

超声水表零流量特性的检测与控制

姚 灵

(浙江省水表研究院, 浙江省 宁波市 315032)

摘要: 在零流量条件下, 当超声水表输出值中含有显著漂移特性时, 其小流量测量段的示值误差就会出现较大的不确定性, 严重时会影响该流量段水表测量结果的准确度。通过分析漂移产生原因、采取有效技术手段、在出厂检验中设置辅助测量项目等措施来及时发现并基本消除隐含在水表计量特性中的漂移因素, 可以大大降低超声水表测量值随时间发生变化的程度。

关键词: 超声水表 零点漂移 水表计量性能 测量重复性 测量再现性

中图分类号: TB937

文献标识码: A

The Testing and Control About Ultrasonic water meter Zero Flow Characteristic

YAO Ling

(Zhejiang Province Water meter Research Institute, Zhengjiang Ningbo 315032, China)

Abstract: Under the condition of zero flow, when the ultrasonic water meter output value contains obvious drift characteristics, its will appear large uncertainty error of indication at small flow measurement range, seriously its will affect the water meter accuracy of measurement results. By analyzing the causes and take effective technical measures, setting auxiliary measuring project in the factory inspection, to timely discover and basically eliminated the implicit drift in the water meter measuring characteristic factors, ultrasonic water meter can be greatly reduced the extent of the measured values change over time.

Key words: ultrasonic water meter; zero drift; water meter measuring performance; measurement repeatability; measurement reproducibility

0 引言

超声水表是一种全新的电子水表。这几年来随着产品成熟度的提高, 超声水表正在逐步进入人们视线, 并开始应用于供排水行业的水计量与节水管理。

超声水表采用无机械运动机构的水流量传感器、精密计时电路和嵌入式计算机系统软硬件, 因此具有流量测量范围宽, 测量准确度高, 使用寿命长, 压力损失小, 信号容易处理和传输等特点。与传统机械水表不同, 很多电子水表都存在有难以彻底消除的所谓零点漂移的特性, 给水表小流量测量性能造成致命的影响。因此, 如何及时发现水表零点漂移特性、控制漂移对超声水表测量准确度带来的影响是水表制造企业所必须掌握的重要技术能力。

1 基本工作原理

大口径超声水表通常采用“传播时间差法”^[1]与一体式(即将超声换能器、信号处理部分与测量管一起安装, 组成整机出厂)对射结构设计。在换能器切换开关控制下, 换能器 A 和 B 均能发射或接收超声波信号。当换能器 A 发射超声波信号时, 换能器 B 则接收信号; 反

之，当换能器 B 发射超声波信号时，换能器 A 则接收信号；这样连续交替工作并在精密计时电路配合下，就能将超声波由换能器 A 至 B 的时间（即正向传播时间）以及由换能器 B 至 A 的时间（即逆向传播时间）分别测量出来，经信号处理电路和嵌入式计算机系统软硬件的运算与处理，超声水表就可完成管道内水的瞬时流量和累积流量的测量。大口径超声水表工作原理示意图见图 1 所示^[2]。

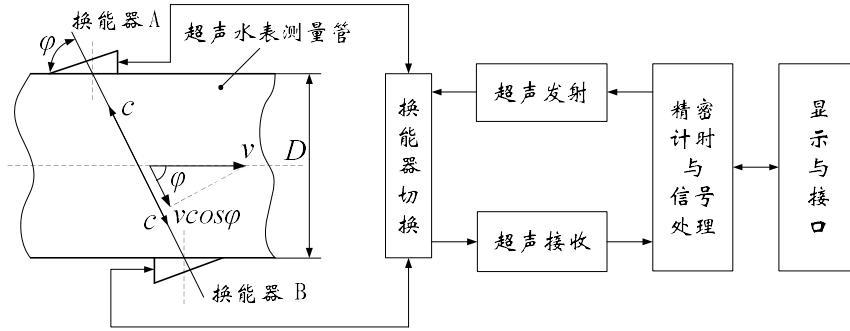


图 1 大口径超声水表时差法工作原理示意图

式 (1) ~ (3) 是超声水表“传播时间差法”计算公式，通过获得超声波的正、逆向传播时间，可以求得超声波传播时间差、管道线平均流速、体积流量和累积流量等结果。

