

智能水表流量测量特性校正技术的研究

中国计量协会水表工作委员会智能水表技术工作组
宁波水表股份有限公司（浙江省水表研究院） 姚灵

1. 概述

水表流量测量特性的计算机校正是智能水表的一项重要核心技术。通过这项技术，可以对智能水表流量测量特性的非线性部分作出数字化校正，使其在测量范围内的示值误差符合标准要求，达到较为理想的状态，即：误差曲线平直且接近于零误差位置，见图 1。

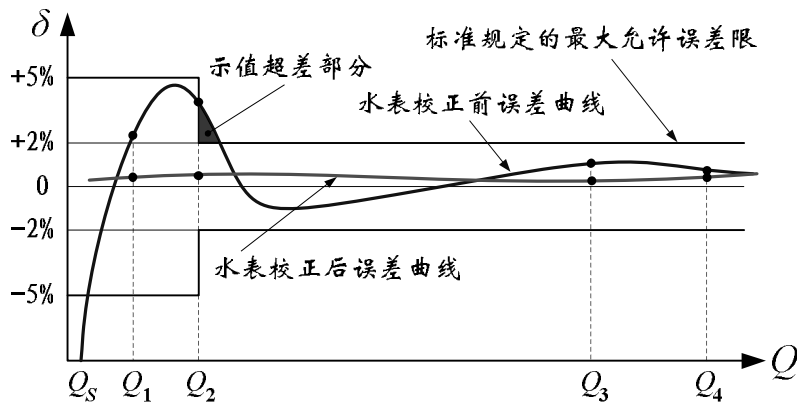


图 1 叶轮式电子显示水表误差曲线校正示意图

智能水表流量测量特性主要由传感器特性决定的。目前智能水表流量传感器最常见的有：叶轮式、超声式、射流式和电磁式等几种。这些传感器当流量测量范围拓宽时，其特性就会出现明显的非线性，如：叶轮式水流量传感器因采用“流-固耦合”结构等原因，在流态转换处存在着固有的非线性；超声式水流量传感器测得的管内线平均流速与管内面平均流速之间存在着非线性；射流式水流量传感器当流体粘性力起主导作用时就会在小流量测量段出现非线性；电磁式水流量传感器因干扰信号叠加时也会在小流量测量段产生非线性。

采用嵌入式计算机校正智能水表非线性特性的方法有很多，但要

证明特性校正后的水表在流量测量范围内的示值误差均落在期望区间内（即标准规定的最大允许误差范围内），需要建立一套科学的评判标准和方法进行有效识别和确认。

目前我国尚无识别和确认智能水表特性校正效果的评判标准和方法，这将有可能存在因不当校正而导致水表非流量检测点示值误差超差且未被发现的风险，即：当特性校正后的成批水表产品出厂时，由于产品批特性的不一致，有可能引起部分水表某些流量测量段的示值误差超出标准规定的允许值，存在所谓“隐性超标”的现象，其结果会使水表计量不可靠、不准确。

图 2 为成批水表流量测量特性未作校正时的误差曲线发散图。粗实线是抽样智能水表样品的平均误差曲线（正常情况下可以代表整批产品的平均误差曲线），虚线为个别特性异常水表的误差曲线。

