

流量测量技术全书 第二篇

第 7 章 电磁流量计

7.1 概述

7.1.1 电磁流量计的技术进步和市场发展

电磁流量计是以法拉第电磁感应定律为依据的流量测量仪表。自法拉第 1832 年利用地磁测量泰晤士河流速试验起, 到 1950 年工业电磁流量计产品问世以来, 随着电子技术和计算机技术的飞速发展, 电磁流量计已日趋成熟和完善, 成为流量仪表中重要和受欢迎的流量计品种之一。

二十世纪七十年代, 电磁流量感应信号微观分析的权重函数理论研究, 采用低频矩形波励磁技术的进步, 以及由于电子学和计算机技术的发展, 带动了电磁流量计制造技术的飞速发展。概括起来, 电磁流量计的技术进步、市场的发展, 可归纳用以下几方面说明。

(1) 高精度度

低频矩形波励磁、双频励磁、可编程励磁等新的励磁方式与前期采用的市电工频电励磁方式相比, 提高了传感器输出流量信号的信噪比; 先进的集成运算放大器大幅度降低了器件的噪声; 采用数字的处理方法等措施, 使电磁流量计的测量精度和性能不断向上提高; 电磁流量感应信号权重函数理论研究, 一定程度的解决了管道内流速分布非轴对称流量测量。因此, 现代的电磁流量计可能达到 $\pm 0.2\%$ 的示值误差。较过去 $\pm 1\%$ 相对于量程的误差精度有很大提高。而且, 从主要应用于过程控制的流量检测仪表, 到采用示值误差表示, 提高了流量计的积算精度, 成为一种有利于供需双方贸易交接的流量计量仪表。

(2) 高可靠性、多功能化

电磁流量计零点的变化, 主要是交变磁场中涡电流形成二次磁通所引起的。低频矩形波励磁能够有效地减少二次磁通的产生, 因而零点稳定。矩形波磁场的频率为工频频率的整倍数, 信号采样的交流平均值为零, 大幅度地抵消了信号中工频干扰的影响。调制的双频励磁、可编程励磁, 能够降低浆液流体测量时电极的电化学噪声影响, 提高传感信号的可靠性和稳定性。高集成度的微电子元器件减少了硬件的故障率, 硬、软件的屏蔽技术等措施, 有力地增加了转换器的可靠性。

现代的电磁流量转换电路中嵌入单片计算机。充分利用计算机具有信息贮存、分时处理、高速运算和控制能力, 因此比较容易实现诸如双向测量、空管检测、多量程自动切换、人机对话、与上位机通讯、自诊断等多功能。新一代具有 HART 协议和其它现场总线通讯的电磁流量计更为用户实现全新的现场总线生产控制与管理提供了条件。

(3) 小型化

权重分布磁场电磁流量传感器的磁场线圈,对均匀分布磁场的励磁线圈而言,其长度大大缩短;低频励磁信噪比的提高,使工作磁场的磁感应强度大幅度降低。因而,线圈铁心尺寸能大大地减小,传感器长度得以缩短。传感器和转换器合二为一的一体型结构,更能降低电磁流量计的制造和安装成本。

(4) 低能耗

低频矩形波励磁的磁场大部分时间工作在直流状态,铁芯的涡电流损失小;磁感应强度的降低,使电磁流量计的能耗也大幅度地降低。现在,一般型电磁流量计的电耗在10~20W以内。直流24V电压供电的两线制电磁流量计,包括励磁电流和信号输出仅为4~20mA。更有甚者,消耗功率仅2mW,用锂电池供电可使用十年,能如同水表那样,在无交流电场合下使用的电磁水表也在普及之中。

(5) 适用范围和市场范围的扩大

现代电子技术发展和新型绝缘材料、磁性材料不断涌现,有条件制造不同形式的电磁流量计,可以解决测量介质对电极的腐蚀、污染。电容式电磁流量计能解决介质电导率低至 $1\mu\text{S}/\text{m}$ 的流体测量,以代替传统的机械式容积流量计,用来测量纯水、制糖脱盐和含有油分低电导率流体。

一体型、两线制、防爆型、高压型、具有现场总线数字通讯功能的电磁流量计,在化工、石油、钢铁、冶金等工业生产过程自动控制中越来越受欢迎。

利用节流装置和电磁流量计相结合原理的潜水电磁流量计用来测量明渠流量,非满管道流量测量的电磁流量计也是近几年来流量仪表发展的热门产品。在今天环境保护和节水节能日益为人类社会重视的条件下,插入式流量计、流速计,在明渠、暗渠水、河道水及污水测量发挥着重大作用。

食品工业、饮料、制药生产要求短的测量时间和定量批量罐装;造纸、矿浆等浆液及脉动流量的测量,要求反映速度快,需要解决直流极化电压的尖状噪声所引起测量抖动现象。高频励磁,双频励磁电磁流量计则能发挥其作用。突破电磁流量计仅能测量导电性液体的理论,非导电性液体电磁流量计的理论研究和试验,亦进入产品开发阶段。总之,新的使用领域不断扩展,促使电磁流量计不断地发展和技术进步。

7.1.2 术语

a) 电磁流量计 电磁流量计由以下所述的传感器和转换器组成。

1) 传感器 由以下部分组成的装置：被测流量的液体和对电绝缘的测量管，在测量管直径上相对安装的、用于测量液体中产生信号的一对以上的电极，以及使测量管内产生磁场的励磁线圈和铁芯。传感器输出与流量成正比的信号电动势。

2) 转换器 转换器有以下功能的电路组成：从传感器的电极检测出流量信号电动势，并转换成与流量成正比的输出信号。有的转换器是与传感器构成一体化结构形式。

b) 测量管（通常称为导管） 被测流体流过传感器的管道部分。这段管道的内部表面通常与电气绝缘。测量管的口径和端面间距尺寸如下：

1) 口径 连接传感器的配管公称通径。往往用连接法兰的公称通径来表示。

2) 端面间距尺寸 传感器管轴方向上法兰连接端面之间的尺寸。带有衬里或接液环的测量管，也包括这些部件的厚度。

c) 电极 为取出电动势的一对以上的导体或电容耦合导电板。

d) 衬里 在传感器中直接接触被测流体的测量管内表面上涂敷一层较厚的绝缘膜。包括绝缘性测量管。

e) 接液环（也称接地环） 为使流量信号和被测流体保持相同参考电位的环状导体。

f) 电极电压 电极间的总电动势。包括流量信号的电位差以及同相干扰、磁通微分干扰（正交干扰）、共模干扰等与流量无关的噪声。

1) 信号电动势 在电极间产生的与流量成正比的电压。

2) 同相干扰 与流量信号同相，但不随流量变化的电极电压成分。

3) 磁通微分干扰 由磁通微分而产生的电极电压成分，具有与流量信号成 90° 的相位差。如用工频市电励磁，常称为正交干扰。

4) 共模干扰 在电极上与基准电位之间存在的极性相同、幅度相等的电压。

g) 输出信号 由转换器输出的、与流量成正比的信号。

h) 传感器常数（特征系数） 传感器固有的常数。相当于在 $1m/s$ 流速下，将励磁电流取一定值时的信号电动势，或产生一定电动势时的励磁电流。

i) 满量程流量 与最大输出相对应的流量。

j) 满量程流速 与最大输出相对应的流速。

k) 额定精确度 在参比工作条件下，电磁流量计所允许的误差限。

7.1.3 特点

依其原理与结构，电磁流量计有以下优点：

(1) 测量体积流量。测量不受流体的密度、温度、压力、粘度、雷诺数以及在一定范围

内电导率的变化影响。

- (2) 在管路中，传感器无活动部件，无压力损失，可靠性高。
- (3) 测量范围大。同一口径传感器，满量程流速可在 $0.3\sim 15\text{m/s}$ 范围内任意调整，每个量程的下限可能测量到 2%，因此，范围度达 1500: 1 以上。一般传感器口径从 3mm 到 3m，所以其测量范围很大。
- (4) 可测固、液两相流（可高达 70%以下的固体含量）。
- (5) 原理上流量信号是线性的。与其它流量计相比测量精确度高，可达指示值的 $\pm 0.2\%\sim\pm 0.5\%$ 。
- (6) 具有橡胶、氟塑料或工业陶瓷等材料衬里，可测量腐蚀性流体。
- (7) 反应速度快，可测脉动流量。
- (8) 可测正、反两个方向的流动流体。

缺点是：

- (1) 电磁流量计不能测量气体和石油、石油制品以及有机溶剂等不导电的液体。
- (2) 测量的是体积流量，不能测量质量流量。
- (3) 当液体中混入气泡时，混入的气泡是少量的（5%以内的体积含量）、且是均匀混入在液体中，测得的体积流量是包含气泡在内的体积流量。
- (4) 衬里材料、电极密封和磁场受温度的限制，通常， 180° 以上的高温液体不能测量。
- (5) 对于高速的脉动流体测量，有一定的脉动频率限制。
- (6) 目前，液体的电导率有一定测量下限值。

7.2 测量的基本原理和理论

7.2.1 基本原理

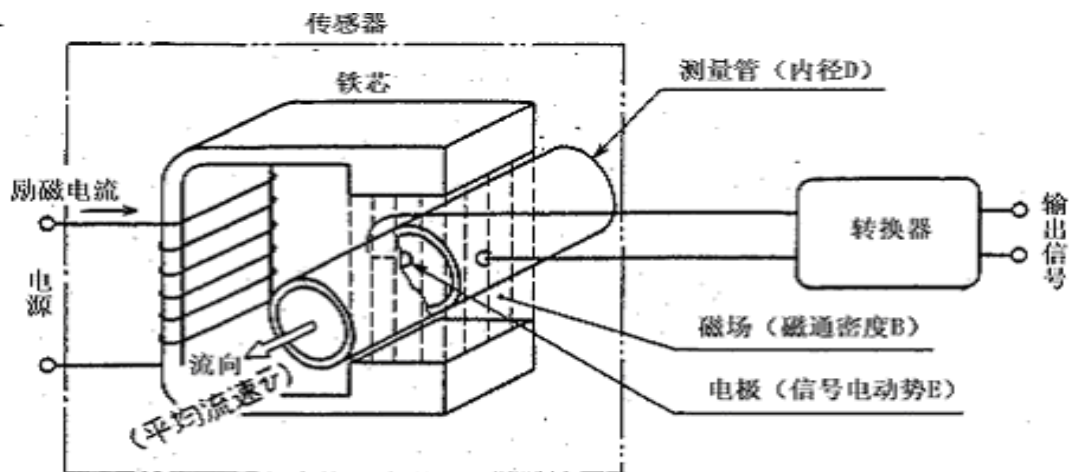


图 7-1 电磁流量计的工作原理

根据法拉第电磁感应定律，导电液体在磁场内流动产生感应电动势。如图 7-1 所示，流过传感器工作磁场的导电流体，在测量管壁与流动方向和磁场方向相互垂直方向的一对电极间产生与体积流量成比例的电动势。其大小可以用下式表示。

$$e = kBDv \quad (7-1)$$

式中 e ——感应电动势，电压 (V)；

k ——常数；

B ——磁感应强度 (T)；

D ——测量管内径 (m)；

v ——测量管内电极断面轴线方向的平均流速 (m/s)。

体积流量为 q_v (m^3/s) 时，流量可表示为： $q_v = \frac{\pi D^2}{4} v$ 。用公式 (7-1) 代换可得 (7-2) 和

(7-3) 式得：

$$q_v = \frac{\pi D}{4 kB} e \quad (7-2)$$

$$q_v = \frac{\pi De}{4 kB} = K \frac{e}{B}; \quad (K = \frac{\pi D}{4k}) \quad (7-3)$$

(7-2) 式，说明当测量管内径 D 和磁感应强度 B 一定时，流量 q_v 与感应信号 e 成正比；(7

—3) 式，说明当具有磁场检测信号时，流量 q_v 与感应信号 e 和磁感应强度 B 的比值成正比。

这里，满足正常测量应符合以下基本条件：

(1)管道内必须充满导电流体

在导电液体充满管道流动时，液体的流速分布成轴对称流动，感应电动势与平均流速成正比。

(2)流体的电导率是均匀的

如果流体的电导率不是均匀的，电极上获得的信号将出现不稳定的干扰，造成很大的测量偏差。

(3)测量管内壁需要附绝缘衬里

在电极一定远处，测量管需要衬有绝缘物。否则，金属导管的内壁接触导电液体，会把感应的电动势短路掉，

(4)被测量液体的电导率有一定范围的规定值

低电导率液体的部分游离离子摩擦电极产生流动噪声，引起测量输出会抖动。过低电导率的流体介电常数不可忽视会对感应电动势有所影响；高导电液体（如液态金属）感应会出现集肤效应而减弱电动势。因此，被测液体的电导率有一定的限制范围。一般电磁流量计电导率的下限约为 $500\mu\text{ S/m}$ ；电导率的上限以非电子导电的介质为限。

7.2.2 理论

在图 7-1 所示的测量原理中，为了能够叙述清楚，假设磁通密度 \mathbf{B} 的分布是均匀磁场。实际上，考虑到不均匀流速分布，并且使用的磁场是不均匀磁场，这里需要综合电磁场和流场两方面的情况加以说明，这就是要讨论的电磁流量计理论问题。

电磁流量计的理论由 J.A.Shereliff^[1]、王竹溪^[2]、Engl^[3]、SchomMartz^[4]等详细研究过，参考资料^[5]也有详尽介绍。这里，我们尽可能地把他们的论述统一起来，用以说明电磁流量计测量的内在原理。

符号说明

\vec{B} ：管内任意点的磁通密度 (T)

B_x 、 B_y 、 B_z ：任意点磁通密度 x 、 y 、 z 方向上的分量 (T)

d ：管道内直径 (m)

a ：管道内半径 (m)

\vec{v} ：平均流速 (m/s)

v ：流速矢量 (m/s)

v_x 、 v_y 、 v_z ：任意点流速矢量 x 、 y 、 z 方向上的分量 (m/s)