$$t_{A \rightarrow B} = \frac{D / \sin \varphi}{c + v \cos \varphi} ; \quad t_{B \rightarrow A} = \frac{D / \sin \varphi}{c - v \cos \varphi} \quad (1)$$

$$\Delta t = t_{B \rightarrow A} - t_{A \rightarrow B} \approx \frac{2Dv}{\tan \varphi c^2} ; \quad v = \frac{D}{2 \sin \varphi \cos \varphi} \left[\frac{\Delta t}{(t_{A \rightarrow B})(t_{B \rightarrow A})} \right] \quad (2)$$

所以

$$q_v = A \cdot (kv) = \frac{\pi D^2}{4} \cdot (kv) ; \quad V = T \cdot q_v \quad (3)$$

式中 $t_{A \rightarrow B}$ —超声波正向传播时间； $t_{B \rightarrow A}$ —超声波逆向传播时间； Δt —超声波正、逆向传播时间差； v —流体轴向线平均速度； c —超声波传播速度； φ —超声波传播方向与管道流速方向间夹角； A —管道截面积； D —管道直径； k —修正系数； q_v —封闭管道内水的瞬时体积流量； V —封闭管道内水的累积流量； T —测量时间。

从式 (1) 和 (2) 中可以看到，当任一方向超声波的传播时间 $t_{A \rightarrow B}$ 或 $t_{B \rightarrow A}$ 发生异常变化或引入干扰和噪声时，都会引起超声水表传播时间差 Δt 的异常变化，其结果是瞬时流量和累积流量值发生变化，最终导致水表示值误差改变，超声水表工作出现不稳定。

2 产品主要技术指标

超声水表性能指标是由国家标准 GB/T 778.1~3-2007《封闭满管道中水流量的测量 饮用冷水水表和热水水表》和国家计量检定规程 JJG 162-2009《冷水水表》规定的，而这些标准和规程等同采用了国际标准 ISO 4064: 2005 和国际建议 R49 的内容，因此我国水表性能指标与国际标准是一致的^[3]。

超声水表是电子类水表产品，因此除了应遵循标准和规程中所规定的通用技术指标外，还应遵循带电子装置水表所特有的技术指标和要求。对水表性能评定，目前主要分为检定和型式评价等两种。就超声水表制造而言，通常应重点关注其计量性能及工作稳定性与可靠性等特性；对电子水表的环境试验（如气候环境、机械环境和电磁环境试验）、压力损失、承压强度、被测介质温度与压力影响以及耐久性试验等指标，通常放在新产品型式试验与评价阶段中进行^[4]。

从现行国家计量检定规程看，水表检定（含首次检定、后续检定和使用中检定）项目主要有水表的“示值误差检定”和“密封性检查”、“外观和功能检查”等三方面。除了密封性、外观和功能检查外，检定项目中涉及水表计量性能指标的只有示值误差这一项，这对机械类水表而言是完全能够满足评价要求的；但对电子类的超声水表，如果其设计不合理、电声转换器件和计时芯片选用不当、相关参数匹配不佳、数据处理方法有瑕疵等，就会出现局部计量性能随时间发生显著变化的问题。因此在水表检定和出厂检验时，仅用示值误差单次测量结果来评定电子类水表计量性能是否符合要求是不够充分的，为此应补充能反映电子类水表测量重复性和测量复现性的辅助指标，来更加全面评价这类新型电子水表的计量性能。

