

调压室阻抗孔修圆三维数值计算

凡家异¹, 鞠小明^{1,2}, 陈云良^{1,2}, 张玉润¹, 吴旭敏³

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065;
2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
3. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:为实现物理模型与数值计算的互补,采用 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型对阻抗孔修圆进行三维数值计算,得到阻抗孔与调压室底板连接处和与底部流道连接处不同修圆半径时流入、流出大井的阻抗系数,并将阻抗孔未修圆时的计算值与实测值进行对比分析。计算结果表明:阻抗孔未修圆时水流进入阻抗孔后发生突缩,流速分布不均,中间大、周边小,阻抗系数相对较大;阻抗孔修圆后突缩效应明显减弱,水流较为平顺、均匀,阻抗系数明显减小。阻抗孔修圆优化减小了突缩损失,能够有效减小阻抗系数,即可增大阻抗孔的流量系数。

关键词:调压室;阻抗孔;阻抗系数;修圆优化; $k-\varepsilon$ 紊流数学模型;三维数值计算

中图分类号:TV732.5;TV222.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)05-0020-04

Three-dimensional numerical simulation of impedance hole rounding on surge chamber//FAN Jiayi¹, JU Xiaoming^{1,2}, CHEN Yunliang^{1,2}, ZHANG Yurun¹, WU Xumin³ (1. School of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The impedance hole rounding on surge chamber is numerically simulated by using the $k-\varepsilon$ turbulence mathematical model for the complementation of physical model tests. The inflow and outflow resistance coefficients at the junction rounding with different radii of the impedance hole with the bottom plate of surge chamber and the bottom flow conduits are obtained. The calculated flow pattern of surge chamber without impedance hole rounding is compared with the observed one. The results show that when the flows without impedance hole rounding go through the hole, a sudden flow contraction occurs, the flow velocity is uneven, faster in the middle but slower at the sides, and the resistance coefficient is relatively large. After the impedance hole rounding, the sudden contraction effect is significantly reduced, the flows are smooth and even, and the resistance coefficient obviously decreases. The impedance hole rounding optimizes and reduces the contraction losses and may effectively reduce the resistance coefficient so as to raise the discharge coefficient of the impedance hole.

Key words: surge chamber; impedance hole; rounding optimization; resistance coefficient; $k-\varepsilon$ turbulence mathematical model; three-dimensional numerical simulation

在调压室水力过渡过程分析中,阻抗系数是关键参数之一。对于阻抗式调压室,阻抗系数的大小直接影响调压室涌波的变幅、衰减速度以及调压室底板压差等。对于差动式调压室,流入、流出大井的阻抗系数对大井与升管的水位幅值和最大水位差以及合理的调压室差动状态设计等均有重要影响。调压室阻抗孔体型结构不同、槽口或孔口数不同时,其水力条件有差异,仅凭一般水力学手册或经验,难以准确得出相应的阻抗系数。

对调压室阻抗系数的研究,过去多以物理模型试验为主。计算流体力学的方法能够模拟各种复杂的调压室体型中的水流,可高效、准确地计算调压室系统水流流态,为优化调压室的结构体型提供依据,近年来发展迅速。刘志雄等^[1]通过模型试验研究,探讨了阻抗孔尺寸和形状优化对调压室水力参数的影响。胡明等^[2]通过试验研究了机组负荷变化情况下不同的底部流道体型的水头损失与分流比的关系。程永光等^[3-5]结合调压室模型试验和数值计算,

得出计算与试验在变化规律、数值上都有同等的精度。张健等^[6]从调压室系统的基本微分方程出发,结合模型试验成果,推求出了调压室稳定断面计算式。张小康等^[7]对比了数值计算与模型试验,表明 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型较适合于水头损失计算。陈祥荣等^[8-9]根据数值计算和模型试验成果,优化了锦屏二级水电站调压室的形式和布置。向英等^[10]对阻抗式调压室进行了三维流场计算。李向宾等^[11]研究表明:非对称回流孔的阻抗系数,流进时明显减小,流出时明显增大。朱永忠等^[12]研究了调压室涌浪随机模型,推导出水头损失和最大相对涌浪值的密度函数计算公式。鞠小明等^[13]通过建立涌波计算的数学模型,对阻抗差动式调压室的水力特性进行了研究。