U ：管内任意点感应电位 (V)

U_e ：在 x 轴管壁一对电极上感应的电动势 (V)

ϵ_0 ：真空的介电常数 ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

ϵ ：流体的介电常数 (F/m)

σ ：流体的电导率 (S/m)

μ ：流体的导磁率 (H/m)

ω ：励磁角频率 (Hz)

\vec{j} ：管内任意点的电流密度 (A/m^2)

\vec{E} : 管内任意点的电场强度 (V/m)

\vec{D} : 管内任意点的电通量密度 (A.s/m²)

\vec{H} : 管内任意点的磁场强度 (A/m)

\vec{W} : 权重函数矢量

$W_\xi^{(3)}$ 、 $W_\eta^{(3)}$ 、 $W_\zeta^{(3)}$: 三维权重函数矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量

$W_\xi^{(2)}$ 、 $W_\eta^{(2)}$ 、 $W_\zeta^{(2)}$: 二维权重函数矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量

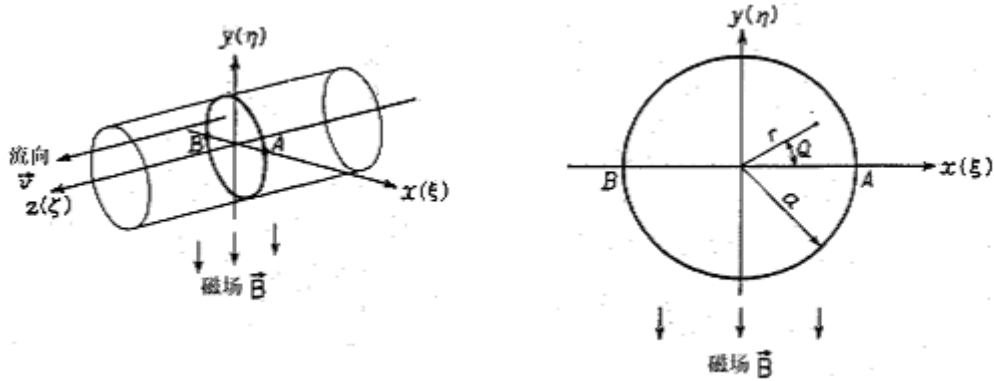


图 7.2 电磁流量计的坐标取向

(1) 基本方程式 电磁流量计的基本方程式一般在以下假设条件下进行推导。

- a) 流体的导磁率 μ 相等, 而且等于真空中的导磁率 μ_0 。
- b) 假设流体的导电率 σ 是同向、均匀的, 欧姆定律成立。

运动流体 (物质) 由静止坐标系的微分方程组 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$, $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ 变换为

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (7-4)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + (\epsilon - \epsilon_0) \vec{v} \times \vec{B} \quad (7-5)$$

利用麦克斯韦方程组之一

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

两边取 div , 因点电流的散度为零, 按矢量恒等式可得

$$\text{div}(\text{rot} \vec{H}) = \text{div}(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) = 0 \quad (7-6)$$

把式(7-4)和(7-5)代入式(7-6), 可得

$$\left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}\right) \operatorname{div} \vec{E} = -\{\sigma + (\varepsilon - \varepsilon_0)\} \operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7-7)$$

由麦克斯韦方程组的另一方程式:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} U \quad (7-8)$$

磁场和电场是随时间以励磁的角频率 ω 变化, 所以

$$\vec{B}(t) = \vec{B} \exp(i\omega t), \quad \vec{E} \exp(i\omega t) \quad (7-9)$$

把式(7-8)两边取 div , 和式(7-9)代入(7-7), 并利用矢量恒等式 $\operatorname{div} \operatorname{grad} U \equiv \nabla^2 U$ 得

$$\nabla^2 U = \frac{\sigma + i\omega(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\sigma + i\omega t} \operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7-10)$$

通常电磁流量计测量流体的电导率比较高, $\sigma \gg \omega \varepsilon$, 流体中的位移电流可以忽略, 上式变为下式

$$\nabla^2 U = \operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7-11)$$

这就是电磁流量计的基本微分方程式。

(2) 二维情况问题的解

在式(7-11)满足以下条件可以按二维问题信号电求得电动势的解。

- c) 管路是以 a 为半径的圆管, 电极在 x 轴的 $A(a, 0, 0)$ 和 $B(-a, 0, 0)$ 两点;
- d) 流动只有 Z 分量;
- e) 磁场不具有 Z 分量, 在 Z 轴方向上认为是相等的;
- f) 管壁是绝缘的, 管壁处 $v_z = 0$ 。

式(7.11)右边可以利用矢量恒等变换为

$$\operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B}) = \vec{B} \operatorname{rot} \vec{v} - \vec{v} \operatorname{rot} \vec{B}。$$

由于磁场几乎不受流体中感应电流的影响, 所以 $\operatorname{rot} \vec{B} = 0$ 。从上述条件可知, $v_x = v_y = 0$,

$B_z = 0$, 所以式(7-11)归于二维问题可写成

$$\nabla^2 U = B_x \frac{\partial v_z}{\partial y} - B_y \frac{\partial v_z}{\partial x}$$

求解式(7-11)引入格林函数 $G(x, y, \xi, \mu)$, 就得到下式

$$U = \iint G(x, y, \xi, \eta) \left(B_x \frac{\partial v_z}{\partial \eta} - B_y \frac{\partial v_z}{\partial \xi} \right) d\xi d\eta \quad (7-12)$$

边界条件为

$$\left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)_{r=a} = 0, \quad (v_z)_{r=a} = 0$$

电极 A 和 B 间的电位差由式(7-12)部分积分求得

$$\begin{aligned} U_e &= U(a, 0) - U(-a, 0) \\ &= \frac{2}{\pi a} \iint (B_y W_\xi^{(2)} - B_x W_\eta^{(2)}) v_z d\xi d\eta \end{aligned} \quad (7-13)$$

这里

$$\left. \begin{aligned} W_\xi^{(2)} &= \frac{a^2(a^2 + \eta^2 - \xi^2)}{a^4 + 2a^2(\eta^2 - \xi^2) + (\xi^2 + \eta^2)^2} \\ W_\eta^{(2)} &= \frac{2a^2\eta\xi}{a^4 + 2a(\eta^2 - \xi^2) + (\xi^2 + \eta^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7-14)$$

$\iint d\xi d\eta$ 是对管道横截面的积分。

式(7-13)表示在磁场 (z 方向是相同的) 随地点 (x, y, z) 改变, 流速分布 v_z 在 (x, y) 截面内也是随地点改变情况下产生电动势的。 $W_\xi^{(2)}$ 、 $W_\eta^{(2)}$ 是表示该点的电位在电极上产生电动势所占比例的权重函数, 图 7-3 为权重函数的分布规律图。

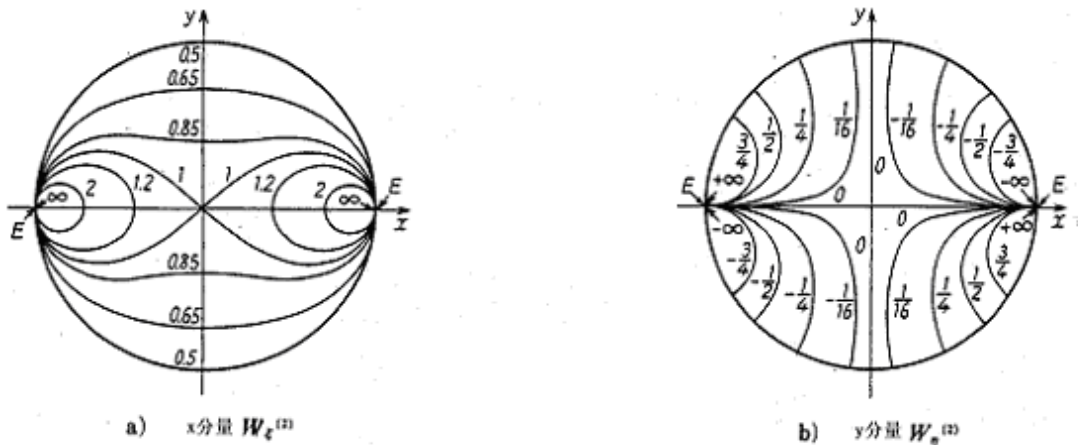


图 7-3 二维权重函数

(3) 均匀磁场、轴对称流情况

若磁场只有 y 分量, $B_y = B$, $B_x = 0$, 式 (7-13) 中的 $B_x W_\eta^{(2)}$ 项变为零。为简单起见, 取极坐标, 即 $\xi = r \cos \theta$, $\eta = r \sin \theta$, 因为是对称, 可写为 $v_z = v(r)$ 。

$$U_e = \frac{2}{\pi a} \int_0^a \int_0^{2\pi} W_\xi^{(2)}(r, \theta) \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{v}(r) r d\theta dr \quad (7-15)$$

$$W_\xi^{(2)}(r, \theta) = \frac{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \cos 2\theta}{1 - 2\left(\frac{r}{a}\right)^2 \cos 2\theta + \left(\frac{r}{a}\right)^4}$$

在 $(r/a)^2 = R$ 情况下，利用 $1 - 2R \cos 2\theta + R^2 = \{1 - \operatorname{Re} \exp(2i\theta)\} \times \{1 - \operatorname{Re} \exp(-2i\theta)\}$ 展开如下

$$\begin{aligned} W_\xi^{(2)}(r, \theta) &= \frac{1 - R \cos 2\theta}{1 - 2R \cos 2\theta + R^2} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 - \operatorname{Re} \exp(2i\theta)} + \frac{1}{1 - \operatorname{Re} \exp(-2i\theta)} \right) \\ &= \frac{1}{2} \{ 1 + \operatorname{Re} \exp(2i\theta) + R^2 \exp(4i\theta) + \dots + R^n \exp(2ni\theta) + \dots \\ &\quad + 1 + \operatorname{Re} \exp(-2i\theta) + R^n \exp(-4i\theta) + \dots + R^n \exp(-2ni\theta) + \dots \} \\ &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} R^n \left(\frac{\exp(2ni\theta) + \exp(-2ni\theta)}{2} \right) \\ &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a} \right)^{2n} \cos 2n\theta \end{aligned}$$

把 $W_\xi^{(2)}(r, \theta)$ 对 θ 从 0 到 2π 积分，则第 2 项以下，都是 $\int_0^{2\pi} \cos 2n\theta d\theta = 0$ 。所以，就成为

$$\int_0^{2\pi} W_\xi^{(2)}(r, \theta) d\theta = 0$$

因此，

$$U_e = \frac{4\mathbf{B}}{a} \int_0^a \mathbf{v}(r) r dr$$

另外，平均流速为

$$\bar{v} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \mathbf{v}(r) 2\pi r dr = \frac{2}{a^2} \int_0^a \mathbf{v}(r) \cdot r dr$$

所以

$$U_e = 2\mathbf{B}\bar{v}a = \mathbf{B}\bar{v}d$$

所以，可以看到，若流动是轴对称，电动势与流速分布无关，与平均流速成正比。这就是电磁流量计与其它速度式流量计如涡轮流量计、涡街流量计、超声波流量计和差压式流量计在测量原理上的优越之处。也是其上游直管段比上述流量计短的原因。

当流动是非轴对称时，在式 (7-13) 中， $v_z(\xi, \eta) = v(r, \theta)$ ，电动势的式(7-15)，变为：

$$U_e = \frac{2B}{\pi a} \int_0^a \int_0^{2\pi} W_\xi^{(2)}(r, \theta) v(r, \theta) r dr d\theta$$

正如在图 7-3 所示那样， $W_\xi^{(2)}$ 在电极附近呈现较大值。所以在电极附近流动的非轴对称性影响要大。

(4) 三维情况问题的解

取消假设条件中 d)、e)，就变为三维问题。一般可用格林函数求解基本方程式 (7. 11)

$$U = \iiint G(\vec{x}, \vec{\xi}) \operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B}) d\xi d\eta d\zeta$$

这里， $\vec{x} = \vec{x}(x, y, z)$ ， $\vec{\xi} = \vec{\xi}(\xi, \eta, \zeta)$ 均为向量。

两个电极的极坐标用 $\vec{x}_A = (a, 0, 0)$ ， $\vec{x}_B = (a, \pi, 0)$ 表示，则两个电极间的电位差为

$$U_e = \iiint \operatorname{grad} G(\vec{x}_A, \vec{\xi}) - G(\vec{x}_B, \vec{\xi}) (\vec{v} \times \vec{B}) d\xi d\eta d\zeta \quad (7-16)$$

这里，

$$\begin{aligned} & G(\vec{x}_A, \vec{\xi}) - G(\vec{x}_B, \vec{\xi}) \\ &= \frac{a^2}{2} \frac{1}{(a^2 + \xi^2 + \eta^2 - 2a\xi + \zeta^2)^{1/2}} - \frac{a^2}{2} \frac{1}{(a^2 + \xi^2 + \eta^2 + 2a\xi + \zeta^2)^{1/2}} \end{aligned}$$

在式(14)中，设 $\vec{W} = \operatorname{grad} \{G(\vec{x}_A, \vec{\xi}) - G(\vec{x}_B, \vec{\xi})\}$

这样就可表示为

$$U_e = \iiint \vec{W} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) d\xi d\eta d\zeta \quad (7-17)$$

在三维问题中，代替二维问题的权重函数的是权重函数矢量 \vec{W} ，用它表示该点电位对电动势的贡献率。

在 \vec{W} 的分量中，沿电极轴最重要的是 x 分量 $W_\xi^{(3)}$ 。可求得如下，其分布示于图(7-4)。

即使在管轴方向上，也是在电极附近的电位贡献率大。

$$\begin{aligned} W_\xi^{(3)} &= \frac{\partial}{\partial \xi} \{G(\vec{x}_A, \vec{\xi}) - G(\vec{x}_B, \vec{\xi})\} \\ &= \frac{a^2}{2} \frac{a + \xi}{(a^2 + \xi^2 + \eta^2 + 2a\xi + \zeta^2)^{3/2}} + \frac{a^2}{2} \frac{a - \xi}{(a^2 + \xi^2 + \eta^2 - 2a\xi + \zeta^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (7-18)$$

