

某在役弧形闸门不平衡启门力数值分析研究

钱声源^{1,2}, 田宏吉³, 王家骥⁴, 杜娟¹

(1. 东南大学 成贤学院, 江苏 南京 210088; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 4. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对不平衡启门力对弧形闸门安全启闭的影响,基于某实际工程,建立弧形闸门-启门力-水封整体三维有限元接触模型,引入 ADINA 接触模型和重启动的方法模拟闸门开度为 0 时的启门工况,计算出该弧形闸门的最大启门力,并与工程实际检测数据进行比较。同时,在此模型上对不平衡启门力作用下闸门的瞬态动力响应进行计算,分析闸门在不同开度下受不平衡启门力作用而产生的应力和变形。可为弧形闸门的安全启闭和设计提供有益参考。

关键词:不平衡启门力; 接触分析; 重启动; ADINA; 弧形闸门

中图法分类号: TV663 文献标志码: A DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.019

水工弧形闸门因具有埋设件数量较少、局部开启条件好、不存在对水流流态产生影响的门槽、所需启闭力较小等优点而被广泛应用^[1]。闸门在运行过程中依靠启闭机提供动力,通过对启门力的计算,从而为闸门启闭机的选型设计提供参考。在现有研究中,弧形闸门启门力的研究目前主要有两种方法:物理模型实验数值模拟。① 物理模型实验^[2-4]。该方法是目前计算闸门启门力使用最广泛,也是最准确有效的方法。通过绘制启门力变化曲线,可为闸门启闭机选型提供依据,但实验方法存在诸多不确定性,且模型实验需耗费大量人力和物力^[5]。② 数值模拟^[6-7]。该领域的研究尚未成熟,很多学者已经对该领域的课题展开研究,但由于弧形闸门启闭过程的动态化,作用荷载随闸门转动而变化以及闸门接触问题的复杂性等难题,闸门启门力的数值模拟与实测情况仍存在较大的误差。同时由于工作时间久远,往往会出现闸门两侧钢丝绳拉力不平衡的情况,这可能会导致闸门门体发生较大的变形,从而影响闸门正常的安全启闭。因此,本文利用 ADINA 的接触分析理论、重启动和瞬态动力学分析功能,模拟了弧形闸门开启时的最大启门力,并进一步

分析了不同开度下不平衡启门力对闸门安全运行的影响,试图为闸门启闭机的选型设计和相关工程领域的研究提供参考。

1 工程概况

某水电站大坝溢洪道共 6 孔,孔口净宽 10.0 m,设置了 6 扇露顶式弧形钢闸门。闸门底槛高程 372.176 m,门顶高程 380.176 m,设计水头 8 m,闸门启闭设备为 2×75 kN 固定卷扬式启闭机,其中钢丝绳从吊点开始,向上顺沿闸门面板至闸门顶部,再与水平方向呈 60°角斜向上由定滑轮牵引,弧形闸门启闭系统参见图 1。该弧形闸门已运行 30 多年,闸门在开启过程中左、右侧吊点钢丝绳存在明显松紧不一致的情况,经现场仪器测试,左右两侧的钢丝绳拉力不平衡且差别很大,实测应变值和对应的启门力如表 1 所示。由表 1 可知,在刚启门时,左侧吊点钢丝绳拉力约为右侧吊点钢丝绳拉力的 1.6 倍,随后左侧吊点钢丝绳拉力逐渐减小,右侧吊点钢丝绳拉力逐渐增大,当闸门开度约为 2 m 时,两侧吊点钢丝绳拉力基本平衡,当闸门开度为 4 m 时,左、右吊点钢丝绳拉力严重不平衡。

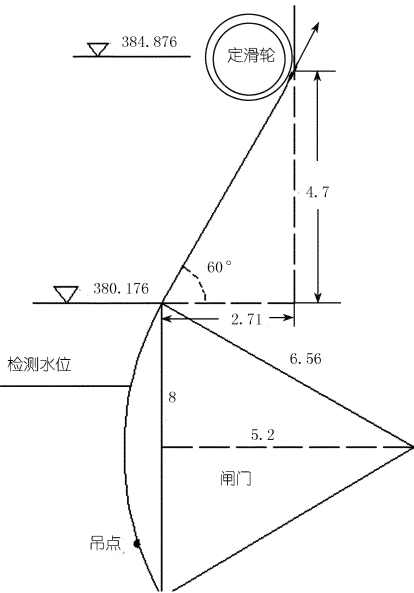


图 1 弧形闸门启闭系统(单位:m)