调压室阻抗孔上、下修圆优化,目前笔者尚未找到相关文献资料予以详细地计算分析。针对某大型阻抗差动式调压室,本文主要给出阻抗孔修圆三维数值计算的研究成果,结合物理模型实测数据,总结阻抗孔修圆优化对调压室水力特性的影响规律,对升管等其他研究成果将后续给出。

1 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型

1.1 基本方程

流经调压室的水流为高雷诺数的紊流,采用 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型(式中各参数符号意义可参考文献[14-15]):

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{动量方程} \quad & \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} k \text{ 方程} \quad & \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \\ & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \text{ 方程} \quad & \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \\ & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 网格划分及计算条件

某大型阻抗差动式调压室,引水隧洞内径 11.8 m,大井内径 21.0 m,大井底部设 4 个直径为 2.1 m 的阻抗孔,分别与两条分叉引水隧洞连通。设置左、右两个升管,分别与左、右两条高压管连接,高压管内径 7.5 m,计算区域如图 1 所示。

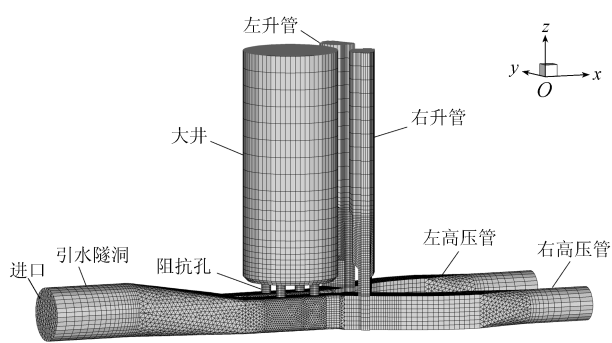
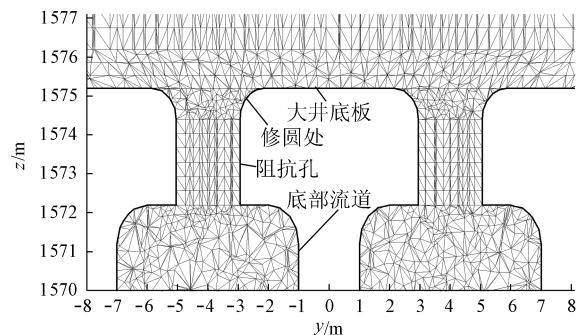
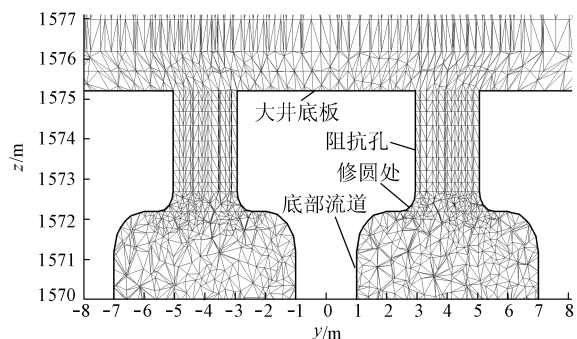


图 1 调压室计算区域

为提高水轮发电机组开机过程中大井的补水能力,可以通过增加阻抗孔的流量系数,即减小水流流出大井时的阻抗系数来实现,为此,可对阻抗孔与大井底板连接处采取修圆优化措施。计算拟定修圆半径分别为 0.3 m、0.5 m 和 0.8 m,与阻抗孔未修圆方案进行对比。要减小甩负荷后大井底板向上的压力差,可以通过减小流入大井时的阻抗系数来实现。计算拟定阻抗孔与底部流道连接处修圆半径分别为 0.3 m、0.5 m 和 0.8 m,与阻抗孔未修圆方案进行对比。图 2(a)(b)分别为阻抗孔与大井底板连接处修圆半径 0.8 m、与底部流道连接处修圆半径 0.5 m 的剖面网格图。



(a) 与大井底板连接处修圆半径 0.8 m



(b) 与底部流道连接处修圆半径 0.5 m

图 2 阻抗孔修圆剖面网格

运用壁函数处理壁面边界,计算水流单独流入和流出调压室大井的工况。水流从引水隧洞流入大井,上游引水隧洞进口断面采用速度边界条件,根据电站引用流量给定入流速度值,大井上部断面和两

条高压管出口断面均采用充分发展的出流边界,流量比分别取 1 和 0。水流从大井流入高压管,两条高压管出口断面给定出流速度值,大井上部断面和上游引水隧洞进口断面均采用充分发展的出流边界,流量比分别取 1 和 0。