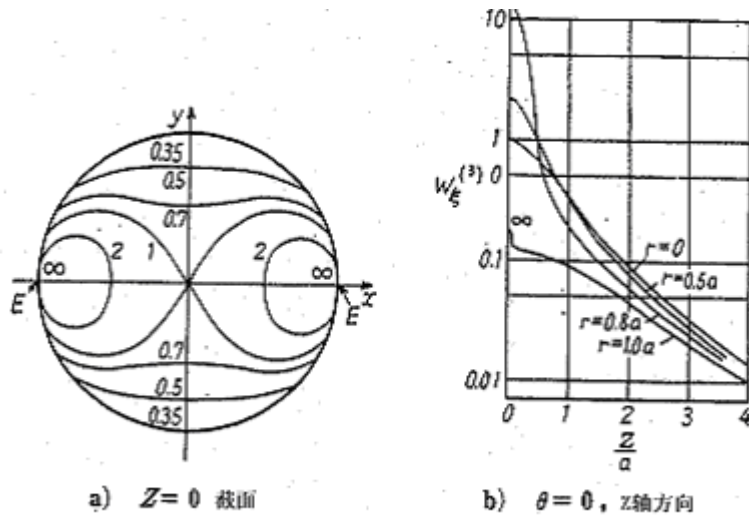


图 7-4 三维权重函数的 X 分量

(5) 非均匀权重转换磁场

在均匀磁场的场合下，流动若是非轴对称的，则平均流量就产生误差。若把磁场按权重的规律做成不均匀分布，就可以改善这种情况，减小由非轴对称流引起的误差。这样，可以缩短流量计上游直管段。把式(7-16)改写成

$$U_e = \iiint (\vec{B} \times \vec{W}) \cdot \vec{v} d\xi d\eta d\zeta \quad (7-18)$$

这里，假定流速仅有 v_z 分量，则

$$U_e = \iiint (B_y W_\xi^{(3)} - B_x W_\eta^{(3)}) \cdot \vec{v}_z d\xi d\eta d\zeta \quad (7-19)$$

B_x 、 B_y 在 z 方向上的密度可能不一样的变化，若能使磁场分布不管在哪个 (ξ, η) 点使得式(7.2-20)是个常数 C ,

$$\int (B_y W_\xi^{(3)} - B_x W_\eta^{(3)}) d\xi = C \quad (7-20)$$

则有

$$U_e = C \iint v_z d\xi d\eta \quad (7-21)$$

即不管流速分布 $v_z(\xi, \eta)$ 怎样的变化，式(7-21)都能给出平均流量。Engl^[3]从理论上做过证明，严密地满足式(7-20)的磁场分布是不存在的。

不过，在实际应用中，都是做成电极附近的磁通密度小，在远离电极的管顶和管底部附近磁通密度较大，尽可能的使其接近理想的权重转换磁场。

权重转换磁场的磁场分布近似等于二维权重函数的倒数。如图 7-5 介绍的几种权重分布磁场励磁线圈形状，实际上是一般用菱形、鞍形线圈或带鞍形极靴片的圆筒形线圈

来实现的。因为权重函数是位置函数，它与电极的大小和形状有关，所以利用大面积弧型板电极也能实现权重分布的要求。这种权重转换磁场的优点除了能减小非轴对称流量测量误差外，还能使线圈轴向长度缩短，减小流量计传感器端面间长度。

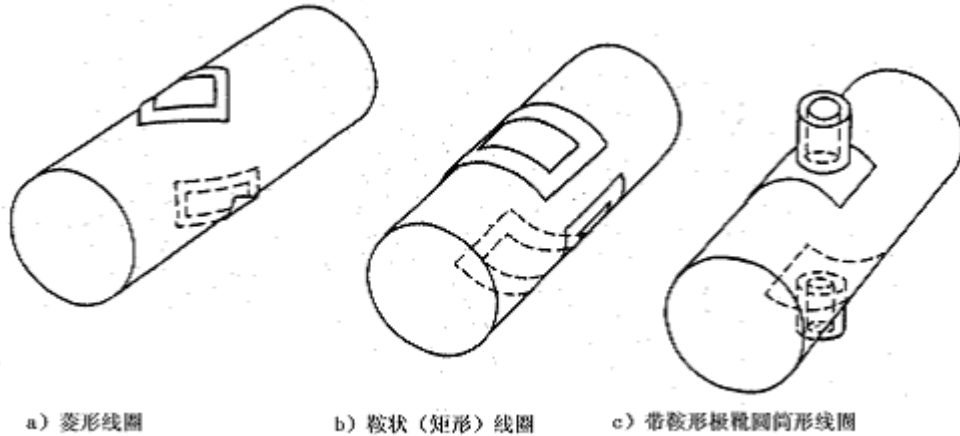


图 7-5 几种权重分布磁场的励磁线圈形状

7.2.3 权重函数的物理意义与实用意义

权重函数是对电磁流量计电极上感应电动势的静电场分析由数学解析得出来的。它的分布规律使得我们能够从微观上认识电极间产生感应电动势的本质。图 7-6 用来表示工作磁场区域内，流体任意一个微元质点存在的感应电势。两电极间的感应电动势则是此区域内所有流体微元质点电势的积分。如此，权重函数则能够有机地把磁场、流场和电场紧密地联系起来。因此，研究权重函数能够从微观上揭示信号电动势的电位分布规律，掌握这个规律，充分地应用它去改善流速分布对测量的影响；利用权重函数的规律是研究流量计提高测量精确度和可靠性的方法和与途径。也就是说有了权重函数的理论，就有了研究、创新和改进电磁流量计的指导基础。

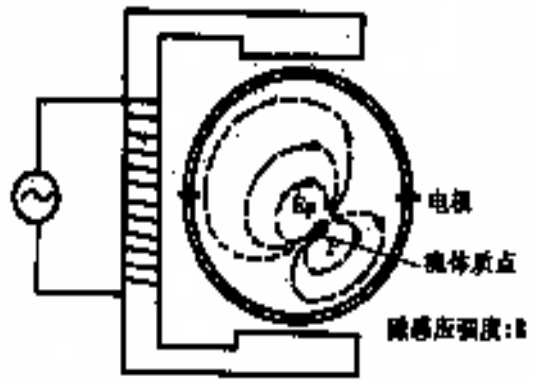


图 7-6 流体微元的感应电势

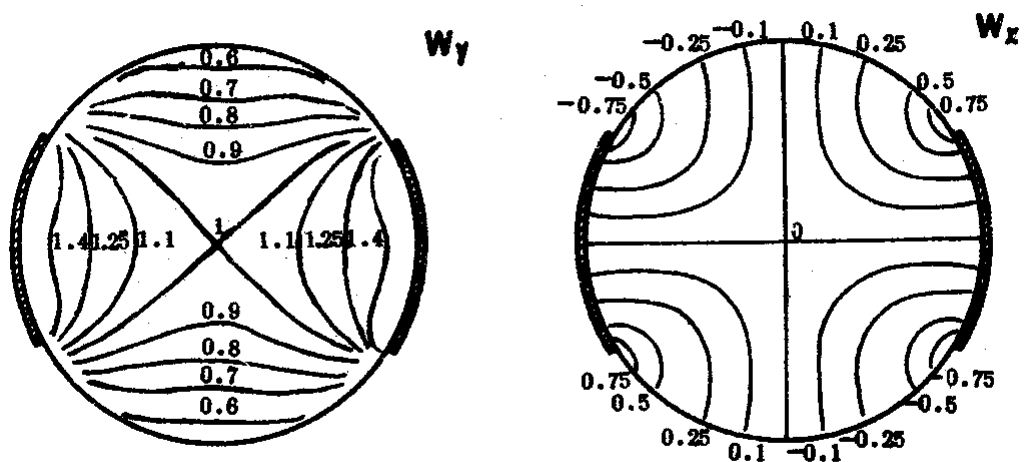


图 7-7 弧形板电极的权重函数

后面提到电磁流量计的一些应用、信号智能处理和新品种开发例子可以看到，许多例子都是以信号权重分布规律为依据的。比如现在已经出现的一些电磁流量计的变型产品和应用例子：流量计上游是 90° 弯头安装时，电极与水平轴线或垂直轴线成 45° ，偏流对测量影响最小；通过有磁场和无磁场情况下的感应信号电压比较，可以检测到由于衬里被破坏引起的偏流；用电极检测电动势的大小，检测非满管道内的液位高低来计算液体截面积，同时用电极电动势求得流体平均流速，然后可以计算非满管道内的流量。

权重函数是电位分布的位置函数，它不仅与感应电动势区域内的位置有关，也与电极的面积大小和形状有关。前面所讨论和图示的是点状电极情况的权重函数。图 7-7 是弧形板状电极的权重函数；图 7.8 是四点电极的权重函数分布。由于对称关系，这里仅画出图像的四分之一。

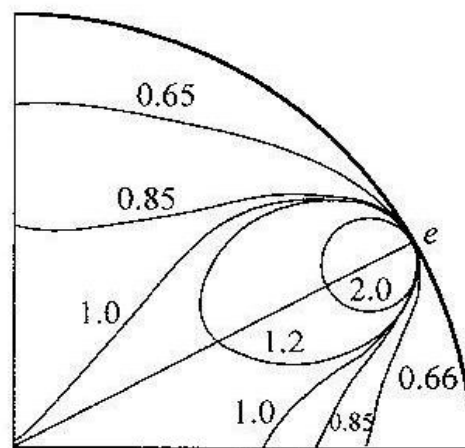


图 7-8 四点电极的权重函数分布

7.2.4 信号的灵敏度系数(包括短路系数)

电磁流量计测量原理公式(7.2-1)右边有一个比例常数 k 。仔细研究发现，磁场在 z 轴的方向有限长，会如图 7.9 所示那样磁通边缘从的强度变化形成涡流。变化的涡流产生交变的磁场，部分抵消主磁通，从而减弱工作磁场的磁场强度 B ，降低流量信号电动势 E 。

A.J.Shereliff 用灵敏度 S 来表示这一现象。灵敏度的定义为

$$S = U_{XY} / (DBV)$$

其物理意义是有限长磁路长度流量计电极间的感应电动势与无限长磁场长度下电极的感应电动势之比。

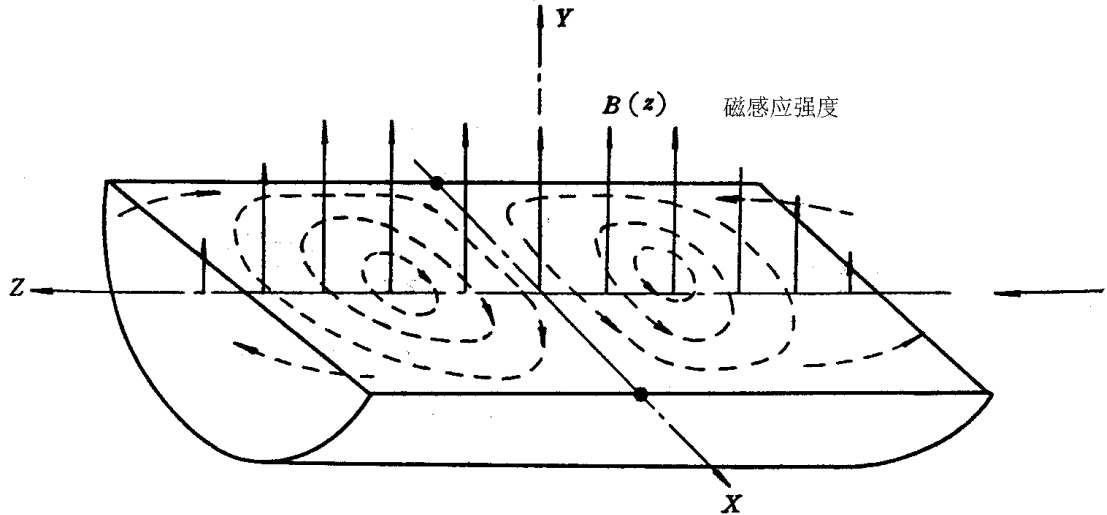


图 7-9 磁场边缘的涡电流

(1)测量管内壁绝缘的情形

图 7-10 是 J. A. Shereliff 求得紊流状态下有限长磁场的灵敏度, 用下式表示:

$$S = 1 - \frac{16}{n^3} \sum \frac{1}{n^3} \sinh \frac{n\pi}{2} \exp\left(-\frac{n\pi c}{2b}\right) \quad (7-22)$$

若以 c/b 表示励磁线圈轴向长度与测量管内半径的比值, 按式 (7-22) 计算测量管内壁绝缘情况下, 这个结果绘成图 7-10。由图 7-10 可以看出, 只有在 $c/b = 2.8 \sim 3$ 范围, $S=0.99$ 。这就是说, 为了减小磁场边缘效应的影响励磁线圈的长度应为测量管内径的 2.8 倍以上, 这时电极上产生的感应电势接近于无限长磁场时的理论计算值。

