

尾水洞出现明满流的水电站小波动稳定性分析

陈刚, 周建旭, 胡明

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对尾水位变幅较大的水电站尾水洞出口段常出现无压流或明满流等复杂流态,提出基于动态尾水边界的分析方法,即以始终保持有压流态的尾水洞中间特征断面的动态测压管水头作为尾水洞系统出口边界条件,结合数值模拟方法研究系统的小波动稳定性,并与传统的边界处理方法进行比较。结果表明采用试验数据和数值模拟相结合进行小波动稳定性分析,考虑了尾水洞无压流或明满流对系统稳定性和调节品质的影响,能够较准确地反映系统的动态特性。

关键词:水电站;尾水隧洞;小波动;稳定性分析;试验研究

中图分类号: TV737 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2011)03-0070-04

Stability analysis of small fluctuation for hydropower stations with free-surface-pressurized flows in tail tunnels//CHEN Gang, ZHOU Jian-xu, HU Ming College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the hydropower stations with constantly free-surface-pressurized flows in outlet segment of a tail tunnel and wide range of tail water levels, the dynamic piezometric head at a specific mid-section of the tail tunnel with pressurized flows was used as the boundary conditions of the tail tunnel system. The small fluctuation stability was analyzed by means of numerical simulations, and it was compared with the traditional boundary treatment methods. The results indicate that the integration of experimental data and numerical analysis for the small fluctuation analysis considers the influences of open channel flows or free-surface-pressurized flows in the tail tunnel on the stability and regulation performance of the system, and it can correctly reveal the dynamic characteristics of the system.

Key words: hydropower station; tail tunnel; small fluctuation; stability analysis; experimental study

通常,具有长尾水系统的引水式水电站在运行过程中,长尾水系统始终处于有压或无压状态,但是部分尾水位变幅较大的水电站尾水系统中可能出现复杂的流态。在较低尾水位下,尾水系统可能会处于部分有压和部分无压状态,或者出口段为无压状态,均有可能发展成明满流交替流态。在尾水位较高时,整个尾水系统都呈现有压流态。在实际工程中,主要分为两类:一类是变顶高尾水洞,另一类是尾水洞为水平或缓坡等高断面,而尾水洞起始段有明显的反坡。

对于在运行过程中尾水洞可能出现无压段或明满流的水电站,主要采用水力学试验和数值模拟计算方法进行稳定性分析,其中主要的数学模拟方法有虚拟狭缝法、激波拟合法^[1]、刚性水柱法^[2]和特征隐式格式^[3]等。文献[4]分析了地下式水电站利用导流洞改作发电尾水洞的过渡过程中明满流现象的

特征及形成机理。程永光等^[5]通过对固定界面明满流的衔接计算,研究了水轮机调节规律对调保参数及涌波的影响。文献[6]采用复杂尾水系统非恒定流的数学模型,分析了无压尾水洞对尾水调压室水位波动的影响。陈乃祥等^[7]、褚宝鑫等^[8]采用明满交替流特征隐式格式法计算模型分析了变顶高尾水洞体型变化对机组运行稳定性的影响。张强等^[9]采用包含引水系统、机组和调速器在内的计算机仿真程序进行水力过渡过程计算,分析可知在明满交替流工况下电站调节系统能满足小波动稳定性要求。文献[10]结合含变顶高尾水洞的水电站,采用基于有压管道特征线法、跟踪明满流分界点的明渠改进狭缝法和状态方程数值计算的联合算法,模拟尾水洞中的明满流流态,进行水力-机械系统的小波动稳定性分析。赖旭等^[11]结合含变顶高尾水洞水电站的水轮机调节系统,分析得出采用合理的调速器参

数可以保证机组运行的稳定性,且系统具有尾波波动时间较长的特点。

综上所述,对于尾水洞出口段可能出现无压流或明满流等复杂流态的水电站,采用传统的数值模拟方法进行小波动稳定性分析有一定的局限性,主要是不能准确模拟明满流分界面的水力特性,特别是无法模拟明满流交替水流。因此,考虑到小波动情况下输水系统的水力瞬变较小,传统的处理方法是取常水位作为尾水边界条件,并以此作为数值模拟的出口边界条件。对于尾水位变幅较大的水电站,当尾水洞全线为满流时,出口边界设在尾水洞出口,而当尾水洞出口段出现无压流或明满流时,出口边界设在无压流和有压流的分界点,近似认为尾水系统有压和无压交界面的测压管水头保持不变,显然这种方法忽略了尾水洞复杂流态的影响。同时,若仅从模型试验的角度进行小波动稳定分析,通常不能较准确模拟机组,也就不能较准确地反映机组的转速特性。