表 1 实测应变值和对应的启门力

开度/m	吊点	应变值/ $\mu\epsilon$	钢丝绳拉力 F/kN
0.0	左侧	164.3	79.76
	右侧	105.7	51.31
2.0	左侧	140.0	67.93
	右侧	127.5	61.94
4.0	左侧	38.3	18.62
	右侧	255.1	123.87

2 有限元模型及计算方法

2.1 有限元模型和材料参数

为了全面了解该在役弧形闸门各构件的工作性态和变形特点,拟采用有限元数值模拟技术对闸门进行三维整体数值仿真计算。弧形闸门的面板、主梁腹板、主梁翼缘、纵梁腹板、纵梁翼缘、支臂腹板、支臂翼缘板等薄板单元仿真均采用 ADINA 的壳单元 Shell,共 6 812 个。次横梁、顶梁槽钢翼缘、支臂竖杆仿真均采用空间梁单元 Beam,共 348 个。弧形闸门的支承铰是整个闸门中最重要的组成部分,它的作用是将闸门上全部水压力和部分门重传给闸墩,并保证闸门能绕水平轴转动。为了模拟铰轴、铰链的构造特点和受力方式,采用三维等参实体单元 3-D Solid,共 1 060 个,闸门启闭有限元模型如图 2 所示。两侧的钢丝绳吊绳采用 Truss 单元进行模拟,共 20 个。根据检测情况,分别建立了闸门开度为 0、2.0、4.0 m 时的 3 个工况对闸门启闭的工作性态进行探究。钢丝绳底部作为吊点与闸门固接,其余节点与闸门对应节点采取 ADINA 中的 Constraint Equations 功能进行处理。

本文中模型的计算工况为检测工况:闸门上游水

位 377.00 m,下游无水,闸门作用水头 6.0 m。弧形闸门和钢丝绳吊绳的材料参数如表 2 所示,且钢丝绳的初始应变取 3.52×10^{-3} 。

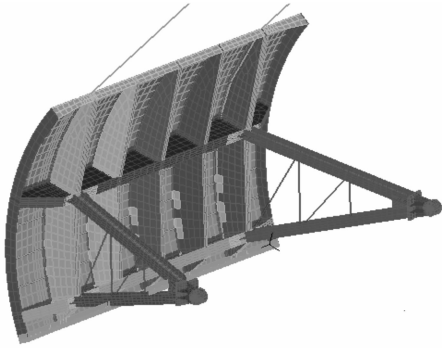


图 2 闸门启闭有限元模型

表 2 计算参数

材料	弹性模量 $E/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	泊松比 μ	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
闸门	2.12×10^5	0.31	7870
钢丝绳	2.06×10^5	0.33	7850

2.2 计算方法

本文采用 ADINA 的动力瞬态分析方法进行弧形钢闸门的启门力数值模拟,通过对闸门开启时底水封的接触状态分析来判别闸门底部何时与底水封脱离,从而确定此时的启门力数值。在闸门的日常运行过程中,水封接触界面的张开与闭合作用属于动力接触非线性问题。接触面模型应满足 3 个接触约束条件:法向间距不能出现负值、法向不出现拉应力和接触面切向要存在摩擦力。具体地,可以用数学表达式表示为^[8]

$$g\lambda = 0, g \geq 0; \lambda \geq 0 \tag{1}$$

式中, g 为接触面法向间距; λ 为接触面间的法向接触压力。当 $\lambda = 0$ 时,即接触面法向没有压力,则表示接触面已经张开,此时 $g > 0$; 当 $\lambda > 0$ 时,即接触面法向相压,则表示接触面闭合,此时 $g = 0$ 。

ADINA 中接触的 Constraint - function 算法^[9],引入法向约束函数 $w(g, \lambda)$,改进了法向接触约束条件。

$$w(g, \lambda) = \frac{g + \lambda}{2} - \sqrt{\left(\frac{g - \lambda}{2}\right)^2 + \epsilon_N} \tag{2}$$

