

水力学模型试验两种参数的测量不确定度评定

罗永钦^{1,2,3}, 张绍春³, 何大明^{1,2}, 李红英³

(1. 云南大学亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650091; 2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650091; 3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650033)

摘要 将测量不确定度与水工模型试验结合起来, 对水工模型试验测量中常见的 2 种检测参数(流量、流速)进行不确定度评定。评定结果表明 ①对流量检测不确定度影响最大的参数是堰上水头, 其次是堰宽、堰高。因此, 在堰上水头的测量过程中应注意各操作步骤精度的控制, 量水堰制作过程中应特别注意堰宽的控制。②对流速检测不确定度影响最大的是水体脉动及位置误差, 由于水体脉动无法人为控制, 因此应特别注意每次测量时测点位置的控制。

关键词 模型试验 参数测量 流量 流速 测量不确定度

中图分类号 TV135 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2011)05-0020-03

Uncertainty analysis of two kinds of parameters of hydraulic model tests/LUO Yong-qin^{1,2,3}, ZHAO Shao-chun³, HE Da-ming^{1,2}, LI Hong-ying³ (1. Asian International River Center, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Key Lab of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming 650091, China; 3. Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650033, China)

Abstract The uncertainty analysis and hydraulic model tests were combined to evaluate the two kinds of common parameters: discharge and flow velocity. The results indicate that the weir head has the largest influences on the uncertainty of the discharge, and the weir width and weir height have great influences on it. Thus, the precision of various operational procedures for the weir head should be properly controlled, and the weir width should be specially controlled during its preparation. The flow fluctuation and position error have the largest influences on the uncertainty of the flow velocity. So, the position of each measurement should be highlighted.

Key words model test; parametric measurement; discharge; flow velocity; uncertainty analysis

水工模型试验是研究工程水力学问题的主要方式之一, 通过模型试验对不同方案进行优化验证, 得到质量、经济上较好的泄水建筑物体型是试验的主要目的^[1]。模型试验过程中, 试验工况控制、泄水建筑物方案调整与确定均需测量水力参数。试验工况控制的水力参数有流量、水位等。消力池体型修改需用临界流速、脉动压力测量数据来判别 掺气设施体型是否合理需用空腔形态、通气井风速、空腔负压等参数来验证; 下游河道的岸边流速、冲坑形态及深度是设计和研究人员关心的参数。而通过模型试验检测出来的水力参数正确与否、所测参数有哪些影响因素、哪些因素是最主要因素、它们的最佳估值范围如何等, 均是需要关注的。

所谓测量不确定度评定^[2], 是指将测量结果作为随机变量, 研究分析统计规律并计算其范围的一

项活动。1963 年, 美国国家标准局的 Eisenhart 在研究仪器校准系统紧密度和准确度估计时首先提出测量不确定度的概念。到 20 世纪 80 年代, 测量不确定度已经在世界许多实验室及计量机构使用^[3]。我国 1999 年颁布的 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》规定, 测量中评定与表示不确定度适用于各种测量领域, 而不局限于计量领域的检定、校准, 并明确提出应用领域包括科学研究中的测量。因此, 将测量不确定度评定与水工模型试验结合起来评定所测量的水力参数, 对于模型制作中重要尺寸的控制和试验过程中测量方式的改善有重要意义。笔者以水工模型试验最常见的 2 种测量参数(流量和流速)为例, 结合水利水电工程模型试验的实测数据进行不确定度分析, 以判别测量结果的主要影响因素, 评估最佳估值范围。

1 流量检测不确定度分析

水工模型试验中流量测量是必不可少的环节,测量的准确性与泄流能力密切相关。流量通常是采用量水堰测量,矩形量水堰流量计算采用雷白克堰流公式:

$$Q = \left(1.782 + 0.24 \frac{H}{P} \right) B H_0^{1.5} \quad (1)$$

式中: H 为堰上水头; P 为堰高; B 为堰宽; H_0 为修正后的水头 ($H_0 = H + 0.0011 \text{ m}$)。

根据不确定度评定步骤,首先建立流量数学模型: $Q = f(B, P, H)$,对模型(式(1))按泰勒级数展开后得不确定度传播律:

$$u^2(Q) = \left(\frac{\partial f}{\partial B} u(B) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial P} u(P) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial H} u(H) \right)^2 \quad (2)$$