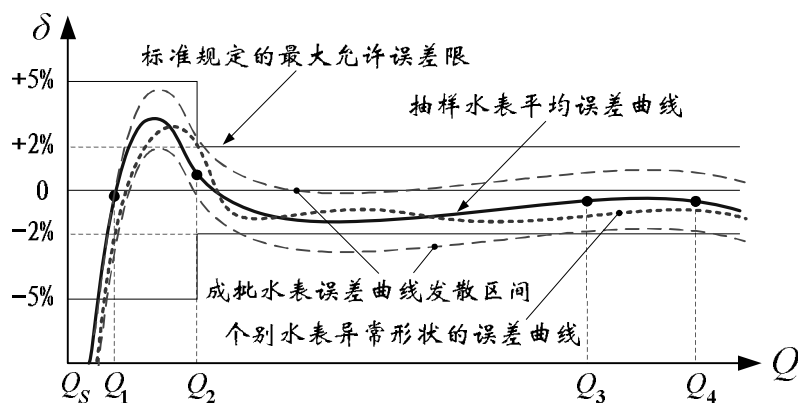


图 2 叶轮式电子显示水表流量测量特性未校正时的误差曲线发散图

2. 智能水表流量测量特性的计算机校正方法

2.1 特性校正技术的应用范围及原理

智能水表流量测量特性的计算机校正方法主要适用于内置嵌入式微型计算机系统、相关信号处理软件和算法、以及电子显示器的电

子水表和带电子装置的机械水表，如：叶轮式电子显示水表、超声水表、射流水表、电磁水表等。

当水表叶轮等机械运动传感机构输出的旋转量通过机电转换装置转化成电信号，或由无机机械运动传感机构的流量传感器（如：超声、射流、电磁等）输出的电信号经信号预处理单元处理输入到计算机，水表就具备了对其“输入-输出”特性进行数字化非线性校正的条件。校正的目的是希望水表的“输入-输出”特性曲线呈现线性（直线）特性，以保证其在设计流量测量范围内的示值误差曲线形状接近于直线，见图 3 和图 4。

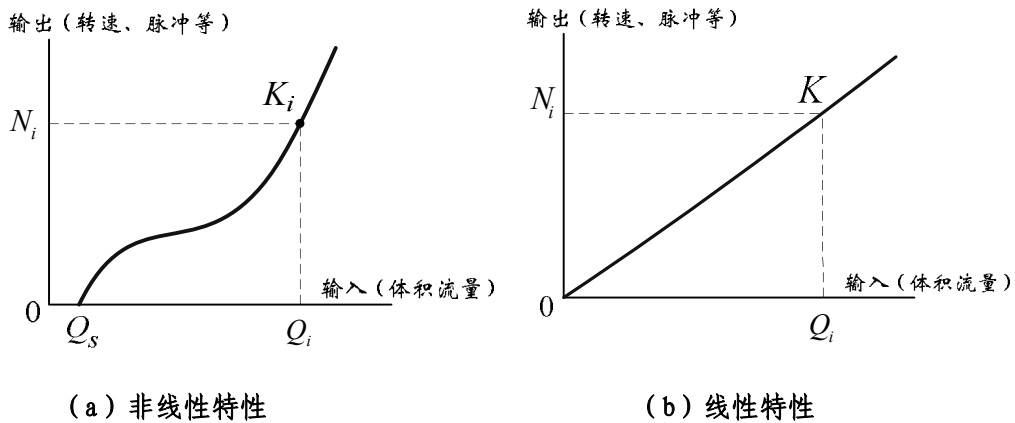
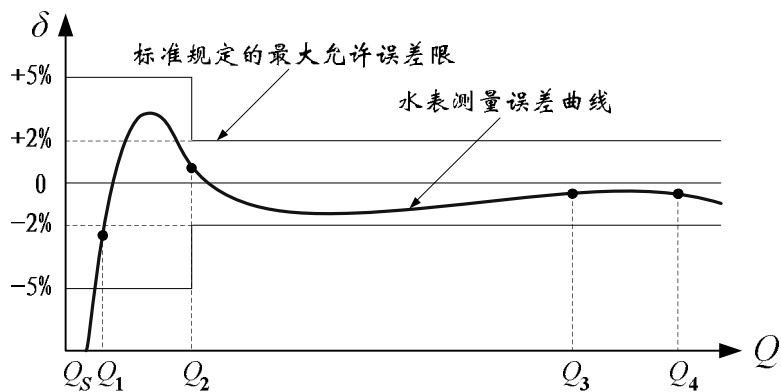
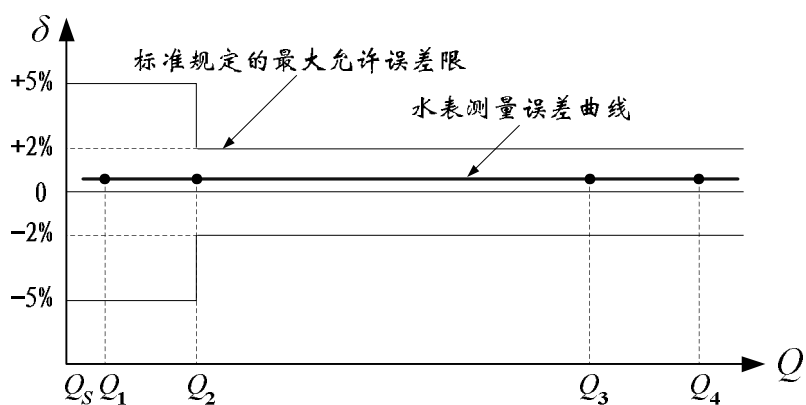


