

# 智能水表 2.0 产品关键核心技术分析与探讨

宁波水表股份有限公司（浙江省水表研究院） 姚 灵

智能水表 2.0 产品主要是指水流量传感器部分无机械运动机构、采用流量计某些技术的新一代电子水表产品，目前主流产品有超声水表、电磁水表和射流水表等三类。除了这三类水表外，GB/T 778-2007《封闭满管道中水流量的测量 饮用冷水水表和热水水表》标准还提到了非主流的涡街水表和科氏水表等产品。

本文主要介绍上述三类主流智能水表 2.0 产品的关键核心技术。

## 1. 超声水表

超声水表主要有以下特点：

1) 用于液体与气体测量，不受被测介质变化影响；2) 测量管内通常无阻流件，流速分布畸变较小；3) 仪表价格不随管道直径增加而大幅增加；4) 可以在管道外测量被测介质；5) 采用渡越时间法的超声水表，被测介质中不能有较大气泡、杂质等存在。

超声水表关键核心技术主要有以下几个方面。

### 1.1 高分辨力、高性能计时芯片技术

当前，全球制造超声水表精密计时芯片的企业主要有：ACAM、D-FLOW、美信和艾萨半导体等公司，它们推出的计时芯片产品主要有：GP22/GP30, UFO2, MAX35102, UTA6902/UTA6905 等。

十数年来，精密计时芯片的计时分辨力指标已从 100ps 量级提高至 10ps 量级；对于零流量条件下的稳定性指标，也有一些芯片公司间接声称可控制在  $\pm 0.5\text{mm/s}$  的不确定度范围内。

关于计时芯片，以下两项影响因素必须予以足够的重视。

#### 1) 计时芯片的计时分辨力对超声水表测量结果的影响

水表产品主要用于测量各时间段的用水量及平均瞬时流量等参数，因此对它的性能要求通常偏重于稳态工作特性方面，而对其动态工作特性则要求不高。基于这一事实，超声等智能水表通常采用对被测数据列划分成任意多个采样周期进行数据处理和显示，并通过数据求平均的方式来削弱测量过程中的随机误差影响，见图 1 和式 (1)。

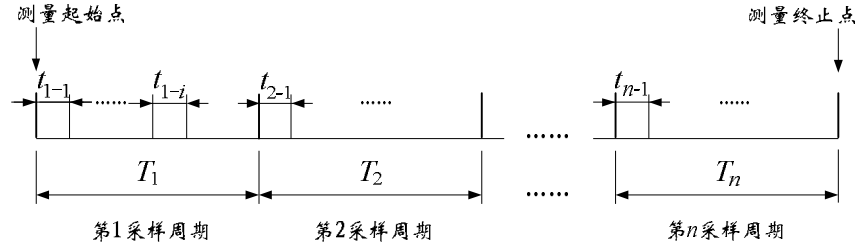


图1 超声水表数据采集示意图

$$\bar{D}_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_{1-i} \quad (1)$$

式中  $\bar{D}_1$  — 第1采样周期  $m$  个测量数据的平均值;

$d_{1-i}$  — 第1采样周期  $T_1$  中第  $t_{1-i}$  时间段采集的测量数据值 (数据经过预处理);

$m$  — 每个采样周期  $T_j$  内的采样数。

计时芯片的计时分辨力是造成超声水表测量分散性的主要影响因素之一。假设设计时采用了计时分辨力为  $\delta \approx 100\text{ps}$  的计时芯片 (注: 计时分辨力在数值上等同于一个计数脉冲周期, 可以作为计时量化误差处理), 每次测量时该值就会计入到超声水表的测量结果中, 并以随机误差的形式影响着测量。下面用不同计时分辨力的计时芯片对超声水表测量结果分散性的影响作出简要的分析。

根据超声水表时间差计算公式有

$$\Delta t = \frac{2L}{c^2} v \quad (2)$$

式中  $L$  — 两反射体之间的距离 (以  $L \approx 0.07\text{m}$  计);

$c$  — 超声波在水中的传播速度 ( $c \approx 1500\text{m/s}$ );

$v$  — 超声水表测量管中水的平均流速;