当 $w(g, \lambda) = 0$ 时,式(1)中所描述的法向接触约束条件得以满足;其中 ϵ_N 是一个非常小的常数,从计算迭代上来看,对计算的收敛性有利。

实际接触问题中接触面都存在摩擦,接触面滑动状态则取决于采用的摩擦力模型,经典的 Coulomb 摩擦定律,其数学表达式为

$$\tau = \frac{F_T}{\mu\lambda}, \text{且 } |\tau| \leq 1 \tag{3}$$

式中, τ 为无量纲变量; μ 为摩擦系数; λ 为接触面间的法向相互作用力; F_T 为接触面间切向摩擦力。当 $|\tau| < 1$ 时, 系统为静接触摩擦状态; 当 $|\tau| = 1$ 时, 系统为动接触摩擦状态。

ADINA 程序中通过引入切向摩擦约束函数 $v(\tau, \dot{u})$ 来描述比例系数 λ 与滑移速度 \dot{u} 的关系, 即规则化摩擦模型。当 $v(\tau, \dot{u}) = 0$ 时, 式(3)所描述的切向接触约束条件得以满足, 其表达形式为

$$\tau + v - \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\dot{u} - v}{\varepsilon_T}\right) = 0 \quad (4)$$

式中, ε_T 为控制规则化摩擦模型与库仑摩擦模型接近程度的重要参数, ε_T 越小两模型越接近。

ADINA 中这种改进的规则化摩擦模型, 在理论上可以更好地描述摩擦现象, 在实际运用中也大大改善了数值计算中迭代的收敛困难问题, 符合工程实际。

2.3 接触模型与重启动

为了较为精确地模拟闸门开度为 0 时的开启状态, 本文在现有模型中引入了接触和重启动的方法, 对该启门过程进行仿真数值模拟。弧形闸门在未开启前主要靠底水封进行支撑, 在开启过程中, 闸门对底水封的压力逐渐减小, 直到闸门吊起, 闸门底部与底水封脱离, 即闸门对底水封的压力为 0, 此过程称为闸门开度为 0 时的开启过程。

模型中闸门底部与底水封之间设为面面接触, 如图 3 所示。本文利用 ADINA 的重启动技术模拟闸门未开启时的初始状态, 其中未开启时两侧吊点设为位移 0 约束, 开启时两侧吊点的启门力按斜坡式 (Ramped) 荷载施加, 共计 1 000 步。

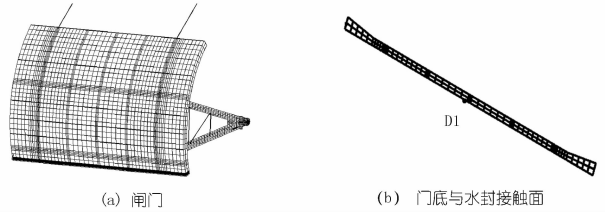


图 3 闸门及接触模型

3 计算结果分析

3.1 不平衡启门力数值模拟分析

本文将开度为 0 时两侧吊点检测的启门力按斜坡式荷载的形式施加在模型上进行瞬态动力学计算, 通过分析不同步数下闸门底部接触的状态来确定闸门何时脱离底水封, 并进一步确定此时启门力的大小及闸门的变形状态。图 4 给出了闸门底水封 1 ~ 1 000 步之间接触状态的变化, 图 5 给出了闸门底水封关键点 D1 处接触正应力的变化, 图 6 给出了在 918 步闸门与底水封分离的状态。

由图 4 中接触状态的变化可以看出, 由于左侧吊点拉力大于右侧吊点, 闸门从左侧开始脱离, 接触状态逐渐向右侧变化, 在 917 ~ 918 步之间, 闸门底水封的接触状态消失, 之后全部为 open 状态, 说明在从 918 步开始, 闸门底部与底水封已完全脱离, 此时两侧吊点的荷载为最大值的 91.8%, 可以推出开度为 0 时该弧形闸门的启门力为 $(79.76 + 51.31) \times 91.8\% = 120.32 \text{ kN}$, 与检测结果的误差为 8.2%; 图 5 中接触正应力随荷载步的变化而变化, 由于刚开始两侧吊点的拉力较小, 所以底水封所受到的接触应力较大, 最大值为 28.23 MPa, 随着两侧吊点拉力的增大, 底水封的