图 3 叶轮式水表“输入-输出”特性



(a) 叶轮式水表非线性特性时的误差曲线



(b) 叶轮式水表线性特性时的误差曲线

图 4 叶轮式水表示值误差曲线

水表“输入-输出”特性校正原理是：在输入标准量（即确定的瞬时流量与相应体积值）的条件下对水表的输出量（如转速、时间差、脉冲数或电压值）进行测量与比较，通过设置分段系数校正或拟合直线校正等方法，使水表在测量范围内的各输出量接近或等于标准量。

成批水表校正方法是：1) 从一批制造完工的智能水表产品中随机抽取几个样品水表进行测量，在输入多点标准流量及用水量的条件下获取其在设计流量范围内平均“输入-输出”特性或示值误差曲线；2) 任选一种合适方法确定其校正系数，对特性进行校正；3) 校正系数应经充分验证，然后将其写入所有出厂水表的计算机；4) 所有出厂水表产品须按标准规定要求完成其出厂示值误差的检验工作。

2.2 常用特性校正方法

智能水表常用特性校正方法主要有：分段（独立）校正法、分段（关联）校正法、分段拟合直线校正法、多项式拟合曲线校正法、以及神经网络校正法等。其中分段（独立）校正法和分段（关联）校正法是目前用得最多的校正方法，它的优点是使用简单、方便，占用计

计算机资源少，缺点是误差曲线离散，有“断点”；分段拟合直线法正在部分企业中使用，尚在试验摸索阶段，有待于实践检验；其它几种校正法则用得较少，究其原因相对复杂，计算量较大。

2.3 分段校正方法存在的问题

目前主流校正方法是分段校正法，它将水表的“输入-输出”特性或误差曲线划分成若干段，经实流校准后对每一段特性或曲线分别给出独立（或关联）的校正系数。这种做法由于有下列因素存在而隐含校正风险和问题：

2.3.1 分段校正导致水表误差曲线离散化

采用分段校正法的水表，分段处的误差曲线不连续，呈现离散特性和“断点”现象，而且这些“断点”处的误差变化大，见图5。当水表在“断点”流量值附近计量用水时，其示值误差就会频繁跳变，对实时准确计量不利。

