

侧向进水泵站前池整流技术研究综述

徐 辉 张 林

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对侧向进水泵站前池水流流态的改善问题 ,概括了当前侧向进水泵站前池整流技术在流动特征、研究方法和整流措施等方面的研究进展 ,指出还需要在旋涡生成机理、比尺效应、配水孔整流方式和实际工程优化设计方法等方面进行进一步的研究。

关键词 :泵站 ;流态改善 ;侧向进水 ;综述

中图分类号 :TV133 ;TV675 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2008)06-0084-05

Review of flow pattern modifying technology for pump sump with side-inlet//XU Hui , ZHANG Lin(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : This paper reviews the advances on the flow pattern modifying problem for a pump sump with side-inlet , which include hydraulic characteristics , practical design and research methods . It is suggested that further study be preformed on the theory of vortex formation , scale effects , the flow distribution control technology , and the hydraulic optimization method of projects .

Key words : pumping station ; flow pattern modifying ; side-inlet ; review

泵站的布置形式往往受到来流条件、实际地形和其他客观因素的限制 ,有时不得不采用侧向进水的布置形式 ,这时如果不采取适当的整流措施 ,就会使得前池中水流紊乱 ,泥沙淤积 ,水泵进水条件恶化 ,影响到泵站的正常可靠运行。前池整流技术已引起广泛注意并得到了深入研究 ,笔者拟对近年来涉及侧向进水泵站前池整流技术方面的研究成果进行论述 ,以探索该领域的研究方向和发展趋势。

1 侧向进水泵站的前池流动特征

一般按照前池进水方式将泵站的布置形式分为正向进水和侧向进水 2 种。正向进水指前池来流方向和前池中的主流方向基本相同 ,这时前池中的流动较为平顺 ,相对容易创造出良好的水泵进水条件 ,所以泵站设计优先选用正向进水的布置形式。侧向进水指前池来流方向和前池中的主流方向存在夹角 ,这时前池中容易形成回流、旋涡等不良流态 ,难以创造出良好的水泵进水条件。受城市中土地占用限制和周围建筑物的影响 ,市政给排水泵站经常采用侧向进水的布置形式。此外 ,临近江河的引水泵站、闸站合建式泵站以及运行工况复杂的枢纽泵站也会采取侧向进水的布置形式。侧向进水形式因来流条件、前池形状和水泵机组的布置形式而千差万

别 ,为能够对侧向进水的流动特征进行一般性的分析和归纳 ,成立等^[1]将侧向进水泵站前池的布置形式概化为如图 1 所示的 3 种简单的基本形式。以下主要针对图 1(a)和图 1(b)形式的前池进行分析。对于图 1(c)所示的双向侧向进水 ,通常会将其对称分隔为 2 个独立的单元 ,从而也就转化为图 1(a)的形式。

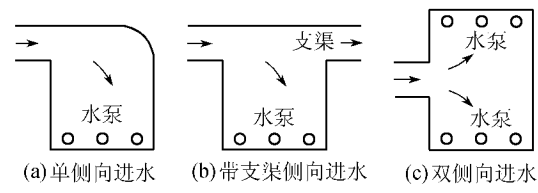


图 1 侧向进水泵站的基本布置形式

图 1(a)所示的单侧向进水形式和直角弯道水流形式相似 ,弯道水流是一种常见的同时也是相当复杂的水流现象 ,弯道水流的研究是水动力学研究中的经典课题。水流流经弯道做曲线运动 ,水面形态和水流结构发生调整 and 变化 ,所形成的弯道水流的运动特征一般可概括为水面横比降、横向环流、弯道脱流和流速重分布 4 个方面^[2]。水面横比降引起弯道断面横向压力差 ,这种压力差沿垂线分布的均匀性和流速沿垂线分布的非均匀性导致了弯道断面纵轴横向环流的出现 ,横向环流和纵向水流叠加就

作者简介 :徐辉(1961—)男 ,江苏东台人 ,教授 ,博士 ,从事泵站工程水力学研究。E-mail :hxu@hhu.edu.cn

形成了螺旋流动。弯道水流结构的变化会引起流速重分布,即沿纵向、横向和垂向的流速分布变化,适用于明渠均匀流的对数、指数、抛物线等流速分布在弯道水流中不再适用,具体的流速分布依赖于弯道形态、地形和水流等条件。因弯道之前的底层水流的纵向流速小于表层水流的纵向流速,流动惯性相对较小,所以底层水流较表层水流更容易转向,这就导致弯道脱流主要发生在表层区域,底层水流不易发生脱流现象。