(2)测量管内壁导电的情形

假若测量管内壁是导电的, 由于导电管壁的短路作用, 磁场边缘效应更加明显, 从而导致电极上感应电势的损失增加。随着管壁电导率和壁厚的不同, 这种影响也不同。

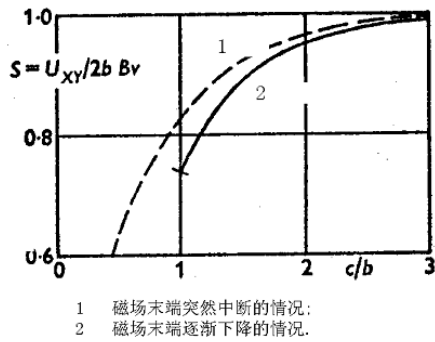


图 7.10 有限长磁场的灵敏度系数

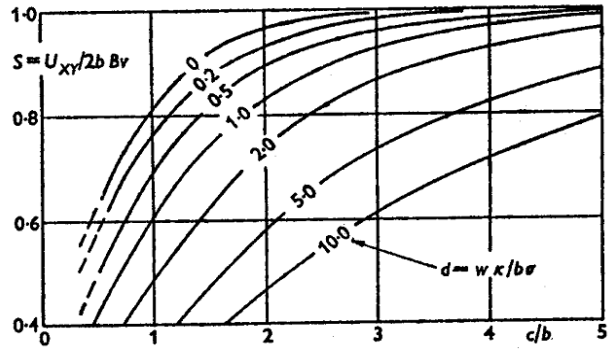


图 7-11 导管的导电性对灵敏度的影响

J. A. Sherliff 得到图 7-11 的结论。图中： w 壁厚； κ ：壁导电率； σ ：液体导电率。由图 7-11 可以看出，在同样 c/b 的比值下，管壁电导率越大，管壁越厚，这种影响越大，即感应电势的损失也越多。当 $d = 0$ 时，相当于管壁是绝缘的情形，其结果与图 7-10 所示的一样。这也说明了测量管管壁绝缘的必要性与重要性。

参考文献^[6]Table12.3 引用了 1972 年由 Bevir 计算得到的磁场和衬里有限长情况下的灵敏度系数数值。注意，Bever 是在正弦波励磁情况下计算的数值，到目前为止尚未见到得到现在主流用的矩形波励磁情况下电磁流量计灵敏度的计算公式和数值。

表 7-1 则是日本 JIS B7554 电磁流量计标准的编制说明中提供的一组实测数据。测试条件：励磁线圈长度为测量管内径的 1.5 倍 (1.5D)，均匀磁场。

表 7-1 日本 JIS B7554 提供的实测灵敏度系数

传感器									S
通径	800	800	1000	1500	2000	2000	2300	2300	平均值
mm	1#	2#			1#	2#	1#	2#	
灵敏度系数 S	0.972	0.963	0.966	0.961	0.967	0.961	0.967	0.967	0.966

目前，采用权重转换磁场或多电极、大面积电极方式的电磁流量计励磁线圈和测量管长度都缩短了，有的励磁线圈已经缩短到 0.3D~0.8D。许多大口径 (DN600 以上) 衬里测量管只有 1D 的长度。测量管的缩短，显然 S 也将变小。

参考文献^[7]应用等效网络电阻的物理模型，分析了与连接管内部导电流体短路状态，造成的感应电动势相对误差 $\frac{\delta U}{U}$ 。如图 7-12 所示，物理模型是把管内导电流体分割成

$M \times N \times K$ 个节点，这些节点间由电阻网络相互连接起来。各个节点的电阻值近似地代表

着该点的权重函数 W 。内部绝缘的测量管和两端导电的接地环或管道连接，使得物理模型的结合面上的电阻值发生变化。因此，会引起该部分的权重函数发生变化。权重函数的变化记作 δW 。求和 $M \times N \times K$ 个节点区域内的电位，可以得出与理想的感应电动势之差，即可得到测量管与连接管导电短路状态造成感应电动势相对误差

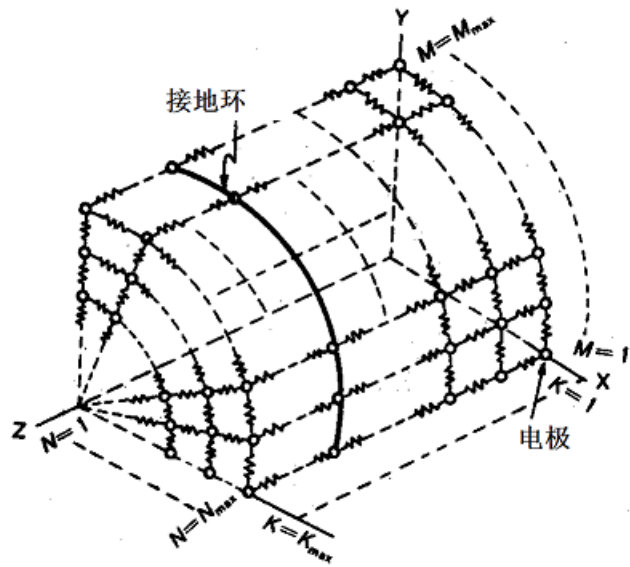


图 7-12 测量管内部电阻网络模型

$\frac{\delta U}{U}$ ，

$$\delta U = \nu_0 \sum_M \sum_N \sum_K [(B_X)_{MNK} \cdot (\delta W_Y)_{MNK} - (B_Y)_{MNK} \cdot (\delta W_X)] \Delta M \Delta N \Delta K \quad (7-23)$$

式中： $\delta U =$ （传感器前后管道为绝缘性的感应电动势）-（传感器前后管道为导电性的感导电应电动势）；

ν_0 一管内的平均流

速；

$(B)_{MNK}$ 一各节点的磁

感应强度；

$(\delta W)_{MNK}$ 一各节点的

权重函数变化分量；

ΔM 一圆周方向的

单位长；

ΔN 一半径方向上的

单位长；

ΔK 一管轴方向上的

单位长。

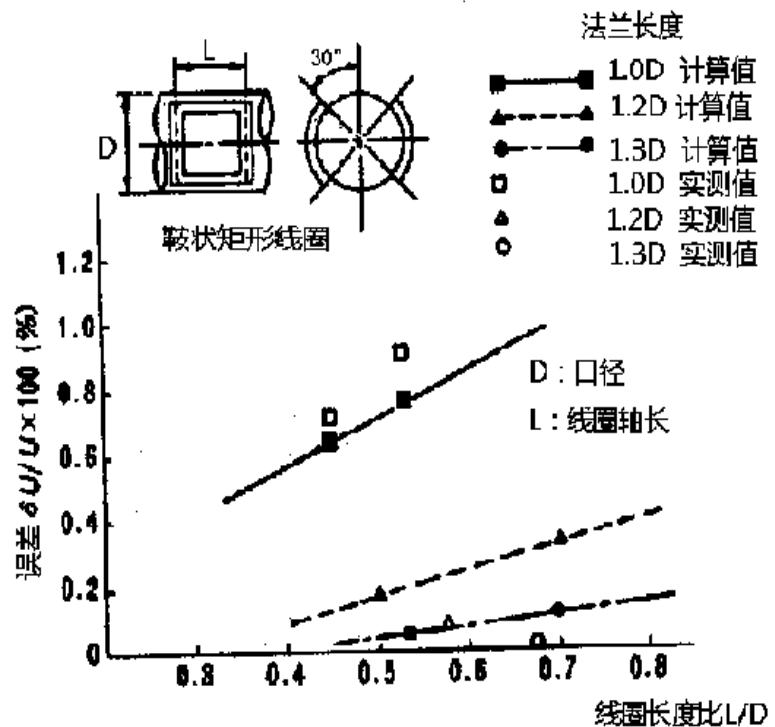


图 7-13 测量管长度影响

图 7-13 是参考文献^[8]通过

计算和实测得到的结果。可以看出，测量管的法兰面间长度在 1.3D 时，测量管与连接管内导电短路状态可能造成感应电动势相对误差 $\frac{\delta U}{U}$ 为 0.2%。

因此，一些研究者认为，测量管法兰面间的长度应不低于 1.3D。事实上，当绝缘性测量管结构一定时，法兰面间长度造成的相对误差也是一定的。而出厂的传感器又必须经过实流标定，因此，这个误差会在校准系数中给予补偿。于是，目前许多公司 DN600 以上的传感器采用 1D 的法兰面间长度。

需要注意，现在大多数电磁流量计工作磁场采用低频矩形波励磁。引起涡电流的原因，主要在励磁线圈电感的波形转换过渡过程这段时间，波形稳定期间是直流磁场，几乎不发生涡电流。因此，低频矩形波励磁的灵敏度系数可能比连续交变的正弦波励磁要大一些。但是，这种情形下对灵敏度系数可能求解更加困难，因此至今未见到有人在理论上做出严密的分析计算。

7.3 仪表结构与功能

流量计按传感器和转换器的构成方式，可分为分体型和一体型两种，如图 7-14 所示。分体型是把传感器和转换器各自独立设置，中间用电缆连接，所以电缆长度受被测流体电导率的限制。一体型是把传感器和转换器作为一个整体而设置，所以与流体温度和环境温度有关，与分离型相比，适用的温度范围将受到限制。

7.3.1 传感器的构造与作用

(1) 主要部件的名称与作用

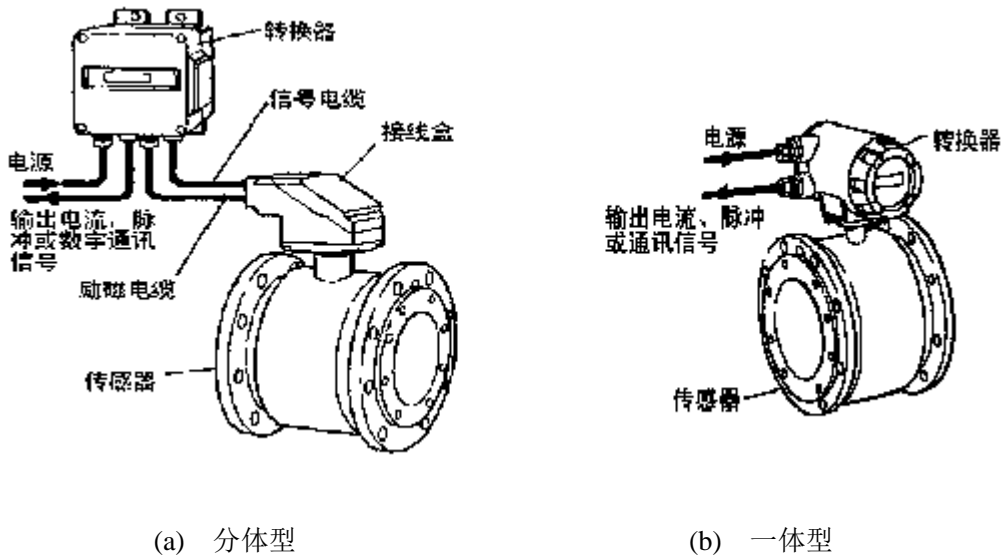


图 7-14 电磁流量计组合形式

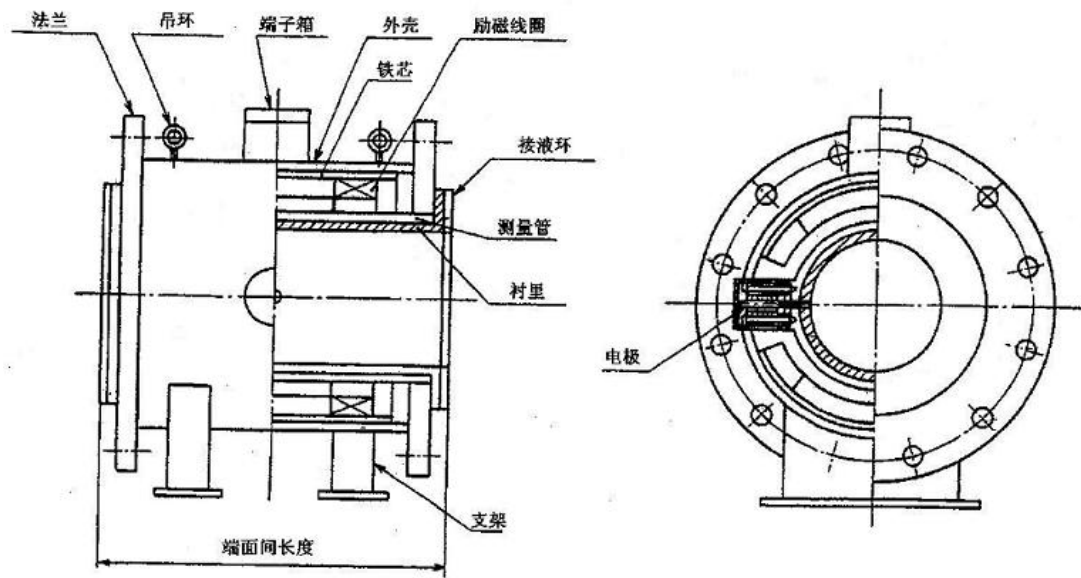


图 7-15 电磁流量传感器结构示意图

传感器主要部件的名称和作用如下（参看图 7-15）。

- a) 外壳 防止传感器内部的励磁线圈、铁心和电极导线遭受机械性损伤，保护其免受周围环境的影响。它的结构必须具有足够的机械强度，能防止水和尘埃等侵入，并耐安装场所周围环境的腐蚀。一般外壳用碳钢材料制成。有些大口径把外壳用作磁路的铁芯。
- b) 测量管 其结构必须形成流过被测流体的导管，机械上能耐流体压力的强度，但必须是不导磁、高电阻率的不锈钢。
- c) 衬里 测量管内衬的绝缘物，以防止信号电动势被短路。因为衬里材料接触被测流体，所以必须是能够耐磨损和耐腐蚀的材料。这些材料列于表 7-2。另外，衬里按其材料性质，受流体温度的上限限制。
- d) 电极 安装在测量管壁上，以取出信号电压。电极材料必须能够耐流体的磨损和腐蚀。这些材料列于表 7-2。
- e) 接液环（接地环） 它能使传感器和被测液体同电位，也有保护法兰端面衬里的作用。其材料必须能够耐流体的磨损和腐蚀。这些材料列于表 7-2。
- f) 励磁线圈和铁芯 它在测量管内形成与传感器励磁电流成正比于磁通密度的工作磁场。

