排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 6 月 June 2014 | 第 32 卷 第 6 期 Vol. 32 No. 6
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.0144

水流量标准装置的高精度换向器设计

朱雷，张建光，张海平，陈莹，孟晓超
（中国水利水电科学研究院水力机械实验室，北京 100038）


朱雷

摘要：为了在水力机械模型测试中对流量进行原位标定，并在水利行业建立水大流量的溯源基准，中国水利水电科学研究院研制了静态质量法水大流量标准装置. 文中对标准装置中的关键装置换向器进行了设计. 首先设计了新型换向器装置，并依据计量检定规程 JJG 164—2000 对换向器进行了检定，结果表明在流量 Q 为 0.8 m^3/s 条件下换向器相对不确定度 U_{Drel} 为 0.015%（$k=2$）；在此基础上应用数值模拟的方法对换向器过程进行了分析，采用 VOF 两相流模型和 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解换向器内的气液分界面，计算不同位置的注入流量；最后利用高速摄像确定了换向器运动过程，得到了换向器的动态曲线并确定计时触发位置. 研究结果已应用于水大流量原位标定以及大口径流量计的检定和校准.

关键词：换向器；静态质量法；水流量标准装置；不确定度；VOF 两相流模型
中图分类号：S277.9；TK7　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2014)06-0511-06
朱雷，张建光，张海平，等. 水流量标准装置的高精度换向器设计[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(6)：511-516.

Design of highly-accuracy diverter for primary water flow standard facility

Zhu Lei, *Zhang Jianguang*, *Zhang Haiping*, *Chen Ying*, *Meng Xiaochao*
(Hydraulic Machinery Laboratory, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A new high-accuracy diverter for primary water flow standard facility has been developed by hydraulic machinery laboratory at IWHR, China. As the core of water calibration facility, diverter determines the test accuracy. Diverter uncertainty test was performed according to China verification code of JJG 164—2000, getting the result that combined standard uncertainty of diverter U_{Drel} is less than 0.015% ($k=2$). In order to analyze the dynamic principal characteristic, numerical simulation method was adopted, which employs VOF multiphase model and $k-\varepsilon$ turbulence model to obtain the water volume fraction inside diverter and to calculate the collecting rate for different positions. By high-speed camera, the operation procedure of the diverter has been obtained, and the dynamic curve and the timing trigger position have been achieved. The results have been applied to calibrate large flow in situ and large diameter flowmeter.

Key words: diverter; static gravimetric calibration; water flow standard facility; uncertainty; VOF

模型试验对水力机械的研发具有十分重要的意义. 2004 年，水利部组织在天津进行了南水北调工程轴流泵模型的同台对比试验，这是目前国内水泵行业最高层次和最大规模的模型试验[1]. 而在水轮机行业，模型试验早已被行业广泛接受，在 20 世纪 60 年代已经完成了行业最重要的模型验收试验

收稿日期：2013-05-16；**网络出版时间**：2014-06-20
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0144.html
基金项目：水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201001049)
作者简介：朱雷(1985—)，男，江苏邳州人，工程师，硕士(zhulei@iwhr.com)，主要从事水力机械试验及数值模拟研究.
孟晓超(1961—)，男，河北高阳人，教授级高级工程师(通信作者，mxc@iwhr.com)，主要从事水力机械模型测试研究.

国际标准,在三峡工程、溧阳抽水蓄能电站等重大水电工程的水力机组招标中进行了目击验收或同台对比模型试验[2-4]. 高精度的水力机械模型试验台是进行模型试验的基础,水平较高的水力机械模型试验台效率测试的合成相对不确定度已经达到小于0.2%的水平[5]. 在模型试验中,流量是影响测试结果精度的最关键参数,为了提高测试精度,在模型试验系统中配备了高精度的流量原位标定系统.

