

水电机组状态监测与故障诊断技术研究现状与发展

张礼达,任腊春

(西华大学能源与环境学院,四川成都 610039)

摘要 根据状态监测与故障诊断技术在水电领域的应用情况,介绍了水电机组稳定性、水轮机空蚀和调速系统等水电机组状态监测与故障诊断的主要内容及其现状,着重阐述了故障树分析法、模糊理论、人工智能及小波分析等该领域的主要研究方法和研究成果及其应用情况,并对水电机组状态监测与故障诊断技术的发展前景和趋势进行了分析与展望。

关键词 水电机组;状态监测;故障诊断;综述

中图分类号:TV737 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2007)05-0085-05

Current research and development of state monitoring and fault diagnosis of hydropower units//ZHANG Li-da, REN La-chun (School of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Based on the current situation of the application of the state monitoring and fault diagnosis technology in the field of hydropower engineering, the main contents of state monitoring and fault diagnosis of hydropower units were introduced, including the stability of hydropower units, the cavitation of turbines, the state of speed regulation system, and so on. The main research methods, including the fault tree analysis, the fuzzy theory, the artificial intelligence, the wavelet analysis, etc., the situation of their applications and the achievement of research were focused. Finally, the development trend of the technology was prospected.

Key words: hydropower unit; state monitoring; fault diagnosis; review

设备状态监测与故障诊断技术是一种了解和掌握设备在使用过程中的状态,确定其整体或局部正常或异常,早期发现故障及原因,并能预报故障发展趋势的技术。随着现代科学技术不断进步和发展,尤其是测试技术、计算机技术的迅速发展和普及,设备的状态监测与故障诊断已逐步形成了一门较为完整的学科^[1]。近几年,随着大、中、小型水电站的建设,水电系统的状态检测与故障诊断工作已越来越受到重视^[2]。针对工程实践中出现的问题,国内一些研究机构在状态监测与故障诊断方法等方面作了较为深入的研究,并取得许多可喜成果。国家电力公司早在 1999 年科技发展规划中,就已明确提到有关水电机组的状态监测与故障诊断技术的发展规划。本文将从水电机组的状态监测与故障诊断技术的现状和发展趋势等方面进行简要介绍。

1 水电机组状态监测与故障诊断的主要内容

1.1 水电机组运行稳定性的监测与诊断

水电机组的运行稳定性直接影响着电网的稳定运行,对其进行状态监测与故障诊断意义非凡。水

电机组的运行稳定性包含机械振动、电磁振动、水力振动和噪声等内容^[3]。

a. 机械振动。水电机组最常见、最主要的故障是振动故障,而机械振动又最突出,因而有必要对其进行分析。机械振动是由机组转动部分质量不平衡、转轮等旋转部件与固定件发生摩擦、密封不良等原因引起。对机械振动的监测与诊断内容主要有:导轴承及转子轴系(上导摆度、瓦温、油温)、机组固定部件(上下机架、推力机架和顶盖的振动)、推力轴承(油膜厚度、油膜压力、轴温、油质等)。文献[4]对水轮机推力轴承稳定性的监测和诊断进行了分析。

b. 电磁振动。电磁振动是由发电机转子不圆、励磁绕组匝间短路、定转子磁场轴心不重合、定子和转子间间隙不均匀及旋转时产生不平衡磁拉力等原因引起。对电磁振动的监测与诊断内容主要有:发电机定转子整体温度和气隙、定子极频振动和转子质量不平衡等。

c. 水力振动。大型水电机组的水力不稳定问题具有一定的普遍性,它直接关系到机组运行的可靠性。引起水力振动的原因有:进水流道水流不均

匀的水力随机振动、卡门涡列诱发的振动、上下迷宫环不均匀性产生的自激振动、尾水管中水流的低频压力脉动引起的振动等。对水力振动的监测和诊断内容为：蜗壳进口压力、尾水管压力脉动、上下迷宫环脉动和导叶前后脉动等。文献[5]对三峡水电站水电机组水力稳定性进行了分析和探讨；文献[6]对机组稳定性尤其是尾水管压力脉动进行了研究，并得到了实际应用。安康水电站机组状态监测与诊断系统在该电站的应用有效地监测和诊断了机组振动和压力脉动引起的故障[7]。但对水力振动进行全面监测与诊断还有待进行深入研究。

