

流速仪主要结构性能对测流精度的影响分析

周冬生^{1,2}, 宗 军^{1,2}, 蒋东进³, 曹子聪⁴, 杨汉塘²

(1.水利部水文水资源监控工程技术研究中心,江苏 南京 210012;

2.水利部南京水利水文自动化研究所,江苏 南京 210012;3.江苏南水水务科技有限公司,江苏 南京 210012;

4.江苏南水科技有限公司,江苏 南京 210012)

摘 要:介绍流速仪结构性能,主要是转子特性、旋转支承结构设计要求与旋转轴动态密封装置原理,对确保流速仪测量精度方面进行阐释,并通过国内外旋桨式流速仪的比测进行验证,还简要介绍了旋杯流速仪的旋转支承结构与发信部件特点,为仪器研发与使用者更了解流速仪的结构和确保测验精度方面提供参考。

关键词:流速仪;转子;旋转支承;测流精度

中图分类号:P335^{+.1}

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)03-0062-04

1 概述

做好流速仪检定工作,确保河流流量测验成果准确性,才能更好地为国家建设服务(水文测[2006]54号)。在流速仪检定及其测流特性研究中发现,精确度、可靠性和稳定性是仪器测量精度的三个重要技术指标,密不可分。要确保流速仪测流精度高,除了需要水槽检定赋值精确外,仪器结构性能应能适应我国江河流速高、含沙量高等恶劣、复杂的工作条件。其中,影响仪器结构性能的因素包括:传感部分转子,旋转支承,旋转轴动态密封,以及发信部件,测流安装、悬挂结构等。

本文在总结回顾我国流速仪研发制造以及改进过程的基础上,分析流速仪结构性能上的改变对测流精度的影响。以帮助仪器使用人员了解仪器工作原理、结构性能,并能根据河流特性正确选择和使用仪器。在长期的使用过程中,及时维护仪器并科学地检测仪器性能,保证流速仪测验的精确度。

2 流速仪转子结构

流速仪性能水槽检定公式 $v=a+bn$ 中,系数 b 为流速仪转子旋转一圈水流运行距离。流速仪检定是应用物体相对运动原理:检定车携带流速仪以一系列匀速直线速度与静水作相对运动,即工况为层流。实际上江河水流为紊流,通过测流断面有一定的斜流。因此,流速仪转子结构特性对测流精度十分重要。

1941年,我国仿制了美国 Price 旋杯流速仪,但其流速上限为 3.5m/s,不能满足高流速测量要求。1956年,仿制前苏联 Ж-3 型旋桨流速仪,最高测速为 5m/s。在此基础上,几十年来,我国的水文仪器研发制造部门结合我国河流特性,经过多次技术变革,研制出符合我国测流特色的旋杯式和旋桨式流速仪。

2.1 流速仪转子响应水流方向特性

流量 Q 是测流断面面积 A 与垂流通过该断面平均流速 V_x 的乘积,即 $Q=AV_x$ 。一般来说,江河水流是紊流,当通过测流断面的水流为斜流 V 时,旋杯流速仪的旋杯转子具有全向性,测得流量偏大;旋桨流速仪的旋桨具有单向性,测得流量偏小。

在同一紊动水流中测流,旋杯流速仪读数大于旋桨流速仪。这是国际上业界共识,但评估不同。如美国 1963 年《土木工程》,“流速仪测量精度”一文作者 R.W.Cater, I.E.Anderson 认为:据苏联文献,旋杯流速仪测量误差可达 40%;无法证明紊动水流对 Price 旋杯流速仪的性能有明显影响;水流垂直方向分量对旋杯影响大于旋桨流速仪。

鉴于水流运动的复杂性,实验资料太少,多年来,国际上都难于做准确评估。我国同时使用以上两种流速仪。为避免同一河流使用结构性能不同的流速仪导致测流成果系统偏差,不利于上、下游水量平衡的整编,曾进行过旋杯—旋桨流速仪测流比测:

