

文章编号:1001-4179(2015)22-0088-03

锦屏二级水电站筒阀动水关闭试验及仿真分析

汪德楼,方 杰,吴胜华,黄靖乾,曹春建

(中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 310014)

摘要:为检测筒阀在长距离输水电站中的实际运行情况,借助现场试验手段,对锦屏二级水电站机组带部分负荷时筒阀动水关闭过程中机组状态量的变化情况进行了检测。对试验数据进行了整理分析,并利用数值仿真手段对筒阀动水关闭过程进行了仿真模拟。现场试验与数字模拟对比结果显示,二者吻合度较高,验证了数值仿真计算的准确性。在此基础上,利用数值仿真手段对筒阀关闭极端工况进行了预测,预测结果显示,机组带 100% 负荷,筒阀动水关闭时蜗壳进口压力未超出设计值。研究方法和手段可为电站机电设备的安全运行提供依据。

关 键 词:筒阀;关闭规律;数值模拟;极值预测;误差修正

中图法分类号:TV135

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.020

1 工程概况

锦屏二级水电工程位于四川省凉山彝族自治州境内的雅砻江干流上,系雅砻江下游梯级开发的骨干水电站之一^[1]。电站总装机容量 4 800 MW,单机容量 600 MW,最大净水头 318.8 m,额定水头 288 m。该电站是雅砻江上水头最高、装机规模最大的一座水电站,同时也是世界上该水头段单机容量最大的水电站。

电站采用“4 洞 8 机”布置,引水隧洞共 4 条,洞线平均长度约 16.7 km,开挖洞径 13 m,衬砌后洞径 11.8 m。由 1 条引水隧洞、1 座调压室和 2 条发电输水高压钢管组成 1 个水力单元,该电站共有 4 个水力单元。每台水轮机均设有圆筒阀。图 1 为该电站一个水力单元的输水发电系统模型简图。

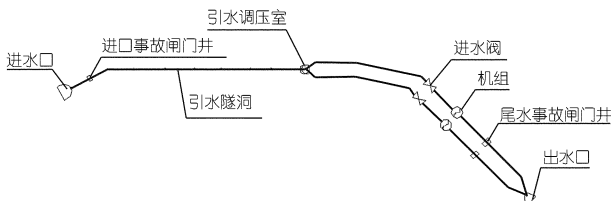


图 1 锦屏二级电站输水发电系统模型

2 筒阀功能及特点

水轮机筒阀的主要功能是,保护中、高水头混流式水轮机的导水机构(主要是导叶)免受由于过流面与顶盖和底环间的端面泄漏引起的空化空蚀,减轻导叶机构的磨损,同时也能降低耗水率。并能比蝶阀或球阀更快速、可靠和安全地在紧急工况下切断水流^[2]。事故时筒阀可作为机组的快速事故闸门直接动水关闭,机组检修时还可以作为机组检修阀门使用。

锦屏二级水电站由于水头高、调压室规模巨大、压力管道直径大且距离长、地下洞室场地受限等多种原因,造成上游设置快速闸门无法迅速切断水流、对应的大口径球阀无法制造等难题,筒阀的设置刚好解决了这些难题^[3]。该电站筒阀内径 8 175 mm,外径 8 625 mm,高 900 mm,重约 42 t,为世界上应用水头最高的大型筒阀。

3 计算方法及控制方程

随着计算机的广泛应用,借助计算机技术辅助计算的特征线方法已经成为目前求解管道系统水力瞬变最常用的数值计算方法。采用特性线法对该电站筒阀

收稿日期:2015-07-23;修回日期:2015-09-18

作者简介:汪德楼,男,工程师,研究方向为水力学、水力机械工程。E-mail:wang_dl@ecidi.com

动水关闭过程进行数值模拟。描述任意管道中的水流运动状态的基本方程为

$$\frac{Q}{A} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{A} \sin\beta = 0 \tag{1}$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2DA^2} = 0 \tag{2}$$

式中, H 为测压管水头; Q 为流量; D 为管道直径; A 为管道面积; t 为时间变量; α 为水锤波速; g 为重力加速度; x 为沿管轴线的距离; f 为摩阻系数; β 为管轴线与水平面的夹角。

