

进水口漩涡问题研究综述

党媛媛^{1 2} 韩昌海^{1 2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029 ; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要 水工建筑物进水口前经常会出现漩涡。根据漩涡是否吸气, 将其分为吸气漩涡和不吸气漩涡, 指出吸气漩涡会造成水工建筑物和水力机械的破坏。分析和总结漩涡产生的影响因素、漩涡危害以及漩涡消除方法等研究成果, 回顾了通过物理模型和数值模拟对进水口吸气漩涡进行研究的最新成果。

关键词 进水口漩涡; 水力模型; 数值模拟; 综述

中图分类号: TV732.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2009)01-0090-05

Review of vortexes at intakes//DANG Yuan-yuan^{1 2}, HAN Chang-hai^{1 2} (1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract : The vortex often appears at the intake of a hydraulic structure. The vortex is divided into vortex with an air-core and vortex without an air-core, where the former can damage the hydro-engineering and hydro-machine. A brief review of the advances of research on vortexes in intakes is presented in this paper. The influencing factors, damage, and elimination method of vortexes are analyzed. The latest achievements in the research on vortexes at intakes with physical and numerical models are reviewed.

Key words : intakes; vortex; hydraulic model; numerical simulation; review

在水利工程中,水工建筑物的进水口前经常会出现漩涡。根据漩涡是否吸气可将其分为吸气漩涡和不吸气漩涡。其中吸气漩涡对水工建筑物和水力机械有一定的破坏作用。其具体表现为:①形成吸气漩涡后会吸入水面漂浮物,堵塞进水口,减小进水口的泄流能力,降低电站的发电效率,危及工程安全;②吸入的空气在水电站洞身内形成气囊,恶化洞身流态,增加洞身脉动压力;③由于水流中夹杂的气泡在压力改变时体积缩胀,降低了水力机械的效率,产生噪音,造成振动和空化,影响周围建筑物安全。因此,探讨漩涡尤其是吸气漩涡的产生机理,揭示其运动的规律,寻求控制漩涡危害的有效措施,是工程实际中需要迫切解决的问题,也是流体力学理论中有难度和有挑战性的重大课题。

1 进水口漩涡的产生条件

在实际工程中,诱导进水口前形成漩涡的原因很多,归纳起来有 3 个方面的因素:①进水口前的来流条件,包括进口前行进流速的大小、方向、环流强度等;②进水口附近的局部流态,一般取决于进水口布置构造的细部特点与边界条件;③进水口自身的

水力学条件,包括进水口的引水流量、进口流速以及淹没深度。综合以上 3 个方面的因素,通过量纲分析方法具体分析影响漩涡形成的无量纲参数,并论述柯氏力的影响。

1.1 量纲分析与参数的选取

已有的研究表明影响漩涡形成和发展的因素很多。综合各项研究成果,采用量纲分析方法,得到影响漩涡形成的几个无量纲参数:弗劳德数 Fr 、雷诺数 Re 、韦伯数 We 、环量数 Nr 和相对淹没水深 S/D (S 为淹没水深, D 为进水口直径)。

由于漩涡的形成与周围水流流态及边界条件的关系相当复杂,迄今在预测其水力性能及形成条件等方面所取得的研究成果尚未完全成熟。对于具有自由水面的水流运动,其主要作用力是重力,因此不能忽略 Fr 对漩涡形成的影响。Reddy 等通过实验或原型观测,将漩涡形成的主要影响参数简化为 Fr 和 $S/D^{1/3}$ 。

对于 Re 和 We ,一般认为只要超过其临界值,就可以忽略水的黏性和表面张力对漩涡运动的影响。其中 Jain 等^[2]提出可以忽略不计黏滞力的临界 Re 与 Fr 有关, Fr 越大,不受黏滞力影响的 Re 下限越

大。早先的研究者如 Reddy, Gordon 等通过实验或原型观测,将漩涡形成的主要影响参数简化为 Fr 和 $S/D^{[1]}$ 。Anwar^[3-4]和 Ansar 等^[5]利用圆桶研究发现具有细长气核的漩涡当 $Re > 10^8$ 时黏性对 Nr 没有影响,而有空气吸入的漏斗型漩涡当 $Re > 3 \times 10^4$ 时黏性对 Nr 没有影响。Anwar 等^[6]指出当进水口 $Re > 3 \times 10^4$, $We > 10^4$ 时,液体的表面张力和黏滞力已不能影响掺气漩涡的流态,对于位置已确定的进水口而言,漩涡的形成主要取决于其环量、进水口的流量和淹没深度,因此现有的漩涡形成的经验公式、类型判据大多建立在 S/D 和 Fr 上,也有部分包含了 Nr 。