取断面静压力(即测压管水头)和动压力的平均值之和为断面总水头,相应断面总水头之差即为相应的水头损失。计算流入时的水头差取引水隧洞进口断面和大井底板向上 21 m 处断面;计算流出时的水头差取大井底板向上 21 m 处断面和高压管进口断面。测压管水头的零点设在引水隧洞进口断面的中心点处,计算阻抗系数的流速取阻抗孔断面平均流速。

2 计算结果分析

2.1 与大井底板连接处修圆

计算不同流量($400\text{ m}^3/\text{s}$, $458\text{ m}^3/\text{s}$, $500\text{ m}^3/\text{s}$)分别流入和流出大井的工况。阻抗孔与大井底板连接处未修圆以及修圆半径为 0.3 m, 0.5 m 和 0.8 m 时,阻抗系数的计算值见表 1。

表 1 与大井底板连接处的阻抗孔阻抗系数计算结果		
修圆半径/m	流入大井的阻抗系数	流出大井的阻抗系数
未修圆	1.95	1.91
0.3	1.87	1.24
0.5	1.78	1.24
0.8	1.72	1.23

计算表明:阻抗孔与大井底板连接处未修圆前,流出大井的阻抗系数相对较大,计算值为 1.91,与文献[16]中模型试验实测值 1.32 有一定偏差,原因:计算采用断面测压管水头的加权平均值,而试验采用测压管点水头代表所测断面的边壁点水头;计算采用原型尺寸,而试验采用模型尺寸,可能会有一定的缩尺效应,水流流态对阻抗系数也有一定的影响。阻抗孔与大井底板连接处修圆后,流出大井的阻抗系数明显减小,不同修圆半径时,其计算值相差不大。随着阻抗孔与大井底板连接处修圆半径的增大,流入大井的阻抗系数略有减小。

分析认为:未修圆时水流进入阻抗孔后发生突缩,流速分布不均,中间大、周边小,流量 $458\text{ m}^3/\text{s}$ 时最大流速超过 45 m/s ,见图 3(a)。阻抗孔修圆后突缩效应明显减弱,水流较为平顺地进入阻抗孔,流速分布相对均匀,流量 $458\text{ m}^3/\text{s}$ 时阻抗孔内最大流速减小为 $35\sim 37\text{ m/s}$,见图 3(b)。由于减小了流出大井时的突缩损失,阻抗孔与大井底板连接处修圆,可有效减小流出大井时的阻抗系数,即增大流出调压室的流量系数。图 4 为未修圆和修圆半径 0.5 m、流出大井流量 $458\text{ m}^3/\text{s}$ 时阻抗孔剖面的压力(即测

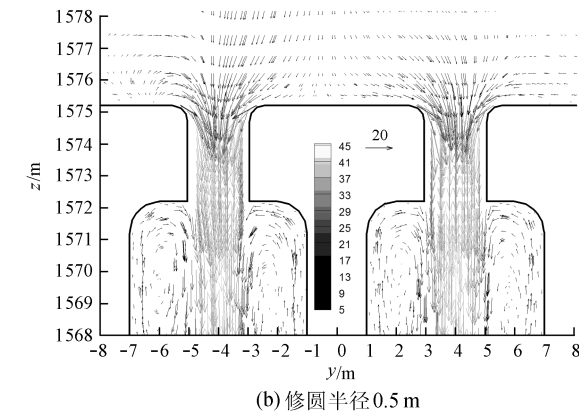
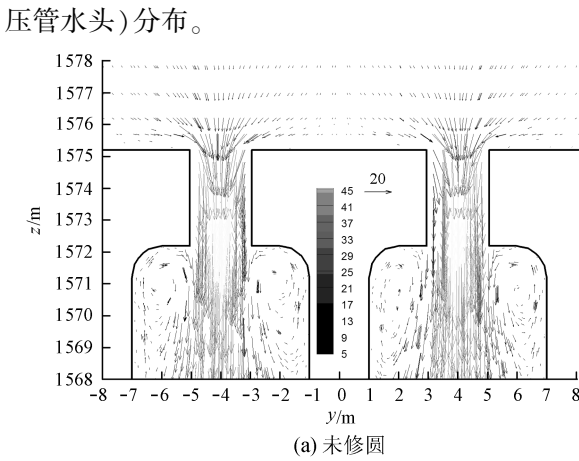