图 1(b)所示带支渠的侧向进水形式和常见的河流岸边的侧向引水形式相似,Kasthuri 等^[3]、Neary 等^[4,5]、Barkdoll^[6]对侧向引水流动特性进行了详细研究,研究结果显示侧向引水的流动特征和弯道水流的流动特征相似,主槽中的底层水流较表层水流更容易转向流进分水槽中,分水槽进口处各层流线的弯曲度沿水深从表层到底层逐渐增加,底层的分流宽度明显大于表层的分流宽度。罗福安等^[7]、曹继文等^[8]的试验结果也都验证了上述结论,并分别给出了沿水深分布的分流宽度的经验计算公式。

2 侧向进水泵站进水特性的研究方法

侧向进水泵站中的流动现象比较复杂,其进水流动特性的研究方法主要有理论分析、模型试验、数值模拟和现场测试。理论分析一般适用于概化的简单流动,或者为流动现象提供定性的理论支持。而现场测试难度大、成本高,因此目前对泵站侧向进水流动的研究主要依赖于模型试验。近年来随着计算流体动力学的日渐成熟,数值模拟已经成为泵站进水流动特性研究的重要手段。

2.1 模型试验

模型试验是研究泵站进水水力特性的重要方法,目前涉及通过水力模型试验进行整流措施研究的文献很多,但在旋涡现象的比尺效应和水泵进水条件的验收标准上,还没有形成一致通用的研究结论。

Daggett 等^[9]、Anwar 等^[10]、Jain 等^[11]研究了表面旋涡产生的影响因素,指出表面旋涡相似首先要符合重力相似,即 Fr 相似准则,此外,为克服黏性力、表面张力所引起的比尺效应,模型还需要满足其他限制条件,各学者根据不同的进水结构和试验条件所提出的限制条件各不相同。也有学者建议采用高于 Fr 准则的流速(保持 Fr 准则的淹没水深),甚至采用原型流速来消除模拟进气旋涡时的比尺效应。日本机械工程师协会^[12]建议对挟气旋涡的相似条件选用 Fr 准则和等流速之间的一个中间流速,即选用流速比尺 $\lambda_v = \lambda_L^{0.2}$ 。美国水泵进水设计标

准^[13]则推荐在表面涡试验中采用 1.5 倍 Fr 流速的相似准则。Padmanabhan 等^[14]为研究泵站水池模型试验中的比尺影响,分别进行了 1:1、1:2 和 1:4 这 3 种几何比尺下的水力模型试验,指出就旋涡而言,缩尺模型中没有表现出比尺效应。由此可见当前人们对表面旋涡模型试验中表面旋涡预测效果的认识并不统一,目前较为通用的办法是先按 Fr 准则设计模型,再用黏滞力和表面张力限制条件加以校核,并补充观察适当增加流量时的试验效果。

因为水泵类型、泵站用途和特定设计条件等差异,很难形成水泵进水条件的统一验收标准。Tullis^[15]、Sweeney 等^[16]、Nathan^[17]、Odgaard 等^[18]都提出了各自的水力模型试验的验收标准,日本机械工程师协会标准^[12]和美国水泵进水设计标准^[13]也都有相应的验收标准的规定条款。所有的验收标准基本上都是针对表面旋涡、水下旋涡、水泵进口流速分布状况进行相应的规定,可以归纳为:①水泵进口前不能出现“染料可视旋涡核心”(即通过染料示踪剂,能够显示出有组织的旋涡核心)式的表面旋涡;②水泵进口前不能出现有组织的水下旋涡;③从进水喇叭口到叶轮室区段不能出现明显的脱流现象;④水泵进口预旋角度应在允许的范围内;⑤水泵进口的轴向流速分布不均匀度应在允许的范围内。水泵进口预旋角度的允许范围一般认为是 $\pm 5^\circ$,水泵进口的轴向流速分布不均匀度的允许范围一般认为是 $\pm 10\%$ 。