进水口前漩涡受边界条件和初始环量的影响较大。进近水流受进水口周围边界条件(进水口形式、位置、进水方向、附近地形、水工建筑物布置)的影响,在进水口上方形成一定的初始环量,是漩涡现象出现和发展的重要诱因。邓淑媛^[7]结合多年的工程试验,并参照前人的试验研究成果,分析了侧部和底部进水口前漩涡的形成与边界条件的关系,归纳出诱导漩涡发生的情况。

为了避免发生自由表面吸气漩涡,进水口必须有足够的淹没深度。20 世纪 60 年代国内外许多专家学者对进水口淹没深度进行了研究,取得了丰硕的成果。其中 Gordon^[8]、Daggett 等^[9]、Jain 等^[2]、Odgaard^[10]、Anwar 等^[11]、邓淑媛^[7,12]、胡去劣^[13]、陈宗娜等^[14]提出了计算进水口临界淹没水深的经验公式。但各研究人员所得出的经验公式差别很大,一方面是由于进水口和边界条件的复杂多样化,在探讨临界淹没深度时考虑漩涡形成的主要因素而忽略了次要因素;另一方面还与试验条件不同有关,其中测量手段的差异也是很重要的原因。

1.2 柯氏力的影响

众所周知,地球是一个匀速旋转的系统,而地球上流体质点的运动实际上相当于质点对于旋转刚体的相对运动。旋转参考系中质点的加速度和惯性参考系中质点的加速度存在着以下的关系:

$$a_I = \left(\frac{dv}{dt} \right)_I = \left(\frac{dv_R}{dt} \right)_R + 2\Omega \times v_R + \Omega \times (\Omega \times r) + \frac{d\Omega}{dt} \times r \quad (1)$$

式中: a_I 为惯性参考系中的绝对加速度; v 为速度矢量; t 为时间; R 为曲率半径; Ω 为刚体旋转角速度; r 为曲线上任一点的矢径; v_R 为半径为 R 处的速度矢量。

等式右边各项含义如下:第 1 项为相对加速度,第 2 项为柯氏加速度,第 3 项为向心加速度,第 4 项

为转动(切向)加速度。对于匀速旋转系统而言,切向加速度为零。将式(1)代入不可压缩流体的 N-S 方程中,整理后得

$$\left(\frac{dv_R}{dt} \right)_R = -2\Omega \times v_R - \Omega \times (\Omega \times r) + f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v_R \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; f 为质量力; p 为压力; ν 为运动黏滞系数。

式(2)增加了前面 2 项 $f_c = -2\Omega \times v_R$, 表示作用于单位质量流体微团上的柯氏力; $f_e = -\Omega \times (\Omega \times r)$, 表示作用于单位质量流体微团上的离心力。离心力的影响很小,可以忽略不计。柯氏力是一种非保守力,会改变速度的方向,对漩涡的形成有一定的影响。引入旋转流体的特征长度 L 、旋转流体的速度 U 、刚体旋转角速度 Ω 和旋转角速度 ω , 分析得到衡量旋转效应的一个重要参数,即罗斯比数 R_o ^[15]:

$$R_o = \frac{U}{\Omega L} \sim \frac{U^2/L}{\Omega U} \sim \left[\frac{\omega}{\Omega} \right]$$

即

$$R_o \sim \frac{\text{相对运动的惯性}}{\text{柯氏力}} \sim \frac{\text{相对运动的涡量}}{\text{行星涡量}}$$

当 $R_o \ll 1$ 时,流体中的惯性力比柯氏力小,旋转效应起主导作用;当 $R_o \gg 1$ 时,表示旋转效应是微不足道的,柯氏力的作用力很小。而当 $R_o \gg 1$ 时,柯氏力和流体中的惯性力同时起作用,流动比较复杂。