$\Delta t$  — 超声波正、逆向传播时间差。

当管道内被测流速的平均值为  $0.0226\text{m/s}$  (相对于公称通径为 DN20、流量测量范围为 R250 时的  $Q_2$  流量点流速值, 假设面与线的流速平均值相等), 则根据公式 (2) 可以算得超声水表在该流量点的传播时间差  $\Delta t$  值约为  $1400\text{ps}$ 。如果计时分辨力为  $100\text{ps}$ , 则由于计时分辨力引起的量化误差  $\delta$  约为  $7.1\%$  (量化误差通常以均匀分布的随机误差形式出现), 见式 (3);

$$\delta = \frac{100 \text{ ps}}{1400 \text{ ps}} \times 100\% \approx 7.1\% \quad (3)$$

如果计时分辨力提高到了 10ps，则水表随机误差的影响可以减少 10 倍，量化误差影响也可以降低至 0.71%。

即使采用这么高计时分辨力的芯片，在超声水表不计入其它随机误差影响的情况下，该误差相对于重复性指标还是占据了很大的比例（重复性指标规定为：不超过最大允许误差的 1/3。对于 2 级准确度水表，在流量测量范围的高区约为 0.67%）。

考虑到水表是以稳态测量为主要特性的仪表，因此可以对其测量值进行多数据的算术平均法处理。随着求平均的测量数据量增加，计时分辨力（量化误差）的影响可以降至很低的水平上，但其代价是劣化了测量结果的实时性。根据算术平均值标准差含义，通过增加测量次数  $n$ ，取算术平均值的标准差  $\sigma_{\bar{x}}$  表示测量结果的分散性，可以提高测量精密度，减少随机误差的影响。算术平均值标准差  $\sigma_{\bar{x}}$  为单次测量标准差  $\sigma$  的  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ，即

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma \quad (4)$$

当取 100 次测量结果计算平均值时，其分散性将是单次测量结果的  $\frac{1}{\sqrt{100}} = \frac{1}{10}$ ，此时超声水表测量结果的分散性就大大降低了，见图 2。

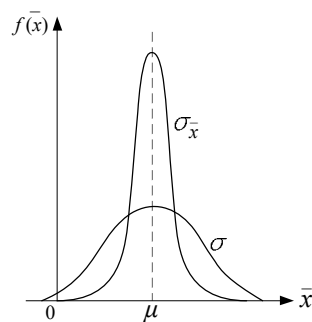


图 2 多次求平均可显著降低测量结果的分散性

## 2) 超声水表（流量计）零流量输出的稳定性

根据国际标准 ISO 12242: 2012《封闭管道中流体流量的测量 渡越时间法液体超声流量计》要求：在零流量条件下，超声流量计因漂移等原因产生的输出不确定度（稳定性）应不超过 1mm/s。为此有些计时芯片制造企业也间接提供了零流量时的稳定性指标：输出不确定度不超过  $\pm 0.5\text{mm/s}$ 。

零流量输出不确定度（稳定性）对超声水表小流量测量结果的影响非常大，尤其当水表测量范围较大时（此时分界流量值非常小）其影响量就更为显著。零流量输出不确定度通常是以数据的时漂或以非平稳随机过程的形式出现的，其统计特征值会随时间而改变，有着不确定的变化趋势项。通常可以用测量重复性、时间改变再现性和稳定性等指标来评价。

以下采用 DN20、R250 的小口径超声水表进行零流量输出不确定度影响的估算：

假设  $Q_2$  点的流速仍为 0.0226m/s 时，计时芯片零流量输出的不确定度为  $\pm 0.5\text{mm}^3/\text{s}$ ，其对该流量点测量结果带来的可能最大影响量约为  $\pm 2.2\%$ ，这对最大允许误差为  $\pm 2\%$  的水表而言是不能容忍的。图 3 反映的是零流量输出对超声水表测量结果的影响。当被测流速值越大时，其影响量就越小，反之则越大。

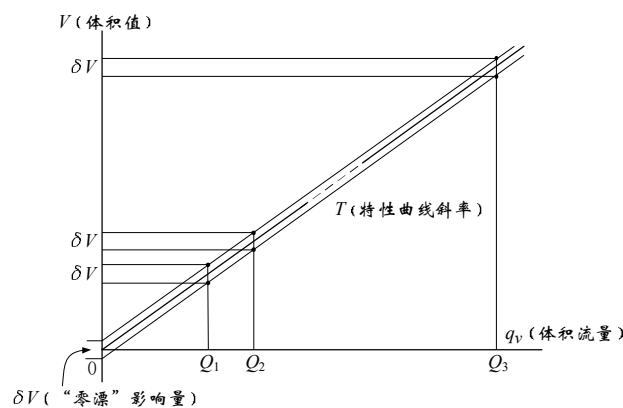


图 3 零流量漂移对超声水表测量结果的影响

计时芯片零流量时的稳定性指标反映的是零漂的极限值，实际使用中的计时芯片，其零漂值会落在这个区间内，超出极限值的概率非常低。关键问题是：如何来测评计时芯片的零漂值，如何来分档与使用。

