

电磁流量传感器结构与原理

宁波水表股份有限公司（浙江省水表研究院） 姚灵

1 概述

在水流量测量方面，电磁（Electromagnetic）流量传感技术主要应用对象是电磁水表和电磁流量计等产品，并在涡街水表和射流水表等电子水表与流量计的信号检测方面得到了较为广泛的应用。

电磁流量传感技术应用最为成功的例子是电磁流量计。大口径电磁流量计已被广泛应用于水流体和导电介质的高准确度测量方面，并且取得了公认的成功。用于水流体测量的电磁流量计，其常用测量口径通常在 DN50~DN3000 之间，可用于直径为 50mm 至 3000mm 的封闭满管道的水流体测量。电磁流量计的测量准确度等级目前能够覆盖到的范围为：2.5 级、1.5 级、1.0 级、0.5 级、（0.3 级）、（0.25 级）和 0.2 级，其相对应的基本误差为： $\pm 2.5\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 0.5\%$ （ $\pm 0.3\%$ ）、（ $\pm 0.25\%$ ）和 $\pm 0.2\%$ ，流量计的测量重复性一般不超过相应准确度等级规定的最大允许误差绝对值的 1/3。电磁流量传感技术及电磁流量计的出现为水流量及导电液体流量的过程测量与控制提供了准确、有效、可靠的测量方法和器具。

将电磁流量检测技术和电磁流量计的相关技术应用于电子水表最初是从大口径管道水流量计量与贸易结算的需求开始的。由于机械水表的测量准确度只能达到 2 级水平，考虑到水表的压力损失相对较大，对水质条件比较敏感，同时也为了提高计量和结算准确度，人们就开始将电磁流量计的瞬时流量测量功能加以拓展，增加了累积流量（即用水量）的计量功能，并作为电磁水表使用，取得了很好的效果。但是电磁水表目前还仅局限于大口径水流量的计量与结算，在民用小口径户用水表方面，除了国外先进水表企业已研究开发出具有商用价值的电磁水表外，目前国内还尚无相应产品化的小口径电磁水表问世。

当然，电磁水表想要全面进入水计量行业，必须改变目前主要使用交流电网供电现状，而采用自带的高容量电池或新型电源供电，这对电磁水表的低功耗乃至微功耗设计与制造技术提出了新要求，为此同样需要给予这方面以足够的关注。

电磁流量传感技术具有如下特点：

- 1) 仅能用于导电液体的流量测量。被测液体电导率在一定范围内变化不影响测量结果。
- 2) 测量结果与被测液体的密度、粘度、温度、压力等物理参数的变化无关。
- 3) 传感器测量管内无机械运动和阻流部件，压力损失很小，测量可靠。

- 4) 流量测量范围度大, 可调范围可达 1500:1 以上。
- 5) 从原理上看, 流量测量具有良好的线性特性, 因而测量准确度比较高。
- 6) 与其它流量传感技术相比, 其上游的直管段相对较短。通常直管段在 5~10 倍管道直径。
- 7) 传感器反应速度较快, 可测脉动流量。
- 8) 易受外界电磁干扰和被测液体极化电势干扰的影响。

2 电磁流量传感器结构

电磁流量传感器的基本结构见图 1 和图 2。其中图 1 是大口径电磁流量传感器所通常采用的结构形式, 它是由相互垂直的励磁磁场、管内流动的导电液体、以及一组测量电极所组成; 图 2 是小口径户用电磁流量传感器的常用结构形式, 由于采用了矩形扁平缩经测量管形式, 因此具有较高的流量测量灵敏度和对被测流体流场分布不敏感的优良特性。图 3 是大口径电磁流量传感器的零部件装配关系图, 图 4 是大、小口径电磁流量计(电磁水表)整机外形图。