同时,在供水、水利、电力等行业存在着广泛的水大流量计量需求[6-8],但是目前缺乏适用于大口径流量计的流量原级标准装置. 国务院《关于实行最严格水资源管理制度的意见》强调"加强水资源开发利用控制红线管理,严格实行用水总量控制". 依据意见精神,水利系统开展了探索在行业内部建立水大流量量值溯源体系的工作,在中国水利水电科学研究院(IWHR)水力机械实验室建成了静态质量法水大流量标准装置. 标准装置最大检测流量为7 200 m^3/h,最优不确定度优于0.05%($k=2$),具有对DN100~800 mm口径的流量计进行原级标定的能力,可以用作水利行业的水大流量计量标准,也可以用于水力机械(水轮机、水泵等)模型检测的流量原位标定.

在静态质量法水流量标准装置中,换向器主要起流动切换的作用,测试开始时将水流引向称重桶,测试结束后将水流向水库切换. 换向器在启动的同时触发计时器进行时间测量,在静止状态称量桶中注入的水流质量. 由时间和质量得到被检流量值,对流量计进行标定. 质量、计时、换向器和密度等是影响流量计量结果不确定度的主要因素. 在当前技术条件下,质量、时间和密度等因素均能得到很好的精度控制,且可以溯源到国家基准. 但是换向器由于受到设计、加工、控制等方面限制,成为影响流量标准装置精度的最关键因素. 如何提高换向器的准确度和稳定性,是提高水流量计量精度的重要课题. 文中研制适用于水大流量测量的高精度换向器,并采用试验和两相流数值模拟相结合的方法对换向器的动作过程进行优化,确定换向器计时器的最佳触发位置,有效地保证水大流量计量的精度.

1 高精度换向器研制

1.1 换向器规律

图1为在理想测量过程中注入流量 Q_C 随时间 t 的变化关系[9-10],图中 t_T 为总集流时间,t_M 为计时测量时间,t_C 为定常集流时间.

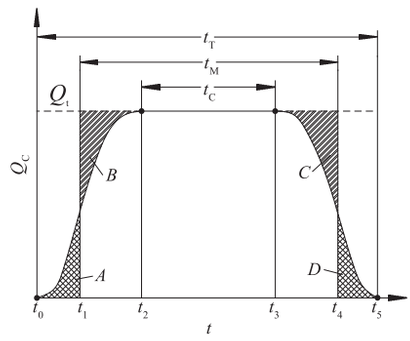


图1 注入流量随时间的变化

Fig. 1 Collecting flow rate versus time

在 t_0 时刻换向器开始动作,t_1 时刻计时器触发,t_4 时刻计时结束,t_5 时刻换向器动作停止. 换向器动作时间 t_d 分别为 t_2-t_0 和 t_5-t_3,计时器触发时间 t_g 分别为 t_1-t_0 和 t_4-t_3. 从图1中可以看出,流量计量的过程可以分为3个阶段:① 正行程(t_0-t_2),换向器开始动作,注入流量从0增加到测试流量 Q_t;② 稳定流动阶段(t_2-t_3),水流以 Q_t 稳定流向称重桶;③ 反行程(t_3-t_5),换向器向水库方向动作,注入流量从 Q_t 减小为0.

1.2 误差来源及控制

在图1中,注入流量 Q_C 在区间[t_0, t_5]的积分即是计量过程的总集流体积 V_T,检定流量为 $Q_t=V_T/t_M$. 总集流体积 V_T 通过测量可以准确得到,但是 t_M 却由计时起始的触发时间确定,如果触发时间点选择不合适就会产生系统误差,这种误差无法通过多次测量取平均值的办法消除.