通常情况下，应尽量选用高性能和低漂移的计时芯片；也可采用超声零流量输出补偿技术等方法。

## 1.2 长寿命、高稳定度的超声换能器

超声水表换能器的性能、稳定性与可靠性等指标与水表整机产品质量水平有着密切的关系。

当前超声水表换能器没有统一的国家或行业技术标准，这对规范换能器的设计、制造、检测等是非常不利的。宁波水表股份有限公司已经提出了评价超声水表换能器的综合性能指标和试验方法（见宁波水表股份有限公司姚灵等在 2016 年第 3 期《测试技术学报》上发表的论文“超声水表换能器综合性能指标的建立”和姚灵等在 2013 年第 8 期《仪表技术》上

发表的论文“超声水流量检测换能器性能指标及试验装置研究”以及姚灵等申请的发明专利“一种超声水流量换能器综合性能试验装置及其使用方法” [P]. 201210573562. 6, 2012. 12 . 26), 并已申报工信部标准《超声水表换能器》, 这对成批稳定生产超声水表换能器奠定了必要的技术基础, 规范了评价指标。

以下内容涉及超声水表换能器的性能与长期工作可靠性:

- 1) 理解压电式超声换能器的工作原理与关键技术;
- 2) 掌握换能器的设计、制造与检测方法;
- 3) 探索换能器老化、筛选、配对等工艺;
- 4) 研究换能器长期工作稳定性与可靠性等问题。

### 1.3 高性能、高可靠的嵌入式系统

嵌入式系统承担了超声水表传感与信号处理等任务, 其工作状态关系到超声水表整机的各项性能是否能满足标准和用户的要求, 并与产品使用功能、制造成本和电池使用寿命等指标有关。

在进行软硬件设计时, 以下内容需要得到重视和研究:

- 1) 流量与体积计算公式的正确理解与选用;
- 2) 了解主要误差产生的原因与处理的方法;
- 3) 超声波发射与接收时间点的准确控制;
- 4) 传感与信号处理部分的低功耗软硬件设计方法;
- 5) 电池使用寿命的预测与预报;
- 6) 零流量输出特性的自检与自补偿技术;
- 7) 流速分布影响处理等。

### 1.4 影响超声水表测量准确度的几个主要因素

- 1) 安装管道阻流件的影响

当超声水表前后直管段足够长时, 进入水表测量管的流速分布可近似视为对称分布, 此时管道流速分布与校表台流速分布较相似, 管道中的阻流件(如: 弯头、三通、阀门等)对流速分布影响可忽略不计, 其仿真结果见图 4。

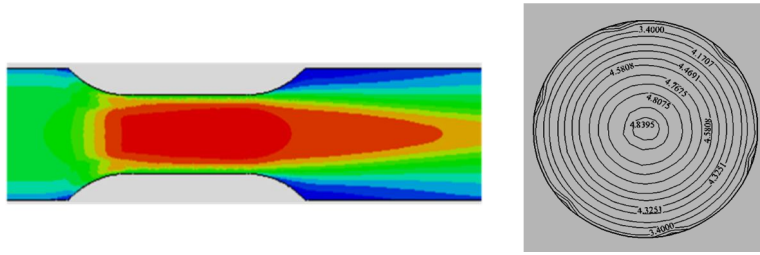


图 4 管道流速对称分布时的流场仿真图

当进入水表测量管的流速受到阻流件影响而发生畸变时,超声水表在校表台所做的校正工作(指线、面流速值的校正)就会失效,影响测量结果的准确性。图 5 是有平面弯管阻流件时的管道流场仿真图。