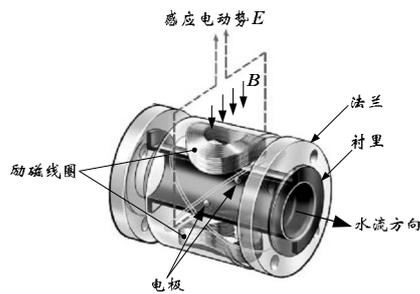


图 1 大口径电磁流量传感器常用结构示意图

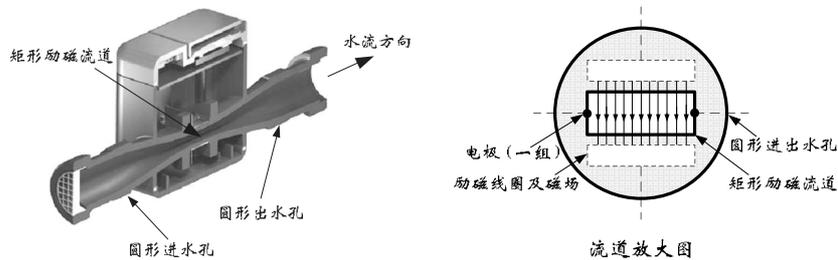


图 2 小口径电磁流量传感器常用结构示意图

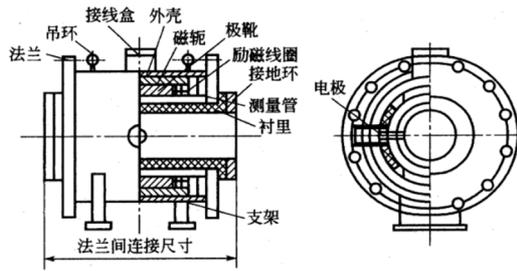


图 3 大口径电磁流量传感器零部件装配关系图



大口径电磁流量计（电磁水表）

小口径户用电磁水表

图 4 电磁流量计（电磁水表）整机外形图

2.1 测量管

测量管是被测流体的测量通道。测量管内壁需要衬有电气绝缘的材料，以使电极与安装在传感器前后的金属管道相绝缘，以防止流量感应电动势信号被金属管道所短路。测量管主要由导管、衬里、电极等所组成。

1. 导管

导管是测量管的主体，应采用非导磁、高电阻率、低导热率、并具有一定机械强度的材料，如奥氏体不锈钢，或者工程塑料 PVC、工业陶瓷等绝缘材料。所用不锈钢导管的厚度应满足耐压强度和低的涡流损失要求，过薄会强度不足，过厚则涡流损失大。不锈钢板卷制焊接而成的测量管其最小厚度 δ 应采用内压圆筒压力容器的计算公式进行计算求得。见下式

$$\delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \cdot \varphi - p} \quad (1)$$

式中 p —设计压力，MPa； D_i —金属导管内径，mm； $[\sigma]^t$ —设计温度下材料许用压力，MPa。

对不锈钢 1Cr18Ni9Ti 材料， $[\sigma]^t = 131\text{MPa}$ ； φ —焊接系数。对未做探伤实验的情况 φ 取 0.75。

常用工作压力的电磁流量传感器测量管,不锈钢材料的管壁厚度一般在 3~8mm 之间;应用工程塑料的测量管和高纯铝工业陶瓷测量管厚度的确定,应以工作耐压强度和耐温性能指标予以考虑。

2. 衬里

测量管的衬里与被测导电流体介质直接接触,不同衬里材料可适用于不同性质的被测介质。为满足被测介质的温度、压力、耐腐蚀性、耐磨性等工况条件等要求,对衬里材料应作出认真的选用。

对于如饮用水和灌溉用水、中水及污水等的被测流体介质,通常可选用聚四氟乙烯和氯丁橡胶等作衬里材料。

3. 电极

电极也与被测导电流体介质直接接触,在测量过程中易受介质电化学反应而产生的干扰信号的影响。电极能否有效、可靠地检测流量信号,对流量传感器而言非常重要。表 1 列出了常用电极材料及其适用范围。

电极的形状、尺寸和被感测的流量信号有关,应根据不同的需要进行选择,见表 2。电极在制造过程中,与导管和衬里的结合处必须密封,不得发生泄漏现象,见图 5。在使用过程中,电极表面不可有绝缘物、油污、泥垢等覆盖和污染。