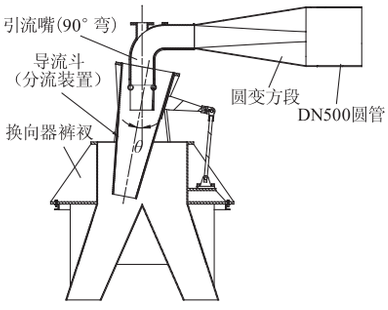
在[t_0, t_5]的时间过程中,假设测试流量 Q_t 维持定值不变,则测试过程中理论的测量时间为 $t_{th}=V_T/Q_t$. 如果满足 $t_M=t_{th}$ 的条件,则计时的测量误差就可以消除,图中[t_1, t_4]区间的矩形区域是理想的流量注入过程. 区域 A 和 D 分别表示计时开始前和结束后流向称重桶的水量,区域 B 和 C 分别表示平均后相应的补偿量.

在实际测试过程中,换向器的误差主要来源于3个方面,分别是正反行程的偏差、射流速度的不对称性引起的误差和计时误差. 通过对国内外主要的原级流量标准装置调研后发现,目前主要有2种技术理念来减小换向器误差:① 减小换向器动作时间 t_d,以延长计时时间 t_C 来减少换向器的时间相对误差,如中国计量科学研究院(NIM)、国家水大流量计量站、德国联邦物理技术研究院(PTB)均采用此种

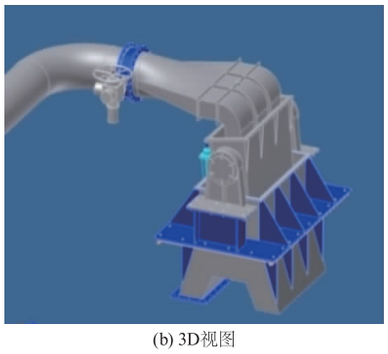
方法[11]；② 增加换向器动作时间 t_d，通过正反方向的水量补偿来减小误差，如美国国家标准与技术研究院（NIST）的单向换向器（unidirectional diverter）[12]、日本国家计量院（NMIJ）的旋转双翼换向器（diverter with rotating double wing method）[13]. 2 种类型的换向器各有优缺点，第 1 种类型换向器结构简单但误差略大，第 2 种类型稳定但结构复杂，一般适用于小流量情况.

1.3　换向器设计

由于所研制的水流量标准装置的测量范围较大，水流对换向器的作用力较大，故采用了结构较简单的设计. 在设计的过程中主要采取了 4 个措施减小换向器误差：① 增加换向器动作速度以减小 t_d，降低时间相对误差；② 采用大长宽比的出流嘴断面设计，尺寸为 1 200 mm × 200 mm，使出流口的流动尽可能对称均匀；③ 配置高精度的计时器，采用 4 MHz 温补晶振作为频率源，频率的相对不确定度可达到 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$；④ 确定合适的计时起始点来满足“$A=B$ 且 $C=D$”的条件，补偿换向正反行程的水量误差. 换向器的主要构成如图 2 所示.



(a) 中间纵剖面



(b) 3D视图

图 2　换向器结构图

Fig. 2　Sketch of diverter structure

换向器主要包括引流嘴、导流斗、分流裤衩、气压缸、计时器等部件. 水流由 DN500 圆管经过圆变方段进入方形 90°弯引流嘴后形成射流，通过导流斗分流后进入换向器裤衩流向称重桶或水库. 导流斗在气缸的操纵下做正反行程运动，运动过程中光电传感器接收到信号触发计时器的启停，对集流时间 t_M 计时.

1.4　换向器检定

依据计量检定规程 JJG 164—2000《液体流量标准装置检定规程》[14]，采用行程差法对换向器进行检定，步骤如下：将流量调至换向器检定流量，稳定 10 min. 操作换向器换向 n（$n \geqslant 10$）次，分别将换入和换出时间记作 t_{1i} 和 t_{2i}.