1963 年 11 月,在长江汉口段,用 LS25-1 型旋桨

流速仪 2 架和 LS68 型旋杯流速仪 8 架比测,共 114 组,比测结果偏差总平均为 1.66%;LS68 型偏大频率为 75.4%。

1990 年 6 月 13 日,“中美水文地质科学技术合作项目”在长江南京段进行流速仪比测。当时中方用 LS20B 型流速仪与美国 Price-AA 型旋杯流速仪,各 1 架,共比测 17 测次,平均偏差为 1.69%,偏大率分别为 17.6%、76.5%。

在我国,旋杯、旋桨这两类流速仪分别适用于中、低速和中、高速河流测量,应用比例约为 4:6,60 多年来累计生产总量约 20 多万架。

2.2 旋桨流速仪斜流(余弦)响应特性

1962 年,前苏联国立水文科学院实验研究提出,旋桨最佳斜流响应特性参数 P 经验公式为:

$$P=\phi/b \quad (1)$$

式中: ϕ 为旋桨回转直径; b 为旋桨水力螺距。当 $P=0.60$ 时,斜流响应特性最佳。

根据试验,我国 LS25-1 型旋桨流速仪(1957 年研制) $\phi=120\text{mm}$, $b=250\text{mm}$, $P=0.48$ 。在 40° 斜流下,测流成果斜流响应特性较差。改进型 GP-55 型旋桨: $\phi=120\text{mm}$, $b=200\text{mm}$, $P=0.60$,误差小于 5%。LJ20 系列旋桨流速仪的旋桨按式(1)设计,同 GP-55 型,旋桨斜流响应特性较好。

1972~1976 年期间,国际气象组织(MWO)水文学委员会组织国际流速仪野外比测,确定旋桨流速仪斜流响应技术指标:

$$((V \times \cos A - V_x)/V_x) \times 100 \leq \pm 3\% \quad (2)$$

式中: V 为斜流速度; V_x 为垂直断面流速; A 为斜流 V 与垂直断面流速 V_x 夹角。

德国知名品牌的旋桨流速仪等大多按式(2)设计。1993 年,美国地质调查局(USGS)组织国际先进流速仪进行室内、外比测检定,我国参比的 LS20B 型流速仪与德国 C-31 型仪器旋桨结构参数相同,斜流响应特性相当,都符合技术要求。

3 旋转轴动态密封装置

精密仪表球轴承制造及其清洗(400 号汽油)、检测、装配等工作都应在无尘、恒温工作室按严格工艺进行,仪器工作条件相当严格,只有在洁净的油浴中才能正常工作。为此,近年来研发的旋桨式流速仪轴承油室前方设置有良好的旋转轴动态密封装置,要求无密封阻力,以确保仪器低速灵敏度和测流精度。

4 流速仪旋转支承结构

流速仪水槽检定公式中,系数 a 即速度头,在流速仪转子运转过程中,用以克服仪器内摩阻力,当仪器在高速、高含沙量江河中测流,轴承油室进水,仪器内摩阻力增大,即可影响测流精度,因此,流速仪旋转支承应具有优良的旋转轴动态密封结构。

4.1 旋桨流速仪

旋桨流速仪旋转支承结构为水平式,技术要求:旋转支承摩阻力矩小而稳定,以满足低流速测量;旋转支承结构强度大,以适应高速水流冲击力;旋转支承跨度大,且旋转体重心位于旋转支承中间,以适应高速测流稳定性;良好的旋转轴动态密封性能,以防轴承油室进水(沙),破坏精密仪表球轴承正常工作,最好是工作一个汛期无须清洗;轴承轴向游隙自然形成,无需调整;油室大;装配简易。

(1) LS25-1 型旋桨流速仪

1956 年,我国仿制前苏联 Ж-3 型流速仪,命名 LS25 型,样机实地使用实验结果显示,旋转支承轴承油室进水(沙),仪器不能正常工作。1957 年,聘请外国专家来华协助改进,称 LS25-1 型(见图 1)。