近年来随着流场显示技术的发展,对水泵进口附近旋涡的研究也从对现象的直观判断向揭示细节与定量描述的方向发展。Rajendran 等^[19]应用二维 PIV (particle image velocimetry) 来捕获旋涡的位置、形状、强度等定量信息,首次直观地显示出旋涡的瞬时结构和时均结构的细节,揭示出旋涡并不是固定的而是在区域附近随机游离的特性。李永等^[20]应用 PIV 对封闭式进水池中进水口附近的旋涡特性进行流场显示,给出了进水口处的环量、涡量等重要的流动参数,认为进水池采用封闭式结构能够有效地减少各种旋涡的发生。

现代量测技术能够细致、定量地描述旋涡附近的流场结构,是进行旋涡现象研究的有力工具。水力相似理论是泵站水力模型试验的理论基础,传统水力模型试验研究已经取得了许多具有实用价值的旋涡比尺效应方面的研究成果,当前有必要基于现代量测技术对泵站前池中的旋涡生成机理以及其在模型试验中的比尺效应进行进一步的研究探索,为水泵进水条件验收标准的研究提供理论依据。

2.2 数值模拟

随着 CFD(computational fluid dynamics)的发展 ,越来越多的学者应用 CFD 手段对泵站进水流动进行研究。泵站进水流动为强烈的三维各向异性紊流 ,CFD 中还有相当多的技术细节不够完善 ,所以 CFD 解的正确性和准确性仍然需要通过分析和试验进行验证。Constantinescu 等^[21]、Rajendran 等^[22]采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型和双层壁面模型对发生表面旋涡时的单台水泵进水池流场进行数值计算 ,并用计算得到的涡量来反映表面旋涡和水中旋涡的强度。PIV 水槽的验证试验表明 ,数值模拟所预测的旋涡的位置、数量及结构与试验观测到的结果一致 ,总体比较而言 ,数值模拟得出的旋涡范围偏大、强度偏弱。Roberge^[23]利用 FIDAP 软件中的标准 $k-\omega$ 模型对单台水泵进水池流动的研究也得出了相近的结论。Ansar 等^[24-25]将单台水泵和对称布置的 2 台水泵的进水池流动的无黏流动数值模拟结果与试验结果进行对比 ,发现无论正向或侧向来流 ,数值模拟所预测的表面旋涡现象都与试验结果一致 ,在采样点利用 ADV 测量得到的流速值与计算得到的流速值基本吻合。上述研究结果表明 ,在非旋涡核心区域 ,数值模拟计算结果具有较高的可信度 ,能够满足实际应用的要求。

由于数值模拟方法具有经济、快速的优点 ,特别适用于需要进行多种方案优化比较的整流措施研究。陆林广等^[26]以水泵进口断面的流速分布均匀度和流速平均角度为目标函数 ,通过单个设计参数的逐步调整 ,用数值模拟方法完成了单泵进水池设计参数的优化 ,得到和模型试验基本一致的结果。屈磊飞^[27]将该水力优化方法应用于闸站合建枢纽中整流措施的设计 ,获得了比较理想的效果。成立^[28]在单泵进水池的水力优化设计中选用水泵进口断面的流速分布均匀度和水力损失为目标函数。上述优化方法使用可以量化的目标函数 ,在单个参数调整时能够获得规律性的认识 ,为参数选择提供了明确的依据 ,具有很好的推广价值。

泵站进水流动中存在旋涡、回流等复杂流动现象 ,精确的数值模拟存在一定困难 ,所以有必要通过现代量测工具对数值模拟结果进行验证。应用数值模拟手段对实际工程进行水力优化时 ,还应对目标函数的确立进行研究 ,使其能够体现整流措施的设想 ,同时物理概念明晰 ,能够为优化研究提供可靠的理论依据。

3 侧向进水泵站的前池整流措施

自英国流体力学研究协会(BHRA)的 Prosser^[29]

给出水泵进水设计推荐准则以来 ,很多研究机构和学者都提出了各自的水泵进水设计准则 ,但所有这些设计建议都以泵站正向均匀进水为前提条件 ,在水泵来流存在横向流动的条件下 ,任何一种设计准则都不能保证为水泵提供良好的进水条件。目前较为通用的设计方法是先按照设计推荐准则的要求进行初步设计 ,再根据具体的前池来流等其他条件采取相应的辅助整流措施 ,并通过模型试验等方法进行验证。经过多年的研究 ,被验证能够有效改善侧向进水流态的整流措施概括起来主要有以下几类。