$$\bar{t}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{1i}}{n}, \tag{1}$$

$$\bar{t}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{2i}}{n}, \tag{2}$$

$$s_5 = \frac{1}{t_{\min}}\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_{1i}-\bar{t}_1)^2}{(n-1)}\right]^{1/2} \times 100\%, \tag{3}$$

$$s_6 = \frac{1}{t_{\min}}\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_{2i}-\bar{t}_2)^2}{(n-1)}\right]^{1/2} \times 100\%, \tag{4}$$

$$u_4 = \frac{|\bar{t}_1 - \bar{t}_2|}{4t_{\min}} \times 100\%, \tag{5}$$

$$U_{\mathrm{Drel}} = \sqrt{s_5^2 + s_6^2 + u_4^2}, \tag{6}$$

式中：$\bar{t}_1$，$\bar{t}_2$ 分别为 t_1 和 t_2 的平均值；s_5，s_6 分别为 t_1 和 t_2 的 A 类相对标准不确定度；u_4 为行程时间差的 B 类相对标准不确定度；U_{Drel} 为合成不确定度.

在流量为 0.80 m³/s 下对换向器进行测试，设备采用光电传感器和毫秒表，检定最小时间 $t_{\min}=60$ s，检定数据如表 1 所示. A 类相对标准不确定度 s_5（$t_1=0.560$），s_6（$t_2=0.568$）分别为 0.003 7% 和 0.005 5%，B 类相对标准不确定度 u_4 为 0.003 7%，合成标准相对不确定度 U_{Drel}（$k=2$）为 0.015 2%.

表 1　换向器检定数据

Tab. 1　Test data for diverter　　s

序号	正行程 t_{1i}	反行程 t_{2i}
1	0.564	0.562
2	0.557	0.567
3	0.559	0.570
4	0.558	0.566
5	0.561	0.565
6	0.560	0.569
7	0.558	0.571
8	0.562	0.573
9	0.558	0.569
10	0.558	0.571

2 换向过程数值分析

在流量 $Q_t=0.8\ m^3/s$、导流嘴角度 θ 分别为 $-5.0°$, $-2.5°$, $0°$, $2.5°$ 和 $5.0°$ 时，采用计算流体力学(CFD)方法，对换向器进行气液两相流流动数值模拟.

2.1 数值模型方法

采用 VOF 两相流模型对换向器内的流态进行了数值模拟. VOF 两相流通过引入体积组分 α 函数及控制方程来表示混合流体的密度并跟踪自由液面[15-16]，这是求解气液两相流和自由液面流动的常用方法[17].

流体的密度和黏度计算如下：

$$\rho=\alpha_1\rho_w+\alpha_2\rho_g, \tag{7}$$

$$\mu=\alpha_1\mu_w+\alpha_2\mu_g, \tag{8}$$

式中：ρ 为流体的物性参数密度；μ 为黏度系数；α_1，α_2 分别为液相和气相体积组分，$\alpha_1+\alpha_2=1$；ρ_w，ρ_g 分别为液体和气体密度；μ_w，μ_g 分别为液体和气体黏度系数.

体积组分输运方程为

$$\frac{\partial\alpha_q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_q u_i)=R, \tag{9}$$

式中：R 为净相变率，计算中假设无相变，取 $R=0$.

由此，可以把两相流体当作单相介质来处理，计算内部流动状态，混合流体的连续方程和运动方程(N-S 方程)分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0, \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)+\rho g_j, \tag{11}$$

式中：u_i，u_j 为混合流体速度分量($i,j=1,2,3$)；p 为压力；μ_t 为湍流黏性系数；g_j 为 x_j 坐标轴方向的加速度.

数值计算采用二维定常数值模拟方法，运动方程采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭. 数值模拟的区域为换向器纵切对称面，从引流管至换向器裤衩延长段，边界条件水流进口为质量边界，空气进口和出口为开放边界，壁面为无滑移边界条件.

2.2 计算结果

对数值模拟结果进行处理，提取了液相体积分布图，如图 3 所示.