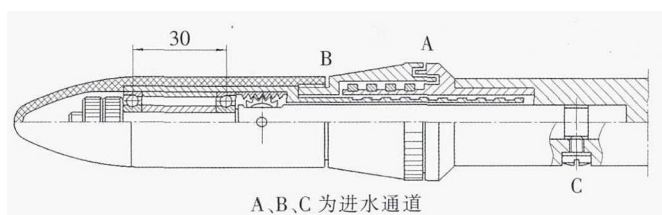


图 1 LS25-1 型旋桨流速仪旋转支承、轴承油室结构图

Fig.1 The structure of LS25-1 type propeller flow meter rotating support and bearing oil chamber

经过改制、实验,在不影响原仪器性能的情况下,完成样机改造。样机试用运行情况如下:分别在长江南京段(11 架)、汉口段(3 架)用拖船以速度 3~3.6m/s,水深 3m 的条件进行实验,运转时间为 5h,轴承油室未进水的仪器数量分别为 7 架和 1 架,占总数的 64%、33%;在黄河陕县流量站,流速为 2.2~2.7m/s,水深 1.5m,工作时间分 2h 和 4h(各 2 架),轴承油室均未进水。

在试运行过程中获得以下 5 条经验:经水槽检定,低速性能符合原仪器性能;轴承油室有少量进水不影响测流精度;仪器零件加工精度及安装质量等对轴承油室密封都有一定的影响;反牙螺丝套与旋桨螺纹接口处涂黄油措施具有显著成效;工作者应熟悉仪器结

构及其性能,并能正确安装。

(2)LS25-3 型旋桨流速仪

1981年,总结以前流速仪轴承油室易进水,GCr15球轴承易生锈等问题,对仪器结构进行了局部改进,研制出LS25-3型旋桨流速仪:旋转支承跨度增大至30mm,将轴套材料由铜改为铝材,并缩短长度,使旋转部件重量减轻,旋转重心前移至后轴承上。高速运转比较稳定。采用D25MX系列单列向心球轴承,材料为4Cr13不锈钢。通过多年水文站实地使用证明,仪器轴承油室防水性能有一定的提高,球轴承不生锈。

(3)LS20B 型旋桨式流速仪

LS20B型旋桨式流速仪是总结我国多年来流速仪高速、高含沙量条件下测流的经验与存在的问题,通过理论分析设计而成:通过水槽15m/s高速检定,线性良好。在黄河龙门、吴堡、三门峡等水文站实测高速5m/s、含沙量100kg/m³,工作一个汛期,每次测量后,只须用毛巾擦拭仪器表面污水,检查仪器灵敏度达标,即把仪器安放于仪器箱中,轴承油室均不拆洗,汛后检修轴承油室无水,既确保测流精度,又方便测站对仪器的维护工作。1993年该仪器参加美国地质调查局(USGS)组织的国际流速仪比测检定,成果达标,并得到好评。

LJ20系列旋桨式流速仪是精化LS20B型高流速仪结构,并按仪器每一信号的转数系列化(转/信号):A型为20;B型为0.5;C型为1。

4.2 新型旋桨流速仪旋转支承结构

近几年,随着科技的发展与新型材料的不断应用,流速仪的旋转支承结构也不断改进,更加趋于合理。

旋桨绕固定轴旋转,其运动方程为:

$$I(d\omega/dt)=M \quad (3)$$

式中: I 为旋桨转动惯量; ω 为旋桨角速度; t 为时间; M 为水流动力矩。

江河水流为紊流,速度为矢量,其大小、方向随时间 t 不断地变化,即输入量 M 是时间 t 的函数。流速仪旋桨角速度 ω 响应水流速度变化与 M 成正比,与 I 成反比。