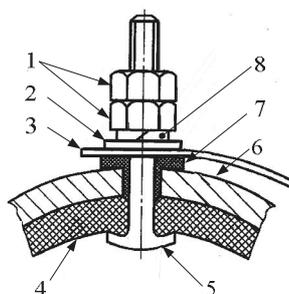
表 1 常用电极材料及特点

电极材料	特点及使用范围
耐酸钢 1Cr18Ni9Ti 含钼耐酸钢 0Cr18Ni12MoTi(相当于 316L)	1. 主要用于生活、工业用水,原水、下水、废物水 2. 稀酸、稀碱等弱腐蚀性酸、碱、盐溶液 3. 造价最低
哈氏合金 B(铬钼合金)	1. 适用低浓度盐酸等非氧化性酸 2. 硝酸等氧化性酸不适用
哈氏合金 C(铬钼合金)	1. 常温硝酸、其它氧化性酸、氧化性盐酸,有耐腐蚀性 2. 盐酸等还原性酸和氯化物不适用
钛 Ti	1. 耐腐蚀性略优于耐酸钢 2. 对氯化物、次氯酸盐、海水有良好的耐腐蚀性 3. 对常温的硝酸等氧化性酸又耐腐蚀性 4. 盐酸、硫酸等还原性酸不适用
钽 Ta	1. 具有和玻璃相似的优越耐腐蚀性 2. 除氢氟酸、发烟硫酸等少数酸外,大部分酸液适用 3. 氢氧化钠等碱液不适用
锆 Zr	1. 耐腐蚀性优于钛、镍铬钼合金和耐酸钢 2. 对浓度低于 80%的硫酸有耐腐蚀性
铂、铂钨合金	1. 对几乎所有酸碱液耐腐蚀

	2. 王水、铵盐及少数介质不适用 3. 价格昂贵
碳化钨硬质合金（耐酸钢表面涂敷碳化钨）	1. 浆液专用电极，耐磨性好，可降低浆液噪声 2. 耐腐蚀性差，不适用于腐蚀性液体
导电橡胶、导电氟塑料、多空陶瓷	1. 低噪声电极材料，抗浆液噪声和流动噪声 2. 导电氟塑料耐化学品性能好

表 2 常用电极形状及特点

形状		适用性	特点
单对点电极	平头形	应用最普遍。适用于各种衬里的内插、外插及浇注安装形式。适用于高压传感器	1. 形状简单，加工容易。与流体接触面积最小，节省昂贵的金属材料。 2. 流量信号内阻抗大。流体电导率的影响小，但受流速分布影响大。
	尖头形	适用于附着、覆盖、污染电极的流体测量。	
	半球形	适用于带纤维状、易挂在电极上的流体测量。	
多对点电极	两对及两对以上电极	电极的形状与点电极相同，适用于大口径、短前置直管段安装场合以及具有水位测量的非满管电磁流量传感器。	1. 改变权重函数分布以改善流速分布对流量传感器影响。 2. 在非满管道传感器中，用于获取流量信号外，并辅助检测水位。
大面积电极	弧面矩形板电极	适用于大口径、短前置直管段安装场合。 适用于电容式电磁流量传感器。	1. 改变权重函数分布以改善流速分布对流量传感器影响。 2. 在非满管道传感器中，用于获取流量信号外，并辅助检测水位。 3. 电容式传感中可降低信号内阻抗。



1 — 螺母；2 — 垫片；3 — 信号引出片；4 — 衬里；
5 — 电极；6 — 导管；7 — 绝缘套；8 — 弹簧垫片

图 5 电极装配示意图

2.2 磁路系统

磁路系统由励磁线圈、铁芯、极靴等零部件所组成。

因为传感器的长度有限，有限长磁场的边缘将会引起金属导管和导电流体内产生不可忽视的涡电流。导管末端的涡电流将抵消部分主磁通，削弱工作磁场强度，使流量信号减弱。因此在式（2）中加入了修正系数 k ，用来表示电极间实际感应电动势与理想（即在无限长