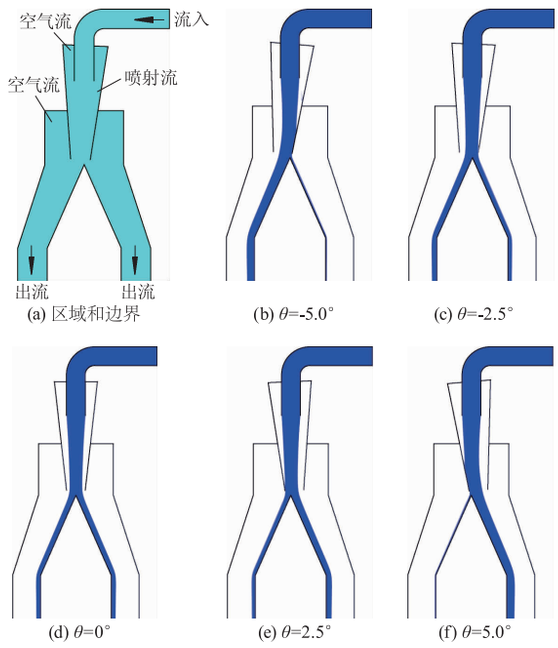


图 3 换向器数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation result of diverter

数值计算确定各角度的注入流量，通过 3 阶多项式拟合得到 Q_C 和 θ 的关系曲线，如图 4 所示. 由图可以看到，注入流量关于 $\theta=0°$ 具有反对称的关系，这是由 5 个角度关于 0°对称所决定；在 $\theta=0°$ 附近流量变化趋势缓慢，在距此区域较远位置流量变化趋势较陡. 上述 2 点均符合实际情况，并对拟合的曲线延伸，其与 $Q_C=0$ 和 $Q_C=0.8\ m^3/s$ 的交点分别为 $\theta=\pm5.71°$，即在这 2 个角度时水流分别开始和全部注入称重桶.

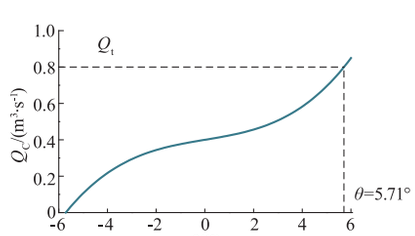


图 4 不同角度下的注入流量

Fig. 4 Collecting flow rate versus jet flow angle

3 换向器动态特性分析

3.1 运动过程

利用高速相机记录导流斗切换过程，并依据导流斗上标记的刻度分析其运动. 正反行程的记录时间均为 1.0 s，拍摄照片帧数为 80 帧. 在 $Q_t=0.8\ m^3/s$ 流量下的导流斗运动曲线如图 5 所示.

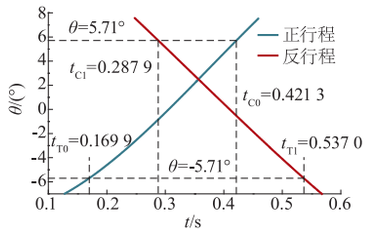


图 5　导流嘴运动过程

Fig. 5　Process of jet flow angle switching

由图 5 可以看到，正行程过程中在 $t_{T0}=0.169\ 9$ s 时刻导流斗角度 θ 为 $-5.71°$，根据图 4 此时水流开始注入称重桶，在 $t_{C0}=0.421\ 3$ s 时刻导流斗角度 θ 为 $5.71°$，根据图 4 此时水流完全注入称重桶，过程持续时间 $t_{d1}=0.251\ 4$ s；反行程过程中 $t_{C1}=0.287\ 9$ s 时刻导流斗角度 θ 为 $5.71°$，水流开始向水库注入，$t_{T1}=0.537\ 0$ s 时刻导流斗角度 θ 为 $-5.71°$，水流完全注入水库，过程持续时间 $t_{d2}=0.249\ 1$ s.