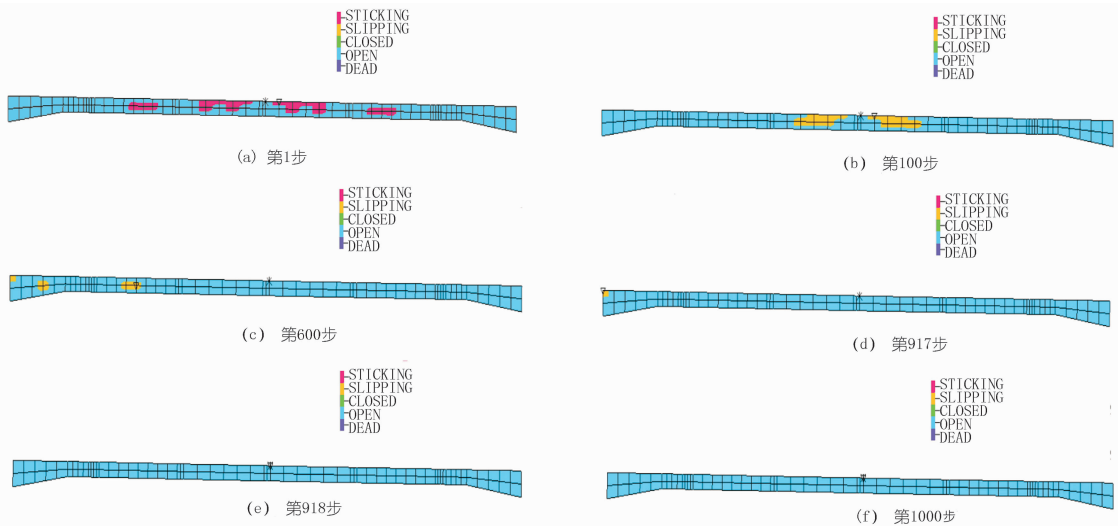


图 4 各步时闸门底水封接触状态

接触应力逐渐减小,在 918 步附近接触应力趋于平缓,接近为 0,说明此时闸门底部已基本与底水封脱离,这与图 4 底水封接触状态的变化和图 6 闸门与底水封分离状态相符。

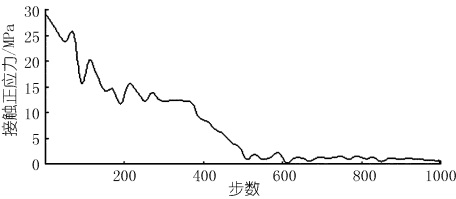


图 5 闸门底水封关键点 D1 处接触正应力

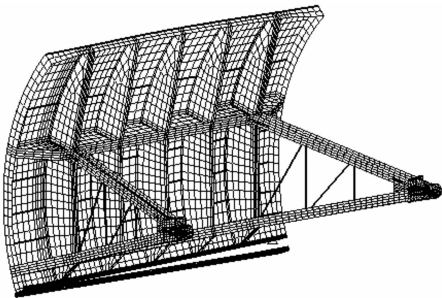


图 6 第 918 步时闸门的开启状态

这说明本文建立的弧形闸门-吊杆-底水封整体三维有限元接触模型,在引入 ADINA 接触模型和重启的方法模拟闸门开度为 0 时计算的该闸门最大启门力与工程实际检测数据比较相近。

3.2 不平衡启门力对闸门安全运行影响分析

3.2.1 对闸门强度的影响

根据闸门的实际检测启门力,将其输入到所建有限元模型中,再利用 ADINA 的瞬态动力学响应分析功能即可得到各个开度下闸门启闭时的工作状态。由此可得出闸门启闭时对应的应力情况,如表 3 所示。不同开度下钢丝绳轴力的分布情况和闸门横河向应力分别如图 7 和 8 所示。由图表可知,钢丝绳的最大轴力与两侧的最大拉力相近,且钢丝绳吊点处与受力处的轴力要大于中间段的轴力,这与实际情况相符。闸门门体部分横河向的应力除了受开度影响外,两侧钢丝绳拉力的不平衡分布及其大小对闸门横河向的应力影响也较大。开度为 0 时,闸门横河向的最大应力为 44.29 MPa;开度为 2m 时,两侧拉力较为接近,闸门