某水电站利用导流洞改作发电尾水洞,尾水洞主要为水平等高断面,起始段有明显的反坡,在运行中尾水洞出口段可能为无压流或明满交替流。在一定的试验条件下,笔者提出了一种新的小波动稳定性分析方法,即利用试验取得某一尾水洞中间特征断面(始终保持有压状态)的动态测压管水头,将其作为尾水出口的边界条件,研究系统的动态特性和小波动稳定性,并与传统的基于常尾水位的分析方法进行比较,论证尾水洞复杂流态对水电站小波动稳定性的影响。

1 含无压段的水电站尾水系统布置和运行工况分析

1.1 输水系统布置

某水电站采用三机单元引水组成的“三机一洞一室”典型水力单元布置方式,其中调压室为三机共用。调压室后尾水洞综合利用施工期导流洞,尾水洞起始段洞底呈反坡状态,至止坡点处结束,止坡点以后的尾水洞即为施工期间的导流洞,其洞顶为水平等高断面,尾水洞出口顶高程为 382 m。该水力单元输水系统布置如图 1 所示。

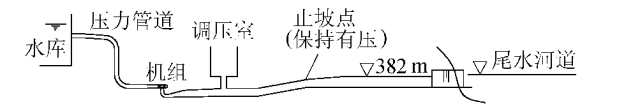


图 1 输水系统布置示意图

1.2 运行工况分析

由于该水电站的典型水力单元由 3 台机组组成,机组运行可以对应 4 个特征尾水位,由低到高依

次为:最低通航尾水位、下临界尾水位、18 台机组全发电尾水位、上临界尾水位。其中下临界尾水位定义为:在 3 台机组同时甩满荷时,尾水隧洞下游段自明流向明满流交替过渡时对应的下游尾水位;上临界水位定义为:在 3 台机组同时甩满荷时,尾水隧洞下游段自满流向明满流交替过渡时对应的下游尾水位。当水电站稳定运行时,若尾水位高于 382 m,则尾水洞全线皆为有压满流;若尾水位低于 382 m,则尾水洞流态为明满流。当水电站处于过渡过程时,若尾水位高于上临界尾水位,则尾水洞始终处于满流状态;若尾水位低于 382 m,则尾水洞中明流与满流的分界点移动,且尾水洞保持明满流状态。

依据水位组合和负荷扰动情况,表 1 给出 4 组典型运行工况进行小波动稳定性分析。

表 1 典型小波动稳定性分析工况

工况编号	运行机组	库水位/m	水位组合	尾水洞初始流态	无压段长度/m	负荷扰动/%
G1	三机运行	600	最低通航尾水位 369.65 m	明满流	1085.250	-10
G2	三机运行	600	下临界尾水位 380.14 m	明满流	985.634	-10
G3	三机运行	600	18 台机组全发电尾水位 381.46 m	明满流	964.815	+10
G4	三机运行	600	上临界尾水位 389.08 m	有压满流	0	+10

2 试验内容

2.1 试验模型布置

针对该水电站 3 台机组组成的典型水力单元建立对应的整体水工模型,模型平面布置图见图 2,其中水库由 1 个钢水箱模拟,压力管道和尾水隧洞模型用有机玻璃制作,机组模型流量由针阀节流装置控制,恒定工况流量用与尾水池相连的三角堰量测。

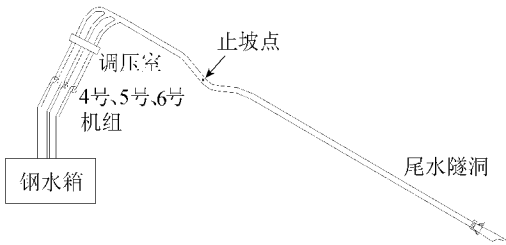


图 2 输水系统试验模型平面布置示意图

2.2 数据量测和分析

如图 2 所示,因止坡点在任何运行尾水位下均为有压满流状态,在止坡点处安装数字传感器,结合不同的小波动稳定性试验工况实时采集和记录止坡点处的动态测压管水头,作为小波动稳定性计算分析的下尾水边界。

3 基于动态尾水边界的小波动稳定性分析

3.1 小波动计算数学方法

水电站水力-机械系统的小波动稳定性分析采用有压管道特征线法和状态方程分析相结合的联合算法,采用有压管道特征线法模拟计算有压输水管道的水力瞬变,充分考虑机组的非线性流量特性和效率特性;采用状态方程组来描述机组转速变化特性和调速器的调节特性,采用合理的数值解法进行求解(如4阶龙格-库塔法)。

3.2 基于动态尾水边界的分析方法

小波动过渡过程中,系统的运行稳定性不可避免地受到尾水洞无压流或明满流的影响,故应尽可能地予以考虑,而传统的数值模拟方法一般未能准确反映这些复杂流态。因此,提出采用动态尾水边界的处理方法,即结合试验条件实时采集整体模型止坡点处的动态测压管水头作为下游尾水边界条件,进行各工况的小波动稳定性分析,此时,试验采集得到的止坡点测压管水头的动态过程综合反映了其下游侧尾水洞复杂流态的影响。系统的数学模型主要包括特征线基本方程^[7]、边界条件、调速器方程等。