d. 噪声。水电机组的噪声对环境的影响很大，噪声的大小是机组稳定性分析的重要参数。重点监测内容为水轮机及尾水管的噪声和发电机的运行噪声。

1.2 空蚀

到目前为止，水轮机的设计大都是按理想流体（即清水）设计的，然而，由于近年来水质受到破坏，特别在6~9月的汛期，水中含沙量和推移质明显增多，泥沙对水电厂水轮机的磨损依然严重，我国黄河和长江等河流上的水电站遭受空蚀情况严重[8]，因此对水轮机空蚀的状态监测与故障诊断进行研究仍然有着十分重要的意义。文献[9]建立了一套准确有效的空蚀状态监测系统，通过实时在线监测空化空蚀引起的压力脉动信号、水轮机效率及空蚀产生的噪声，达到间接监测机组空蚀状况的目的。而且该系统已经在福建省池潭水电站监测与诊断系统中投入使用，目前运行良好。但总体来讲，国内相关研究成果较少，而国外对水轮机空蚀方面的研究较多。如美国电力研究所（EPRI）、加拿大魁北克水力研究所（IREQ）和美国声学 ORE 股份有限公司等[10]，他们基于声传播原理开发出一些产品，应用加速度传感器测量声强，这些产品可以监测空蚀发生和发展的过程，并用建立的相对标准来评判水轮机空蚀的严重程度，该系统在美国许多水电站应用，取得了良好的效果。

1.3 调速系统

通常调速系统运行工作状态的监测设备对象主要是调速器系统及油压系统运行设备，其中包括调速系统性能监测和设备状态监测2个部分。调速系统的性能监测参数包括控制参数和静、动态特征参数以及机组控制参数；状态监测参数包括调速器和油压设备运行状态参数以及电站运行参数。目前，调速系统状态监测与故障诊断的研究重点在调速系统的性能监测与诊断[11]。调速系统是水电站运行的重要组成部分之一，是具有开机、停机、并网等机组控制和转速、功率调节等功能的机-电系统，它的

可靠运行直接关系到电站甚至电网的生产质量和安全，但国内外对其建立的状态监测与故障诊断系统较少，基本停留在传统的检修方式上。值得庆幸的是，2006年华英电力科技公司研制出水轮机调速系统仿真测试装置[12]，该系统集仿真、测试和诊断于一体，必将改变调速系统的监测与诊断的现状。

2 水电机组状态监测与故障诊断的主要研究方法

目前，得以研究并在工程中得到应用的主要方法有故障树分析法、模糊理论、人工智能、小波分析和基于这些方法的综合方法等。

2.1 模糊诊断

目前应用于水电机组故障诊断中的模糊数学方法主要有模糊模式识别、模糊聚类分析、模糊逻辑诊断、模糊时序模型等。这些方法各自从不同角度去解决诊断中所遇到的模糊性问题。文献[13]对模糊故障诊断方法进行了研究；文献[14]引用模糊隶属度的概念来描述机组振动故障存在的倾向性，采用动态模糊聚类分析法分析了机组振动的原因；文献[15]将模糊知识成功地应用于实际水电站的故障诊断系统中，在长期的运行中，此诊断方法成功地诊断出如转子不对中、尾水管偏心涡带等机组运行问题，为电站的维修与管理提供了有价值的依据与参考。但是，对于复杂的诊断系统，要建立正确的模糊规则和隶属函数是非常困难的，而且需要花费很长的时间。因而，单独模糊诊断方法有较大的局限性。

2.2 人工智能

从人工智能在其他领域中的应用情况来看，将人工智能引入水电机组的故障诊断中，在现有机组特别是大型水轮发电机组运行设备的基础上，研究设备的智能故障诊断系统，能实现对水电机组运行状态的自动监测及故障的自动诊断，减少人工干预，有利于大中型水电站全面实现“无人值班，少人值守”的现代化管理模式。因而，人工智能方法尤其是其中的专家系统和人工神经网络得以研究和应用。