3.1 导流栅、导流墩、导流墙整流方式

当来流有明显的主流方向时 ,往往采用这类以“导”为主的整流方法 ,通过沿水流纵向设置构筑物 ,引导水流逐渐转向整流构筑物所控制的方向。以导流栅为例 ,水流经过导流栅时形成叶栅绕流效应 ,叶栅给水流提供了使其转向的离心力 ,从而有效地抑制了弯道内侧水流因扩散效应所引起的脱流。同时导流栅等措施还可以从结构上阻断弯道水流的横向环流。这类整流措施能够显著改善前池中的脱流和环流 ,但如果设计不当 ,整流构筑物后易产生卡门涡街 ,诱发水泵进口处产生旋涡 ,引起机组振动。

田景环等^[30]参考了肘管流动的叶栅设计公式 ,以弯道后的断面流速分布均匀系数为依据 ,通过试验给出了弯道整流导流栅的设计方法。白音包力皋等^[31]发现导流栅的导流效果与导流栅进口断面动量的分配均匀度有密切关系 ,并通过试验和回归分析给出了不同水力条件下的导流栅设计的参考公式。导流栅几何形状复杂 ,设计时需要反复调整参数 ,所以导流栅整流方式一般仅出现在来流方向明确、易于形成设计经验的弯道整流当中。导流墩、导流墙在调整来流中的横向流速方面也有很多应用实例^[16-18 32-34] ,但导流墩的数目、位置、角度、高度和长度等设计参数一般都需要通过具体的模型试验来确定 ,个别工程的设计参数不具有推广价值。

3.2 立柱、底坎、压水板整流方式

这类整流方法以“挡”为主 ,通过调整断面的水流结构 ,使水流之间互相掺混 ,从而在下游不远处获得比较均匀的流动。这类整流方法具有很好的适用性 ,对于弯道流动、扩散流动和其他来流条件较差的流动 ,都能够很好地弱化来流中的横向流速 ,使下游形成纵向和横向都比较均匀的流动。底坎整流是比较常见的整流方法 ,实际工程中还常见立柱与底坎组合的整流方法。底坎整流虽然具有很好的整流效果 ,但容易导致底坎附近泥沙淤积 ,这不仅增加了前池的清淤工作量 ,更因为淤积后改变了前池的流场分布 ,从而影响到整流效果。为减轻泥沙淤积 ,压水

板整流方式应运而生。压水板同样能够使得水流在横向上均匀分配,同时能增大水流的底层流速,对于前池的防淤减淤具有积极作用。但压水板前形成的垂向翻滚区对于水泵进水会形成不良影响,在压水板下设置导流墩可以改善其底部流态,使水泵进口处获得比较均匀的来流。

这类整流方法有很多的应用实例^[16,32,35-41],但基本都局限于通过模型试验得到适用于具体工程的整流措施设计参数。徐辉等^[35]从涡流理论出发对立柱辅助底坎整流的机理进行了详细的阐述,并给出底坎的经验设计参数。冯旭松^[37]在纵向二维流动情况下对底坎整流进行理论分析,并对底坎的几何设计和设置位置提出建议。何耘等^[39]将压水板应用于城市污水泵站的前池整流,并进行了泵站前池的浑水模型试验,验证了压水板整流的防淤减淤效果。徐辉等^[42]针对有代表性的正向进水的城市排水泵站进行压水板整流措施的研究,给出了压水板的优化设计参数,同时还比较了导流墩压水板组合和单独压水板的整流效果,试验显示前者的整流效果更好。

3.3 配水孔整流方式

近年来在城市排水泵站中经常见到配水孔整流方式^[43]。配水孔整流方式不仅通过“挡”来调整断面水流结构,还预先为各台水泵机组分配流量。配水孔整流方式设想在配水池中经过水流结构的调整,将侧向进水转换成多个配水孔出流的正向进水,并通过配水孔的均匀配水,为每台水泵提供完全相同的进水条件。配水孔整流方式能够在较短的距离内大幅度改善水泵来流条件,其以底孔配水的形式预先为每台水泵分配流量,不仅能够提高各台水泵之间的配水均匀性,而且有利于泵站的防淤减淤,这种整流方式特别适用于布置紧凑的多机组城市排水泵站。