式(1)、(2)可简化为标准的双曲型偏微分方程,从而可利用特征线法将其转化成同解的管道水锤计算特征相容方程。

该电站筒阀与机组简化布置如图 2 所示。

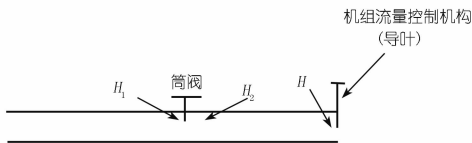


图 2 筒阀与机组简化布置

H_1 、 H_2 、 H 分别为阀前、阀后及机组前的压力。

对于图 2,关于阀门(或孔口)的过流特性可用式(3)表示。

$$H_1 - H_2 - \alpha Q^2 - \beta Q \frac{dQ}{dt} = 0 \tag{3}$$

式中, α 为阀门(孔口)的过流系数,与阀门开度(孔口连接形状)有关; Q 为过阀门(或孔口)流量; $\beta Q \frac{dQ}{dt}$ 为耗散项。

4 筒阀动水关闭实测数据与仿真计算对比

4.1 筒阀动水关闭试验工况及说明

目前国内设置有筒阀的水电站较多,自 1993 年漫湾水电站筒阀首次在我国投入使用以来,石泉、小浪底、大朝山、滩坑等水电站均采用筒阀作为进水阀^[4],各电站筒阀均运行良好。2013 年 9 月,锦屏二级电站 2 号水力单元的 3 号机组分别进行了机组带 25% 额定负荷和 50% 额定负荷状态下的筒阀动水关闭试验,记录了筒阀动水关闭试验的各项指标。通过(1)~(3)式数学模型,对 3 号机组进行了数值仿真分析,并比较了数值仿真结果与真机实测数据的差异。在此基础上对 100% 额定负荷工况下筒阀动水关闭试验的各项指标进行了预测。筒阀动水关闭试验是在调压室水位处于上升波动过程中进行的,此时的蜗壳进口压力已经超过了上库正常水位机组稳态运行时对应的蜗壳进口

压力。对试验工况进行数值模拟时,上库水位按 1 656.0 m 进行仿真计算。工况说明如下。

试验工况 T1。上库水位 1 646.0 m(仿真计算时取 1 656.0 m),下库水位 1 330.6 m,机组带 25%(150 MW)负荷,筒阀动水关闭,关闭时间 56 s。

试验工况 T2。上库水位 1 646.0 m(仿真计算时取 1 656.0 m),下库水位 1 330.6 m,机组带 50%(300 MW)负荷,筒阀动水关闭,关闭时间 54 s。

4.2 试验与数值仿真结果对比分析

在与筒阀动水关闭试验相同边界条件下,对机组在分别带 25% 和 50% 额定负荷的初始条件下筒阀动水关闭过程进行仿真模拟,并将计算结果与现场试验数据进行对比分析。对比结果见表 1 和图 3~6。

表 1 实测数据与数值仿真计算结果对比

工况	项目	蜗壳进口压力/kPa		
		初始压力	第一波峰	第二波峰
T1	实测值	3333.4	3671.9	3718.0
	仿真值	3331.5	3575.7	3684.6
	差值	1.9	96.2	33.4
T2	实测值	3345.2	3720.9	3720.9
	仿真值	3319.7	3752.3	3730.7
	差值	25.5	-31.4	-9.8

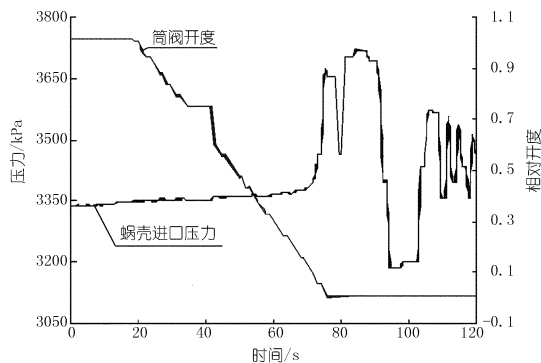


图 3 T1 工况蜗壳进口压力现场试验曲线

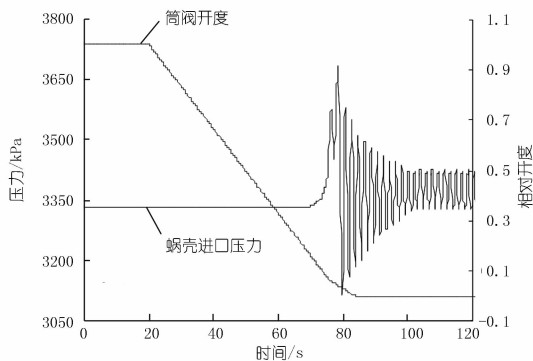


图 4 T1 工况蜗壳进口压力仿真计算曲线

由对比结果可知,蜗壳进口最高压力计算值与现场试验时的压力峰值较一致,蜗壳进口压力最大实测数据与仿真计算结果最大差值 T1 工况为 96.2 kPa,T2 工况为 -31.4 kPa。压力峰值出现的时间点有所差异,主要是因为筒阀的实际流量关系曲线与计算时采用的流量关系曲线不完全一致所致。