表 7-2 接液部件的材料

名称	材 料
衬里	氟塑料 PTFE（聚四氟乙烯） PFA（四氟乙烯——聚氟化烷基乙烯基醚） FEP（全氟乙丙烯）

	氯丁二烯橡胶 聚氨基甲酸酯橡胶 陶瓷
电极	不锈钢 SUS316 SUS316L 或国产 0Cr18NiMo2Ti 白金（铂） 铂铱合金 钽 钛 耐蚀耐热镍基合金 B，耐蚀耐热镍基合金 C 蒙乃尔合金
接液环	一般结构用轧钢 不锈钢 1Cr18Ni9Ti SUS304, SUS316, SUS316L 铂铱合金 钽 钛 耐蚀耐热镍基合金 B，耐蚀耐热镍基合金 C 蒙乃尔合金 导电性氟塑料

(2) 用途 流量计的用途和结构按表 7-3 分类

表 7-3 用途和结构

种类	用途	结构
一般用	在通常使用环境下使用 （包括用于测量排水流量）	
卫生用	在通常使用环境下使用 用于与食品有关的介质。	使用对食品卫生无害的材料，接液部上无残留物。
防爆用	在起爆环境下使用	
水中用	浸没于水中使用	用塑料 PVC 制成的流量计本体。

(3) 配管连接 按配管连接的方式，分类如表 7-4。

表 7-4 连接方式

种类	结构
法兰连接方式	传感器的法兰与配管的法兰相连接。
法兰夹持方式	把不带法兰的传感器夹持在配管法兰中。
卫生连接方式	把符合国际牛奶标准 IDF 卡箍标准的传感器连接到带 IDF 卡箍的配管中。可以快速装卸，便于冲洗消毒。

螺纹连接方式	把带螺纹传感器拧进带螺纹的配管内，连接起来。
--------	------------------------

(4) 口径 传感器的口径系列列于表 7-5

表 7-5 传感器的口径

口 径	口 径	口 径
3	200	1200
6	250	1200
8	300	(1350)
10	350	1500
15	400	1600
20	500	1800
25	600	2000
40	700	2200
50	800	2400
80	900	2600
100	1000	2800
150	(1100)	3000

(5) 转换器的电路结构与功能

①转换器的功能如下

- a)* 向传感器提供励磁线圈的励磁电流。
- b)* 对流量电动势放大和转换，显示流量、流速、量程百分比，显示自诊断功能，并输出为其它仪表能接受的各种信号、讯号。
- c)* 设定上限量程流量（或流速），调整零点。
- d)* 消除电极电压中的同相干扰、磁通微分干扰、直流极化干扰和共模干扰的影响。
- e)* 消除由电源电压和频率变化产生的影响。
- f)* 消除由磁场变化产生的影响。

②转换器的电路结构

为了达到上述的功能，典型的转换器电路结构构成如图 7-16 所示的原理框图。

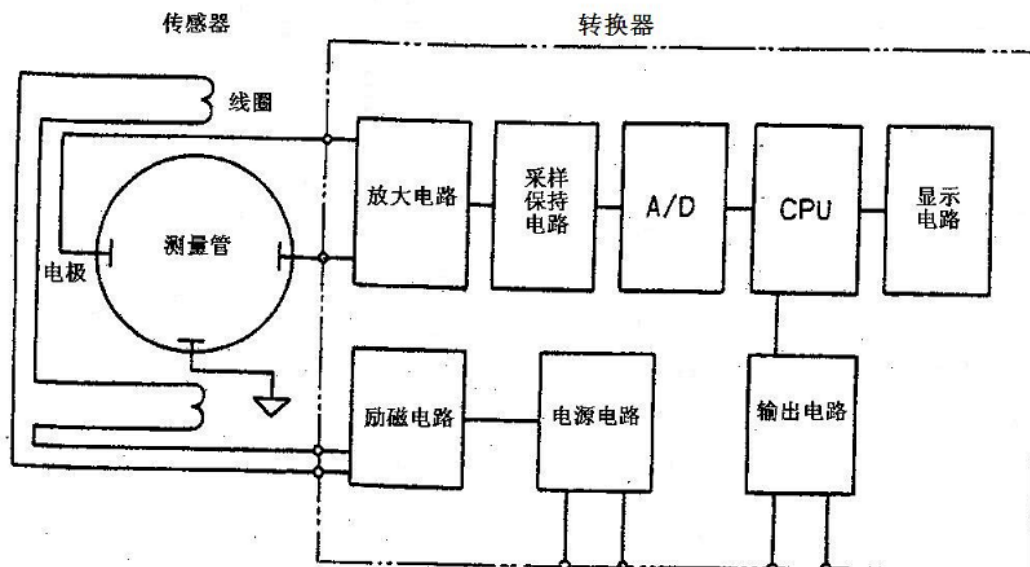


图 7-16 转换器电路原理方框图

③励磁方式

流经传感器励磁线圈电流的励磁方式，可以用工频市电、方波励磁和经高频调制的方波，其波形示于图 7-17。工频市电励磁方式是用市电电源直接对线圈励磁的方式。这种

励磁方式名称	励磁波形	特征
a 正弦波励磁		<ul style="list-style-type: none"> 。用市电正弦波励磁的波形。 。1970年以前为主的励磁方式。
b) 矩形波励磁 (两值波励磁)		<ul style="list-style-type: none"> 。用电子电路交替切换流向线圈的电流方向，产生矩形波的励磁电流。 。现在的主流方式。
c) 矩形波励磁 (两值波励磁)		<ul style="list-style-type: none"> 。b)的变形应用 。用零态检测信号零点，提高零点稳定性。
d) 矩形波励磁 (双频调制)		<ul style="list-style-type: none"> 。b)的变形应用 。用高频和低频调制励磁，取两者的优点，解决浆液测量的尖状干扰。

图 7-17 各种励磁方式和波形

方式的响应性好，不大受低频同相干扰的影响；但因为存在电磁感应，而容易引起零点变动。方波励磁方式，则是由转换器产生的、频率为工频频率偶数分之一的方形脉冲电流，对传感器励磁线圈励磁。这种方式使用与工频干扰的周期同步采样，所以零点性能稳定，并且流量计的电功率消耗低；但响应性差，抗直流噪声不好；由于电极极化原因，测量浆液介质流体容易发生输出跳动。双频励磁方式则是用高频（80~200Hz）对 6.25Hz 方波调制，因此它

具有低频方波的优点，零点稳定，功率损耗低，也提高了测量的响应性和抗直流噪声，利于测量浆液流体稳定性的提高。当然，双频励磁的电路较复杂，调试相对麻烦些。

④ 输出信号 转换器的输出信号可能有下列几种：

a) 模拟直流电流信号 4-20mA

b) 模拟直流电压信号 1-5V

c) 频率信号和定标的脉冲信号、频率输出，相对于满量程在 1-10kHz 范围选择。

定标脉冲是指按脉冲当量设置每个脉冲代表的体积值，或者每个体积流量单位产生的脉冲数。

d) 数字通讯信号：RS232C、RS485、MODBUS、HART 协议、现场总线 PROFIBUS、FF 以及如 GPRS 等无线通讯等。

7.4 检验与校准

7.4.1 电磁流量计的测量误差和流量特性

(1) 测量误差表示方法

电磁流量计的测量误差，通常采用相对于指示值的误差（测量值的误差%R）或相对于量程上限流量的误差（量程的误差%FS）来表示。在精确度表示方法上通行也采用两者的结合，这点与其它速度式流量仪表和容积式流量仪表有所不同。

相对于指示值的误差 e ，用下式确定

$$e = \frac{I - Q}{Q} \times 100(\%)$$

式中， e ：相对于指示值的误差

I ：流量计的指示值

Q ：用校准器或校验装置求得的实际流量（约定真值）。

相对于上限流量的误差（量程的误差） e_F ，用下式表示。这种误差表示方法通常又称为引用误差。

$$e_F = \frac{I - Q}{I_{\max}} \times 100(\%)$$

式中 e_F ：相对于上限量程流量的误差

I_{\max} ：流量计的上限量程流量值。

应用相对于指示值的误差，测量点的测量绝对误差（指示值与用标准器或校验装置所谓“真值”求得的实际流量值之差）比较小，因此适于总量积算；应用相对于量程的误差，对测量下限的绝对误差要求低，表示的误差受零点影响小，适于流量控制与调节的信号输出。

值得注意，电磁流量计是测量流速的仪表，在市场上常见到把引用误差变成流速值的绝对误差来表示。例如，某公司产品技术指标给出在参比条件下， $\geq 1\text{m/s}$ 时，电磁流量计的基本误差是测量值的 $\pm 0.2\%$ ； $< 1\text{m/s}$ 时，电磁流量计的基本误差是测量值的 $\pm 0.2\% + 1\text{mm/s}$ 。意思是说，在 $\geq 1\text{m/s}$ 任何测量点的相对误差是该点 $\pm 0.2\%$ 的绝对误差与该点流速的百分比；在 $< 1\text{m/s}$ 的测试点，除了相对于该点 $\pm 0.2\%$ 流速的绝对误差外，还要加上为 1mm/s 流速的附加误差。举例说明，在 1m/s 时允许绝对误差为 $\pm 3\text{mm/s}$ ，相对误差为 $\pm 0.3\%$ ； 0.5m/s 时允许绝对误差 $\pm 2\text{mm/s}$ ，相对 0.5m/s 的误差为 $\pm 0.4\%$ ；即使测量点的流速为零，也有 1mm/s 流速的绝对误差存在，那么相对零点的误差应为 $\infty\%$ 。显然，指示误差曲线会在 1m/s 流速处出现上下拐点，零点的相对误差应该是 $\pm \infty\%$ 。

(2) 电磁流量计的特性曲线

流量计的静态特性是指被测量值处于稳定状态时的输入与输出关系。对静态特性的基本要求是：输入为零时输出亦为零，输出与输入成唯一的对应关系。

表征静态特性的参数有：静态变换函数、静态特性曲线、仪表系数、测量范围、线性度、灵敏度、稳定性、重复性、精确度等。

① 静态变换函数

从公式 7-1 和 7-2 可以得到电磁流量计的流量（流速）与感应电动势的函数曲线（图 7-18）。用 x 轴表示流速 v ， y 轴表示感

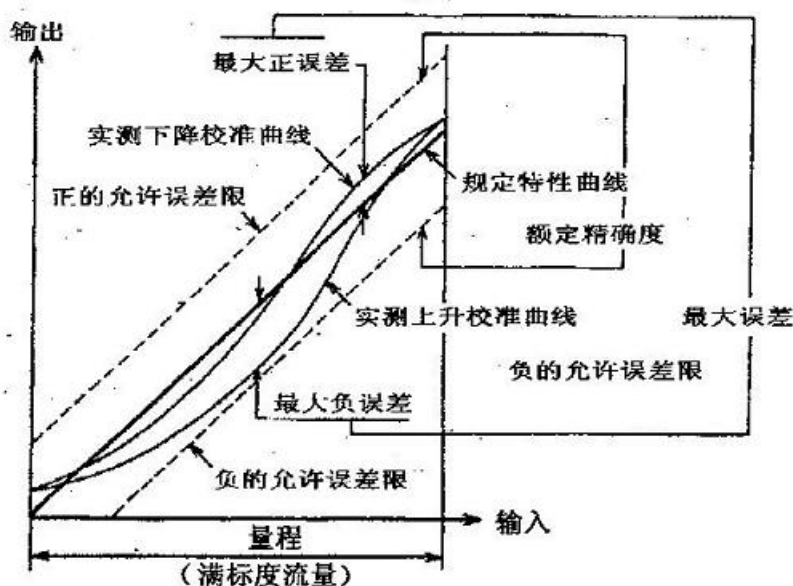


图 7-18 函数曲线及相关定义

应电动势 e ，理想的函数曲线是一个过零点的斜线。它表示输入（流速 v ）与输出（传感器感应电动势 e ）之间呈线性关系，这点与通常流量仪表的灵敏度相似。从图中可以看到，实

实际的流量关系性曲线不仅存在斜率，也可能存在截距，符合 $q_m = a + bx$ 的关系。从图中也可以看出，应用引用误差分解成正的允许误差限和负的允许误差限，它们之间存在一个误差带。这种相对于满标度流量的误差形式只适合于检测导电流体控制与调节生产过程的使用场合。

②静态特性曲线

在参比条件下工作原理和结构相似的流量计的特性曲线是相似的，只不过在系统误差的水平上有所不同，这是因为每台流量计制造上的测量要素差别造成的。流量计的特性曲线是在流量校验装置上用实验方法求得的。一般速度式、容积式和差压式的流量计特性曲线的纵坐标为流量仪表系数 K 或流出系数 C ，横坐标为流量 q_m 或管道雷诺数 Re_D 。但是，因为流量测量范围宽，标准和习惯规定电磁流量计用横坐标表示为流速，纵坐标表示为指示值误差，如图 7-19 那样来表示测量结果。用实流校验试验来得到流量特性，用曲线表现出实际测量流量的准确性。把各流量点的指示值误差平均值连接成一条曲线，这就是电磁流量计的流量特性曲线。

与速度式（除超声波流量计）、容积式流量计不同的是，电磁流量计测量上限流量（流速）可以在很大范围内变化。而且，由函数变换关系式可知，影响测量相对误差的是零点的输出值，只要把握住下限某一个区域的相对于测量值的误差，在一定范围内上限测量流速的延伸，不会增大其相对指示

的误差。因此，图 7-19 仅示出 1m/s 流速以下的误差曲线。在这段曲线中可以明显看到，由于零点输出的影响，0.25m/s 以下测量误差呈快速上升趋势。

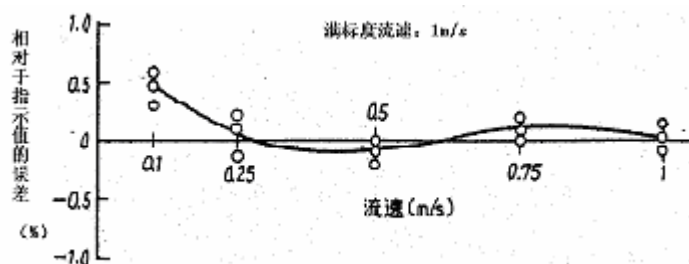


图 7-19 电磁流量计特性曲线

图 7-20 举出电磁流量计误差特性曲线的一个例子。这是国际上通行的电磁流量计误差表示方法，符合 ISO6817 电磁流量计国际标准规定的误差表示方法。表 7-6 表示出这种误差曲线的不同型号和口径的误差值。可以看出，这是采用示值误差与引用误差结合的表示方法。这种表示方法相对测量值的误差加上一个以流速为单位的附加误差。含有附加误差的总误差对高流速测量的相对误差影响不大，但对 1m/s 以下流速影响很大，也就是说在 1m/s 处流量误差出现拐点；理论上在零流速处的误差是无穷大。