2.2.1 专家系统

专家系统诊断方法利用了专家积累的丰富实践经验，能模仿专家分析问题和解决问题的思路，而且能够解释自己的推理过程，解释结论是如何获得的。文献[16-20]从不同角度采用不同方法对水电机组故障诊断专家系统及其应用进行了研究，有的已在水电站运行多年，效果较好。但是从运行的实际情况来看，现有用于水电机组故障诊断的专家系统，对于水电机组的某些故障机理研究尚不够透彻，还存在着信息量少、缺乏系统性和综合性、故障模型不准

确等问题,在故障的诊断率和诊断的准确率、系统的稳定性等方面还存在问题。

2.2.2 人工神经网络

与传统的信息处理方法不同,人工神经网络是自适应和可以被训练的,它有自修改能力,同时有对信息的并行处理及并行推理的能力,从原理上就比传统的方法要快得多。由于人工神经网络所具有的高度非线性、模拟并行性、高度容错性、鲁棒性、自联想自学习和自适应等许多特点,人工神经网络在水电机组故障诊断中日渐得到重视和应用^[21]。文献^[22]将人工神经网络中的BP模型应用于水电机组振动故障诊断中,比较了选择不同的网络参数对诊断系统性能的影响。文献^[23]以葛洲坝水力发电厂二江电厂水轮机调速系统为模型,进行了调速系统故障智能诊断技术的研究,建立了基于BP模型的智能诊断系统,对提高二江电厂的稳定运行水平发挥了积极作用。但BP神经网络也有其局限性,如影响因素较多,因素变量之间的交互作用复杂,实验设计与优化多依赖于人的经验等^[24-25]。针对上述问题,文献^[26]首次将概率神经网络(probabilistic neural network, PNN)技术引入水电机组振动故障诊断,并对其效果进行了测试,测试结果表明PNN模型解决水电机组振动故障诊断问题可行,并且还具有良好的外延性和推广性。文献^[27]通过理论推导阐述了径向基神经网络应用于水电机组故障诊断的可行性,并进行了仿真试验对比,发现径向基神经网络比BP神经网络具有更高的精度和更快的收敛速度,为实现故障诊断的自动化提供了一种新的途径。

但是,人工神经网络的结构和训练算法必须在大量数据的前提下完成,只能对训练过的范例进行处理,对未训练过的功效甚微,因此它在诊断领域的应用也有一定的局限性。

2.3 小波分析

小波变换和小波分析是当前应用数学中迅速发展的新领域,能够解决许多傅立叶变换难以解决的问题,它在时域和频域都有良好的局域化能力,能聚焦到信号的任意细节,对信号的突变有很强的识别能力,能有效地去噪和提取有用信号。因此小波分析为水轮机故障诊断提供了新的分析方法。文献^[28]根据水电机组振动的特性,运用小波包分析方法的分解与重构,得到信号的突变时间点及信号能量的大小,从而为系统故障诊断提供了理论支持。文献^[29]提出了一种新的谱分析方法——小波包-最大熵谱估计(WP-MESE)方法,运用此法有效地提取了水轮机轴动态特性信息,从而为提取微弱故障信息并进行早期诊断提供了办法。毫无疑问,小波分析在振动信号分

析方面的应用受到了广泛的重视,其作用是不容忽视的,值得进行深入的研究。

2.4 基于以上方法的综合方法

鉴于模糊理论、专家系统、人工神经网络和小波分析等方法的优缺点,目前,一些学者正致力于研究一种基于这些方法的综合智能故障诊断方法^[30-33]。如将模糊理论与人工神经网络相结合形成模糊神经网络故障诊断方法;将模糊理论与专家系统相结合形成模糊故障诊断专家系统;还有将人工神经网络与专家系统相结合,小波包与神经网络结合,模糊理论、专家系统和神经网络三者相结合等。从研究的现状可以看出,这些方法充分利用了各种故障诊断方法的优点,互相取长补短。将多种故障诊断方法综合起来解决水电机组中的不确定性问题已成为共识,可为水电系统的自动化和运行稳定可靠提供强有力的保证,因而会有很好的应用前景。