均匀磁场情况下)感应电动势信号电压的比值,通常 k 值小于 1。据有关资料介绍,在均匀磁场条件下,欲使 k 值接近 1,磁场的长度应为测量管(导管)直径的 2.5~3 倍以上,其线圈形状通常为矩形的鞍状,并采用余弦分布形式,因此流量传感器的长度和体积很庞大;而按权重函数分布的磁场,线圈长度约为测量管直径的 0.6 倍,其形状有矩形、菱形和圆形等,传感器的长度和体积就会比较小。

由于电磁流量传感器的气隙长度较大,相应磁感应强度就较低,铁芯材料通常工作于磁化曲线的较下部分,因此应选用硅钢或低碳钢材料制作铁芯。对交流正弦波励磁,由于产生的涡电流损失大,铁芯及磁轭零件应采用片状材料叠层而成;对低频矩形波励磁,则可采用低碳钢板材。

在交流正弦波励磁时,通常希望线圈的直流电阻值越小越好,这是因为线圈电阻小,铜阻损失就降低,流量信号与磁场的相位移也会降低。当采用低频矩形波励磁时,线圈电阻过大,其两端电压降就会过高,使二次仪表(即信号处理部分)励磁恒流源电路不能正常工作;而电阻过小,则有可能增大励磁矩形波电流的上升和下降时间,产生大的微分干扰,影响同步采样的准确性,同时还会增大恒流源功率管的功耗等。

采用电池供电的电子水表,其磁路系统应优先考虑选用矩形磁滞回线合金材料以减少励磁功耗。

3 电磁流量传感器工作原理

电磁流量传感器的工作原理是:根据法拉第电磁感应定律,当导电液体介质(如饮用水)流过非导磁体测量管切割由励磁磁场产生的磁力线时,导电液体介质就会产生感应电动势,通过放置在与磁力线和测量管相互垂直的一对电极可将感应电动势引出,见图 6 所示。由于感应电动势 E 与励磁磁场 B 的强度、介质的平均流速 \bar{v} 成正比,因此可从感应电动势的强弱来测定被测介质的流速,见下式

$$E = k D B \bar{v} \quad (2)$$

式中 E —感应电动势, V; k —调整系数; D —测量管内径, m; B —磁感应强度, T; \bar{v} —测量管内导电液体介质平均流速, m/s。

而流量传感器输出的体积流量 q_v 则为

$$q_v = \frac{\pi D}{4k B} E \quad (3)$$

因此感应电动势与体积流量之间的关系可表为

$$E = \frac{4k B}{\pi D} q_v \quad (4)$$

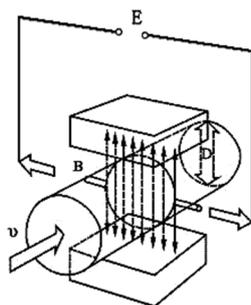


图 6 电磁流量传感器工作原理图

3.1 电磁流量传感器基本测量条件

从被测管道内流体实际流动状态和磁场分布情况来考虑,并根据对电磁流量传感器的理论分析,可得到其基本微分方程为

$$\nabla^2 U = \text{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

这是一个二阶线性偏微分方程,必须加入适当的边界条件和初始条件才能得到确定的解,这些条件正是电磁流量传感器充分和必要的设计、制造与工作条件。

1) 励磁磁场的磁力线方向与两电极轴线、测量管中心轴线(即流体流动方向)三者应相互垂直;

2) 导电液体的电气性质(电导率)应为均质,且应符合要求;

3) 被测液体为不可压缩流体;

4) 测量管沿轴线方向的无限长范围内励磁磁场应为均匀分布;

5) 测量管内壁应为绝缘材料组成,管壁处流速应为零;

6) 被测流速应以测量管中心轴线对称分布,并且是矢径 r 的函数。

求解式(5)方程主要有古典法和格林函数 G 法等两种。对于均匀磁场型电磁流量传感器,为了便于分析和阐明它的物理意义,常会提出“长筒流量传感器”物理模型。该模型假设流量传感器测量管很长,而励磁磁场的长度为 $2L$,电极长度也为 $2L$,且为线状电极。当 $L \rightarrow \infty$ 时,方程的求解就可由三维的柱坐标简化为二维平面圆坐标。按上述条件和假设,可由式(5)基本微分方程解得到式(2)的感应电动势公式。