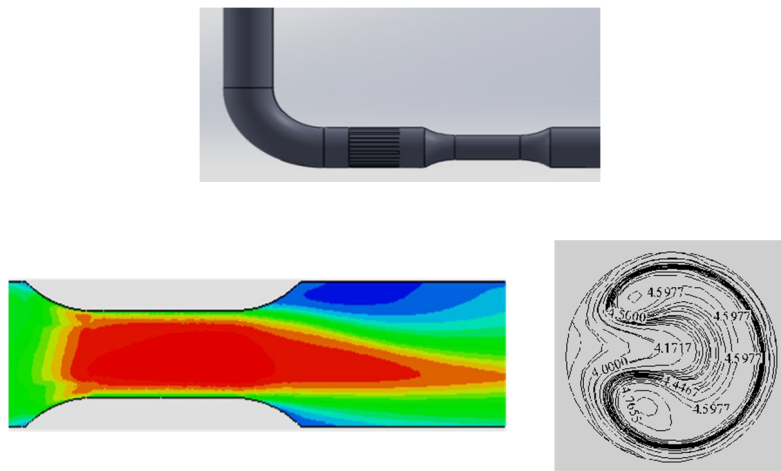


图 5 有阻流件时的流场分布仿真图

流场发生畸变时,可以通过增加水表前后直管段长度或在表前安装整流器的方法减少其带来的影响,见图 6。除此之外,还可增加超声水表声道数来减少流畅畸变的影响。

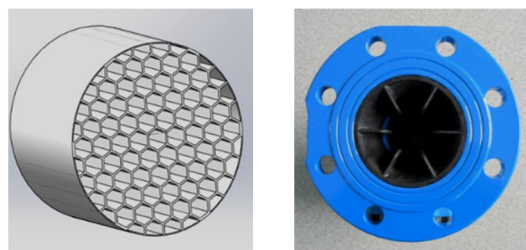


图 6 几种管道整流器外形图

## 2) 常压下被测介质温度变化的影响

假设管道内水的压力无很大变化,当被测介质和环境温度变化时,温度变化仅会导致测量管几何形状发生变化,产生几何量误差。温度变化一般符合式(5)规律,因此可以通过检测工作温度与参比温度的差值对影响量进行修正。

$$\frac{Q_{V(true)}}{Q_{V(meas)}} = (1 + \alpha \Delta T)^3 = 1 + 3\alpha \Delta T + 3(\alpha \Delta T)^2 + (\alpha \Delta T)^3 \quad (5)$$

式中  $Q_{V(true)}$  — 参比温度下测得的体积流量;

$Q_{V(meas)}$  — 实际工作温度下测得的体积流量;

$\alpha$  — 材料热膨胀系数;

$\Delta T$  — 温度变化范围 (即工作温度偏离参比温度的值)。

由于式 (5) 高阶项是个微小量, 通常可以忽略, 因此式 (5) 可以简化为式 (6)

$$\frac{Q_{V(true)}}{Q_{V(meas)}} = 1 + 3\alpha \Delta T \quad (6)$$

如果超声水表采用 304 不锈钢用作测量管材料 (其热膨胀系数  $\alpha = 17 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), 当工作温度偏离参比温度  $20^\circ\text{C}$  时, 由此引起的系统误差一般不会超过 0.1%。所以只有当温度变化范围很大时才需要对超声水表进行温度补偿。

下表是不锈钢材料在  $0 \sim 100^\circ\text{C}$  时的温度系数。

| Material              | Value, $1/^\circ\text{C}$ |
|-----------------------|---------------------------|
| Stainless steel (304) | $17 \times 10^{-6}$       |
| Stainless steel (316) | $16 \times 10^{-6}$       |
| Stainless steel (420) | $10 \times 10^{-6}$       |

图 7 是碳钢和 AISI 420 不锈钢材料测量管的“体积流量受温度变化影响”的曲线。图中“1”为 AISI 420 不锈钢影响曲线, “2”为碳钢影响曲线。

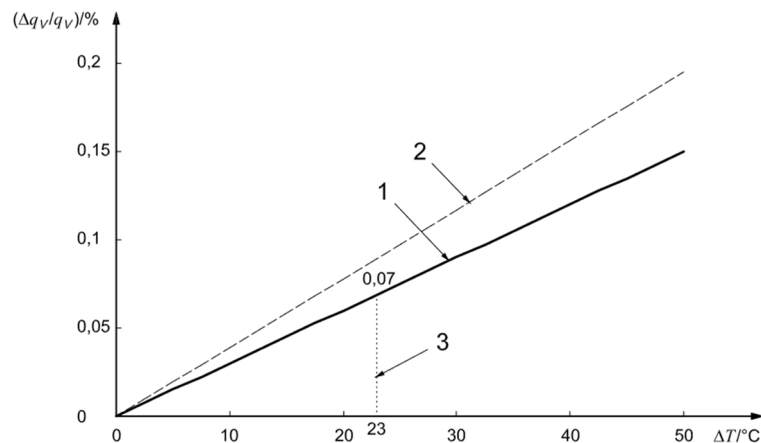


图 7 不同材料测量管“体积流量受温度变化影响”的曲线

### 3) 管道内壁粗糙度变化的影响

管道内壁过大的粗糙度会造成管道内径值改变和流速分布的变化。当管道内流速处于湍

流流动时，管壁粗糙度对流速分布很敏感，粗糙度的增加会导致管内流速分布趋于弯曲，使线、面流速校正值出现偏差，见图 8。内壁粗糙度的影响仅出现在湍流流动条件下，可以通过改变校正系数予以补偿和修正。