3 国内外主要研究成果及应用情况

国外对水电机组状态监测与故障诊断技术的研究比较早,取得的成果也比较多,在工程实际中得到了广泛应用^[34-36],如美国Bently Nevada Corporation研制的系列产品、IRD与ENTEK公司联合开发的5911系统以及三菱公司开发的MHM系统,其中美国技术最先进。国内对水电机组状态监测与故障诊断技术的研究相对较晚,但自20世纪90年代以来发展较快,故障诊断分析系统在个别单项诊断技术上有些突破,主要限于机组稳定状态的监测与故障分析。北京英达华公司研制的EN8000系统、EN600系列水电机组振动监测故障诊断分析仪及EN3800系统、北京华科同安公司推出的“TN8000机组振动在线监测分析故障诊断系统”在100 MW到600 MW不同容量的主流机组上得到不同程度的应用,其中TN8000已于2003年用于浙江紧水滩水电站,并在2004年初有过监测机组摆度超标与诊断水力不平衡的成功案例。

在对水电机组状态监测与故障诊断技术的研究方面,华中科技大学等高校所做的工作相对较多。该校研制的水电机组状态监测、诊断及综合试验分析系统及HSJ型系列多功能水力机械监测分析系统已经成功地应用到三峡、二滩、刘家峡、葛洲坝等大型水电站。由清华大学研制的“水电机组状态检测与故障诊断研究与应用”这一成果,面向水电机组状态监测与故障诊断,从动力学机理、信号检测与状态分析、故障诊断及策略、基于Internet/Intranet的应用系统设计及实现等方面全面地展开了研究,在理论、技术和应用方面,都取得了一系列有理论意义

和应用价值的创新性成果,并已在 30 余家水电站得到了成功应用和推广,取得了巨大的经济效益和社会效益。该成果已于 2006 年 8 月通过鉴定。所有这些成果虽然都得到一定的实际应用,但由于水电机组的特殊性,要实现真正意义上的状态监测和故障诊断还需要不断完善和改进。

4 水电机组状态监测与故障诊断技术发展趋势

近年来,我国对水电机组故障机理及其诊断技术的研究有较大进展,但由于水电机组单机装机容量的不断增大,对大型机组许多常见故障的机理、故障特征及现场诊断方法的研究还有待进一步地深入。此外,在现场信号采集与故障诊断仪器及数据管理软件的研制方面,国内虽有一些研究机构和企业推出了自己的产品,也得到了工程应用,但随着计算机技术尤其是微处理器及软件技术的飞速发展,这些装置及软件系统在性能指标、可靠性、软件对不同公司数据采集装置的适应性等方面不同程度地存在一定局限性。因而,对状态监测与故障诊断方法、实现技术等的研究将是一个长期的过程,它的发展方向是应用当今前沿科学技术实现诊断模型和方法的多元化、综合化,诊断技术的网络化、高智能化。具体体现在以下几个方面:

a. 新的信号分析技术的应用。由于现场实测的振动信号随时间变化不十分规则,有些甚至是随机变化的,现有诊断系统无法对机组振动信号进行分析处理,从而有效地提取机组运行状态及故障特征。而利用小波分析技术对随机信号进行分析处理能克服上述缺点,它的应用使信号分析技术有了新的突破。

b. 全息谱分解技术的应用。长期以来,在水电机组的故障诊断中,对于采集的数据大多数采用传统的频谱分析方法进行分析。全息谱分解技术充分利用在一般谱分析中被忽略的相位信息,结合相互垂直的两个信号,按照频谱分析的结果,对轴心轨迹进行分解,从而使故障诊断结果更可靠。

c. 多传感器信息融合技术的应用。该技术充分利用了各个传感器的时域、频域数据、关系信息数据以及专家经验等故障相关信息,与人工神经网络、模糊理论和证据推理等方法相结合,使得不确定知识和信息表达更直观,从而实现融合诊断。

d. 网络技术的应用。将 Internet 网络技术和虚拟仪器技术与水电机组状态监测和故障诊断技术结合,可将水电机组的状态监测与故障诊断提升到远程的网络环境,以极大提高状态监测和故障诊断的

