

水工模型多条有压隧洞联合泄流糙率校正方法

李红英,罗永钦

(中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院,云南 昆明 650033)

摘要 :针对水利水电工程多条有压隧洞联合泄流时传统的糙率修正方法工作量大且精度不高这一问题,对多条有压隧洞联合泄流的糙率校正方法进行研究,采用一封闭的方程组求解各有压隧洞的水位校正值和实际过流量。此方程组考虑了有压隧洞间的互相影响,且仅需测量 1 组次多条有压隧洞同时泄流时的水位、流量数据。该方法在金沙江流域其宗水电站 5 条有压隧洞联合泄流模型试验中的应用表明,计算简单方便,可节省大量时间,糙率校正后的试验结果准确可靠。

关键词 :有压隧洞;联合泄流;糙率校正;水工模型试验

中图分类号 :TV131.4

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2011)06-0014-02

Roughness correction methods for hydraulic model tests on combined discharge of multiple pressure tunnels//LI Hong-ying, LUO Yong-qin(Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650033, China)

Abstract :With regard to the large workload and low accuracy of the traditional roughness correction methods for the combined discharge of multiple pressure tunnels in hydropower engineering, the roughness correction methods for the combined discharge of multiple pressure tunnels were studied. A closed equation set was employed to solve the corrected water levels and actual discharges of the multiple pressure tunnels. The interrelations among various pressure tunnels in the equation set were considered, and only one group of data of water levels and discharges of should be measured under the simultaneous discharge of the multiple pressure tunnels. The application of the above method in the combined discharge of five pressure tunnels of Qizhong Hydropower Station in Jinsha River basin shows that the proposed method is simple and convenient and can save much time, and the test results after roughness correction are accurate and reliable.

Key words :pressure tunnel; combined discharge; roughness correction; hydraulic model test

随着我国西南水电开发步伐的加快,一些大型水电工程布置了多条有压隧洞,多洞联合泄流能力是水工模型试验的一项重要研究内容,直接关系到水利水电工程的安全。受模型比尺效应影响,糙率通常不能满足原型与模型相似要求,影响有压隧洞水位流量试验的准确性,因此必须对糙率进行校正。目前常用的糙率校正方法,无论是修正洞长法(阻力系数修正法)还是变态比例尺法,都是针对单条有压隧洞的泄流试验,研究人员通常应用沿程阻力系数修正法、变态模型试验修正等方法对糙率进行修正,以得到合理的水位~流量关系曲线^[1-3]。

当多条有压隧洞联合泄流时,用修正洞长法会改变进、出口与其他建筑物的相对位置;用变态比例尺法会造成有压洞的体型变态,从而使模型的局部水头损失与原型的不相似,同时改变了有压洞的底坡而使建筑物进、出口的相对位置与原型不同,由此造成模型的下游出流与原型的不相似。因此,在多

条有压隧洞联合运行的水工模型试验中,采用适当抬高库水位的方式来弥补模型试验中额外增加的沿程阻力水头损失,从而实现对流量的修正。在进行泄流能力试验研究时,如先进行单条有压隧洞水位流量试验,再对糙率校正后的成果进行累加计算,这种方法工作量非常大,耗时耗力,且未考虑相邻有压隧洞之间的流线干扰,试验准确度也受到一定影响。基于此,笔者针对多条有压隧洞联合泄流时的糙率校正方法进行研究,以求较好地解决多条有压隧洞联合泄流的糙率校正问题。

1 单条有压隧洞糙率校正方法

水工模型不仅要满足重力相似准则,还必须满足阻力相似准则。所谓阻力相似准则,即模型试验泄水建筑物过流边界的沿程阻力和局部阻力与原型沿程阻力和局部阻力相似。对正态模型而言,只要保证在阻力平方区,局部阻力就能满足相似准则,而

沿程阻力与边界糙率有关,边界糙率是否相似与模型选用材料和模型比尺有关。例如,选用糙率为0.0085的有机玻璃,其不同模型比尺下对应的原型糙率见表1。由表1可见,只有当模型比尺达到1:20时才能达到原、模型糙率相似要求,这在模型试验中很难实现。

表1 各比尺下原、模型糙率的相似关系

模型糙率	比尺	对应原型糙率	原型设计糙率	误差/%
0.0085	1:100	0.018	0.014	30.8
0.0085	1:80	0.018	0.014	26.0
0.0085	1:60	0.017	0.014	20.1
0.0085	1:40	0.016	0.014	12.3
0.0085	1:20	0.014	0.014	0