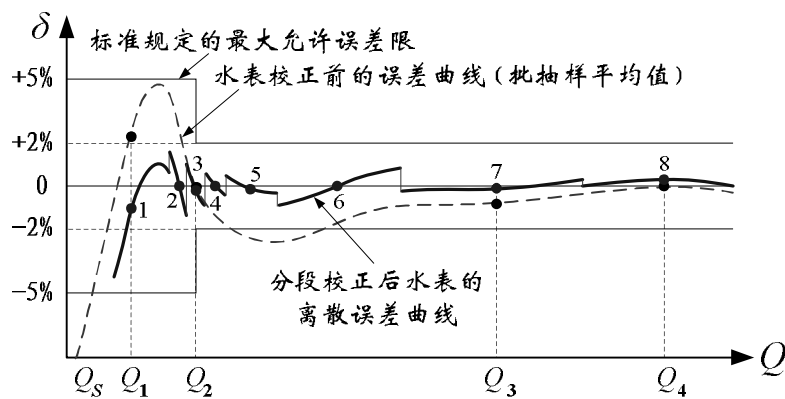


图5 分段校正后水表的离散误差曲线

2.3.2 批特性发散易造成校正水表部分测量段超差

当成批水表因加工、装配不善导致其测量特性出现较严重的平移发散时，部分特性偏离均值较大水表的误差曲线虽经分段（独立）校

正法校正，但仍难保证曲线中某些测量段的示值误差不超差，见图 6。对于这些特性发散较大但曲线形状基本不变的成批水表，出厂检验时如选用有限个流量检验点测量（如： Q_1 、 Q_2 、 Q_3 等点），其对应的示值误差既有可能全部合格或未显著偏离原校正值，也有可能出现示值误差超差或显著偏离原校正值的两种结果：

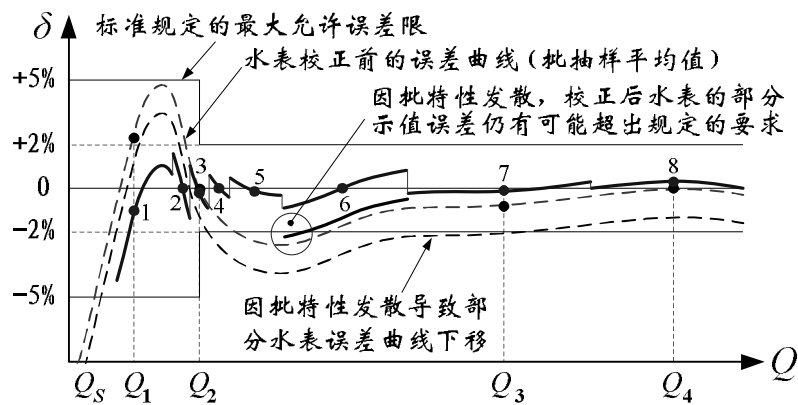


图 6 校正后水表的部分示值误差仍有可能超出规定的要求

- 1) 对出厂检验流量点示值误差全部合格或未发生显著偏离原校正值的水表，通常可以认为其非检验流量点的示值误差也是合格的；
- 2) 对出厂检验流量点示值误差出现超差或显著偏离原校正值的水表，通过对这些检验流量点的重新校正可以使其示值误差回到原来合格范围内；但对于非检验流量点的示值误差则不能保证其全部合格。对此，最保险的做法是将所有非检验流量点的分段示值进行全部重新校正，代价是校正成本过高、占用时间过长。

2.3.3 缩小误差范围需要用更多的校正分段数

为使校正后水表的示值误差控制在较小区间内（如 1 级准确度水表，其最大允许误差几乎比 2 级水表缩小一半），必须将误差曲线划分成很多段，这将大大增加校正时间，降低校正效率。当出现成批产

品特性发散严重时，其校正成本则会更高。

2.4 误差曲线形状改变易致原有校正失效

成批制造的叶轮式水表由于零部件加工及装配不善，除了会出现特性平移发散外，部分水表还会出现误差曲线形状改变的情况。形状改变严重时打乱原先的校正，导致某些流量分段误差超差。此时需要对所有分段进行逐个重新校正，以保证全范围示值误差合格。

3. 与特性校正技术相关的几个问题

基于上述原因，建立智能水表流量测量特性校正技术规范，树立正确的仪表设计观，统一校正技术与出厂试验方法是十分必要的。它对确保智能水表出厂质量，提升水表产品测量准确性，维护水表作为贸易结算的强制性计量器具属性也是非常重要的。