水平和时效性,从而实现真正意义上的诊断网络化。

e. 非线性原理和方法的应用。水电机组在发生故障时,其行为往往表现为非线性,将 FFT、分形几何、相关分析、奇异谱等理论应用于故障诊断系统中征兆的获取,可提高整个诊断系统的可靠性和准确性。

参考文献:

- [1] 盛兆顺,尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术应用 [M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [2] 王海. 水轮发电机组状态检修技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 沈东. 水力机组故障分析 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [4] 刘晓亭,刘昱. 大型水电机组推力轴承运行稳定性及故障诊断 [J]. 水力发电,2002(11):48-51.
- [5] 田子勤,刘景旺. 三峡电站混流式水轮机水力稳定性研究 [J]. 人民长江,2000,31(5):1-4.
- [6] 陈秋,韩凤琴,韦彩新,等. 白莲河水电厂 2 号机组振动在线监测系统 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2003,31(3):84-85.
- [7] 周廷虎,崔悦. 安康水电厂水轮发电机组状态监测与诊断系统 [J]. 水电自动化与大坝监测,2006,30(3):23-25.
- [8] 段生孝. 我国水轮机空蚀磨损破坏状况与对策 [J]. 大电机技术,2001(6):60-64.
- [9] 盛鹏,何永勇,褚福磊. 水轮机空蚀在线监测与诊断系统 [J]. 水利水电技术,2002,33(7):17-20.
- [10] 郑杰. 水电机组的状态监测及状态检修 [J]. 水利科技,2001(3):61-62.
- [11] 刘兴文. 水轮机调节系统状态监测与故障诊断探讨 [J]. 湖北电力,2001,25(1):23-24.
- [12] 武汉市华英电力科技有限公司. 水轮机调速器仿真测试仪 [EB/OL]. [2006-10-01]. http://www.cnhydro.com/memberad/space/business/index.asp?org_id=4693.
- [13] 张礼达,余波,胡建兵. 水轮机振动故障的模糊诊断研究 [J]. 四川水力发电,2003,22(2):95-96.
- [14] 陈铁华,陈启卷. 模糊聚类分析在水电机组振动故障诊断中的应用 [J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):43-47.
- [15] 符向前,蒋劲,孙慕群,等. 水电机组故障诊断系统中的模糊诊断技术研究 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):81-83.
- [16] 刘晓波,黄其柏,黄开启. 基于框架式规则的水电机组故障诊断专家系统研究 [J]. 水力发电,2005,31(12):50-53.
- [17] 胡建兵. 基于 GSM 平台的水轮机机械振动故障诊断模糊专家系统 [D]. 成都:西华大学,2004.
- [18] 赵辉. 水轮机故障诊断系统 [D]. 武汉:华中科技大学,2003.
- [19] 张礼达. 用面向对象的语言进行水轮机故障诊断专家系统知识库的研究 [C]//第五届全国水动力学学术会议暨第十五届全国水动力学研讨会论文集. 北京:海洋

[20] 刘晓波, 黄其柏. 水轮发电机组故障诊断模糊专家系统研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 71-73.

[21] SORSA T, HEIKKI N, KOIVO H N. Application of artificial neural networks in process fault diagnosis[J]. Automatica, 1993, 29(4): 843-849.

[22] 德吉措姆, 蔡天富, 田国良. BP 网络在水轮发电机组振动故障诊断中的应用研究[J]. 四川电力技术, 2000(4): 3-6.

[23] 余晓晖, 杜林, 陈明英, 等. 基于 BP 神经网络的水轮机调速系统故障诊断[J]. 重庆大学学报, 2001, 24(6): 71-74.

[24] 杨晓萍, 解建宝, 孙超图. 水轮发电机组振动故障诊断的神经网络方法研究[J]. 水利学报, 1998(4): 94-97.

[25] 贾嵘, 白亮, 刘峰. 基于神经网络的水轮发电机组振动故障诊断专家系统[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 120-123.

[26] 熊建秋, 李祚泳, 汪嘉杨, 等. 基于 PNN 的水轮发电机组振动故障诊断[J]. 水力发电, 2005, 31(7): 55-57.