对于有压隧洞,过流面糙率不相似主要影响泄水建筑物的实际过流量,在相同水位下,试验得到的泄流量比实际过流量小,因此必须进行糙率校正。为了确保进、出口流态及流速相似并保证泄流量相似,单条有压隧洞过流量糙率校正采用抬高库水位的方式来弥补模型试验额外增加的沿程阻力水头损失,即根据式(1)计算不同泄流量糙率偏大引起的库水位升高修正量 Δh ,式(1)考虑了有压隧洞的长度、过水面积、水力半径等参数,经过修正的水位~流量关系曲线和实际更为接近。

$$\Delta h = \frac{LQ^2}{A^2 R^{4/3}}(n_p'^2 - n_p^2) \quad (1)$$

式中 Δh 为因糙率不相似引起的库水位升高修正量,m; L 为有压隧洞长度,m; Q 为实测下泄流量, m^3/s ; A 为有压隧洞洞段断面面积, m^2 ; R 为有压隧洞洞段断面水力半径,m; n_p' 为模型对应原型的糙率; n_p 为原型设计糙率, $n_p = 0.014$ 。

2 多条有压隧洞糙率校正方法

在水工模型试验中,通常采用上述方法对通过各单洞过流量进行糙率校正,再叠加各单洞相同校正后水位的流量来表述修正后的总泄流量。如果多条有压隧洞联合运行时按上述方法进行水位流量的糙率校正,需要确定多条有压隧洞联合运行的水位~流量关系,则需测量多条有压隧洞单独运行的水位~流量关系曲线(水位~流量关系曲线数量与隧洞数量相等),工作量非常大。同时,就糙率校正质量而言,通过各单洞泄流的实测水位~流量关系曲线来校正多条有压隧洞联合泄流的水位~流量关系,没有考虑多条有压隧洞联合泄流时的相互影响,对于各洞间影响较大的泄水建筑物,糙率校正质量将受到影响。

为了解决模型试验中多条有压隧洞联合运行时

糙率校正过程工作量大、耗时长,且校正质量不能得到保证的问题,在水工模型试验中对需要联合运行的多条有压隧洞直接实测库水位、模型总泄流量2个参数,同时对各单洞进行糙率校正,得到联合泄流的校正水位、各单洞的实际下泄流量,具体步骤如下^[4]:

步骤1 每条隧洞因糙率偏大引起的库水位升高修正量仍按式(1)进行计算,多条有压隧洞联合泄流时,每条隧洞的库水位升高修正量见式(2)(就每条洞而言, m_k 是一个常数):

$$\Delta h_k = m_k Q_k^2 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中
$$m_k = \frac{L_k(n_p'^2 - n_p^2)}{A_k^2 R_k^{4/3}}$$

步骤2 库水位一定时,进口高程、洞身水力参数与各单洞之间的相互影响导致各洞泄流量不同,但各单洞校正前库水位相等,校正后的库水位也是相等的,表现为各单洞库水位升高修正量相等,即

$$\Delta h_1 = \Delta h_2 = \dots = \Delta h_n = \Delta h \quad (3)$$

步骤3 在多条有压隧洞联合运行时,各单洞过流量之和等于参与联合泄流洞群的总泄流量,即

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q_{\text{总}} \quad (4)$$

通过分析式(2)~式(4)可得出:当对多条有压隧洞联合泄流进行糙率校正时,共有 $n+1$ 个未知数,分别是 $\Delta h, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 。可供求解的方程数同样为 $n+1$ 个,此方程组是封闭的,有解析解。从以上分析可以看出,采用此方法仅需测量1组次多条有压隧洞同时泄流时的水位、流量数据便能求出其联合泄流时的校正水位及各单洞的泄流量,同时还考虑了各单洞之间过流量的影响。由此可快速地评判多条有压隧洞联合泄流的泄流能力是否满足工程需要。试验研究过程中,在泄流量确定时可通过反算来确定模型所需增补的水头(库水位升高修正量),从而保证泄水建筑物出口下游的出流与原型相似,并保证试验研究精度。

3 应用实例

其宗水电站位于云南省香格里拉县、维西县、玉龙县三县交界的金沙江中游河段,是金沙江中、下游河段水电规划的第1个梯级电站,在施工导流期存在多条有压隧洞同时泄流的情况。在水工模型试验中,用本文方法进行糙率校正,在较短的时间内就完成了泄流能力试验,为设计决策提供了科学有效的试验数据支持。表2是对4号、5号、6号导流洞与泄洪洞和放空洞5洞联合泄流工况进行糙率校正的计算结果(模型比尺为1:100)(下转第34页)

该泵最优工况时试验与数值计算得到的临界空化余量分别为 2.82 m 和 2.73 m ,最大相对误差为 6.7% 。产生误差的原因可能是泵的铸造误差、数值耗散误差、壁面粗糙度的设置等。从试验和数值计算结果来分析 ,数值计算具有较高的精确度。

5 结 论

a. 通过对一台低比转速离心泵进行空化性能试验与数值研究 ,验证了应用数值方法预测泵空化的准确程度 ,对泵空化发生时的内部气液两相流场进行分析 ,得到了泵发生空化时叶轮内部气泡的分布规律。

b. 通过对泵的空化初生、临界空化余量、许用空化余量时叶轮内部气泡分布规律的研究 ,指出低比转速泵在进口压力较高时已经发生了空化初生 ;泵在临界空化余量和许用空化余量运行时 ,气泡在叶轮内部分布较多 ,有可能对叶轮产生空蚀破坏。研究成果对进一步深入研究离心泵空化具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京 :宇航出版社 ,1995 :54-56.
[2] ARASSIK J K ,MESSINA J ,COOPER P ,et al. Pump handbook