3.1 规定特性校正水表出厂技术要求。

智能水表特性校正方法很多，随着技术进步相信还会有更多更好的校正方法可供水表设计人员选择。我们不能强制规定和要求采用哪种方法校正水表测量特性，但可以规定特性校正后水表的示值误差应全面符合标准规定的要求。

由于大部分智能水表可以通过人为校正方法来改变其测量特性和误差，因此如果缺乏监管就会导致特性校正水表的计量性能失控，造成严重后果。传统机械水表可以采用铅封设施对出厂水表产品的性能实施有效控制和管理；而对测量特性可以通过软件校正的这类智能水表，仅仅采用机械铅封是不能满足控制和管理要求的，因此需要采用电子封印等方法加以控制和管理。

3.2 采用高效可靠的特性校正方法

分段校正方法将水表误差曲线人为地分割成若干个离散段，它既不利于压缩水表测量误差，提高测量准确度，也不利于提高校正效率。通常，拟合直线（曲线）的方法是一种比较有效的校正方法，值得尝试和探索。

图 7 是对射式宽范围超声水表的误差曲线校正图，图中校正采用了拟合直线法，因此误差曲线较平坦且连续。

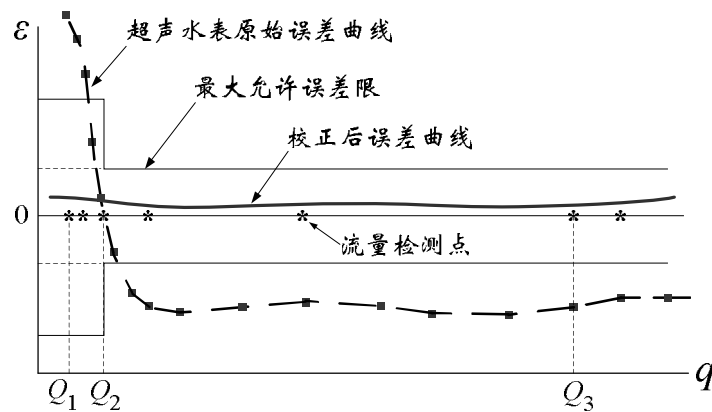


图 7 直射式宽范围超声水表误差曲线校正图

3.3 加强电子封印管理

电子封印管理是涉及智能水表（带电子装置水表和电子水表）的一种科学的数据管理方法，也是水表产品标准（GB/T 778—2007）所规定的方法。加强电子封印管理是确保智能水表出厂计量特性受到法制计量控制的有效途径，因此必须受到高度重视和认真执行。

4. 制定特性校正规范的技术依据

4.1 GB/T 778-2007 标准对水表特性校正内容的描述和要求

1) 对水表“校正装置”的定义：连接或安装在水表中，在计量条件下根据被测水的流量和（或）特性（例如：温度和压力）以及预

先确定的校准曲线自动修正体积的装置。

2) 对水表“校正装置”的规定: a. 水表可以配备校正装置, 校正装置是水表的组成部分。所有使用于水表的要求, 尤其是规定的最大允许误差要求也适用于计量条件下的修正体积; b. 正常工作情况下应不显示未经修正的体积; c. 使用校正装置的目的是尽可能把误差减少到零; d. 开始测量时, 应将校正所需的所有非测量参数输入计算器。型式批准试验证书可能会对检验这些参数作出规定。这些参数对于正确鉴定校正装置是必不可少的; e. 校正装置应不允许校正预测漂移, 例如与时间和体积有关的漂移; f. 不得利用校正装置将水表的示值误差调整到不接近零的值, 即使该值仍在最大允许误差范围内。

3) 对水表“计算器”的规定: a. 开始计量时, 计算器中应存有产生受法制计量管理的示值所需的所有参数, 如计算表或校正多项式等; b. 计算器可以配备接口同外部装置连接。使用这些接口时, 水表的硬件和软件应继续正常工作, 其计量功能应不受影响。