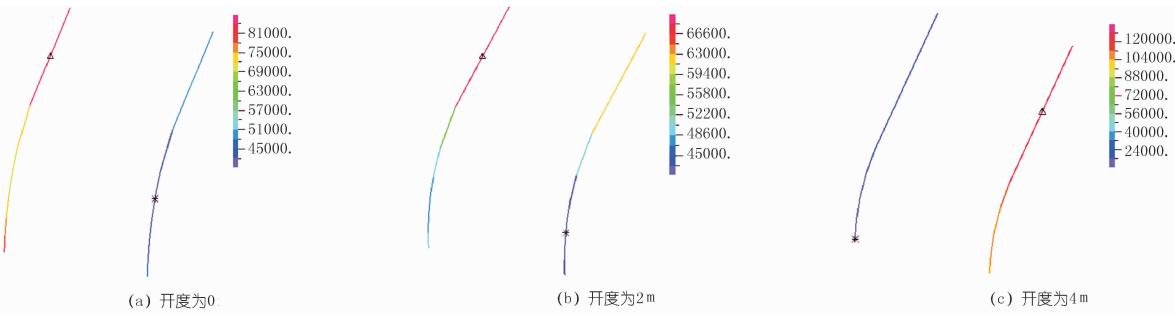


图 7 不同开度下钢丝绳轴力 (单位: N)

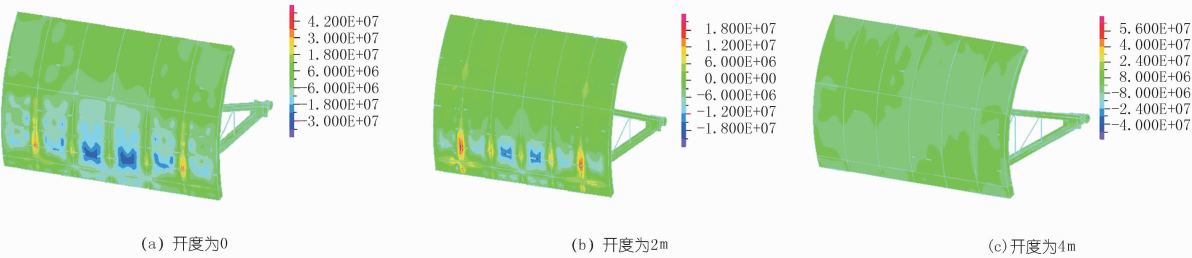


图 8 不同开度下闸门横河向应力分布 (单位: MPa)

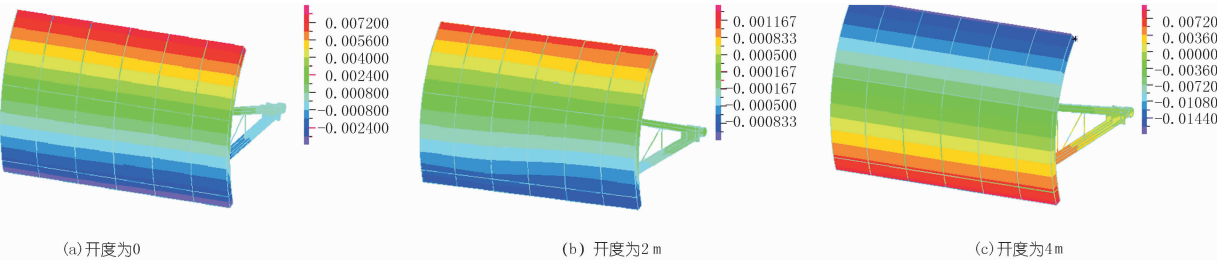


图 9 不同开度下闸门横河向位移分布 (单位: m)

横河向的最大应力为 -24.11 MPa ;开度为 4 m 时,闸门横河向的最大应力为 64.62 MPa 。这表明闸门横河向的应力除受开度影响外,还受两侧钢丝绳拉力的影响,且影响较大。