因此，在检测与选用时，对于电磁流量计的误差，不仅要看其精度等级，还需要注意其误差表示方法。

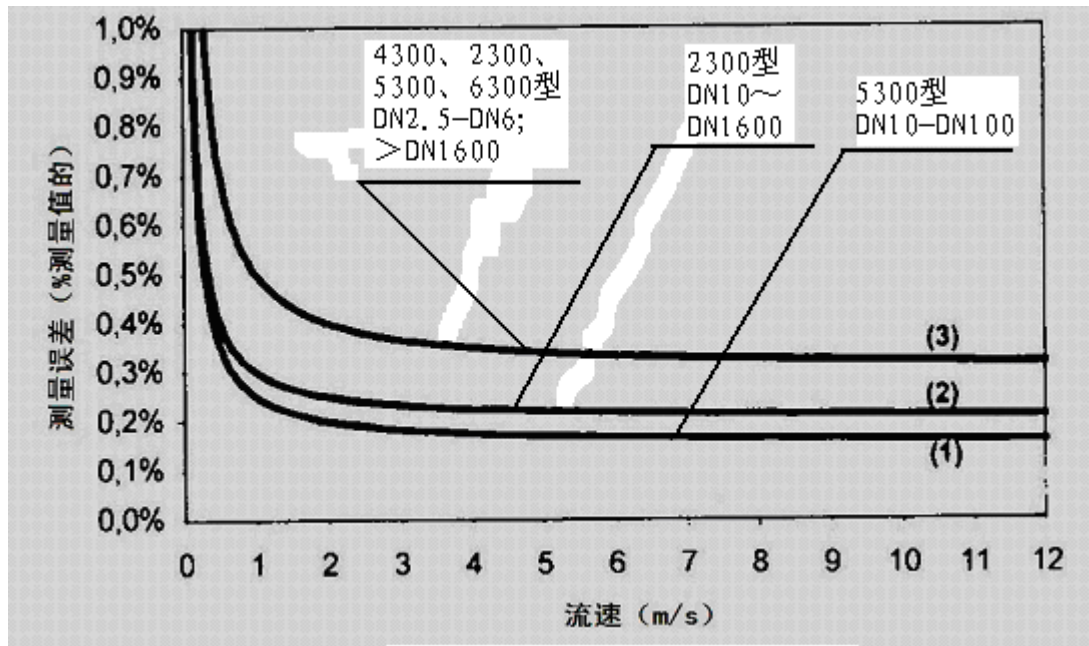


图 7-20 典型的基本误差曲线

表 7-6 某公司几种型号电磁流量计误差

型号	公称通径 DN (mm)	相对误差 (%测量值的)	曲线
5300	10-100	0.15%测量值的+1mm/s	1
	150-250	0.2%测量值的+1mm/s	2
2300/4300	10-1600	0.2%测量值的+1mm/s	2
6300	10-150		
1300	10-150	0.3%测量值的+2mm/s	3
4300/5300/6300	2.5-6		
2300	>1600		

7.4.2 流量计特征系数（传感器常数）和零点

图 7-18 显示出电磁流量计感应电动势与流速之间是正比例关系的直线方程。方程的斜率即为仪表系数，它相当于其它流量计的灵敏度，是用实际流体校准来求得的。实际的传感器也会存在有零点，即方程存在截距。对于一台制造完成的电磁流量传感器，一定会有唯一确定的仪表系数相对应，也会有一个静态的零点存在。这就是说仪表系数和静态零点将成为传感器的固有常数，由实流校验标定校准并需要保留下来。

(1) 流量计特征系数

流量计的特征系数 k ，包含前面讲过的灵敏度系数 s 、电流产生磁场的修正系数和公称通径 D 与实际尺寸误差的修正系数等。从公(7-1)可以看到，这些修正系数和灵敏度系数是

相乘的关系。国家标准 GB/T 18660-2002 将仪表系数命名为“一次装置的校准系数”；国际标准 ISO6817: 1992 命名为“calibration factor of the primary device”，日本标准和欧美一些公司也将它命名为“传感器常数”，也有公司把它命名为 GK 值。考虑到电磁流量计仪表系数有时包含着转换放大器的转换系数在内，我国的电磁流量计 JJG1029-2007 检定规程则将它定义为“流量计特征系数”。

电磁流量计的特征系数的物理意义和量纲，随着流量计的原理结构形式不同而不同。

传感器结构如果采用式 (7-2) 的原理，流量计特征系数是一个无量纲的常数，它表示传感器流过 1m/s 平均流速产生的电动势如果与转换器输出 1m/s 的输入信号幅度不一致，需要对输入信号乘上的一个系数。实际上这个系数包含灵敏度系数 s 、电流产生磁场的修正系数和公称通径 D 与实际尺寸的误差修正系数的乘积。

传感器结构如果采用式 (7-3) 的原理，流量计特征系数是一个百分比的比值。它表示传感器 1m/s 平均流速产生的电动势与磁场基准电动势的比值大小。磁场基准电动势可以取自转换器提供的励磁电流，也可以在传感器磁场中插入感应线圈，由测磁线圈感应出磁场基准电动势。

电磁流量计的特征系数还可以用励磁电流的大小表示。通过调整励磁电流的大小，可以改变传感器的感应电动势，这时的特征系数的单位为 mA。当然，修正的励磁电流中同样包含有灵敏度系数、公称通径 D 与实际尺寸的误差在

内的修正值。

(2) 传感器的静态零点和动态零点

从图 7-21 看出，电磁流量计零点产生有以下几种成因：

① 信号线与电源之间存在分布电容。分布电容将与信号同频率的电源电压感应到信端子上，形成大的共模噪声。

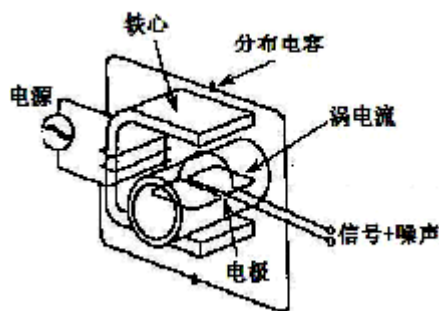


图 7-21 零点产生原因

② 传感器是以流体为参考电位，当参考电位与大地存在大的接地电阻时，地回路的杂散电流在参考电位上引入大的共模电压。

共模噪声可以通过良好接地能够大幅度地降低；也可通过转换器前置放大器的高共模抑制比进行抑制。现代的低频矩形波励磁技术，流量信号仅是电源频率的几分之一，所以通过同步采样可以降低这种与电源同频率的共模噪声，使它对零点的影响几乎为零

③ 被测流体中存在涡电流。由于传感器磁场、管道内的流速、电极中心轴线对于测量管

的轴线对称分布以及电导率的均匀分布被破坏；流体导磁性的变化等，涡电流在电极上表现出同相噪声和正交噪声，从而引起零点的变化。

④电磁流量计测量的导电液体是电解质，与金属电极接触会进行电化学反应产生极化电压。这种漂移的直流噪声表现出输出的跳动，尤其在流量为零时这种跳动依然很大。往往随着电极与电解质电化学反应达到平衡，这种跳动会自然消除掉。

⑤传感器装配中，信号线和电极、导电流体形成一个 1 匝的平面回路。磁场的磁力线不能完全平行于该回路，就会产生电磁感应。感应的电动势与流量信号电动势为正交状态，即为正交干扰噪声。当回路面积一定时，感应的正交噪声和转换为同相噪声的幅度也是一定的，正交噪声的二次感应即为与流量信号同相的零点噪声。

现代的电磁流量计，能够做到 100db 以上共模抑制比。如果良好地接地，完全能够将分布电容造成的零点影响降到零。采用低频矩形波励磁相对于正弦波励磁，流体中涡电流造成的零点变动的影响会降低很多。但在含有固体颗粒情况下，由于直流极化电压引起的输出跳动比较突出。在以水为介质校验情况下，我们主要关心第⑤点，传感器信号线、电极和流体回路感应的静态零点。静态零点值即为公式（7-1）中的截距，它会严重地影响流量计的非线性度。所以，校验时需要把零点记下来，并在计算流量时减掉。

其它几种零点的成因是在流体测量过程中与流体性质和环境变化所形成的，它们是动态零点，需要对流体性质和状况进行检测、分析判断和试验给予修正。

7.4.3 电磁流量计校准的方法和程序

理论上，电磁流量计的校准是求解原理公式的斜率和截距的过程。

一般电磁流量计的校准试验是在液体流过流量计和校准标准装置或参比流量计的情况下进行的。应注意确保试验管道中液体均匀稳定流动，不受由于扰动引起的局部速度急剧波动的影响。另外，当在估算被试电磁流量计的测量不确定度时，应考虑参比流量计或校准装置的测量不确定度。

(1) 校验方法

使流体流过传感器进行流量计的校准和校验，通常液体是清洁水。对流体要求和流量计的参比工作条件示于表 7-7。

表 7-7 参比工作条件

	参比工作条件
管道配置	流量计下游应有一定背压，满足流体充满测量管。推荐背

	压为最高检定温度下检定用液体饱和蒸气压力的 1.25 倍。
流体	不夹杂空气，无纤维、导磁性颗粒及其他可见颗粒等物质的清洁水
流动条件	很少有旋涡流和脉动流的轴对称流
最短直管段长度	口径在 1600mm 以下：上游 10D(1)，下游不规定 口径在 1600mm 以上时，由制造厂的规定
流体温度	4~35℃。在每个流量点的每次检定过程中，液体温度变化应不超过±0.5℃。
电导率	5mS/m (50 μ S/cm) 至 500mS/m (5000 μ S/cm)
压力	最高 1MPa
环境温度	4~35℃
电源电压	额定值±10%
电源频率	额定值±5%
交流电源谐波失真度	谐波失真度小于 5%
接地	不大于 10Ω

注(1) D 为公称通径。

电磁流量计的校准和校验有质量法、容积法和标准表比较表法几种方法。

a) 质量法

如图 7-22 那样，按被校流量计的量程选用适当的容器，将其放在秤上，让水通过被校流量计流进容器。测量在所检定时间内流进水的质量，或者测量容器内所贮存水的质量达到

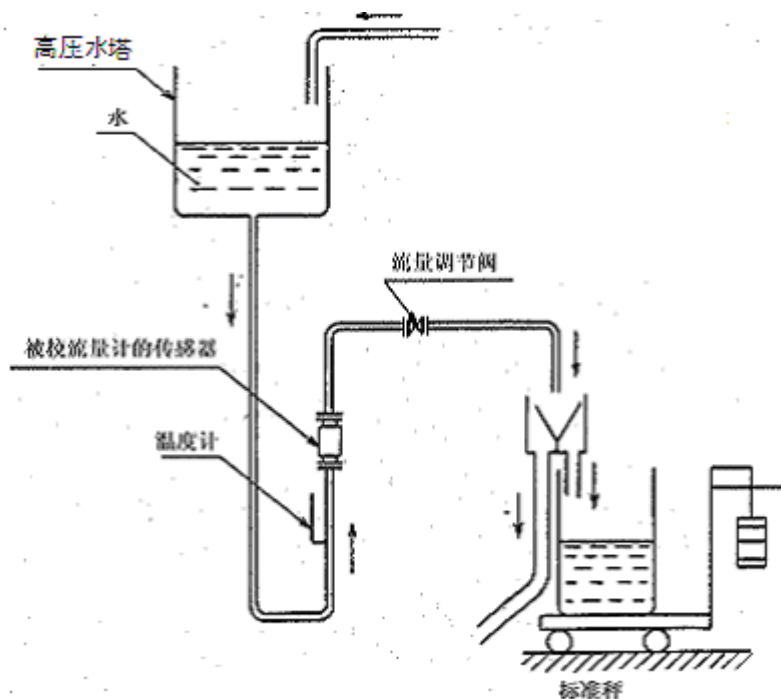


图 7-22 质量法

内预定值时所经过的时间。用水在其温度下的密度算出体积流量，或者将流量计的累积值与从容器内存积水的质量换算而得到的体积进行比较。调整流量计的指示值与实际流量值或体积值的误差在规定的误差范围内，找出流量计特征系数，并符合特性曲线的要求。

b) 容积法

如图 7-23 那样，让水通过被校流量计流进预先校准过的标准容器内。测量在预定时间内流进标准容器水的体积，或者测量容器内所积存水的体积达到内预定值时所经过的时间。由此算出流量，或者将流量计的累积值与容器内存积水的体积进行比较。调整流量计的指示值与实际流量值或体积值的误差在规定的误差范围内。并符合特性曲线的要求。