3.2.1 有压管道特征线法

如图3所示,有压管道系统水锤计算的特征相容方程为

C⁺:H_{Pi} = C_P - B_PQ_{Pi} (1)

C⁻:H_{Pi} = C_M + B_MQ_{Pi} (2)

式中:H_{Pi},Q_{Pi}分别为t时刻i断面未知的瞬时水头和瞬时流量;C_P,B_P,C_M,B_M为特征线相容性方程常数,是t-Δt时刻的已知量,由t-Δt时刻i-1断面和i+1断面的已知水头和流量确定;Δt为计算时步,满足库朗条件Δt=Δx/a,其中Δx为特征网格管段长度,a为水锤波速。

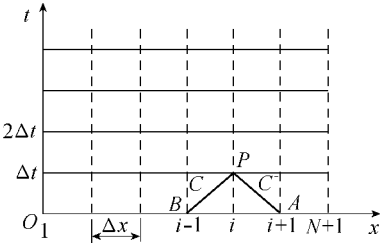


图3 特征线网格

3.2.2 边界条件

在进行小波动稳定性分析时,涉及的水力-机械系统边界条件主要包括水库进口边界、机组边界、调压室边界、尾水分岔点边界和尾水出口边界。以上边界条件均可依据相应边界的流量特性或水头特性并结合特征线方程给出。这里仅讨论尾水出口边界

条件。动态尾水边界与常尾水位边界的不同之处在于定义尾水出口边界为止坡点的动态测压管水头,该断面始终处于有压流状态,采用该断面的动态测压管水头作为数值分析的输入边界,即

H_{Pn} = C_P - B_PQ_{Pn} (3)

H_{Pn} = H_T(t) (4)

式中:H_{Pn},Q_{Pn}分别为t时刻n断面未知的瞬时水头和瞬时流量;H_T(t)为止坡点动态测压管水头,由试验采集。

3.2.3 稳定性分析模型

结合有压管道特征线法、调速器方程^[12]和机组运动方程、输水系统的边界条件和动态尾水边界条件,以及试验采集到的止坡点断面动态测压管水头,可建立尾水洞可能出现明满流等复杂流态的水电站小波动稳定性分析数学模型,并结合机组转速动态过程线进行小波动调节品质分析。

4 算例分析

结合图1所示水电站的参数及表1所列的计算工况,分别采用基于常尾水位边界的分析方法和基于动态尾水边界的分析方法,进行水力-机械系统的小波动稳定性分析,并进一步进行小波动调节品质分析^[12]。

各工况下小波动调节品质分析结果见表2。图4给出了常尾水位方案G1~G4工况4号机组转速小波动时变过程线。

表2 4号机组小波动调节品质分析

工况 编号	尾水 边界	转速 稳定值 n _i / (r·min ⁻¹)	转速 峰谷值 n _{max} / (r·min ⁻¹)	最大偏差 Δn _{max} / (r·min ⁻¹)	调节 时间 T _p /s	衰减度 ψ
G1	常尾水位	125.37	128.32	2.95	18.6	98.98
	动态尾水	125.40	128.36	2.96	18.3	99.64
G2	常尾水位	125.40	128.39	2.99	19.2	99.02
	动态尾水	125.42	128.40	2.98	19.4	99.34
G3	常尾水位	124.56	121.34	-3.22	21.4	98.70
	动态尾水	124.56	121.35	-3.21	21.1	98.30
G4	常尾水位	124.53	121.31	-3.22	23.7	97.27
	动态尾水	124.51	121.31	-3.20	22.1	98.76

分析表2、图4可知:①不论是采用常尾水位边界分析方法还是动态尾水边界分析方法进行小波动稳定性分析,在相同的扰动下均满足小波动稳定性要求,所得到的机组调节品质和动态曲线接近,主要表现为转速最大偏差、调节时间和衰减度基本一致。②对于尾水洞均为有压满流的G4工况,采用常尾水位边界分析方法或动态尾水边界分析方法进行小波动稳定性分析,机组转速动态曲线基本一致,包括尾波的波动周期和波动幅度等特性也基本相同。此