3 零流量特性的分析

在检验超声水表计量特性时，会发现个别水表放置一段时间后小流量测量区域的示值出现变化的现象，有的甚至超出标准规定的最大允许误差的范围；也有些水表多次重复测量结果的分散性较大，导致单次测量结果的可信度下降。表 1 是某型号 DN100、R250 超声水表示值误差随时间发生变化的情况，表 2 是同一超声水表多次重复测量的结果，图 2 是将表 1 数据按时间坐标进行图示化处理。从表和图中可以看到，存在设计和制造缺陷的超声水表如果仅做单次示值误差测量，是很难发现其计量性能变化隐患的。

表 1 某型号 DN100、R250 超声波表稳定性测量结果

检定流量点	标准规定的最大允许误差	“示值误差检定”结果 (t_0 时间)	第一次稳定性测量 (t_1 时间)	第二次稳定性测量 (t_2 时刻)	第三次稳定性测量 (t_3 时间)
Q_1	$\leq \pm 5\%$	- 3.0 %	- 1.8 %	- 0.7 %	- 2.5 %
Q_2	$\leq \pm 2\%$	+ 1.2 %	+ 2.2 %	+ 2.8 %	+ 0.8 %

表 2 某型号 DN100、R250 超声波表重复性测量结果

检定流量点	重复性指标	第一次测量	第二次测量	第三次测量	平均值 \bar{x}	标准偏差 σ
Q_1	$\leq \pm 5\% \times 1/3$	- 2.4 %	- 0.1 %	+ 1.6 %	- 0.30 %	2.01 %
Q_2	$\leq \pm 2\% \times 1/3$	+ 0.8 %	+ 1.7 %	- 1.8 %	+ 0.23 %	1.57 %
Q_3	$\leq \pm 2\% \times 1/3$	+ 0.8 %	+ 1.2 %	+ 0.5 %	+ 0.83 %	0.35 %

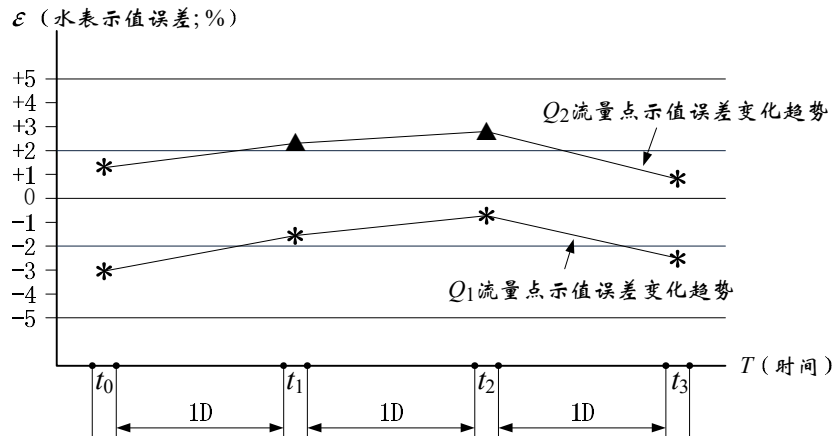


图 2 超声波表稳定性测量结果示意图

导致超声波表出现计量性能随时间变化或多次测量不一致的主要原因是个别水表存在有“零漂”或“零点不稳定”的现象。当被测管道内流量为零时，根据式 (1) 和式 (2)，超声波表的传播时间差为零，水表输出也应为零。但如果设计、制造中存在有缺陷，水表在零流量条件下的输出实际并不为零，主要会出现如下三种情况：1) 零位数据不为零，但恒定偏离某一值；2) 零位数据在一定区域内作随机变化，且以平稳随机过程为主；3) 零位数据除了作随机变化还含有随时间长期变化的趋势项。对第一种情况，可以在零流量情况下进行一次校正，就可基本消除所谓“零漂”的影响；第二种情况，应将含有“零漂”的测量数据作大数据量的均值化处理，并以统计值作为测量结果。数据的均值化处理，可以大大削弱因随机特征引起的“零点不稳定”，但同时也会影响超声波表测量的实时性；第三种情况，