图 3 与大井底板连接处的阻抗孔剖面流速分布(单位:m/s)

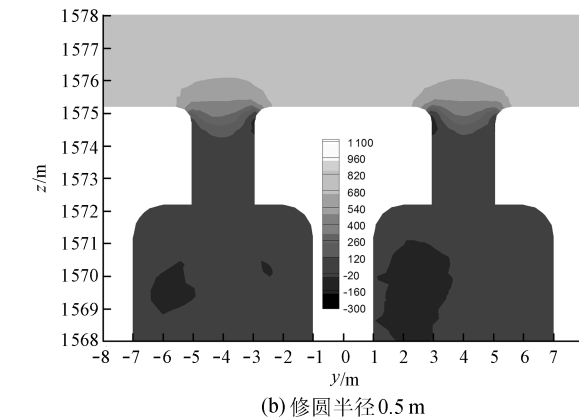
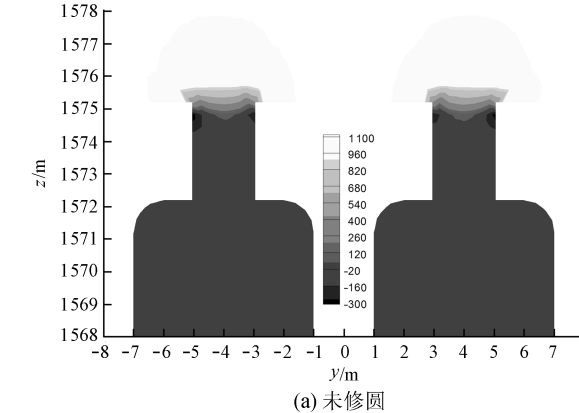


图 4 与大井底板连接处的阻抗孔剖面压力分布(单位:kPa)

2.2 与底部流道连接处修圆

计算不同流量(400 m³/s,458 m³/s,500 m³/s)分别流入和流出大井的工况。阻抗孔与底部流道连接处未修圆以及修圆半径为 0.3 m,0.5 m 和 0.8 m 时,阻抗系数的计算值见表 2。图 5 和图 6 分别为流入大井的流量为 458 m³/s 时,阻抗孔剖面的流速及压力分布。

表 2 与底部流道连接处的阻抗孔阻抗系数计算结果		
修圆半径/m	流入大井的阻抗系数	流出大井的阻抗系数
未修圆	1.95	1.91
0.3	1.57	1.85
0.5	1.48	1.79
0.8	1.42	1.77

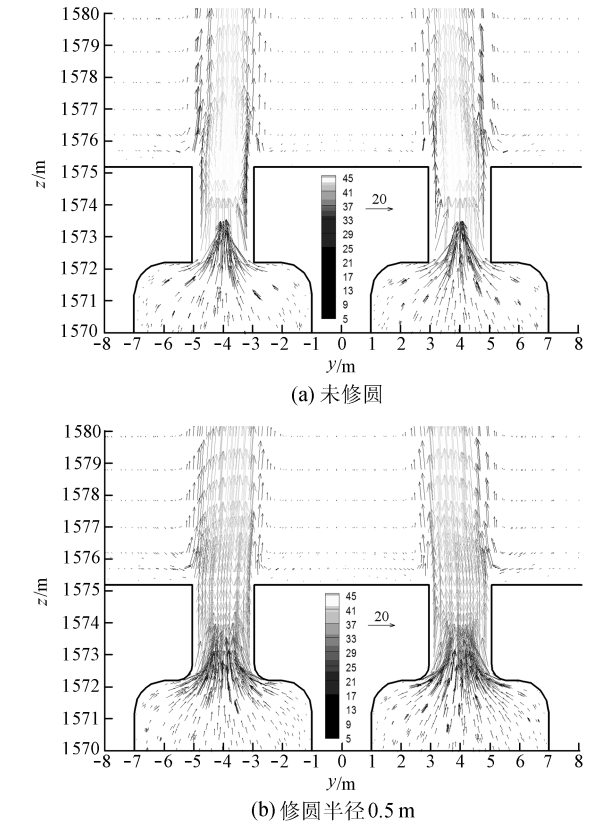


图 5 与底部流道连接处的阻抗孔剖面流速分布(单位:m/s)