不确定度传播律可表征为各分量不确定度与合成标准不确定度的关系,由此求得各分量灵敏系数的表达式:

$$\frac{\partial f}{\partial B} = \left(1.782 + \frac{0.24H}{P} \right) (H + 0.0011)^{1.5} \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial P} = \frac{0.24BH(H + 0.0011)^{1.5}}{-P^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial H} &= 2.673B(H + 0.0011)^{1.5} + \\ &\quad \frac{0.24B}{P} [(H + 0.0011)^{1.5} + \\ &\quad 1.5H(H + 0.0011)^{0.5}] \end{aligned} \quad (5)$$

其次求出各分量的标准不确定度 u ,所谓标准不确定度^[2]即是以标准偏差表示的测量不确定度。最后求出合成标准不确定度及扩展不确定度,所谓合成标准不确定度,即当测量结果是由若干个其他量的值求得时,按其他各量的方差和协方差算得的标准不确定度,而扩展不确定度^[2]为确定测量结果区间的量,大部分合理赋予被测量之值可含于此区间。

为了更好地了解各分量不确定度对流量检测的影响,以某工程水工模型量水堰为例,对流量检测进行不确定评定。该量水堰 $P = 1.041 \text{ m}$, $B = 1.001 \text{ m}$, $H = 13.94 \text{ cm}$,模型比尺 $\lambda = 70$ 。评定过程中,堰宽、堰高引起的标准不确定度考虑了钢直尺误差及操作者读数误差,堰上水头引起的标准不确定度考虑了操作者读数误差、水准仪仪器误差、水准仪测读误差、立尺误差、测针误差。

建立的原型堰流公式为

$$Q = \left(1.782 + 0.24 \frac{H}{P} \right) B H_0 \lambda^{2.5} \quad (6)$$

经计算得 $(3\,920.704 \pm 19.74) \text{ m}^3/\text{s}$ 。评定结果表明,该量水堰在过 $3\,920.704 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量时,扩展不确定度为 $19.74 \text{ m}^3/\text{s}$,占实测流量的 0.5% ,满足测量要求^[6]。堰宽、堰高、堰上水头所引起的分量不确定度分别为 $1.429 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $2.956 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.403 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$,合成标准不确定度为 $2.408 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 。堰高、堰宽引起的不确定度相对较小,堰上水头所引起的不确定度较大。因此,水工模型试验流量检测过程中,在保证量水堰制作精度的同时,确定堰上水头的各步骤应尽量使用高精度仪器,并仔细测读,减少人为误差。

从流量不确定度评定过程可以看出,评定的主要计算来自灵敏系数和各分量标准不确定度的确认。由式(7)可知,当各分量不确定度 $u(x)$ 足够小时, $u(x) \leq \Delta x$,则式(8)成立,由此可以推导出式(9)。这种方法避免了直接求灵敏系数的步骤,使计算量大幅度减小。通过这种方法对上述量水堰流量检测进行不确定度评定后发现,所求得的标准不确定度为 $2.407 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$,而前一种方法所求值为 $2.408 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$,误差在 0.1% 以内。

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(B + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f(B + u(x)) - f(x)}{u(x)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial X} u(X) &\approx f(X + u(X)) - f(X) \\ (X &= B, P, H) \end{aligned} \quad (9)$$

2 流速检测不确定度分析

岸边流速是水利水电工程重要的水力参数,关系到两岸护坡位置、方式及程度的选择。模型试验中,检测岸边流速的步骤是找到检测位置、利用测量仪器进行测量、记录数据。流速测量的数学模型为 $Y = V(X_1, X_2) + \Delta V$,其中 Y 为模型流速值, V 为模型流速测量值, ΔV 为旋桨流速仪的误差, X_1 为所测流速不稳定性参数, X_2 为测点位置误差。对已建数学模型按泰勒级数展开后,得到流速检测不确定度传播律:

$$u_c^2(Y) = u^2(\bar{V}) + u^2(\Delta V) \quad (10)$$

式中: $u_c(Y)$ 为合成标准不确定度; $\bar{V}$ 为平均速度。

评定使用的检测仪器为长江科学院生产的 CF9901 电脑流速仪,对同一位置的流速进行了 5 次测量^[6],测量值包含水体脉动及每次测量位置误差的影响,测量的流速分别为 0.222 m/s , 0.231 m/s , 0.226 m/s , 0.224 m/s , 0.236 m/s 。对测量结果进行 A 类评定,即应用对观测列统计分析方法评估标准

不确定度,由此得到 $u(\bar{V}) = 0.0025 \text{ m/s}$ 。仪器误差引起的不确定度采用 B 类评定,即基于经验或其他信息假定的概率分布的估计方法,由流速仪检定结果知 $\Delta V = 0.01\bar{V}$, $V = 0.2278 \text{ m/s}$,得 $\Delta V = 0.0023 \text{ m/s}$,取正态分布(置信概率为 99.73%)时包含因子 $k = 3$,则 $u(\Delta V) = \Delta V/3 = 0.00076 \text{ m/s}$ 。