田家山^[44]的模型试验研究显示,配水孔整流措施引起的水力损失与底坎整流措施引起的水力损失相当。段志强^[45]对配水池进行水力优化设计,模型试验表明采用引水槽结合引水斜坡的配水池底部结构形式能够显著改善集配水池的配水均匀性,并能够提高水泵机组的平均性能。Sweeney等^[16]在侧向引水工业泵站的模型试验中采用窄形配水孔来削弱泵站来流中的横向流速,获得了正向均匀的水泵来流,并配合分流板等整流措施,使水泵进水条件能够满足水力模型试验验收标准,这说明只要配水孔整流措施设计得当,就能够取得良好的整流效果。

当前对配水孔整流方式的研究仅限于具体工程的模型试验^[16,43-46],通用的研究结果较少。配水孔

整流措施具有形状规则、结构简单的优点,易形成通用的设计准则以便推广使用,具有很好的应用前景,值得进行系统深入的研究。

4 结 语

尽管侧向进水泵站前池整流技术获得了广泛的关注,取得了很多的研究成果,但还存在很多问题没有解决,仍然没有通用、可靠的侧向进水泵站前池整流措施的设计准则与验收标准。当前对侧向进水泵站前池整流措施的研究在以下几个方面有待于进一步的研究探索:

a. 对泵站前池中的旋涡生成机理以及其在模型试验中的比尺效应进行基础性研究,为泵站水力模型试验提供理论依据。

b. 通过建立可以量化的物理概念明晰的目标函数,采用数值模拟方法对前池整流措施进行优化研究,该方法具有经济、快速的优点,能够为整流措施的优化设计提供可靠的理论依据,具有很好的推广价值。

c. 配水孔整流方式具有结构简单、布置紧凑、配水均匀、防淤减淤的优点,适用于侧向进水的城市排水泵站,值得对其整流机理、参数设计和整流效果进行系统深入的研究,以期形成侧向进水前池整流设计的推荐设计准则。

参考文献:

- [1] 成立,刘超,周济人,等.泵站侧向进水流态及其改善措施机理探讨[J].排灌机械,2001,19(1):31-34.
- [2] 张红武,吕昕.弯道水力学[M].北京:水利电力出版社,1993:44-76.
- [3] KASTHURI B, PUNDARIKANTHAN N V. Discussion of separation zone at open channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1987, 113(4):543-544.
- [4] NEARY V S, ODGAARD A J. Three-dimensional flow structure at open channel diversions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, 119(11):1223-1230.
- [5] NEARY V S, SOTIROPOULOS F, ODGAARD A J. Three dimensional numerical model of lateral-intake inflow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(2):126-140.
- [6] BARKDOLL B D. Sediment control at lateral diversions[D]. Iowa, USA: University of Iowa, 1997.
- [7] 罗福安,梁志勇,张德茹.直角分水口水流形态的实验研究[J].水科学进展,1995,16(1):71-75.
- [8] 曹继文,陈惠泉,贺益英.明渠岸边横向取水口水力特性的试验研究[J].水利学报,2003(10):32-37.
- [9] DAGGETT L L, KEULEGAN G H. Similitude in free surface vortex formations[J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1974, 100(HY11):1565-1581.