对于水工建筑物前的漩涡,一般来说 R_o 接近于 1,故柯氏力对漩涡有一定的影响,但是结合工程实际中观察到的漩涡情况,也说明了柯氏力对于漩涡的影响并不是完全主导的,柯氏力对漩涡的影响还有待于进一步的研究。

2 水力模型试验研究和数值模拟方法

2.1 水力模型的相似性与比尺效应

对于漩涡的形成,通常有 3 个主导作用力,即重力、黏滞力和表面张力。在模型试验中,若所用的流体与原型相同,即采用水,欲达到上述 3 项作用力都相似,即同时满足 Fr 相似、 Re 相似、 We 相似,在各尺度模型试验中是不可能实现的。许多学者认为,模型和原型中的 Fr 相等,是满足动力相似条件的根本,以 Fr 相似准则来模拟漩涡有较好的效果。另外一些学者认为,除了 Fr 还应考虑黏滞力和表面张力的影响,这些学者又有着各自的结论^[2]。

Daggett 等^[9]研究指出,当模型 $Re = \frac{Q}{\nu d} > 2.5 \times 10^4$ (Q 为流量, d 为水力半径)时,可以不考虑黏滞力的影

响,在满足 Fr 相似准则的条件下,能忽略吸气漩涡的比尺效应。Anwar^[3]认为当 $Q(\nu d) > 10^3$ 时,不同尺度漩涡间的相似性和 Re 无关,然而强度比较大的吸气漩涡受 Re 的影响就比较大。Amphlett^[16]认为只要 $Q(\nu d) > 3 \times 10^4$,水平进水口的漩涡就不受黏滞力的影响,漩涡模拟不用考虑比尺效应。Hecker^[17]对漩涡形成的模型试验与原型观测进行比较后认为:对于微弱漩涡和表面凹陷漩涡均可按照 Fr 相似准则模拟,漩涡的比尺效应可忽略;而对于模型中发生吸气漩涡,则存在一定程度的比尺效应。

为克服这种比尺效应,可采用以下 4 种方法:
①缩小模型比尺,使模型 Re 和 We 大于一定的临界值;
②允许存在一定的黏滞力影响,增加修正系数;
③提高模型运行水温来增大模型中的 Re ;
④加大模型流速或流量,即将模型流速或流量增加到比 Fr 相似准则所要求的更大一些,而水深值不变,这实际上是为了加大模型的 Re 和 We ,从而减少黏滞力与表面张力的缩尺影响,放弃了 Fr 相似准则。对一些缩尺大、尺寸小的模型而言,这个方法可能有一定效果,但流速究竟应该增大多少才合适,至今尚无定论,有人建议采用 2~3 倍 Fr 的流速。Denny 提出“等流速”理论^[18]。但流速过大,将加剧进水口波浪运动与水流紊动,反而会加大漩涡形成的趋势,也可能导致模拟失真。

各家学者根据不同试验或原型调研资料提出了一些相应的模型流速或流量的比尺要求,认识并不完全统一,相似效果亦随模拟对象而异。目前,较为通用的办法是模型几何正态,按 Fr 相似准则设计,用黏滞力与表面张力相似条件加以校核,并在试验过程中适当增加流量(流速)作为补充观察。

2.2 试验方法

自由水面漩涡运动受水流各种因素影响,在试验中由于毕托管、旋桨流速仪、热线热膜流速仪等测量仪器干扰流场会造成漩涡运动的不稳定,同时在测点坐标、流速方向的判断上易受人为因素影响,给试验结果带来误差,甚至可能得出错误的结论。杨正骏等^[19]利用热线热膜流速仪测量轴向速度;Quick^[20]使用旋桨流速仪测量了漩涡附近的切向速度分布;近年来,随着实验流体力学技术的发展,尤其是粒子图像速度仪(PIV)技术的日臻完善,使得测量相对狭窄槽道内的流动状态成为可能,PIV 技术在不干扰槽道内部原始流场分布的状态下进行流速测定,具有较高的准确度和精确性。何学民等^[21]利用 PIV 较为准确地得出三维轴对称漏斗漩涡的流速分布特性。这种测量方法避免了接触式测量干扰流场的缺点,在模型试验中得到广泛的运用,并取得了