流速检测不确定度评定结果表明,流速测量引起的分量不确定度 $u(\bar{V})$ 为 0.0025 m/s ,旋桨流速仪仪器误差引起的分量不确定度 $u(\Delta V)$ 为 0.00076 m/s ,合成标准不确定度为 0.0026 m/s ,扩展不确定度为 0.0052 m/s 。所测水体流速不稳定和测点位置误差造成的不确定度占总不确定度的比例很大,故影响流速检测结果的主要因素为流速脉动和测点位置。

3 结 语

将测量不确定度评定与水工模型试验结合起来,对水工模型测量参数进行不确定度分析,既有利于模型制作中主要参数精度的控制,也有利于试验手段、方法的改善,提高水工模型试验所测数据的准确度。针对水工模型试验常见的 2 种检测参数(流

(上接第 13 页)

独调度具有明显的优越性,采用式(3)计算的供水权重系数最有利于提高水库群的系统供水量。

4 结 语

建立了多水库联合运用情况的水库联合供水模拟模型,采用模拟法对模型进行求解,重点对水库群联合供水权重系数的计算方法进行探讨。

a. 考虑了库容补偿和水文补偿的水库群联合供水调度较水库单独供水调度能显著提高水资源利用率,提高水库群的系统供水量。

b. 水库群联合供水权重系数计算方法的选择对于提高系统供水量的影响是显著的,就提高系统供水量来说,本次给出的供水权重系数计算公式(3)优于公式(1)、公式(2)。

c. 从实际供水调度操作来看,供水权重系数计算公式(2)更便于水库群的实际调度运行,这是因为公式中涉及的水库当前可供库容较容易计算得到,而水库的库容系数也是一个相对稳定的数值,供水权重系数计算公式(3)中关于水库下一时段的来水量分析预测存在一定难度,尤其是枯水季节更难把握,因此在一定程度上影响了水库群调度运行的准确性。

量和流速)进行不确定度评定,得到以下结论:①流量不确定度贡献最主要的参数是堰上水头,其次是堰宽和堰高。试验中应特别注意量水堰测针的控制及测读,量水堰制作过程中应重点注意堰宽的精度控制。②引起流速检测不确定度最主要的参数是水体脉动及位置误差。由于水流脉动的不可控性,流速检测时应特别注意每次测量测点位置的控制。

参考文献:

[1] 南京水利科学研究院. 水工模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社,1985.
[2] 中国合格评定国家认可委员会. 化学分析中不确定度的评估指南[M]. 北京: 中国计量出版社,2006.
[3] 国家质量技术监督局计量司. 测量不确定度评定与表示指南[M]. 北京: 中国计量出版社,2000.
[4] 李慎安. JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》讨论之二: A、B 两类标准不确定度[J]. 工业计量,2005,15(6): 33-37.
[5] 范巧成. Excel 在复杂数学模型测量不确定度评定中的应用[J]. 计量学报,2002,26(4): 380-383.
[6] SL 155—1995 水工(常规)模型试验规程[S].
(收稿日期: 2011-01-25 编辑: 高建群)

参考文献:

[1] 周之豪,沈曾源,施熙灿,等. 水利水能规划[M]. 北京: 中国水利水电出版社,1997.
[2] 叶秉如. 水资源系统优化规划和调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2001.
[3] 游进军. 水资源系统模拟理论与实践[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院,2005.
[4] 黄彤,许文斌,郑建青. 多水源多用户大型水资源系统优化模型[J]. 水利学报,2002,33(3): 91-96.
[5] 刘卫林,董增川,王德智. 混合智能算法及其在供水水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报,2007,38(12): 1436-1443.
[6] 甘治国,蒋云钟,鲁帆,等. 北京市水资源配置模拟模型研究[J]. 水利学报,2008,39(1): 91-95.
[7] 周玉琴,王丽萍,张保生,等. 深圳市东部水库群联合供水调度模型探讨[J]. 水电能源科学,2005,23(2): 25-28.
[8] 谷媛媛,矫振宽,朱红玉,等. 区域多水源联合调配供水研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版,2008,25(4): 69-72.
[9] 王德智,董增川,丁胜祥. 供水库群的聚合分解协调模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2006,34(6): 622-626.
[10] 浙江省水利水电勘测设计院. 杭嘉湖地区水利综合规划[R]. 杭州: 浙江省水利水电勘测设计院,2010.
(收稿日期: 2010-11-04 编辑: 方宇彤)