大数据量均值化处理只能消除随机变化的影响，但对由趋势项引起的时间漂移则无能为力。因此，对这种情况只有两个选择，第一是选用性能更好地精密计时芯片和元器件，其次是压缩超声水表的测量范围，使零漂趋势项对测量的影响程度降到最低点。

图3是超声水表测量特性出现“零漂”时的示意图。如果零漂影响量足够小，或零漂接近为恒定值，则不会对水表测量结果产生显著的影响。除此之外，只有设法将零漂影响量控制在很小范围内，使超声水表在小流量（如分解流量 Q_2 和最小流量 Q_1 ）时的示值误差不超出最大允许误差的范围。

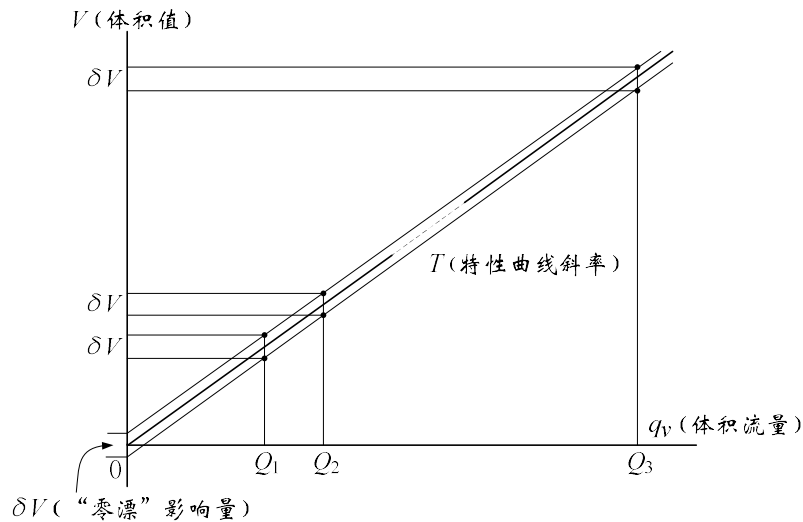


图3 超声水表流量测量特性出现“零漂”时的示意图

图3中 δV 为一微小量，它是水表“零漂”影响下的零流量体积值，可由下式计算得到

$$\delta V = \varepsilon \cdot T \quad (5)$$

而水表测量时的正常输出值为（内含零流量体积值）

$$V = Q \cdot T \quad (6)$$

所以，“零漂”影响量对超声水表示值的影响程度可由下式来评价

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\varepsilon \cdot T}{Q \cdot T} = \frac{\varepsilon}{Q} \quad (7)$$

式中 δV —管道流量为零时，因“零漂”影响水表输出的零流量体积值； ε —“零漂”影响量； T —测量时间； V —水表累积流量输出值； Q —水表测量时的平均瞬时流量值。

由于累积流量 V 与平均瞬时流量 Q 成正比，而 δV 为一微小量，因此在测量时间 T 相同条件下，在流量值较大的测量范围内， δV 对水表示值误差产生的影响会非常小，可以忽略不计；而对最大允许误差只有 $\pm 2\%$ 、高区最小流量值的分解流量 Q_2 而言，“零漂”对其示值

误差的影响则是最大的，而且影响量随着测量范围 Q_3/Q_1 的增加而增大。

另外，在分解流量 Q_2 附近，管道内流态多数处于“过渡流”状态。这一流态下的流体分布通常不稳定，容易受到外界因素影响使其分布发生不可预计的变化，这样也会间接影响到超声水表在 Q_2 的测量重复性和稳定性^[2]。

设计指标确定后，生产制造过程中对“零漂”影响量超出允许范围的超声水表及部件可以通过工序检验予以剔除或维修，当然也会有个别水表及部件因漏检未被发现而流出生产工序。这就是为何需要建立辅助测量项目来确保水表计量性能符合使用要求的原因。