大量的研究成果。

2.3 数值模拟

随着数值计算和计算机技术的发展,数值模拟技术以其成本低、速度快、精度高等优势受到广大科学家的重视,在流体力学中也得到了广泛的应用。

Brocard 等^[22]运用有限元法求解了二维深度平均下的质量守恒方程和能量方程,并将计算结果和试验结果进行了比较。随后许多学者对进水口处的漩涡流场进行了计算,但由于缺乏较好的紊流近壁模式,他们的数值模拟远没有揭示近壁区和漩涡区的流动特性。Constantinescu 等^[23]对进水池中的临界条件进行模拟,显示出漩涡的大小、位置和强度,并采用 $k-\omega$ 模型和 $k-\epsilon$ 模型分别进行了计算和比较。Eiamsaard 等^[24]运用代数雷诺应力模型 ASM 和标准 $k-\epsilon$ 模型模拟了涡管内可压缩的漩涡流动,和单独运用 $k-\epsilon$ 模型相比,其与原型结果的一致性更好。在国内,徐宇等^[25]基于雷诺平均的 N-S 方程和 $k-\epsilon$ 紊流模型,采用 SIMPLEC 算法计算三维紊流,得出了流速场和压力场的分布,预测了漩涡发生的位置和结构。赵永志等^[26]利用雷诺应力湍流模型和 PISO 算法模拟自由水面涡的运动过程,并运用流体体积模型(VOF)处理自由表面问题。陈云良等^[27]对某电站进水口水流流态进行了研究,数值计算针对优化后的体形,模拟了进水口前的表面回流。陈云良等^[28]还运用三维数值模拟、局部网格加密等方法,得到了漩涡的多圈螺旋流特性,并对非对称来流条件下形成的立轴漩涡进行了模拟。叶茂等^[29]采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型对有无防涡墩 2 种情况进行模拟,再现了漏斗状吸气漩涡,计算结果与测量数据吻合良好,验证了漩涡模拟的可行性。

综合以上研究成果分析可知,造成数值模拟计算结果和试验观测值之间误差的原因主要有 4 个方面:
①缺乏好的紊流模式。各种紊流模式的计算结果或多或少存在差异。
②没有好的网格生成。由于漩涡区尺度小,物理量的梯度大,形状复杂,造成了局部网格划分的难度。
③自由水面的处理。由于漩涡表面的水流方向在短距离内从水平转为竖直,曲线的斜率变化较大,在自由水面追踪方面增加了难度。
④恒定流的假定。

3 漩涡的消除

研究进水口前漩涡的最终目的在于合理设计、布置进水口和消除进水口前漩涡尤其是吸气漩涡。国内外众多学者从漩涡形成的原因以及影响因素等方面分析消除漩涡的几个可能途径。

3.1 优化进水口设计

改善进水口的体形和结构,增加淹没水深或减少进水口流速,能有效地防止漩涡、尤其是吸气漩涡的产生;在平面布置上,尽量使来流边界在垂直和水平方向比较平顺,尽可能使进水口附近水流边界对称,避免在进水口采取后倾式胸墙;在无法改变边界条件时,可采取压低闸门门孔,使其在相同的流量下增大淹没深度,减小孔前行进流速或者在孔口前水面设置漂浮式的排筏、隔栏或横梁等,以破坏不利的水流流态;水头很低时,在孔口顶端设置导向板,不但能克服漩涡,还能提高泄流能力^[7];在设计进水口的位置时,应尽可能降低进水角,进水角越大,行近水流所具有的初始环量越大,越可能形成强度较大的漩涡;在条件允许的情况下,尽可能地加长正向引水渠的长度,使进水口附近的环量减弱。

3.2 改善运行方式

尽量在高水位工况下运行,以保证进水口前有一定的淹没深度;高水位时,在保证一定出流的情况下,可减小进水口的流速,削弱水流的紊动,避免水面漩涡的发生;存在多孔进水口时,应合理安排工况,尽可能使进水口对称进水。

3.3 修建专门的消涡建筑物

由于进水口的布置与运行条件往往受到其他更为重要的因素制约,故通过修建专门的消涡建筑物来消除进水口漩涡是比较常用的方法。主要手段有在进水口上方设置消涡梁(图1)和消涡板(图2)或各种活动的消涡构筑物(消涡器)等,其中又以消涡梁的研究居多。日本研究者^[30]研究认为,进水口上方 30° 范围内,属于漩涡易发生区域。邹敬民等^[31]