表 3 闸门启门力和对应的闸门应力

开度/ m	实测值		计算值	
	左侧拉力/ kN	右侧拉力/ kN	钢丝绳轴力/ kN	闸门横河向 最大应力/MPa
0.0	79.76	51.31	48.73 ~ 80.15	44.29
2.0	67.93	61.94	44.19 ~ 66.36	-24.11
4.0	18.62	123.87	15.52 ~ 123.46	64.62

3.2.2 对闸门刚度的影响

不同开度下,闸门两侧的拉力出现不平衡的情况,这将导致闸门发生较大的变形,从而影响闸门的正常启闭。图 9 给出了不同开度下闸门横河向的变形情况。图 10 给出了不同开度下闸门侧水封处横河向相对位移的分布情况。

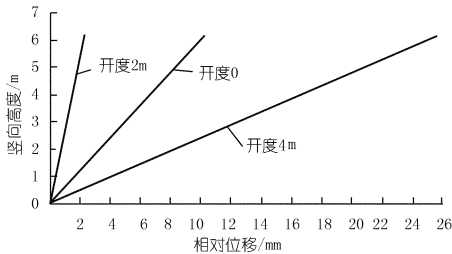


图 10 闸门侧水封相对位移分布

由图 9~10 可以看出,开度为 0 时,闸门整体向右侧倾斜,侧水封处相对位移随高度递增,最大相对位移为 12.97 mm ;开度 2 m 时,两侧拉力接近,侧水封相对位移为 2.67 mm ;开度为 4 m 时,右侧拉力为左侧拉力的 7.1 倍,闸门发生较大变形,整体向左侧倾斜,侧水封处相对位移随高度递增,最大相对位移为 25.84 mm 。

根据钢闸门安装规范^[10]中 8.1.6 款的规定,弧形闸门侧轮导板到侧止水板和侧导轮中心线曲率半径的安装极限偏差为 $\pm 5\text{ mm}$,据此可以得出潜孔式弧形闸门侧水封与侧轮导板之间的最大允许间隙为 10 mm 。

计算表明,弧形闸门在刚开启时由于两侧钢丝绳拉力不平衡导致闸门向右侧倾斜,最大相对位移为 12.97 mm ,超出最大允许安装间隙;开启过程中两侧钢丝绳拉力逐渐平衡,闸门整体变形相对不大;当闸门开度接近 4 m 时,两侧钢丝绳拉力严重失衡,闸门整体向左侧倾斜,闸门变形较大,大大超出最大允许安装极限间隙,闸门启闭时将可能出现与侧墙导轨发生较大摩擦,影响闸门正常启闭。

4 结 论

通过大型有限元分析软件 ADINA,建立了弧形闸门-启门力-水封整体三维有限元接触模型,模拟计算了闸门开度为 0 时的最大启门力,探究了闸门在 3 个不同开度下,不平衡启门力对闸门安全运行的影响。

(1) 利用 ADINA 建立弧形闸门-启门力-底水封整体三维有限元接触模型,采用 ADINA 的重启动技术模拟闸门未开启时的初始状态,按斜坡式计算荷载,根据启门时闸门底水封接触状态的变化确定最大启门力的数值大小。结果表明,计算结果与实际检测结果相近,可为闸门启闭机的选型设计提供参考。

(2) 计算 3 种不同开度下不平衡启门力对弧形闸门安全运行的影响。结果表明,不平衡启门力对闸门横河向应力有一定的影响,同时也会发生较大的横河向变形。尤其在开度为 0 和 4 m 时,闸门侧水封的最大横河向相对位移均已超出最大允许安装极限间隙,这会导致闸门启闭时出现与侧墙导轨发生较大摩擦的情况,影响闸门正常启闭。

(3) 本文对弧形闸门开度为 0 的启门力进行了数值模拟,计算中顶底止水、两侧导轨的摩擦及支铰处的摩阻力均采用静力荷载的方式进行施加。然而实际工况中摩阻力会不断发生变化,采用接触的方式进行模拟可能更加合理,因此该方面的研究方法和内容还需进一步深入探究。

参考文献:

[1] 沈长松,王世夏,林益才,等. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[2] 陈端,王忠亮,陈秀玲. 偏心铰式弧形闸门启闭力试验研究[J]. 长江科学院院报,2010,(5):44-48,57.

[3] 肖兴斌,王业红. 高水头平板闸门水力特性研究[J]. 水利水电科技进展,2001,8(4):29-31.