[M]. New York :McGraw-Hill Professional 2011 87-93.
[3] 李龙 ,杨雪林 ,李丹.考虑粗糙度影响的水泵原模型效率换算[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2010 ,38(3) :327-331.
[4] 陈运杰 ,刘超.基于面元法的轴流泵叶轮散水性能紊流数值分析[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2010 ,38(4) :369-372.
[5] JEANTY F ,de ANDRADE J ,ASUAJE M ,et al. Numerical simulation of cavitation phenomena in a centrifugal pump [C]//Proceedings of ASME 2009 Fluid Engineering Division Summer Meeting. Colorado ,USA :Vail 2009.
[6] KOBAYASHI K ,CHIBA Y .Numerical simulation of cavitation flow in a mixed flow pump with closed impeller[C]//Proceedings of ASME 2009 Fluid Engineering Division Summer Meeting. Colorado ,USA :Vail 2009.
[7] 杨孙圣 ,孔繁余 ,陈斌.离心泵空蚀性能的数值计算与分析[J].华中科技大学学报 ,2010 ,40(38) :93-95.
[8] DING H ,VISSER F C ,JIANG Y ,et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial application[C]//Proceedings of ASME 2009 Fluid Engineering Division Summer Meeting. Colorado ,USA :Vail 2009.
[9] GB 3216—2005 回转动力泵水力性能验收试验[S].
[10] VLAMING D J .Optimum impeller inlet geometry for minimum NPSH requirements for centrifugal pumps[J]. Pumping Machinery ,ASME ,1989 25-29.
[11] de LA TORRE. Antonio efficiency optimization in SWRO plant : high efficiency & low maintenance pumps[J]. Desalination 2008 221 :151-157.

(收稿日期 2011-01-07 编辑 :方宇彤)

(上接第 15 页)模型总泄流量为 9 702 m³/s ,模型实测水位为 2 100.37 m ,模型对应原型糙率为 0.018 3 ,原型设计糙率为 0.014。

表 2 其宗水电站糙率校正计算结果

有压隧洞	洞长 L_k/m	过水断面面积 A_k/m^2	水力半径 R_k/m	常数 m_k
4 号导流洞	685.869	58.878	2.337	8.8902×10^{-6}
5 号导流洞	772.120	111.439	3.256	1.7954×10^{-6}
6 号导流洞	586.607	155.928	3.256	6.9669×10^{-7}
泄洪洞	408.705	72.382	2.400	3.3832×10^{-6}
放空洞	398.288	72.382	2.400	3.2969×10^{-6}

由式(2)~(4)求得各有压隧洞的库水位升高修正量 $\Delta h = 8.267$ m。各有压隧洞实际过流量分别为 :
 $Q_4 = 964.37$ m³/s , $Q_5 = 2 145.97$ m³/s , $Q_6 = 3 444.92$ m³/s , $Q_{泄} = 1 563.29$ m³/s , $Q_{放} = 1 583.55$ m³/s。

4 结 语

为解决水利水电工程多条有压隧洞联合泄流的糙率校正问题 ,采用一封闭的方程组求解各有压隧洞的水位校正值和实际过流量 ,可对多条有压隧洞联合泄流时的水位进行糙率校正 ,试验成果准确可靠。该方法仅需测量 1 组次多条有压隧洞同时泄流

时的水位、流量数据便能求出其联合泄流时的校正水位及各单洞的泄流量 ,同时还考虑了各单洞间的过流量影响 ,节省了大量的人力及时间。

该方法在金沙江流域其宗水电站 5 条有压隧洞联合泄流水工模型成功应用后 ,在缅甸丹伦江滚弄水电站、金沙江梨园、阿海等多个水电站的导流洞泄流能力试验中展开应用。结果表明 ,多条有压隧洞联合泄流用本文方法进行糙率校正后取得的成果与单洞糙率校正后叠加所取得的成果吻合良好。

参考文献：

[1] 杨庆 ,戴光清.水工导流隧洞模型试验中糙率不相似问题的研究[J].四川大学学报 :工程科学版 ,2002 ,34(4) :42-45.
[2] 贺昌林 ,余挺 ,张建民 ,等.长泄洪洞模型糙率修正方法研究[J].四川大学学报 :工程科学版 ,2007 ,39(6) :26-29.
[3] 岳丽霞.水工模型试验中长导流洞的糙率修正问题[J].水利水电工程设计 ,2009 ,28(1) :34-35.
[4] 李红英 ,罗永钦 ,张绍春 ,等.水工模型试验 n 条有压隧洞联合泄流糙率校正方法 :中国 ,ZL200810233687.4 [P]. 2010-08-18.

(收稿日期 2011-04-14 编辑 :骆超)