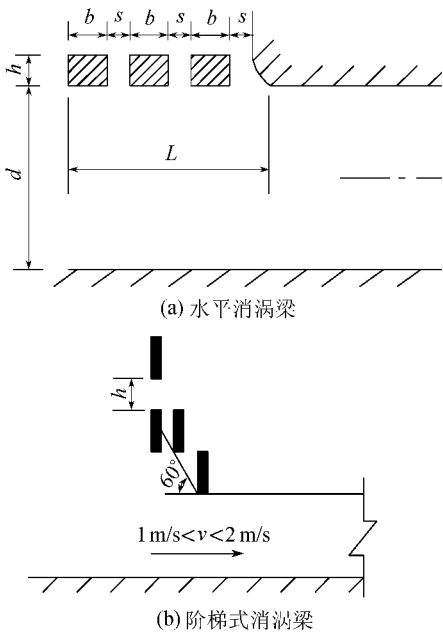


图1 消涡梁示意图

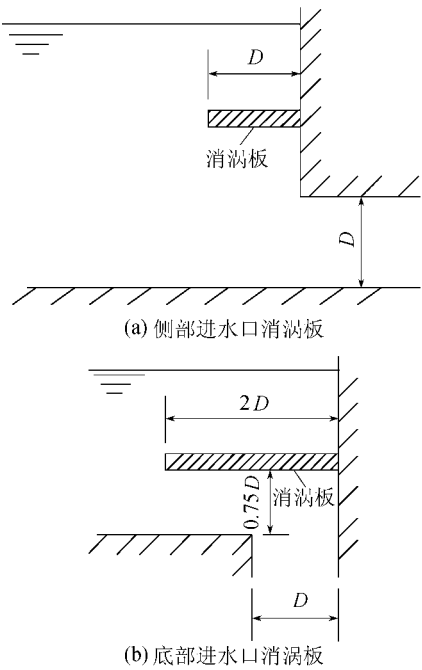


图2 消涡板示意图

对消涡梁的形式进行了研究,针对不同的进水口流速给出了各自的消涡梁形式。

消除漩涡的方法较多,但是由于对漩涡发生的机理和运动规律的研究还不够深入,目前还无法找到通用的消除漩涡的准则,而且由于漩涡的比尺效应,在模型中消除了漩涡,并不能保证在原型中也不存在漩涡。因此,对于具体工程,因尽可能地建造大比尺模型进行试验,并且考虑经济因素,确定合理的消涡梁形式。

4 漩涡的利用

只要掌握了漩涡运动的规律,漩涡也可以被加以控制和利用。如前苏联就在进水口前形成漩涡来排放木材;在意大利、法国、中国等国家采用的漩涡竖井式泄洪洞就是利用漩涡的特性,人为地在进水口前形成漩涡,使流入竖井的水流在涡室内旋滚,保证泄洪洞的正常运行;我国采用的漏斗式全沙排沙技术使含沙水流切向进入漏斗后,受涡室的边壁约束和调流装置的影响产生的强迫涡与室中心的自由涡相耦合,形成一稳定的三维螺旋流将水沙分离。此外,漩涡也可用于重力式选矿、发电等方面。

5 结 语

一直以来,进水口漩涡问题研究都是国内外专家、学者关注的问题,随着计算机技术的进步和先进测量手段的不断涌现,在漩涡问题的理论研究、水力模型试验以及数值模型等方面都取得了丰硕的成果和经验,并不断运用在实际问题当中。但是由于漩

涡问题的复杂性,对于漩涡的生成机理、漩涡的比尺效应、数值模型的选取以及网格的划分等很多问题,仍需要进一步研究。

参考文献:

[1] 华东水利学院. 水工设计手册 第7册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.

[2] JAIN A K, RANGARAJU K G, GARDE R J. Vortex formation at vertical pipe intakes[J]. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 1978, 104(10): 1429-1448.

[3] ANWAR H O. Formation of a weak vortex[J]. Journal of Hydraulic Research, 1966, 4(1): 1-16.

[4] ANWAR H O. Flow in free vortex[J]. Water Power, 1965(4): 153-161.

[5] ANSAR M, NAKATO T. Experimental study of 3D pump-intake flows with and without cross flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(10): 826-834.