计算表明:阻抗孔未修圆时,流入大井的阻抗系数计算值为 1.95,与模型实测值 1.99 吻合较好。阻抗孔与底部流道连接处修圆后,流入大井的阻抗系数明显减小,不同修圆半径时,其计算值相差不大。随着阻抗孔与底部流道连接处修圆半径的增大,流出大井的阻抗系数略有减小。

3 结 语

作为水工模型试验的互补,本文采用 *k-ε* 紊流数学模型对调压室阻抗孔进行了修圆优化计算。对比分析了阻抗孔与调压室底板连接处和与底部流道

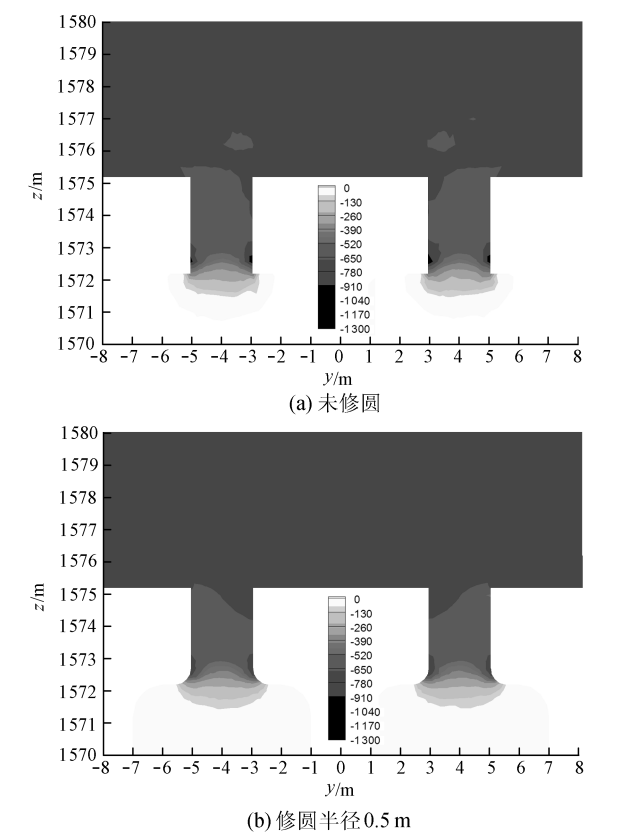


图 6 与底部流道连接处的阻抗孔剖面压力分布(单位:kPa)

连接处不同修圆半径时的水流流态,给出流入和流出大井时的阻抗系数,并将阻抗孔未修圆时的计算成果与实测数据进行了对比分析。计算结果表明:阻抗孔未修圆时,水流进入阻抗孔后发生突缩,流速分布不均,中间大、周边小。阻抗孔修圆后突缩效应明显减弱,水流能较平顺地进入阻抗孔,流速分布相对均匀。阻抗孔修圆优化减小了突缩损失,能有效减小进入阻抗孔的水头损失,即可增大阻抗孔的流量系数。

参考文献:

[1] 刘志雄,江耀祖,黄国兵. 构皮滩电站尾水调压室阻抗孔口型式研究[J]. 人民长江,2006,37(3):82-83.
[2] 胡明,蔡付林,曹青. 矩形调压室连接型式的研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2000,28(2):92-95.
[3] 程永光,杨建东. 用三维计算流体力学方法计算调压室阻抗系数[J]. 水利学报,2005,36(7):787-792.
[4] 郭杨. CFD 方法计算阻抗式调压室阻抗损失系数[J]. 江西水利科技,2007,33(3):172-175.
[5] 杨琳,赖旭. 结合数值计算与模型试验研究阻抗式调压室阻抗损失系数[J]. 中国农村水利水电,2005(5):109-111.
[6] 张健,索丽生. 用调压室阻抗试验值推求稳定断面[J]. 河海大学学报:自然科学版,1997,25(增4):58-64.