3.2　换向器动态特性

在 $t=0$ 时刻开始试验，持续 60 s 换向器开始做反行程运动，确定时间和注入流量的对应关系并绘制换向器动态特性曲线，见图 6. 图中 S 表示注入称重桶的水量；$A+E=0.096\ 6\ m^3$；$D+F=0.099\ 1\ m^3$.

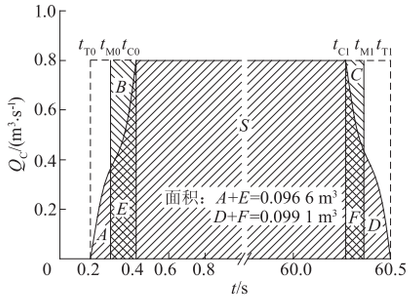


图 6　换向器动态特性曲线

Fig. 6　Diverter dynamic curves

对曲线分段积分得到不同时间段注入称重桶的水量. 正行程 $t_{T0}-t_{C0}$ 段，持续注入 $t_{C0}-t_{C10}$ 段，反行程 $t_{C1}-t_{T10}$ 段的注水量分别为 0.096 6，47.910 0，0.099 1 m^3，总注水量为 48.106 0 m^3. 由总水量计算的理论测量时间 $t_{th}=60.133$ s（即 48.106 0/0.8），而换向器总工作时间为 60.386 s，误差为 0.254 s（相对误差为 0.419%），因此要设置合理的计时启停位置，以获得更高的测试精度.

3.3　计时启停点的确定

根据对换向器动态特性曲线的积分结果绘制曲线，并根据“$A=B$ 且 $C=D$”的条件确定计时起始和结束的位置，A，B，C，D 的值通过以下公式求得：

$$A=\int_{t_0}^{t_1}Q_C\mathrm{d}t, \tag{12}$$

$$B=Q_t(t_2-t_1)-E, \tag{13}$$

$$C=Q_t(t_4-t_3)-F, \tag{14}$$

$$D=\int_{t_3}^{t_5}Q_C\mathrm{d}t-F, \tag{15}$$

式中：A 为计时开始前注入水量；B 为水量 A 的补偿值；C 为计时结束后注入水量；D 为水量 C 的补偿值；$E=\int_0^{t_2}Q_C\mathrm{d}t-A$；$F=\int_{t_3}^{t_4}Q_C\mathrm{d}t$.

将计算结果绘于坐标图上，A/B，C/D 曲线的交点即分别是计时的起点和止点，如图 7 所示. 图中，实线表示正行程，点划线表示反行程，为了便于对照，将正反行程的时间分别从零开始计，对应时刻的有效流量也在图上标出.

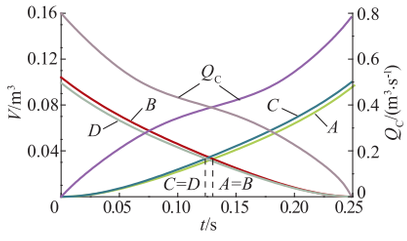


图 7　换向器计时启停位置确定

Fig. 7　Starting and stopping triggering points of diverter

由图 7 可以看出，满足条件的起止时刻分别为正行程 0.131 s 和反行程的 0.124 s，对应的出流嘴角度 θ 分别为 $-0.234°$ 和 $-0.096°$. 因此将计时器的触发设置在 $\theta=0°$ 左右位置，以此消除测量时间和换向器工作时间的误差.

4　结　论

针对水大流量标准装置研制了高精度的换向器，通过不确定度测试和换向过程分析得到如下结论：

1）测试表明所研制换向器的合成标准相对不确定度 $U_{Drel}=0.015\ 2\%$（$k=2$），可应用于高精度的静态质量法水流量标准装置.

2）通过对换向器动态特性的分析可以看到，换向器的正反行程误差得到了很好的控制，但是总集流时间和理论测量时间存在偏差，因此需要确定合适的计时器触发点.

3）计时器的触发位置设置在 $\theta=0°$ 左右，以此消除测量时间和换向器工作时间的误差，提高了水

流量标准装置的系统精度.