[27] 彭兵, 周建中, 付波, 等. 径向基神经网络在水轮发电机组故障诊断中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(1): 35-38.

[28] 洪治, 李国宏, 蔡维由, 等. 基于小波包分析的水轮发电机组振动的故障诊断[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(1): 65-68.

[29] 桂中华, 韩凤琴. 小波包——最大熵谱估计及其在水轮机故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 62-66.

[30] BUCKLEY J J, HAYASHI Y. Fuzzy neural networks: a survey[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 66: 1-13.

[31] 桂中华, 韩凤琴. 小波包特征熵神经网络在尾水管故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 99-103.

[32] 余波, 张礼达, 王辉. 水轮机故障诊断专家系统的一种模糊诊断方法[J]. 水力发电, 2004(4): 38-39.

[33] 陈喜阳, 张克危, 彭玉成. 基于多种诊断方法的水电机组故障诊断系统的研究[J]. 水力发电, 2003, 29(5): 23-26.

[34] BOAMANS R F, HEWITT J A. Expert system for machinery vibration diagnostics [C]//MUSZYNSKA A. Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions. New York: ASME, 1992: 365-371.

[35] SMITH D J. Artificial intelligence—today's new design and diagnostic tool[J]. Power Engineering, 1989, 93(1): 26-30.

(收稿日期: 2006-10-10 编辑: 熊水斌)

(上接第 13 页)

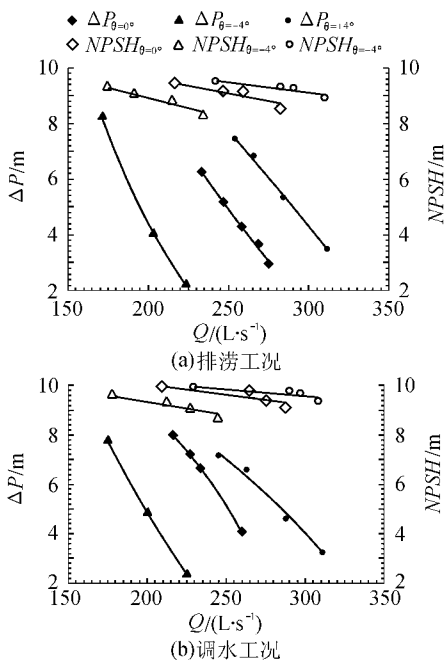


图 8 叶片进口压降 ΔP 与 $NPSH$ 的关系

研究成果表明, 泵装置外特性到内特性之间存在着一定的关联性。CFD 预测的效率与模型实测效率非常接近, 流道损失也基本相同。从对比分析的结果来看, 在一定的流量范围内, 尤其是接近最优工况点附近, 采用 CFD 方法预测装置的能量特性是可行的, 通过叶片进水边压降与 $NPSH$ 值的对比, 表明

两者存在明显的相关性。因此, 数值模拟方法能够应用于工程中进行不同的方案比选和初步的能量及空化特性的确定; 流速分布和流道的损失等内特性的进一步分析, 可以揭示不同工况下泵性能存在差异的原因, 为进一步优化流道指明了努力的方向和研究的重点^[8]。

参考文献:

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2002: 187-197.

[2] 储训, 陈履. 大型泵站建设和更新改造对策[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000: 52-56.

[3] 郑源, 张德虎, 刘益民, 等. 贯流泵装置能量特性试验研究[J]. 流体机械, 2003(2): 1-4.

[4] 蒋小欣, 李龙, 王玲玲, 等. 双向贯流泵装置特性数值研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 81-84.

[5] 蒋小欣, 王玲玲, 李龙. 数值模拟及可视化技术在旋转水力机械设计中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 409-413.

[6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 64-97.

[7] 谢伟东, 陈卫东, 韩仕宾, 等. 秦淮新河抽水站水泵改造项目研究[J]. 江苏水利, 2000(7): 24-25.

[8] 李龙. 泵优化设计现状及发展趋势[J]. 水泵技术, 2003(2): 8-120.

(收稿日期: 2006-08-08 编辑: 高建群)