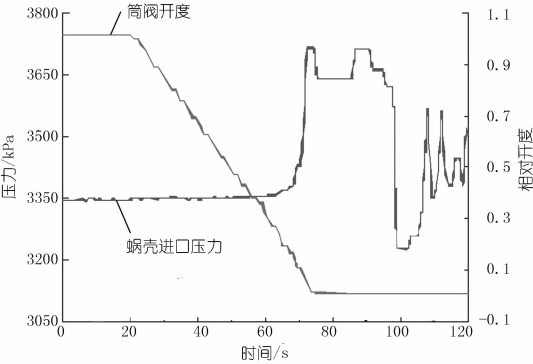


图 5 T2 工况蜗壳进口压力现场试验曲线

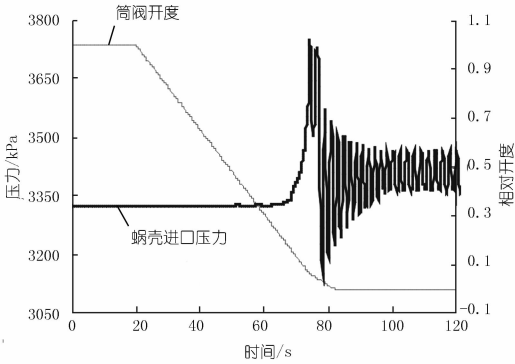


图 6 T2 工况蜗壳进口压力仿真计算曲线

通过分析,T1 工况压力偏差较大,为安全起见,取 T1 工况压力偏差 96.2 kPa 对计算结果进行误差修正,预测极端工况下筒阀动水关闭过程中蜗壳进口最大压力。

根据现场试验可知,蜗壳进口压力峰值出现在筒阀小开度(6%~7%)附近,并出现了两个压力峰值,在此之间产生了一个较大的压力下降。据推测,其原因可能为筒阀小开度时,水损急剧加大,压力陡升,从而出现压力峰值;在第一波峰出现时,筒阀受到的浮力、接力器的作用力与来自水流的下拉力等产生了短暂的平衡,筒阀保持瞬间的开度不变,因此压力出现了短暂的下降之后,筒阀下降速度又增加,导致第二波峰峰值也较大。

5 极端工况预测

根据筒阀动水关闭试验实测数据与仿真计算对比情况进行计算误差的修正,判断极端工况下蜗壳进口

最大压力值是否超过蜗壳承压设计值。极端工况说明如下。

极端工况 Y1。上库水位 1 646.0 m,下库水位 1 330.6 m,机组带 100% (600 MW) 负荷,筒阀动水关闭。

极端工况 Y2。上库洪水位 1 653.30 m(200 a 一遇),下库洪水位 1 351.2 m(200 a 一遇),机组带 100% (600 MW) 负荷,筒阀动水关闭。

根据筒阀动水关闭试验结果,机组带 25% 和 50% 负荷时,筒阀关闭时间分别为 56 s 和 54 s,随负荷增加,筒阀动水关闭时间有减小趋势。初步假定关闭时间按开度(负荷)线性递减,取机组带 100% 额定负荷时筒阀关闭时间为 50 s。计算结果见表 2。

表 2 极端工况筒阀动水关闭计算结果 kPa

Y1 工况蜗壳进口压力			Y2 工况蜗壳进口压力		
初始压力	最大压力		初始压力	最大压力	
	计算值	修正值		计算值	修正值
3188.3	3873.0	3969.1	3256.9	3935.8	4031.9

由计算结果可知,在极端工况机组带 100% 负荷时筒阀动水关闭,考虑计算误差后蜗壳进口最大压力为 4 031.9 kPa,小于蜗壳设计压力 4 100 kPa。因此机组在极端水位组合下同时带 100% 负荷工况时,筒阀动水关闭是安全的。计算结果显示,筒阀在现有关闭规律下,当机组带 100% 负荷动水关闭时,蜗壳进口最大压力修正值已接近于蜗壳设计压力。后期调试时可考虑增大筒阀动水关闭时间以改善由于筒阀关闭所引起的压力升高。

6 结 语

根据筒阀动水关闭试验实测数据,对锦屏二级水电站进行了与关闭试验相同边界条件的数值仿真计算,计算结果与实测数据吻合度较好,论证了数值仿真方法及模型的准确性。对机组带 100% 额定负荷的极端工况进行筒阀动水关闭仿真计算,并在计算结果的基础上加以修正,修正后的蜗壳进口最大压力小于蜗壳设计压力。该研究手段和预测方法为该电站的安全稳定运行提供了依据,并可为类似电站提供参考。

参考文献:

[1] 熊开智,冉懋鸽. 锦屏二级水电工程动态支付管理及风险分析[J]. 人民长江, 2009,40(7):90-91.
[2] 张思青,徐一民,王煜,等. 筒阀技术特点及其应用研究[J]. 阀门, 2002,(6):8-11.
[3] 窦学刚,顾挺,张冬生. 锦屏二级水电站水轮机筒阀同步控制系统可靠性分析[J]. 水电站机电技术,2013,36(2):32-34.

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