(下转第 51 页)

出的灵敏度略大,并有较好的区分度。在素填土和黏土层中,灵敏度保持在2~3之间。在淤泥层中,灵敏度保持在6~8之间。由CPTU试验分析出夹层所在位置,剔除夹层所产生的锥尖阻力和侧摩阻力异常值,使得测出的淤泥灵敏度比原位十字板剪切试验的灵敏度更高。因此可以得出:夹层对原位十字板剪切试验结果产生一定影响,CPTU试验所测出的灵敏度比原位十字板剪切试验测得的结果更加灵敏。

4 结 论

a. 地下水位线以下未扰动土的初始孔压由静水压力和未消散的残余孔压组成。对于欠固结土,土体中存在残余孔压,利用残余孔压可以迅速判断土体的固结状态。

b. CPTU 孔压消散曲线的末端无限逼近初始孔压且末端实测孔压与时间的倒数近似呈线性关系,基于此采用时间倒数外推法计算海相黏土的初始孔压,进一步得出残余孔压值。采用固结状态参数对该土的欠固结程度进行定量评价,结果表明固结状态参数越小,欠固结程度越高。

c. 夹层对原位十字板剪切试验测出的灵敏度有一定的影响,尤其是海相黏土中的粉砂、云母碎屑及贝壳碎屑导致原位十字板剪切试验测出的灵敏度偏低。

d. CPTU 试验利用摩阻比估算海相黏土的灵敏度,既能保证原状土的结构性,也能判断出夹层所在位置,剔除受夹层影响的参数后,计算结果更加灵敏,因此可用CPTU试验估算土体的灵敏度。

参考文献:

[1] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
[2] GB/T 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].
[3] 刘松玉,吴燕开.论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J].岩土工程学报,2004,26(4):553-556.
[4] 卢廷浩.土力学[M].南京:河海大学出版社,2005:123-124.
[5] BALIGH M M, VIVATRAT V, LADD C C. Cone penetration in soil profiling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1980, 106(4):447-461.
[6] CRUZ R I, MAYNE P W. Interpretation of CPTU tests carried out in lacustrine Mexico City soft clay [C]// Proceedings of Sessions of Geology. Shanghai: ASCE, 2006:24-31.
[7] LIM B S, TUMAY M T, SLAUGHTER S H. Estimation of stress history by partial piezocone dissipation tests [C]// The 2009 International Foundation Congress and

Equipment Exposition. Orlando: ASCE, 2009: 15-19.
[8] TORSTENSSON B A. The pore pressure probe [C]// Proceedings of Geoteknik Kedagen. Norway: [s. n.], 1977:1-15.
[9] 马淑芝,汤艳春,孟高头,等.孔压静力触探测试机理方法及工程应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2007:67-68.
[10] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetretion testing in geotechnical praction [M]. London: Blackie Academic and Professiona, 1997:51-56.
[11] SCHMERTMANN J H. Guidelines for cone penetration test, performance and design [M]. Washington D. C. :US Federal Highway Administration, 1977:51-56.
[12] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU [M]. Vancouver: University of British Columbia, 1988.
[13] RAD N S, LUUNE T. Correlations between piezocone results and laboratory soil properties [R]. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1986.
[14] 樊向阳,顾国荣,黄宏伟.上海地区土体灵敏度的研究 [J]. 岩土工程技术, 2004, 18(3):130-132.

(收稿日期:2012-02-13 编辑:骆超)

(上接第23页)

[7] 张小康,杨建东.水头损失的CFD计算[J].中国农村水利水电,2009(5):105-107.
[8] 陈祥荣,范灵,鞠小明.锦屏二级水电站引水系统水力学问题研究与设计优化[J].大坝与安全,2007(3):1-7.
[9] 陈祥荣,沈家俊.锦屏二级水电站调压室型式选择及水力计算[J].水力发电,1997(10):37-40.
[10] 向英,刘德祥.阻抗式调压室流场的数值模拟[J].中国农村水利水电,2006(9):125-127.
[11] 李向宾,侯靖,吴旭敏,等.调压室非对称孔口阻抗特性的数值模拟[J].华北电力大学学报,2011,38(4):91-95.
[12] 朱永忠,索丽生.随机分析方法及其在水击和调压室涌浪中的研究进展[J].水利水电科技进展,2007,27(3):90-94.
[13] 鞠小明,陈家远.阻抗差动式调压室的水力计算研究[J].水力发电学报,1996(4):54-60.
[14] 华富刚,秦柳燕.水电站调压室内三维湍流场数值模拟[J].水利水电科技进展,2007,27(5):47-49.
[15] 陈云良,张林,张锦堂,等.过水围堰溢洪的全域三维数值模拟[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(6):28-35.
[16] 丁果,鞠小明,陈祥荣,等.复杂结构差动式调压室阻力系数试验研究[J].四川水力发电,2010,29(5):151-154.

(收稿日期:2012-02-23 编辑:周红梅)