3.2 权重函数的物理意义

在对式(5)的解析过程中,引入一个与点坐标位置和电极大小有关的、被称为权重函数的概念。对于二维坐标,可得到如下电磁流量传感器两测量电极之间电位差的表达式

$$E = \frac{2}{\pi R} \iint B(r, \theta) v(r, \theta) W(r, \theta) r dr d\theta \quad (6)$$

式中 W —权重函数; v —被测液体的速度函数; B —磁感应强度函数。

其中权重函数 W 为

$$W(r, \theta) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{r^{2n}}{R^{2n}} \cdot \cos 2n\theta \quad (7)$$

式中 r —测量管矢径; θ —转角。

权重函数 W 以直角坐标的表达式

$$W = \frac{R^4 + R^2(x^2 - y^2)}{R^4 + 2R^2(x^2 - y^2) + (x^2 + y^2)^2} \quad (8)$$

式中 R —测量管半径。

直角坐标与极坐标之间可按下式和图 7 所示进行转换。

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = z \end{cases} \quad (9)$$

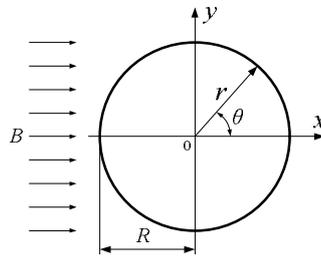


图 7 直角坐标与极坐标系变换

权重函数的物理意义是: 相同流速的流体微元在均匀磁场中运动, 虽然产生相同大小的感应电动势, 都对电极上的电位差有所贡献, 但贡献的大小却是不同的。权重函数是用来表示各流体微元对电极间电位的贡献程度, 它是所在位置的函数。图 8 是根据式 (8) 绘制的二维权重函数分布图, 从图中可知, 电极附近的感应电动势对电极间的流量信号贡献比较大。

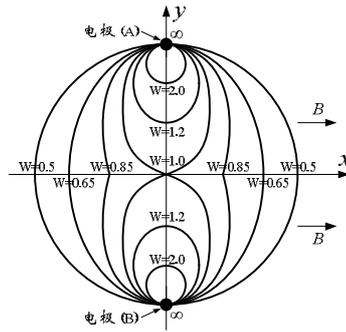


图 8 二维权重函数分布图

在电磁流量传感器励磁磁场的工作区域内，每个流体微元切割磁力线并产生感应电动势和相应的电位，而整个工作区域内各处流体微元产生的电场强度矢量和，即为被测流量信号合成的总电场。因此，权重函数可以起到对由任何流体微元切割磁力线所产生的感应电动势对两电极间电位差所作不同贡献的定量表达作用。

权重函数是一个与测量段尺寸、几何形状（包括电极）有关的空间函数，它与流速场的分布和励磁场的分布状态无关，它所反映的是测量段电场的电位分布。

用权重函数理论可以解释现代电磁流量传感器是如何通过采用非均匀磁场设计方法来得到对被测流速分布不敏感特性的。设测量管中心的磁场强度为 B_0 ， B_y 表示在直角坐标中任意点在 y 轴上的磁感应强度分量， W_x 为该点在 x 轴方向的权重函数，流速 v 为直角坐标的 z 轴方向。如 $B_y W_x = B_0 = \text{常数}$ ，即可形成一个按权重分布规律相对应的非均匀磁场，见图 9。非均匀励磁磁场的出现，不仅能提高电磁流量传感器对非轴对称流体的测量准确度，而且能够使传感器的制造长度大为减少，制造成本也大为降低。