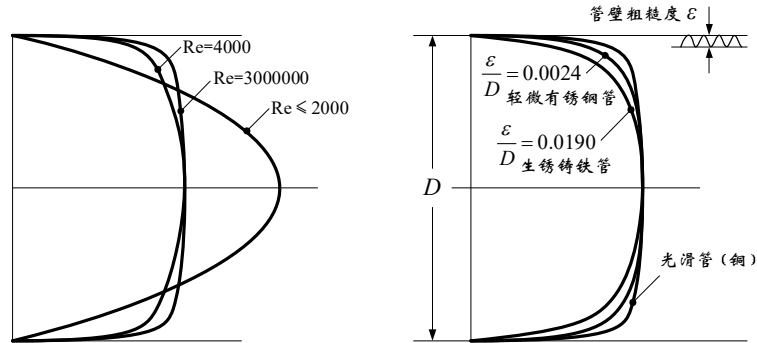


图 8 管壁粗糙度对流场分布曲线的影响

管道内壁粗糙度变化，会明显影响超声水表的测量准确度。当管道内壁粗糙度变化 10 倍时，会给双声道超声水表带来约为 1.5% 的附加测量误差，但随着声道数的增多，附加误差测量就会大大减少，如四声道超声水表此时的影响量可以降低至 0.07%。

#### 4) 流速对称分布时线-面平均流速的校正

超声换能器测得的流速值是超声波在传播路径上获得的被测介质线流速的分量值，称为线平均流速  $v$ ，而评定管道流量用的流速则是被测介质的面平均流速  $\bar{v}$ 。在不同雷诺数测量条件下它们之间具有某种函数关系，见图 9。因而需要引入速度分布校正系数  $k_h$  来消除两者之间的差异。

进行线-面平均流速校正的前提条件是，管道内的流速分布必须是经充分发展的对称流。

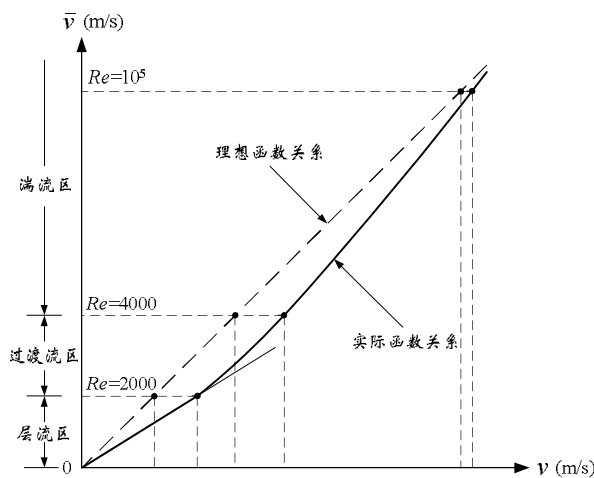


图 9 超声水表线-面平均流速之间的函数关系

当管道内流体流动处于层流状态（即雷诺数  $\leq 2000$ ）时，线平均流速与面平均流速之间



的关系为

$$k_h = \frac{\bar{v}}{v} = \frac{3}{4} \quad (7)$$

当雷诺数  $2000 < Re \leq 4000$  时，流体流动处于过渡流状态，线与面平均流速之间没有固定函数关系。由于该区域很窄，通常可予以忽略；当雷诺数大于 4000 时，流体进入到湍流流动状态，线与面平均流速之间的关系改变成

$$k_h = \frac{\bar{v}}{v} = \frac{2n}{2n+1}; \quad n \approx 1.66 \lg Re \quad (8)$$

水表流量测量范围通常很宽，一般都能覆盖到上述三个流动区域。线与面平均流速在三个流动区域之间的相互关系见图 9。除了过渡流区域，其它两个区域均可通过设立校正系数将两者误差消除或削弱。