[4] 徐国宾,菅娟,高仕超. 平面闸门启闭过程中的动水垂力数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2012,30(10):132-135.

[5] 陈五一,欧珠光,刘礼华,等. 闸门水封水密性规律及封水判据的探究[J]. 水力发电学报,2010,29(5):232-236.

[6] 张冬,张燎军,陈超,等. 高水头平面钢闸门启闭力数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2014,(1):168-171.

[7] 郑宏伟,张燎军,关超年,等. 高水头平面钢闸门水封接触性态研究[J]. 水电能源科学,2014,(1):172-175.

[8] Eterovic A L, Bathe K J. On the Treatment of Inequality Constraints Arising from Contact Conditions in Finite Element Analysis[J]. Computers and Structures, 1991, 40(2):203-209.

Cause analysis of electrical discharge in voltage endurance test of generator rotor magnetic pole and treatment

LI Xiaofei, RAN Yinkang

(Maintenance and Installation Co., Ltd., China Guodian Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610064, China)

Abstract: As No. 14 generator unit of Tongjiezi Hydropower Station has operated for a long period, the generator stator and rotor were decided to be upgraded, with 68 magnetic poles replaced as well. The new magnetic poles are manufactured by Dongfang Electric Machinery Co., Ltd.. In voltage endurance test while assembling of the rotor magnetic poles, electrical discharge phenomenon was found for four magnetic poles. The discharge phenomena of single magnetic pole voltage – endurance test before assembling and in the integral voltage – endurance test of the magnetic poles after assembling were compared and analyzed and it was found that the excessive impure substance was the cause of the discharge. According to the analysis results, the effective treatment measures are put forward. Innovative suggestions are also proposed for the follow – up similar tests of related devices.

Key words: assembling of magnetic poles; electrical discharge of magnetic poles; voltage endurance test; insulation treatment; generator rotor; Tongjiezi Hydropower Station

(上接第 87 页)

- [9] Bathe K J, Bouzinov P A. On the Constraint Function Method for Contact Problems[J]. Computers and Structures, 1997, 64 (5 – 6): 1069 – 1085. [10] DLT5018 – 2004 水电水利工程钢闸门制造安装及验收规范[S]. (编辑:徐诗银)

Numerical analysis on imbalanced uplifting force of an arc gate in service

QIAN Shengyuan^{1,2}, TIAN Hongji³, WANG Jiaqi⁴, DU Juan¹

(1. Chenxian College, Southeast University, Nanjing 210088, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200434, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The normal operation of arc gate is influenced by the imbalanced uplifting force. Taking a practical project for example, a 3D finite element contact model of an arc gate with uplifting force and water seal at the bottom was established based on ADINA. The maximum uplifting force under the opening of 0 (being about to open) was calculated by FEM with constraint – function algorithm and re – start technique of ADINA, and the results were compared with the testing data. The transient dynamic response of the gate under the imbalanced uplifting force was analyzed respectively to research the stress and stain under different openings, which provides references for safe opening and closing of arc gates and its design.

Key words: imbalanced opening force; contact analysis; restart; ADINA; arc gate in service

(上接第 90 页)

- [4] 李正安. 漫湾水电站圆筒阀的安装与调试[J]. 水力发电, 1994, (2): 49 – 51. (编辑:徐诗银)

Experiment of dynamic closing process of cylindrical valve at Jinping Power Station II and simulation analysis

WANG Delou, FANG Jie, WU Shenghua, HUANG Jingqian, CAO Chunjian

(HydroChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to test the actual operation condition of cylindrical valve in hydro – power station with long – distance water delivery system, the change of state variables of the unit under partial load in the dynamic closing process of the cylindrical valve was detected by the field test method. The dynamic closing process of cylindrical valve was simulated numerically on the basis of the test data. The comparison results showed that the two were highly consistent, which proved the accuracy of the numerical simulation. The prediction for the extreme modes of cylindrical valve closing process by the numerical simulation method indicated that the pressure at the inlet of the spiral case in 100% load met the requirements of the contract. It provides basis for ensuring the safe operation of mechanical and electrical equipment of hydropower stations.

Key words: cylindrical valve; closing law; numerical simulation; extreme value forecast; error correction