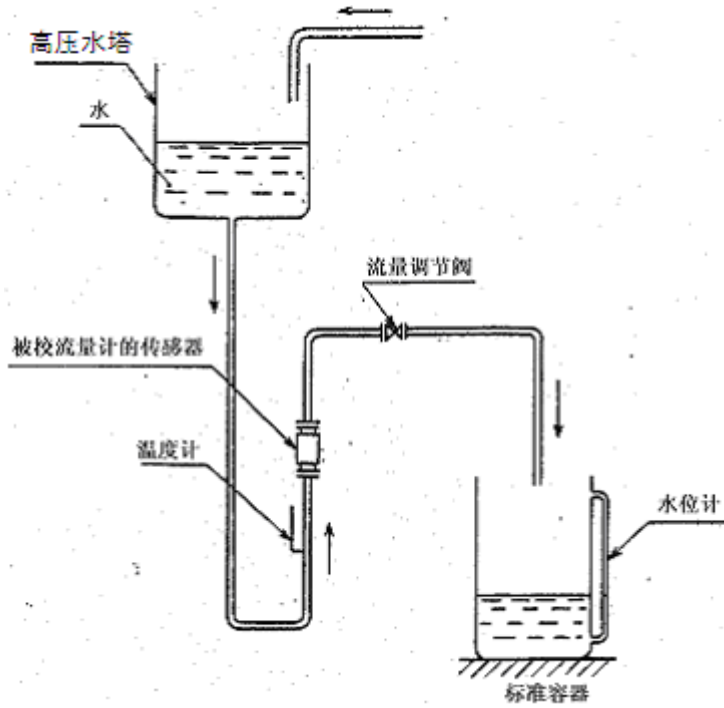


图 7-23 容积法

c) 标准表比较表法

如图 7-24 那样，把预先校准过的标准流量计(不限于电磁流量计)与被校流量计的传感器串联连接，让水通过，将标准流量计的指示值或累积值与被校流量计的指示值或累积值进行比较。调整流量计的指示值与实际流量值或体积值的误差在规定的误差范围内。并符合特性曲线的要求。

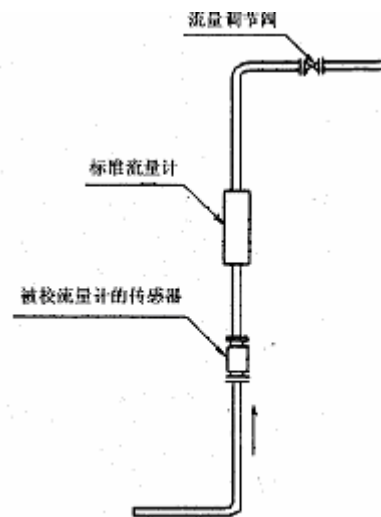


图 7-24 标准表比较法

按实现试验流体的稳定性方法分，标准流量校验装置又分为恒水头法和变水头法。恒水头法又有高位水塔溢流法和变频调速稳压容器法。它们的不同主要在于强调瞬时流量的稳定性。不过，由于电

磁流量计反映速度快，线性度好，而且一般都具有频率或脉冲输出。因此，在试验管道内流速分布轴对称的情况下，通常电磁流量计可以采用累计脉冲总量与标准流量装置累计总量比

较来计算误差。总量比较法可以降低对标准流量校验装置流量稳定性的要求。重要的是标准流量校验装置的复现性好。即要求容积（质量）测量分辨率高，准确度好；换向时间差小，计数准确。

(2) 配管、安装与配线

1) 配管条件

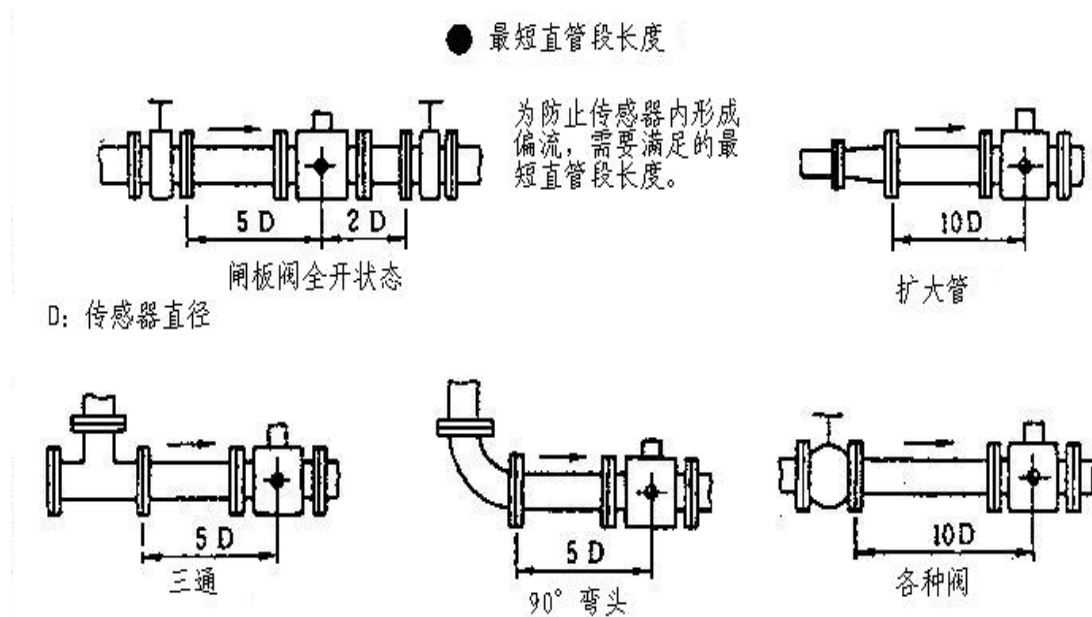


图 7-25 确保精度的配管方法

为了确保校验精度，满足测量管内流速以轴对称分布的条件，流量计上游必须有足够的直管段长度，配管条件应轴对称分布的条件，流量计上游必须有足够的直管段长度，配管条件应符合图 7-25 所示。校验管道内壁应是光滑的金属管或高强度塑料管。特别是 DN300 以下校验管道，最好是不锈钢管。因为粗糙、锈蚀的金属管不仅会影响管壁处流速的分布，进而影响到下限流速的测量精度；同时由于锈蚀的金属内表面与水接触形成的极化作用可能严重地影响信号的稳定性。

2) 阀门

流量计上游应该安装闸板阀，不能安装碟阀，应用时闸板阀必须全开状态。这是防止阀门后面的流速分布出现旋涡流进入流量计。流量计下游安装调节阀，用以调节流量。

3) 接地与接液

电磁流量计流量信号是以被测导电液体为基准电位的，整个测量管道内的导电液体看成电阻为零的导体，两个电极对导电液体形成差分状态的信号电压。因此，如果信号接液点不可靠，则造成基准不稳定，测量不稳定。

金属管道往往与大地相通。有时候工业电网的地电流，如三相不平衡电流会流过管道。如果管道与流量计之间不是相通的，地电流、三相不平衡电流可能在流量计上产生大的电压降，造成对流量信号的干扰。因此，希望将流量计前后的金属管道与流量计用金属导线连接到一起并接到大地。

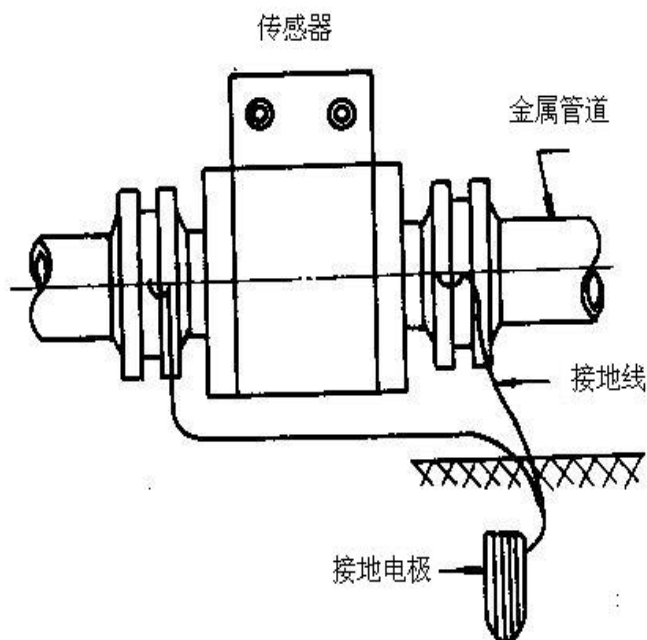


图 7-26 a) 金属管道的接液与

对于大口径管道，有可能测试管线的长度不是充分长，作为基准电位的导电液地体的体电阻不能看作零，而且这些大口径金属管道内壁往往锈蚀严重，依靠金属管道接液是不可靠的。所以将金属管道接地，会起到稳定基准的作用。

图 7-26 所示电磁流量计的接地与接液方法。

4) 流量计的安装

流量计可以是水平安装，也可以是垂直安装，或者任意角度安装，垂直安装和任意角度安装则要求流体自下而上流动。水平安装的两个电极应该是水平位置。

流量计安装时必须注意密封垫圈不得伸出管道内，阻碍流体流动。

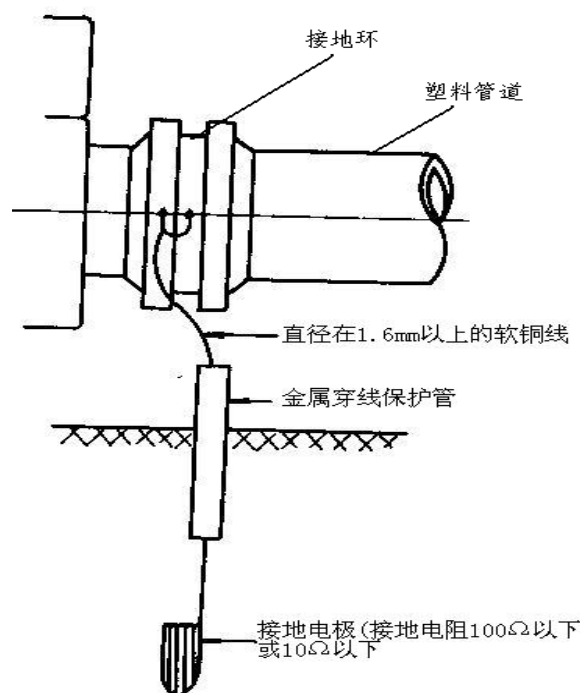


图 7-26 b) 塑料管道的接液与接地

5) 配线

对于分体型流量计，励磁线一般使用聚氯乙烯护套双芯多股圆铜线；信号线一般使用聚氯乙烯护套金属网屏蔽双芯多股圆铜线，金属屏蔽网通常作为接地、接液线。如果使用双芯多重屏蔽电缆，请注意每根芯线外面的金属屏蔽网在传感器接线端子是开路的，千万不能接到流量计机壳或大地。芯线外面的金属屏蔽网应接在转换器接线端子的信号激励屏蔽端（如

MBmag 转换器的 DS1 和 DS2)。

流量计电源线需要有良好的绝缘护套,防止长期使用磨破护套出现事故。尽管流量计的工作电耗仅在 30VA 以内,考虑到浪涌电流,电源线的选择载荷电流应在 5A 左右。

频率或脉冲输出通常是 OC 门电路。使用时需要外接直流电源和负载电阻。

(3)流量计校准的程序

被试流量计以及有关的测试设备应达到稳定(即在任何试验开始之前,在稳定的环境条件下至少预热 15min)。在预热期间内,其输出应大约调整在输出范围的中间。要观察并记录可能影响试验结果的环境条件。

为了评定流量计系统在规定的流量范围内的性能,流量设置应该取几个试验点。通常在性能考核或产品型式试验时,要做约是量程的 0%、10%、25%、50%、75%和 100%几个试验点;除非用户对特殊要求,出厂试验只需做约是量程的 0%、50%和 100%三个试验点即可。每个测试点至少测量三次。图 7-27 表示测量点分散性的校验例子。

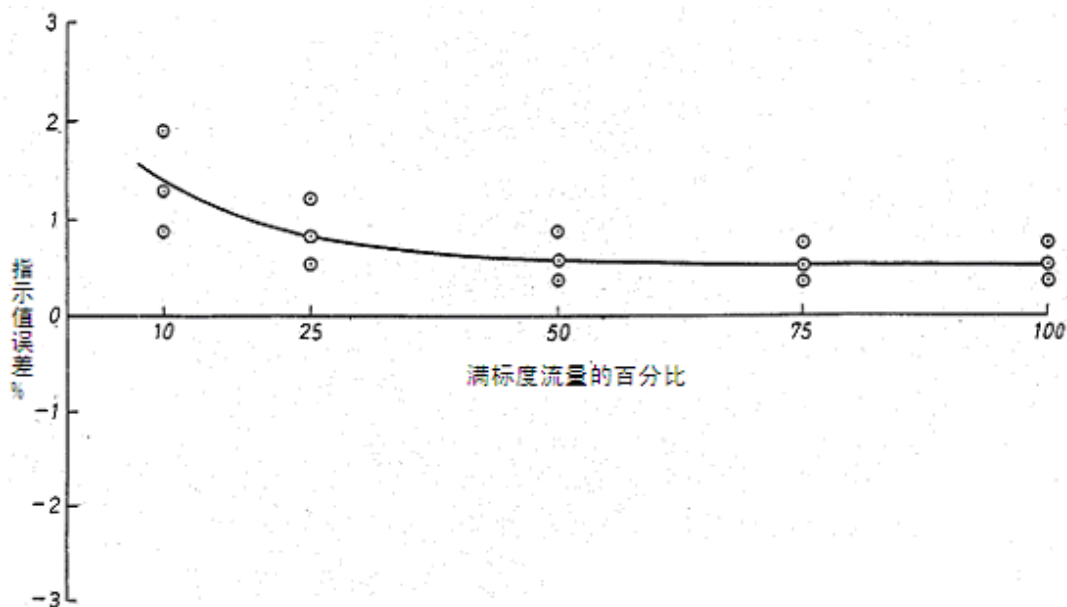


图 7-27 表示测量点分散性的校验例子

电磁流量计是一种测量范围度广、量程调节范围很宽的仪表。校准试验的量程设定建议满标度流速值取以下两种情况: 1m/s; 10m/s 和校准装置最大流速中最小的一个的值。但对于出厂检定试验,在用户不提出要求时,可选 2m/s 作为满标度流速。

(4)精确度等级与基本误差限^⑨

电磁流量计检定规程 JJG 1029-2007 规定,流量范围内准确度等级、最大允许误差应符合表 7-8 的规定。流量计误差表示可以使用相对示值误差和引用误差,以及相对示值误差和引用误差混合的表示方式。

表 7-8 准确度等级和最大允许误差

准确度等级	0.15	0.2	(0.25)	(0.3)
最大允许误差	±0.15%	±0.2%	(±0.25%)	(±0.3%)
准确度等级	0.5	1.0	1.5	2.5
最大允许误差	±0.5%	±1.0%	±1.5%	±2.5%