图 10 是超声水表线-面平均流速校正前后的示值误差曲线图。

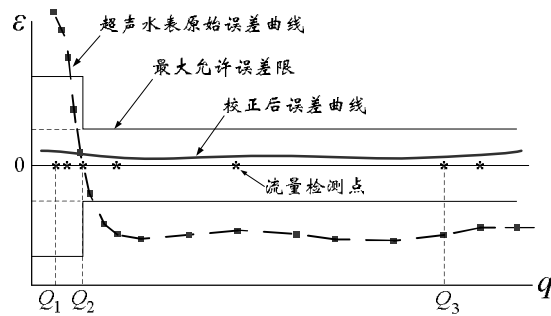


图 10 超声水表校正前后的示值误差曲线

## 2. 电磁水表

电磁水表主要有以下特点：

1) 测量结果与被测介质物性参数变化无关；2) 测量管内无阻流件，压损小；3) 水表线性度好，测量范围宽；4) 易受外界电磁干扰；5) 仅能用于导电液体的流量测量。

电磁水表关键核心技术主要有以下几个方面。

### 2.1 低功耗励磁技术

采用特种励磁性材料和尖脉冲励磁方法，可以大大降低电磁水表电源供电的功耗。在同样磁感应强度条件下，由于采用尖脉冲励磁，使得励磁持续时间大大减少，因此可以使电源平均功耗幅度下降达数百倍。图 11 是尖脉冲微功耗励磁的测量波形图和波形示意图。

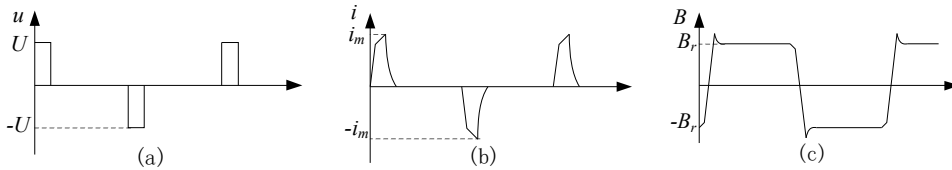
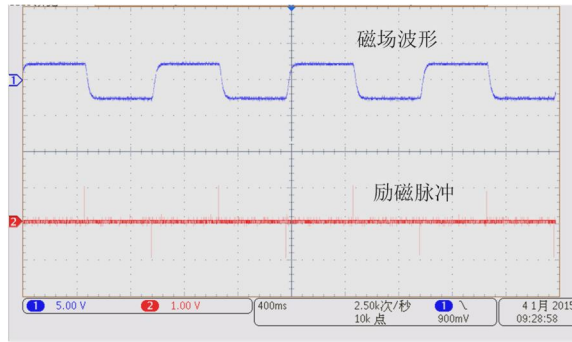


图 11 微功耗尖脉冲励磁测量波形图与示意图

## 2.2 权重函数线性化技术

权重函数是空间分布函数，它是电极与测量管形状的函数，见图 12。它的存在会将流速的非对称分布影响带入到水表的测量结果中。

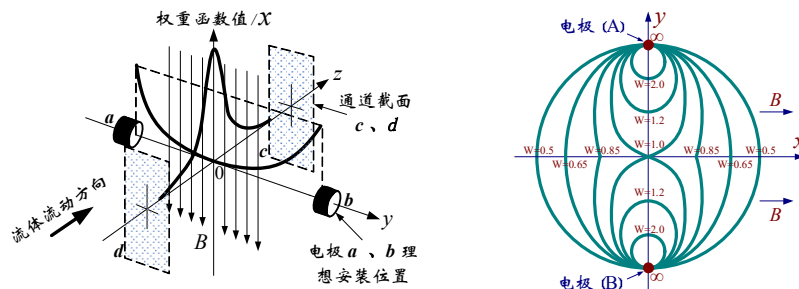


图 12 权重函数分布示意图

式 (9) 是电磁水表测量原理公式，在近似条件下该式可简化为式 (10)

$$E = \frac{2}{\pi R} \iint B(r, \theta) W(r, \theta) v(r, \theta) dr d\theta \quad (9)$$

$$E = k D B \bar{v} \quad (10)$$

式中  $E$  — 一对电极上获得的感应电动势；

$B(r, \theta)$  — 磁感应强度的空间分布（通常设计成均匀磁场，即  $B$  为常量）；

$W(r, \theta)$  — 权重函数的空间分布；

$v(r, \theta)$  — 被测流速函数；

$k$  — 流速对称分布时简化的权重系数;

