包括大坝安全评价、水库效益和水库生态评价等,需要应用概率与数理统计、模糊数学、系统科学等方面的知识。由于水库的健康评价还处于起步阶段,还有很多方面需要完善,如健康评价的方法、健康指标的选择及定量分析、健康指标资料的收集、健康标准的确定等。本文只是在这方面作一个初步探索。

- a. 提出水库健康效应的概念,分析水库健康评价的意义和特征。
- b. 分析影响水库健康状况的因素。
- c. 初步建立水库健康评价的结构指标体系,介绍各层各指标定量描述的方法,并提出水库健康综合指数的概念和计算方法。

参考文献:

[1] 阿里木·吐尔逊. 坝基老化岩-水-化学作用数值模拟研

(上接第 31 页)进行分流前是均匀流,水流平稳地进入分岔管,加上没有后面出口的折管损失,所以损失要小。至于 6 号出口,水流在管内是紧靠外侧壁面流动,不经过类似分岔管那样形状变化剧烈的部分,而对于配水环管,主要的损失是分岔管处的损失。考虑到这些因素,尽管水流所经路程最远,从进口到 6 号出口的损失比进口到 5 号出口的损失小,这是合理的。

从 6 个出口开启的不同组合方案(单出口、双出口、四出口开启)的数值模拟结果可知,当只开启 1 个出口时,1 号、2 号出口水力损失最小,均为 0.35 m,比水力损失最大的出口低约 0.93 m;开启 2 个出口时,1 号、4 号出口同时开启水力损失最小,为 0.44 m,比最大损失的组合低约 0.55 m;开启 4 个出口时,1 号、2 号、4 号、5 号出口同时开启水力损失最小,为 0.90 m,较最大损失的组合低约 0.78 m。

4 结 语

通过对水斗式水轮机配水环管从进口到 6 个出口全流道的三维定常湍流的数值模拟计算,得出配水环管的水力损失与流量之间的关系^[12]:从进口到 6 个出口的平均水力损失随着流量的增大而增大。同时也验证了水力损失与管路长度和形状之间的相互关系。根据现场实际情况,模拟出口的不同开启

究 D]. 南京: 河海大学, 2005.
[2] 吴中如, 顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断 M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
[3] SEIDOU O, CLAUDE M, BENOIT R. Risk management of hydroelectric reservoirs [J]. Canadian Journal of Civil Engineering 2003, 30(6):1111-1122.
[4] 高永胜, 王浩, 王芳. 健康水库内涵及评价指标体系的建立 J]. 水利发展研究 2005, 5(9):1-6.
[5] 马晓辉, 彭汉兴, 杨光中, 等. 大坝环境水质特征与化学潜蚀 J]. 水利学报 2001(10):44-47.
[6] 刑林生. 混凝土坝老化性状分析研究 J]. 大坝与安全, 2005(3):4-8.
[7] 侯玉成. 土石坝健康诊断理论与方法研究 D]. 南京: 河海大学, 2005.
[8] 倪晋仁, 刘元元. 河流健康诊断与生态修复 J]. 中国水利 2006(13):4-10.
[9] 中国水利百科全书编委会. 中国水利百科全书 M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006 :1297-1298.
[10] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication M]. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1949.
[11] 许树柏. 层次分析法原理: 实用决策方法 M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

(收稿日期 2007-10-19 编辑: 方宇彤)

组合方案, 比较得出性能较优的方案, 为电站的高效运行提供了重要依据。

参考文献:

[1] 韩凤琴, 林志文, 肖业祥, 等. 非定常喷嘴射流形状预测研究 J]. 水电能源科学 2005, 23(3):14-16.
[2] 韩凤琴, 久保田乔, 刘洁. 数值模拟冲击式水轮机内部非定常流动 J]. 华中科技大学学报 2000, 28(11):14-16.
[3] 韦彩新, 韩凤琴, 许萍, 等. 冲击式水轮机射流干涉研究 J]. 华中科技大学学报 2001, 29(4):82-84.
[4] 韩凤琴, 久保田乔. 冲击式水轮机性能换算的新理论提案: I J]. 华中理工大学学报 2000, 28(3):105-107.
[5] 韩凤琴, 刘洁. 冲击式水轮机性能换算的新理论提案: II J]. 华中理工大学学报 2000, 28(11):11-13.
[6] 许萍, 韦彩新. 水斗数对转轮性能影响的实验研究 J]. 华中科技大学学报 2003, 31(3):89-91.
[7] 埃杰尔. 水斗式水轮机 M]. 黄益生, 译. 北京: 机械工业出版社, 1990.
[8] 张胜兰, 赵景山, 付勇智. Pro/ENGINEER Wildfire(野火版) 实用培训教程 M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[9] 孙江宏, 段大高. Pro/ENGINEER d2000i 高级功能应用及二次开发 M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
[10] 潘家铮. 压力钢管 M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
[11] 李家星, 赵振兴. 水力学 M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
[12] 韩正忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用 M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.

(收稿日期 2007-05-31 编辑: 骆超)