- [10] ANWAR H O ,WELLER J A ,AMPHLETT M B. Similitude of free vortex at horizontal intake[J]. Journal of Hydraulic Research ,IAHR ,1978 ,16(2) 95-105.
- [11] JAIN A K ,RAJU K G R ,GARDE R J. Vortex formation at vertical pipe intakes[J]. Journal of Hydraulic Division ,ASCE , 1978 ,104(HY10) :1429-1445.
- [12] 日本机械学会. JSME 5004—1984 水泵进水池模型试验法[S]. 黄林泉,译. 北京:中国水利水电出版社,1986.
- [13] ANSI/HI 9.8—1998 ,American National Standard for Pump Intake Design[S].
- [14] PADMANABHAN M ,HECKER G E. Scale effects in pump sump models[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1984 ,110(11) :1540-1557.
- [15] TULLIS J P. Modelling in design of pumping pits[J]. Journal of Hydraulic Division , ASCE ,1979 ,105(HY9) :1053-1063.
- [16] SWEENEY C E ,ELDER R A ,HAY D. Pump sump design experience : summary[J]. Journal of Hydraulic Division , ASCE ,1982 ,108(HY3) 361-377.
- [17] NATHAN G K. Flow investigation in two pumping pits[J]. Journal of Hydraulic Division ,ASCE ,1981 ,107(HY1) :103-106.
- [18] ODGAARD A J ,DLUBAC J J. Hydraulic model study of pump sump design[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1984 ,110(9) :1267-1272.
- [19] RAJENDRAN V P ,PATEL V C. Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE ,2000 ,126(5) 322-334.
- [20] 李永,李小明,吴玉林,等. 水泵吸水池的改进和 PIV 试验验证[J]. 水力发电学报,2002 ,21(1) :76-82.
- [21] CONSTANTINESCU G S ,PATEL V C. Numerical model for simulation of pump-intake flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE ,1998 ,124(2) :123-134.
- [22] RAJENDRAN V P , CONSTANTINESCU G S ,PATEL V L. Experimental validation of numerical model of flow in pump-intake bays[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1999 ,125(11) :1119-1125.
- [23] ROBERGE J A. Use of computational fluid dynamic(CFD) to model flow at pump intakes[D]. Worcester ,USA :Worcester Polytechnic Institute ,1999.
- [24] ANSAR M ,NAKATO T. Numerical simulations of inviscid three dimensional flows at single and dual-pump intakes[J]. Journal of Hydraulic Research ,2002 ,40(4) 461-470.
- [25] ANSAR M. Experimental and theoretical studies of pump-approach flow distributions at water intakes[D]. Iowa ,USA : University of Iowa ,1997.
- [26] 陆林广,曹志高,周济人,等. 开敞式进水池优化水力计算[J]. 水利学报,1997(3) :16-25.
- [27] 屈磊飞. 闸站枢纽进水流动计算与研究[D]. 扬州:扬州大学,2006.
- [28] 成立. 泵站水流运动特性及水力性能数值模拟研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [29] PROSSER M J. The hydraulic design of pump sumps and intakes[M]. Cranfield , Bedford :British Hydromechanics Research Association ,1977.
- [30] 田景环,宋永嘉,田林钢. 导流栅对弯道水流的影响分析[J]. 华北水利水电学院学报,1999 ,30(1) 5-9.
- [31] 白音包力皋,孙东坡,李国庆. 导流栅对弯道水流动量调整的研究[J]. 水利学报,2001(1) :1-5.
- [32] ODGAARD A J ,DLUBAC J J. Hydraulic model study of pump sump design[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1984 ,110(9) :1267-1272.
- [33] 丘传忻,虞积瑞,余碧辉,等. 侧向进水前池的流态分析及其对水泵性能的影响[J]. 中国给水排水,1991(2) :4-8.
- [34] 严忠民,周春天,阎文立,等. 平原水闸泵站枢纽布置与整流措施研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2000 ,28(2) 50-53.
- [35] 徐辉,田家山. 泵站前池回流现象与消除方法的试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,1989 ,17(增刊) :35-41.
- [36] ARBOLEDA G , EI-FADEL M. Effects of approach flow conditions on pump sump design[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE ,1996 ,122(9) 489-494.
- [37] 冯旭松. 泵站前池底坎整流及坎后流动分析[D]. 扬州:扬州大学,1996.
- [38] 成立. 泵站进水弯道三维流动分析及流态改善研究[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2002 ,25(2) 64-68.
- [39] 何耘,刘成. 污水泵站前池设置压水板的改进措施研究[J]. 水泵技术,2000(2) 21-24.
- [40] 罗缙,林颖. 火(核)电站循环水泵房前池水力模型试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2000 ,28(5) :106-110.
- [41] 徐月江,冯建刚,陈毓陵. 侧向进水多机组泵站进水流态改善措施研究[J]. 排灌机械,2004 ,22(4) 5-13.
- [42] 徐辉. 城市排水泵站进水水力特性研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [43] 《给排水设计手册》编委员. 给排水设计手册:第四篇[M]. 北京:北方工业出版社,2007.
- [44] 田家山. 泵站侧向进水池流态的评价与整治[J]. 河海大学学报:自然科学版,1989 ,17(增刊) 8-14.
- [45] 段志强. 侧向进水泵站集水池水力特性研究[D]. 南京:河海大学,2004.
- [46] 周健,张爱玲,舒福荪,等. 全地下式雨水泵站的设计[J]. 中国给水排水,2006 ,22(14) 35-38.
- [47] 练伟航,马治安,张广传,等. 电厂机组泵房侧向进水前池流态水力试验研究[J]. 中国农村水利水电,2006(6) :115-119.

(收稿日期 2008-04-17 编辑 骆超)