4 抑制“零漂”影响的主要方法

抑制“零漂”影响可以从以下几个方面着手：1) 分析造成超声水表零流量特性劣化的各类内、外部影响因素；2) 选择合理的设计方法与指标；3) 控制外部测量环境，使其符合参比或额定条件；4) 超声换能器输出幅值应长期稳定并配对工作^[5]；5) 时间测量终止点(Stop 点)的阈值设置应符合设计要求，并留有冗余度；6) 发射激励与接收信号时，换能器压电元件应处于无振动静止状态^[6]；7) 采用零流量输出值极低的精密计时芯片（如零流量输出值至少应小于 $\pm 0.5\text{mm/s}$ ）；8) 测量结果应进行大数据量的优化均值处理；9) 超声水表测量管及相关零部件应进行稳定性时效处理等^[7]。

5 增加出厂辅助检验项目

电子类超声水表在进行出厂检验或首次检定时，除了做水表“示值误差检定”项目外，有必要补充两项能综合反映超声水表工作稳定性的辅助测量项目。

(1) 重复性辅助测量项目

可参照执行水表最新国际标准 ISO 4064:2014 中“7.2.4 重复性”条款：

水表测量结果应能重复：在同一流量下，水表 3 次测量值的标准偏差不应超过最大允许误差的 1/3（测量应在额定流量范围内的 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 下进行）。

(2) 改变测量时间的再现性辅助测量项目

根据水表制造企业对计量性能存在“零漂”的超声水表长期跟踪试验表明：1) “零漂”等因素对超声水表示值误差影响会在较短时间内发生（即时效性）；2) 超声水表因“零漂”发生计量性能变化会限定在一定范围内，不会出现持续发散的情况（即有界性）。因此可以制订相应的改变测量时间的再现性辅助测量项目：

在 Q_2 流量下测量超声水表的重复性和示值误差，将检验合格的水表放置 1 周后在相同的安装与测量方法、相同的测量条件下进行重复性和示值误差项目检验，两项指标均应符合标准规定的要求。

6 结语

通过一段时间对成批超声水表的出厂检验表明,经严格工序质量控制后的超声水表其计量性能总体上还是非常稳定的,由“零漂”影响水表示值误差的情况也是比较少见的。但也不能排除,由于设计、制造和质量控制水平的参差不齐,会有个别计量性能不稳定、不可靠的超声水表产品流出生产企业。因此,尽快建立电子类水表整机辅助测量项目、剔除个别计量性能不稳定水表的工作是很有必要的。

参考文献

- [1] BS ISO. BS ISO/TR 12765:1998, Measurement of fluid flow in closed conduits—Methods using transit-time ultrasonic flowmeters[S].1998
- [2] 姚灵. 电子水表传感与信号处理技术 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2012, 96-162
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 778.1—2007/ISO 4064:2005, 封闭满管道中水流量的测量 饮用冷水水表和热水水表 第1部分: 规范[S]. 2007
- [4] ISO . ISO 12242:2012 (E), Measurement of fluid flow in closed conduits—Ultrasonic transit-time meter for liquid[S]. 2012
- [5] 栾桂冬、张金铎、王仁乾. 压电换能器和换能器阵列(修订版) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005, 73-100
- [6] 林书玉. 超声换能器的原理及设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2004, 207-256
- [7] 姚灵. 超声水表测量误差分析及处理 [J]. 仪表技术, 2015. 5: 1-4

项目介绍: 浙江省优先主题重点工业项目(2010C11025); 宁波市重大科研攻关项目(2009B10003)

第一作者简介: 姚灵(1953-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事几何量精密仪器和水流量测量仪表的研究与开发

联系方式: 宁波市 江北区 洪兴路 355号, 邮编: 315032, 电话: 13806630959、0574-88195868
邮址: 13806630959@139.com

注: 本文曾发表在《仪表技术》2016年第9期上