$D$  — 电磁水表测量管内径。

从式 (9) 可知, 如果磁感应强度与权重函数乘积在测量管内的任何空间位置上均为常数, 测量时权重函数影响就可被忽略, 见图 13; 如果乘积不为常数, 就会因流场畸变可能导致产生最大约有  $\pm 30\%$  的附加测量误差, 见图 14。

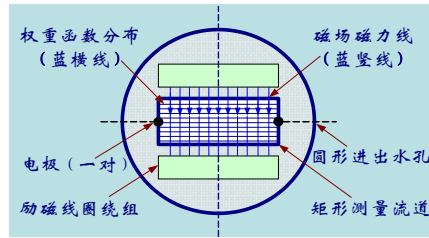


图 13 权重函数与磁感应强度乘积为常数时的示意图

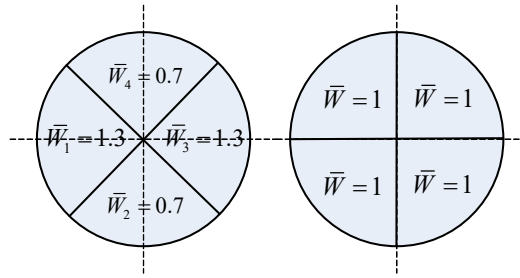


图 14 流场畸变时因权重函数存在导致测量误差出现

图 15 是电磁水表测量内截面由圆形改为矩形后, 可基本消除权重函数非线性带来的影响。图 16 是矩形测量截面 (圆形电极) 时的权重函数分布仿真图。



图 15 矩形测量截面可消除权重函数对测量结果带来的影响

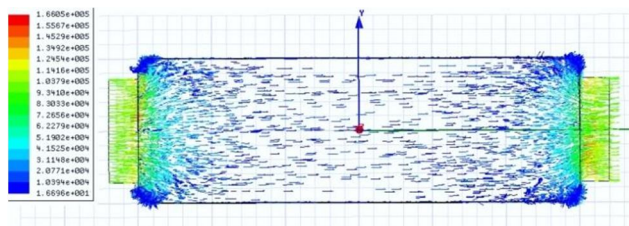


图 16 矩形测量截面 (圆形电极) 时的权重函数仿真图。

### 2.3 微弱信号处理技术

采用微弱信号处理技术是为了解决当电磁水表在测量过程中遇到电极极化电势、介质流动噪声和外部电磁干扰等问题时，能够运用先进信号处理与识别技术，分离信号与噪声（干扰）、削弱噪声（干扰）影响、达到提升有用信号的目的。当电磁水表流量测量范围非常宽时，测量下限的流速值会非常小，因此电极感应到的有用信号仅在  $\mu\text{V}$ （微伏）数量级，已完全被噪声（干扰）覆盖和淹没。因此这是一项决定电磁水表研发能否成功的非常关键的核心技术。

### 3. 射流水表

射流水表主要有以下特点：

1) 结构简单，性能稳定、可靠；2) 可以在  $Q_3/Q_1 \leq 160$  流量范围内工作；3) 小流量特性易受流体粘性力作用而不起振，大流量特性易受计量腔压损增加而被限制。

#### 3.1 射流水表工作原理

当封闭管道中的水流进入射流水表的射流腔时，由于射流的附壁效应和控制射流反馈原理，使水流体在射流腔中振荡，该振荡频率在一定流量范围内与流经管道的流速或体积流量成正比，且不受流体物理性质等影响。射流水表工作原理见下式