参考文献(References)

[1] 何成连,蒋玉华,张智彬,等. 南水北调工程水泵模型同台测试及试验台简介[J]. 水利水电工程设计,2006,25(2):29-32.
He Chenglian, Jiang Yuhua, Zhang Zhibin, et al. The brief introduction for pump model test and experiment of south-to-north water diversion project[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering,2006,25(2):29-32. (in Chinese)

[2] IEC 60193-1999, Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines-Model Acceptance Tests[S].

[3] 黄源芳,熊腾晖,田子勤. 三峡水轮机模型目击验收试验剖析[J]. 水力发电,2001(5):43-47.
Huang Yuanfang, Xiong Tenghui, Tian Ziqin. Analysis on visual acceptance tests of the turbine model for the Three Gorges Project[J]. Water Power,2011(5):43-47. (in Chinese)

[4] 陈忠宾,高从闯,刘徽. 溧阳抽水蓄能电站水泵水轮机模型同台对比复核试验简介[C]//抽水蓄能电站工程建设文集. 北京:中国电力出版社,2010:255-258.

[5] 陆力,高忠信,潘罗平,等. 50年来水力机电研究领域发展与回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2008,6(4):299-307.
Lu Li, Gao Zhongxin, Pan Luoping, et al. Review and prospect on hydraulic machinery research in the past 50 years[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2008,6(4):299-307. (in Chinese)

[6] 王秀瑛. 流量计量在自来水行业中的应用及发展[J]. 山西建筑,2002,28(5):89-90.
Wang Xiuying. The application and development of flow measuring in water supply industry[J]. Shanxi Architecture,2002,28(5):89-90. (in Chinese)

[7] 吴新生,廖小永,王黎,等. 外贴式超声波流量计的测量与在线校准[J]. 人民长江,2013,44(11):72-75.
Wu Xinsheng, Liao Xiaoyong, Wang Li, et al. Research on measurement and on-line calibration of outside-attached ultrasonic flow meter[J]. Yangtze River,2013,44(11):72-75. (in Chinese)

[8] 孟涛,王池,陈海滨,等. 用模型实验方法研究三峡电站流量计准确度[J]. 计量学报,2010,31(6):509-512.
Meng Tao, Wang Chi, Chen Haibin, et al. Study on the accuracy of flowmeter at Three Gorges power station by model experiment method[J]. Acta Metrology Sinica,2010,31(6):509-512. (in Chinese)

[9] 孟涛,王池,陈晓铭. 流量装置中换向器检定方法的研究[J]. 计量学报,2008,29(5):420-422.
Meng Tao, Wang Chi, Chen Xiaoming. Research on verification method of diverters in liquid flow facilities[J]. Acta Metrology Sinica,2008,29(5):420-422. (in Chinese)

[10] Yeh T T, Yende N P, Johnson A N, et al. Error free liquid flow diverters for calibration facilities[C]//Proceedings of the 2002 ASME Joint U. S., 2002:141-148.

[11] Pöschel W, Engel R, Dopheide D, et al. A unique fluid diverter design for water flow calibration facilities[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Flow Measurement, 2000.

[12] Marfenko I, Yeh T T, Wright J. Diverter uncertainty less than 0.01% for water flow calibrations[C]//Proceedings of the 6th International Symposium for Fluid Flow, 2006.

[13] Doihara R, Shimada T, Terao Y, et al. Development of weighing tank system employing rotating double wing diverter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(3):141-152.

[14] JJG 164—2000,液体流量标准装置检定规程[S].

[15] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):201-225.

[16] 吴玉林,唐学林,刘树红,等. 水力机械空化和固液两相流体动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:92-98.

[17] Yang W, Liu S H, Lin H. Viscous liquid sloshing damping in cylindrical container using a volume of fluid method[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(6):1484-1492.

(责任编辑 盛杰)