为快速响应水流速度变化,提高测流精度,流速仪旋转、支承结构要求:(1)转动系统转动惯量 I 应小。为此,旋桨采用接近中性浮力的PC塑料;(2)增大旋桨受水面积,以增大水动力矩 M ;(3)转动部分重量轻,转动半径小,以减小旋桨转动惯量 I ,为此,旋转体与支承固定结构与上述仪器相反,即:旋转部分为,旋桨、轴套、内隔套、密封内套圈、内隔套等;支承固定部分

为:旋转支承部件、轴承外圈、外隔套和迷宫外套等。

高速旋转支承结构稳定性包括:旋转支承跨度的大;旋转重心在两支承中间;转动套伸出支承点外的长度短;转动部分重量轻;旋转部件转动惯量半径小;高速运转平稳。

低速性能包括:启动速度 V_c 、起转速 V_0 ,以及旋桨旋转一周轴承摩阻力矩 M 值的变化,低速 $V \sim n$ 曲线的线性度。影响低速性能因素:轴承摩阻力矩;与轴承相配合零件的精度及其安装质量,特别是确保轴承正常运转必须的装配游隙: $\Delta=0.02\text{mm}$;发信接点工作压力;旋桨承受水流动力矩;轴承清洗工艺、质量;仪器油质量及其理化性能等。

为实现以上性能,采取的措施主要有:选用仪表精密微型球轴承,摩擦力矩 $M<0.5\text{g}\cdot\text{cm}$,小而稳定;旋转支承结构的前轴承为悬浮式,其自身工作游隙即为旋转部件的安装游隙,无须调整;发信结构采用国际上先进的磁敏元件,阻力极小而稳定;增大旋桨受水面积;清洗轴承用半自动化清洗设备;仪器油理化性能符合相应的国家标准。轴承油室空间大,储油量多,有利于轴承充分润滑,并保持较长时间(一个汛期)。

基于上面旋转支承结构设计,新型系列仪器旋转支承结构具有很好的可靠性、稳定性,使用、维护都比较方便。

4.3 旋杯流速仪

旋杯流速仪旋转支承结构包括:旋轴部件和旋转支承部件。旋杯流速仪旋转支承结构为垂直式,在仪表轴尖支承中,这种结构只适用于作用力为轴向、轻负荷,低转速场合。旋杯流速仪是用于测量水流速度,作用力为径向,故适用于低速测量。在高速、高含沙量河流测量,当高速上限为3.5m/s,作用力达2.5kg,在紊流状态下其载荷性质为冲击性,轴尖支承结构损伤大,对测流精度、支承付工作寿命都有重要的影响。

1955年,当时我国尚无旋桨流速仪,为汛期高速测流,对旋杯流速仪旋转支承结构做了大量的实验研究,并定型。以下分析LS68旋杯流速仪、LB70系列旋杯流速仪支承结构特性。

(1)LS68 系列旋杯流速仪

LS68系列仪器旋转支承结构:底部为顶针、顶窝支承副,承受旋转部件全部重量和水流径向作用力的83%,为旋转支承的主支承副;上部为圆柱支承副;顶部为钢球限位支承。

(2) LB70 系列旋杯流速仪

旋转支承结构为, 旋转轴下部安装一通孔宝石轴承, 孔上方有一不锈钢小球; 由安装在下轭架上的硬质合金轴颈端面支承, 组成复合型支承结构。

工作机理及特点: 低速时, 由硬质合金轴颈端面与小钢球组成轴承付, 工作性质为滚动摩擦, 摩擦阻力小, 仪器灵敏度高; 中速时, 水流推动旋杯-旋转轴部件, 自动转换为轴颈外圆配通孔宝石轴承孔, 工作性质为线接触, 结构强度高, 承载能力强, 可在较高速度, 较长时间下正常工作。旋转支承结构的轴向工作游隙为 $\Delta=0.03\sim0.10\text{mm}$, 技术要求不严格, 调整容易; 支承副油室, 为安装在护套上方, 根据波义耳定理, 河水不易侵入, 只需在工作点注入少许润滑油, 便可较长时间工作; 支承副零件均为防锈材料(不锈钢、硬质金和宝石轴承), 维护简便, 可在水中长期工作; 材料结构强度高, 硬度高, 硬度差值大, 摩擦阻力矩小; 零配件通用性强, 无须调整。