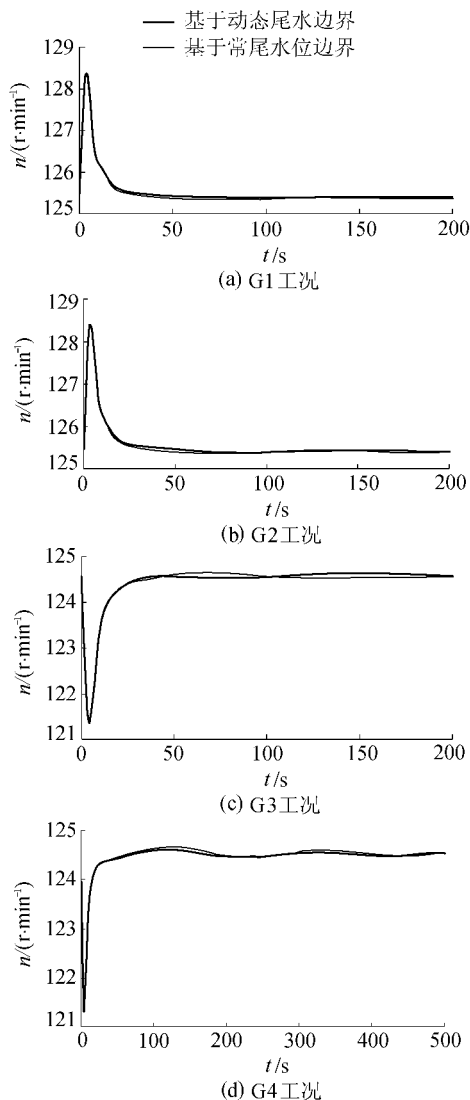


图4 G1~G4工况4号机组转速小波动时变过程线

时常尾水位边界分析方法的出口边界在尾水洞出口处,而对于尾水洞出现无压流的G1~G3工况,采用2种不同的分析方法,机组转速动态曲线的尾波特性存在一定的区别,主要表现在波动周期、波动幅度和衰减速度上,对机组调节品质并没有产生明显的影响,此时常尾水位边界分析方法的出口边界在明满流分界面处。动态尾水边界分析方法基于试验的某特征断面的动态测压管水头,考虑了尾水洞无压段或明满流等复杂流态的影响,其分析结果更能反映实际情况,而传统的常尾水位边界分析方法不能反映这种影响的存在。

因此为了更准确地反映系统小波动过渡过程的动态特性,应该充分考虑尾水洞无压段或明满流等复杂流态的影响,而本文基于动态尾水边界的分析方法为解决尾水系统出现明满流等复杂流态的水电站小波动稳定性分析提供了新的思路。

5 结 语

长尾水洞方案是首部式开发的引水式水电站常用的布置形式,对于部分尾水位变幅较大的水电站而言,其尾水系统在运行过程中可能出现明满流现象,在小波动稳定性分析通常采用常尾水位边界,未能较准确考虑尾水洞中复杂流态的影响。笔者结合模型试验,提出基于动态尾水边界的分析方法,即采用试验量测的某特征断面的动态测压管水头作为尾水出口的边界条件,研究系统的动态特性和小波动稳定性。数值计算和验证分析表明,与常尾水位边界分析方法比较,基于动态尾水边界的小波动稳定性分析方法能够较真实地反映下游尾水洞复杂流态的影响,其对机组转速动态曲线的尾波特性存在一定的影响,通常其对小波动稳定性的影响也是不利的,分析结果更能反映实际情况。基于动态尾水边界的分析方法为解决尾水系统出现明满流等复杂流态的水电站小波动稳定性分析提供了新的思路。

参考文献:

- [1] ABBOTT M B, MINNS A W. Computational hydraulics[M]. Aldershot, England: Ashgate, 1998: 248-252.
- [2] LI J, McCORQUODALE A. Modelling mixed flow in storm sewers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(11): 1170-1180.
- [3] 邓辉. 水电站明满流过渡过程数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [4] 丁振华, 许景贤. 地下式水电站尾水洞过渡过程中明满流现象的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3(2): 163-168.
- [5] 程永光, 张师华. 具有长尾水渠的水电站过渡过程[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(3): 43-46.
- [6] 刘华. 水电站尾水系统的非恒定流计算[J]. 成都科技大学学报, 1994, 79(6): 12-17.
- [7] 陈乃祥, 孔庆蓉, 樊红刚, 等. 明满交替流特征隐式格式法计算模型在工程中的应用[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 86-89.
- [8] 褚宝鑫, 樊红刚, 陈乃祥. 具有明满交替流大型水电站的动态数值模拟及优化设计研究[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 166-170.
- [9] 张强, 刘保华. 向家坝水电站右岸变顶高尾水洞的水力计算[J]. 水力发电, 2004, 30(3): 32-33.
- [10] 周建旭, 张健, 刘德有. 双机共变顶高尾水洞系统小波动稳定性研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(12): 64-67.
- [11] 赖旭, 陈鉴治, 杨建东. 变顶高尾水洞水电站机组运行稳定性影响[J]. 水力发电学报, 2001(4): 102-107.
- [12] 周建旭, 张健, 刘德有. 双机共变顶高尾水洞系统水力干扰分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 661-664.

(收稿日期 2010-10-19 编辑 骆超)