4) 对水表“电子封印”的规定: a. 当机械封印不能防止接触对确定测量结果有影响的参数时, 应采用如下的防护措施。借助密码(关键词)或特殊装置(例如钥匙)只允许授权人员接触参数。密码应能更换; b. 至少应记忆最后一次干预行为。记录中应包括日期和识别实施干预的授权人的特征要素。如果下一次干预未覆盖前一次干预的记录, 至少应保证两年的追溯期。如果能记忆两次以上的干预, 但必须删除原有记录才能记录新的干预, 应删除最早的记录。

5) 对水表计量性能的规定(参照 ISO 4064: 2014 标准): 1 级

和 2 级准确度水表的允许误差应符合高区不大于 $\pm 1\%$ 和 $\pm 2\%$ ，低区不大于 $\pm 3\%$ 和 $\pm 5\%$ 的要求；测量重复性指标不大于最大允许误差 1/3 的要求。

4.2 规范水表特性校正方法的几项基本原则

4.2.1 示值误差应符合标准要求

特性校正水表的示值误差在设计流量测量范围内必须全部符合水表产品标准的相关要求。因此在出厂检验时，除了在标准规定的三个流量点（或型式评价时的七个流量点）必须符合最大允许误差的要求外，在流量测量范围内的任意流量点的示值误差，也必须符合标准规定的要求。

4.2.2 需要规定测量重复性

测量重复性指标是计量仪表最重要的性能指标之一。在最新颁布的 ISO 4064: 2014 标准中已设置了该项技术指标，并规定水表的测量重复性不得超过最大允许误差的 1/3。如果没有测量重复性指标作保证，水表特性校正则是毫无意义的。

4.2.3 校正系数的控制与管理

校正确定的符合标准要求的系数具有法制计量属性，不能随意进行改变，需要严格受控和管理。除了现有标准规定的电子密钥原则外，尚需进一步规范校正系数的控制和管理，如：规定密钥（密码）的基本要求、修改程序及日常维护等问题。

5. 拟起草标准的主要技术要求

5.1 最大允许误差：

1 级和 2 级准确度 (ISO 4064 - 2014)

5.2 测量重复性:

不超过最大允许误差的 1/3 (ISO 4064 - 2014)

5.3 在流量测量范围内,水表示值误差均应符合最大允许误差的要求
抽查任意流量点的示值误差均应在最大允许误差范围内。

5.4 电子封印:

校正系数修改管理方法 (密钥的设立与管理等)

5.5 附录:

批特性不合格水表产品的处理方法。

6. 结语

水表流量测量特性的计算机校正是涉及到所有内置有嵌入式计算机系统 and 电子显示器的智能水表,这项技术的推广应用将有效改变叶轮式、超声式、电磁式、射流式等流量传感器因原理的或非原理的非线性输入-输出特性造成的使用范围变窄、测量误差超差的问题,为提高水表的计量准确度,进一步扩大流量测量范围提供了一中行之有效的办法。

如何规范智能水表流量测量特性的校正,是一项新的课题,对行业技术进步来说也是一项必须尽早解决的重要问题。它关系到校正后水表的测量准确度,关系到校正过程的效率和成本,并且与水表流量传感器的加工和装备水平息息相关。因此在此项工作的实施过程中,既要到慎重仔细、又要加快推进步伐,使测量特性的计算机校正、乃至参数补偿等工作真正发挥其应有的作用。

主要参考资料

1. GB/T 778 - 2007 《封闭满管道中水的测量 饮用冷水水表和热水水表》
2. 姚灵等. 单声道超声水表测量特性分段校正方法的研究. 计量学报, 2013. 5
3. 姚灵等. 基于特性校正技术的宽量程垂直螺翼式水表的研制. 仪表技术, 2012. 11
4. 姚灵. 基于拟合方程的水表误差曲线校准方法. 上海计量测试, 2013. 3
5. GB/T ×××××1《流量测量装置校准和使用不确定度的评估 第 1 部分: 线性校准关系》

2014. 12. 31