5 旋杯流速仪测流悬挂结构

按理论要求, 流速仪检定与测流安装应相同, GB/T21699-2008 规定, 旋杯流速仪检定安装时, 旋杯转轴与水平垂直度偏差小于 2.5° , 早期旋杯流速仪检定采用自由悬挂方式。由于该仪器上方的传信部件受水面积和高度远大于下面的轴针支承部件, 当速度很高时, 仪器头部即向上仰, 最大仰角达 13° , 并上、下摇摆, 导致检定误差较大。

近几年新生产的系列旋杯流速仪克服了以上缺点, 前方的旋转支承和发信部件体积较小, 结构对称, 不存在上述缺陷, 并且可采用悬索悬吊和测杆安装兼用两种结构。

6 流速仪发信结构

流速仪发信结构应与国际同步, 采用磁敏干簧管。接触阻力微小, 寿命 1 千万次, 更换、安装耗时仅 10s。

7 结语

仪器精度包括精确度, 可靠性和稳定性三个技术指标, 密不可分。在江河恶劣条件下工作的流速仪, 评估仪器测量精度应综合分析仪器结构性能, 工作可靠性和稳定性, 以及长期使用中, 对仪器性能正确、及时的维护和科学检测。

要确保河流流量测验成果准确性, 首先要做好流速仪检定工作, 赋值正确。在高速、高含沙量恶劣条件下工作的流速仪, 其结构性能更为重要。除外, 测流中仪器配套的铅鱼结构流线型, 其与流速仪的距离对流速的影响, 悬索偏角, 流向, 以及测流方法等对测流精度都有重要影响, 都应深入实验研究。

参考文献:

- [1] Г.В.Железняков. Исследование работы гидрометрических приборов [R]. 1958.
- [2] 姚永熙, 杨汉塘. 水文仪器研究与设计[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011. (YAO Yongxi, YANG Hantang. Hydrological Instrument Research and Design [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2011. (in Chinese))
- [3] 杨汉塘. 旋桨流速仪检定方程主参数 K 值的几何检定法 [J]. 水文, 1994, (5):6-11. (YANG Hantang. The geometric calibration of the main parameter K of the calibration equation for propeller-type current meter [J]. Hydrology, 1994, (5):6-11. (in Chinese))
- [4] 杨汉塘. 流速仪运动方程主参数 K 值的一点检定法[J]. 水利水电科技进展, 1995, (5):45-48. (YANG Hantang. One point test of main parameters K value equation for flow meters [J]. Water and Hydropower Technology Progress, 1995, (5):45-48. (in Chinese))

Influence of Main Structures of Velocity Meters on Measurement Accuracy

ZHOU Dongsheng^{1,2}, ZONG Jun^{1,2}, JIANG Dongjin³, CAO Zicong⁴, YANG Hantang²

(1. Hydrology and Water Resources Engineering Research Center for Monitoring, MWR, Nanjing 210012, China;

2. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, MWR, Nanjing 210012, China;

3. Nanshui Water Technology Co., Ltd of Jiangsu Province, Nanjing 210012, China;

4. Nanshui Technology Co., Ltd of Jiangsu Province, Nanjing 210012, China)

Abstract: The article introduces rotor, rotating bearing structure and rotating shaft dynamic seal devices, analyses there effects on measurement accuracy of velocity meters, by testing domestic and international propeller velocity meters, the article also describes the rotary support structure and the signal generator of cup-type current meters. The article provides references for instrument R&D and the users to deeply understand the structure of the current meter and ensure its test precision.

Key words: current meter; rotor; rotating bearing structure; flow measurement precision