$$f = \frac{Sr}{d} \cdot v = \frac{Sr}{d} \cdot \frac{q_v}{S} \quad (11)$$

式中  $v$  — 射流腔喷射口处流体平均流速值；

$d$  — 与射流腔特征尺寸有关的参数；

$Sr$  — 斯特劳哈尔数（Strouhal）；

$f$  — 射流振荡频率；

$q_v$  — 流过喷射口的体积流量值；

$S$  — 射流喷射口截面积。

在射流腔主通道或反馈通道上设置电磁速度式敏感元件或压电压力式敏感元件，可以将流体振荡频率检出并送后续信号处理电路作进一步处理。

射流振荡腔的外形及结构、工作原理、振荡波检测技术等可参考图 17~图 19 进行了解，射流振荡原理的计算机仿真见图 20。



图 17 射流振荡腔外形与结构图

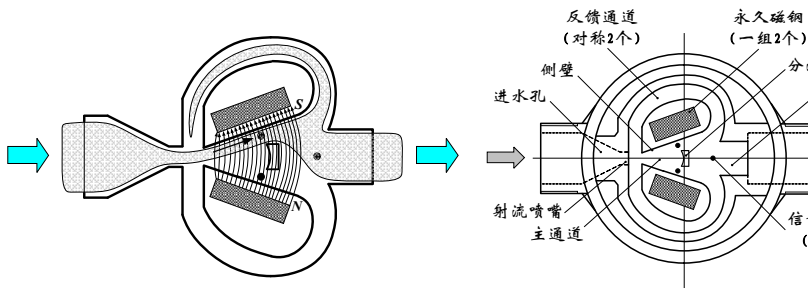


图 18 射流振荡电磁检测原理及结构示意图

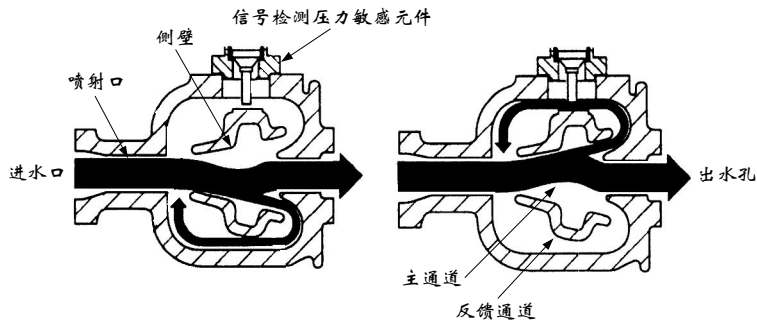


图 19 射流振荡压力检测原理图

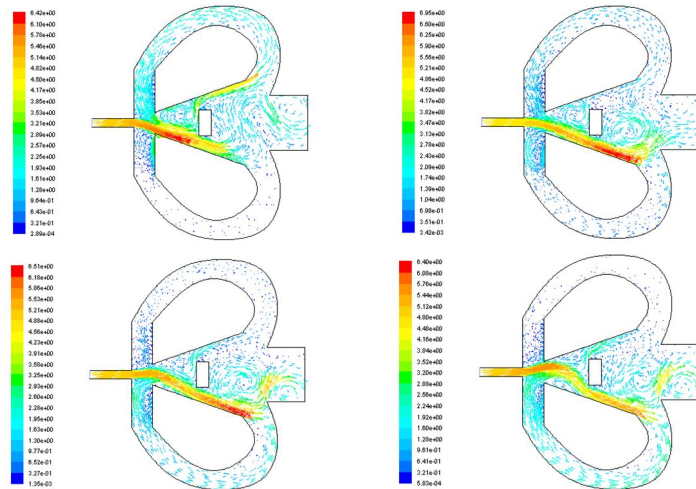


图 20 射流振荡的计算机仿真

### 3.2 射流腔设计制造技术

为保证小流量能够顺利起振，大流量压损符合要求，射流振荡幅度稳定，射流振荡腔的设计必须进行优化。射流振荡腔关键几何尺寸见图 21。要求振荡腔的内表面粗糙度数值尽量低，保证低雷诺数流体也能稳定起振。

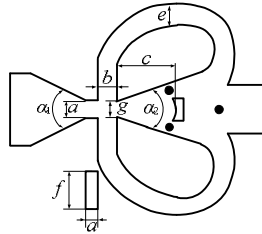


图 21 射流振荡腔关键几何尺寸图

### 3.3 射流振荡检测技术

射流振荡信号特点：小信号（微伏至毫伏级信号强度）、极低频率（低于 1Hz 振荡频率）的正弦波振荡信号。差动振荡输出波形见图 22。

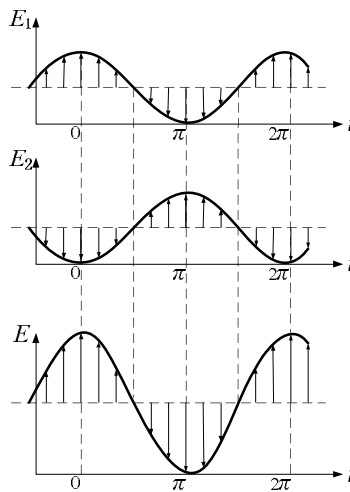


图 22 射流振荡检测信号示意图（差动信号）

2016. 8. 25