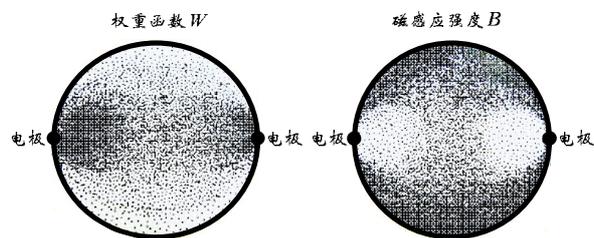


图 9 非均匀励磁传感器的权重函数与励磁磁场分布

图 10 是电磁流量传感器沿 z 轴和 y 轴方向的权重函数分布示意图。图中表明， W_y 随着离开电极所在截面距离的增大（即沿着 z 轴方向移动）而迅速衰减，当距离大于 $0.25D$ 时， W_y 值实际已接近为零。这表明在离电极平面较远处的管内空间，流体产生的感应电动势对电极信号输出的贡献已微不足道，因而可大大缩短传感器励磁磁场在 z 轴方向的长度。

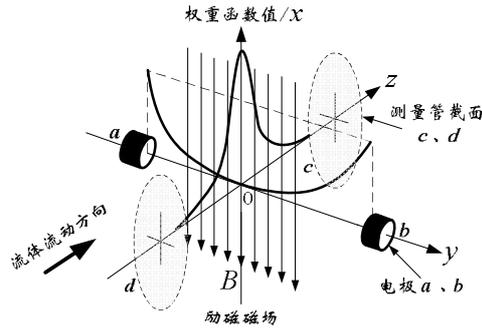


图 10 权重函数在 z 轴和 y 轴上的分布示意图

3.3 流速分布对电磁流量传感器测量结果的影响

在流速以测量管轴线为对称的速度分布条件下，应用古典法对式 (5) 的基本微分方程进行解析，可得到式 (2) 的电磁流量传感器原理公式。

考虑到传感器由均匀磁场励磁，可认为 $B(r, \theta)$ 为常数，即 $B(r, \theta) = B$ ；同时考虑到流速分布为轴对称，因此可将 $v(r, \theta)$ 表成 $v(r, \theta) = v(r)$ ，这样式 (6) 可由下式表达

$$E = \frac{2B}{\pi R} \iint v(r) r dr \cdot W(r, \theta) d\theta \quad (10)$$

对式 (7) 权重函数进行 $0 \sim 2\pi$ 积分，其结果为

$$\int_0^{2\pi} W(r, \theta) d\theta = 2\pi \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10)，可得

$$E = \frac{4B}{R} \int_0^R v(r) r dr \quad (12)$$

由于流速在管轴中心处为最大，在管壁处为零，因此其平均流速可用下式表示（参见图 11 示意图），

$$\bar{v} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v(r) \cdot 2\pi r \cdot dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R v(r) r dr \quad (13)$$

结合式 (12) 和 (13)，可得

$$E = 2RB\bar{v} = DB\bar{v} \quad (14)$$

式 (14) 表明，电磁流量传感器只要流速以管道中心轴线为对称分布，不管是层流或湍流状态，感应电动势都正比于平均流速。

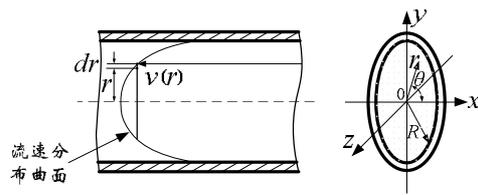


图 11 管道内流速分布示意图

流体流经弯头、渐缩管、渐扩管、阀门等阻流件后，会产生流速分布畸变或旋转流，并在其后直管段内，流速剖面也会出现非轴对称的偏流现象。因此流体只有经过相当长的直管段流动后，流体速度分布才能恢复到以中心轴线为对称的流动状态。大量实验表明，一般情况下对于均匀励磁磁场的圆形测量截面电磁流量传感器的上游需要有 5~10 倍 D 的直管段来保证流体按轴对称流动。

对于励磁磁场按权重函数分布的圆形测量截面电磁流量传感器和励磁磁场按均匀分布的矩形测量截面电磁流量传感器，由于它们的励磁磁场分布与权重函数乘积为一常数，因此对非对称的管内流速分布不会造成附加的测量误差。在此种情况下，电磁流量传感器可以采用较短的前后直管段，甚至可以不用直管段。

作者联系方式：宁波市 江北区 洪兴路 355 号，邮编：315032；宁波水表股份有限公司（浙江省水表研究院）姚灵；邮址：13806630959@139.com；电话：0574-88195868

2016 年 2 月 20 日