[6] ANWAR H O, WELLER J A, AMPHLETT M B. Similarity of free-vortex at horizontal intake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1978, 104(2): 95-105.

[7] 邓淑媛. 泄水建筑物进口水面漩涡的形成及其克服方法的探讨[J]. 水利水运工程学报, 1986(4): 51-63.

[8] GORDON J L. Vortices at intakes structures[J]. Water Power, 1970(4): 137-138.

[9] DAGGETT L L, KEULEGAN G H. Similitude condition in free-surface vortex formations[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1974, 100(11): 1565-1581.

[10] ODGAARD A J. Free-surface air core vortex[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(7): 610-620.

[11] PAULT C. Analytical models of free-surface aircore vortex[J]. Journal of Power and River Valley Development, 1987, 5(7): 465-474.

[12] 邓淑媛. 边界条件对进水口水面漩涡的影响及其克服方法的探讨[C]//水利部西北水利科学研究所. 中小型工程水力学学术讨论会论文集. 杨凌: 水利部西北水利科学研究所, 1984.

[13] 胡去劣. 低水头进水口的布置及漩涡试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1985.

[14] 陈宗娜, 伍超, 陈云良, 等. 进水口前立轴旋涡的试验研究[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2006, 32(4): 799-804.

[15] 童秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994.

[16] AMPHLETT M B. Air-entraining vortices at a horizontal intake [R]. Wallingford, Oxfordshire: Hydrulic Research Station, 1976.

[17] HECKER G E. 漩涡模拟的比尺效应[C]//长江水利科学研究所. 国际水工模拟缩尺影响专题讨论会译文选. 武汉: 长江水利科学研究院, 1985.

[18] 何耘. 水泵进水池漩涡研究的主要进展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(5): 92-96.

[19] 杨正骏, 林宗, 谢佩珍. 进水口前立轴旋涡区水流流速特性[J]. 水力发电学报, 1987, 6(2): 11-20.

[20] QUICK M C. Scale relationships between geometrically similar free spiral vortices[J]. Civil Engineering and Public Works Reviews, 1962, 57(10): 1423-1436.

[21] 何学民, 汝树勋. 水工建筑物进水口三维漩涡流场的实验研究[J]. 四川水力发电, 1993, 4(4): 73-79.

[22] BROCARD D N, BEAUCHAMP C H, HECKER G E. Analytic predictions of circulation and vortices at intakes[R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1982.

[23] CONSTANTINESCU S G, PATEL V C. Numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1998, 124(2): 123-134.

[24] EIAMSAARD S, PROMVONGE P. Numerical prediction of vortex flow and thermal separation in a subsonic vortex tube [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2006, 7(8): 1406-1415.

[25] 徐宇, 吴玉林, 王琳. 水泵进水池内紊流及涡流的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(S1): 33-36.

[26] 赵永志, 顾兆林, 郝永章, 等. 自由水涡结构及运动特征的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(1): 85-88.

[27] 陈云良, 伍超, 叶茂, 等. 水电站进水口水流流态的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(3): 340-345.

[28] 陈云良, 伍超, 叶茂, 等. 立轴旋涡多圈螺旋流场特性研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(1): 13-17.

[29] 叶茂, 伍超, 杨朝晖, 等. 进水口前立轴旋涡的数值模拟及消涡措施分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(2): 36-40.

[30] 福原华一. 抽水蓄能电站进水口、泄水口的水力设计[J]. 上海水利水电技术, 1988(1): 32-43.

[31] 邹敬民, 高树华, 于艳丽, 等. 进水口防涡措施研究[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 15(4): 463-466.

(收稿日期: 2008-01-10 编辑: 方宇彤)

· 简讯 ·

河海大学有 4 种期刊被收录为
2008 年中国科技论文统计源期刊

经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐,由河海大学主办的《河海大学学报(自然科学版)》、《水利水电科技进展》、《水资源保护》、《水利经济》继续被收录为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。《2008 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(CJCR)共收录中国科技论文统计源期刊 1765 种。这些被收录的期刊都是经过严格的定量和定性分析选取的各个学科的重要期刊。河海大学主办的这 4 种期刊已连续多年被收录,标志着我校期刊继续保持着较好的发展势头,这对提升学校学术声誉、促进学科建设将起到有力的推动作用。(本刊编辑部供稿)