注：优先采用不带括号的等级。

a) 相对示值误差计算

(1) 流量计各流量点单次检定的相对示值误差为：

$$E_{ij} = \frac{Q_{ij} - (Q_s)_{ij}}{(Q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (7-24)$$

或

$$E_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (7-25)$$

式中：

E_{ij} ——第 i 检定点第 j 次检定被检流量计的相对示值误差，%；

Q_{ij} ——第 i 检定点第 j 次检定时流量计显示的累积流量值， m^3 ；

$(Q_s)_{ij}$ ——第 i 检定点第 j 次检定时标准器显示的累积流量值， m^3 ；约定真值。

q_{ij} ——第 i 检定点第 j 次检定时流量计显示的瞬时流量值，可为一次试验过程中多次读取的瞬时流量值的平均， m^3/h ；

$(q_s)_{ij}$ ——第 i 检定点第 j 次检定时，标准器换算到流量计的瞬时流量值， m^3/h 。约定真值。

其中当采用被检表脉冲输出进行检定时， Q_{ij} 可按式计算：

$$Q_{ij} = \frac{N_{ij}}{k} \quad (7-26)$$

N_{ij} ——第 i 检定点第 j 次检定被检流量计所输出的脉冲数。

k ——流量计 k 系数，或称脉冲当量。单位体积流体流过流量计时流量计发出的脉冲数。

(2) 流量计各检定流量点的相对示值误差按下式计算：

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (7-27)$$

式中:

E_i ——第 i 检定点被检流量计的相对示值误差, %;

n ——第 i 检定点检定次数。

(3) 流量计的相对示值误差 E 为流量计各流量点的相对示值误差中的最大误差。

流量计的相对示值误差应符合表 7-8 的要求。

b) 引用误差计算

(1) 流量计各流量点单次检定的引用误差一般可按式 (7-28) 计算

$$(E_f)_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{q'_{\max}} \times 100\% \quad (7-28)$$

式中:

$(E_f)_{ij}$ ——第 i 检定点第 j 次检定被检流量计的引用误差, %。

q'_{\max} ——对应转换器输出上限值的满量程流量值, m^3/h 。

(2) 流量计各检定流量点的引用误差按下式计算:

$$(E_f)_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (E_f)_{ij} \quad (7-29)$$

式中:

$(E_f)_i$ ——第 i 检定点被检流量计的引用误差, %。

(3) 流量计的引用误差 E_f 为流量计各流量点的引用误差中的最大误差。

c) 流量计的重复性

当每个流量点重复检定 n 次时, 使用相对示值误差的流量计的重复性按 (II-7-30) 式计算:

$$(E_r)_i = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_{ij} - E_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7-30)$$

使用引用误差的流量计的重复性按 (II-7-31) 式计算:

$$(E_r)_i = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [(E_f)_{ij} - (E_f)_i]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7-31)$$

式中:

$(E_r)_i$ ——流量计第 i 检定点的重复性。

流量计的重复性:

$$E_r = [(E_r)_i]_{\max} \quad (32)$$

式中:

E_r —— 流量计的重复性。

按流量计测量不确定度标准 ISO5167 规定, 当置信度水平选 95%时, 标准偏差为测量不确定度的 1/2。所以一般电磁流量计复性误差应不大于基本误差限的 1/2。

7.4.4 电磁流量计干法校准

对于大口径流量计, 有时用实流校准进行试验很困难, 所以作为一种参考方法, 这里介绍电磁流量计中的干法校准。

校准的过程就是求解特征系数的过程。用公式 (7-1), 由磁通密度、管道内径和流速可以算出传感器的电动势 e (V)。这里, 最重要的条件是流速在 z 方向上应是以轴对称分布, 磁场分布也认为是均匀。实际的流量计在管轴 z 方向上磁场长度是有限的, 在管内的分布也不大均匀。因此, 需要进行以下修正。

1) 管轴方向磁场长度有限的修正

7.2.4 节讨论过磁场在管轴方向上有限长的灵敏度系数(短路系数), 说明产生的电动势部分会被短路。所以, 产生的电动势比取 $k = 1$ 时的值要低。得到电动势如式 (7-33) 所示

$$e = kBdv \dots\dots\dots (7-33)$$

正如7.2.4节所述, 目前从理论上很难得到 k 的准确数字解。不过, 对于设计电磁特性相似的流量计, 不管哪种口径的传感器, 原理上 k 值是一个相同的值。所以, 能够用实流校准的那些口径的传感器来确定 k 值。如表7-1提供了励磁线圈长度为测量管内径的1.5倍 (1.5D), 均匀磁场情况下灵敏度系数 k 的试验数据; 或者由结构参数计算出磁场长度和衬里长度与测量管直径之比, 用参考文献^[5] Table12.3的值线性插值法求得灵敏度系数 k 值。

2) 对磁场不均匀的修正

测量管内各点的磁通密度取加权平均值来确定代表值 B , 并将此作为式 (7-33) 中的 B 。

把式 (7-14) 的极坐标变换成直角坐标式 (7-34) 形式

$$W(x, y) = \frac{d^4 + 4d^2(y^2 - x^2)}{d^4 + 8d^2(y^2 - x^2) + 16(x^2 + y^2)} \dots\dots\dots (7-34)$$

如图 7-28 所示的那样, 将 W 在电极间分 n 等分, 求出 $(n-1)$ 个点的 W_{xi} 值, 再实测 x 轴各点的磁场 B_{xi} , 按下式求得平均磁感应强度 B_w 。

$$B_w = \frac{\sum_{i=0}^{\pm \frac{n}{2}-1} B(x_i, 0) \cdot W(x_i, 0)}{\sum_{i=0}^{\pm \frac{n}{2}} W(x_i, 0)} \dots\dots\dots (7-35)$$

3) 测试点的磁场感应强度测量

在传感器励磁线圈通以励磁电流，获得工作磁场情况下，测量电极轴线的点磁感应强度值。所谓点的磁场感应强度应该是在测量管的电极连线之间内，很小面积的磁通量与面积之比。因此，应用于磁场测量传感器的面积必须很小。电极间等分点的磁场感应强度测量一般可使用霍尔式和探测线圈式特斯拉计（或霍尔高斯计）测量。

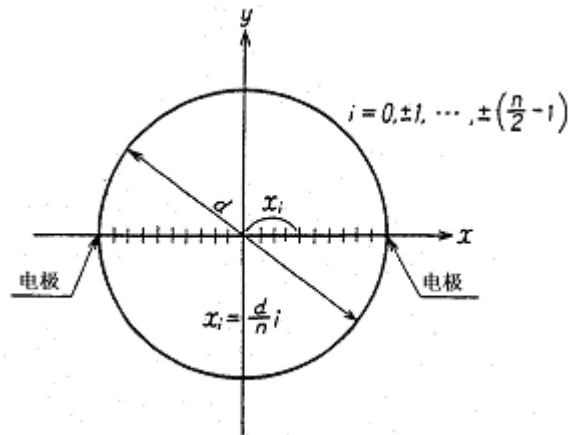


图 7-28 权重函数的取向

霍尔传感器是应用霍尔元件的霍尔效应，当流量计工作磁场的磁力线垂直地穿过霍尔元件，在长方形的霍尔元件长边通以电流，在霍尔元件的两短边对称焊有的霍尔输出电极上能够得到与流量计该点磁感应强度成正比的电动势。因为与磁场垂直的霍尔平面仅仅是几个 mm²，所以测得磁感应强度可以认为是该点的磁感应强度。在使用霍尔特斯拉计时需要注意以下三个问题：一是为防止磁场测量受周围电磁场影响，建议使用直流电励磁产生直流磁场。直流磁场测量要注意霍尔元件不等位电势的修正；二是霍尔元件的平面与流量计磁力线一定要垂直；第三，由于现代流量计的磁感应强度随着信号的降低越来越降低，尤其随着口径的增大，磁场会更低，一般会在几十个毫特斯拉。所以，磁场的测量会受到外界地磁场的影响而产生误差。必要时电磁流量传感器磁场测量，需要放在具有地磁场屏蔽的屏蔽室内进行。

探测线圈式磁感应强度测量是利用放置在电磁流量传感器测量点有限匝数的探测线圈感应出的电动势。应用公式 $U = \sqrt{2}\pi f N B S$ ，N 是探测线圈匝数，f 是励磁频率，S 是空心的探测线圈空心的面积。测量出感应电压，通过公式计算可以得到 B，即是该测试点的磁感应强度。从公式可以知道，它一般适合正弦波磁场的磁感应强度测量方法。

4) 对测量管的实际直径尺寸和电极间距离的修正

将测量管的实际直径尺寸和电极间距离用多次实测得到平均的尺寸 d' ，与公称测量管直径比较，计算出修正系数 k' 。

将 k' 、 d' 和 B_w 以及校验时的传感器内平均流速 \bar{v} (例如 1m/s) 代入, 用式 (7-36) 表示感应电动势

$$e = k'B_w d' \bar{v} \dots\dots\dots (7-36)$$

这里, d' : 电极间距离;

k' : 对于 d' 的灵敏度系数。

对于恒流源励磁的传感器测量出电磁感应强度, 计算出平均磁感应强度, 就可以计算特征系数。把流量计转换器规定的流速信号值 (例如 MBmag 转换器规定 1m/s 信号电压为 166.7 μ V) 与 (7-36) 式计算的值相比较, 比值就是要求得的仪表特征系数。

对于非恒流源励磁, 通过采集励磁电流的变化能给予磁场变化的信号修正。因为磁通密度 B_w 与励磁电流 I 成正比, $B_w = K_w I$ (K_w : 比例常数)。用此关系式可将式 (7-36) 变为式 (7-37)。

$$\frac{e}{I} = kK_w d' \bar{v} \dots\dots\dots (7-37)$$

e/I 具有电阻的量纲, 设 $R = e/I$, 得式 (7-38)

$$R = kK_w d' \bar{v} \dots\dots\dots (7-38)$$

式 (7-37) 的右端是由结构和规格所决定的常数, 不受电源电压和频率的影响。在式 (7-38) 中, 若已知 k 、 K_w 和 d , 则可求出对应流量计满标度的等效阻抗, 用此值的精密电阻串入转换器励磁回路, 电阻两端产生满标度流量信号电压。调整转换器中的传感器特征系数值, 使输出达到满标度显示、频率和电流, 这样就求得在补偿励磁电源电压和频率变化情况下的特征系数。

预期误差 干法校准的预期误差主要用 k 、 B_w 和 d 的标准偏差来表示。此外, 还有与转换器组合进行调整时所产生的误差 e_r , 通常取这两者的概率误差作为综合预期误差 e 。

$$e = \sqrt{(2\sigma)^2 + (e_r)^2}$$

实际例子: DN1400 电磁流量计, 导管长度 $L=1.4m$ (衬里长度 $L=1D$), 内径即电极间距离 $d=1.4m$, 轴向磁场长度 $L_1=0.6D$ (D 为导管直径)。被校准传感器使用的 MBmag 转换器: 励磁电流 250mA, 输入 0.1667mV 信号, 转换器输出显示 1m/s 流速。

干法校准按下面的程序进行。

1) 按参考文献⁽⁶⁾ Table12.3 查表插值计算灵敏度系数。磁场长度 $L_1=0.6D$ ，衬里长度 $L=1D$ 。取值计算 $k = 0.636 + \frac{0.790 - 0.636}{1.0 - 0.5} \times (0.6 - 0.5) = 0.6668$ 。

2) 实测测量管内 x 轴上各点磁通密度 $B(x_{xi}, 0)$ ，取 $n = 20$ ， x 轴等分长度 x_i 和点的磁感应强度 B_{xi} 测试值记于表 7-9。用式 (7-34) 求得 x 轴上各点的 W_{xi} 也记于表 7-9，再按式 (7-35) 求出平均磁场 B_w 。

表 7-9 干法校准测试、计算值

	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_i	0	$\pm \frac{d}{20}$	$\pm \frac{d}{10}$	$\pm \frac{3d}{20}$	$\pm \frac{d}{5}$	$\pm \frac{d}{4}$	$\pm \frac{3d}{10}$	$\pm \frac{7d}{20}$	$\pm \frac{2d}{5}$	$\pm \frac{9d}{20}$
W_{xi}	1	1.010101	1.04167	1.0989	1.19047	1.33333	1.5625	1.96078	2.77778	5.263158
B_{wi} (mT)	0.183	0.182	0.182	0.182	0.181	0.180	0.179	0.178	0.166	0.150

$$B_w = \frac{1 \times 0.183 + 1.0101 \times 0.182 + \dots + 5.263158 \times 0.150}{1 + 1.010101 + \dots + 5.263158} = 0.169485 \text{ (mT)}$$

3) 取 3 处以上实测电极间距离 d' ，计算 d' 的平均值。 $d'_1 = 1396\text{mm}$ ； $d'_2 = 1401\text{mm}$ ； $d'_3 = 1394\text{mm}$ 。 $\bar{d}' = 1397\text{mm} = 1.397\text{m}$ 。

设被校准传感器内流过 1m/s 平均流速，电极上感应电动势为：

$$e = k' B_w d' \bar{v} = 0.6668 \times 0.169485 \times 10^{-3} \times 1.397 \times 1 = 0.157876\text{mV}。$$

已知转换器输出显示 1m/s 的信号幅度(如 MBmag 型⁽¹²⁾电磁流量转换器为 0.1667mV)，计算被校准传感器的特征系数 (MBmag 转换器中菜单项目传感器系数值) K

$$K = 0.1667 / 0.157876 = 1.055891。$$

7.4.5 电磁流量计测量的不确定度分析^{[9]、[10]}

国际标准 ISO 6817 和国家标准 GB/T 18660 已经规定电磁流量计采用不确定的测量精确度方法。但是，在制定国家检定规程 JJG 1029-2007 电磁流量计时，从国内外大多数制造商的现状考虑，认为现在引入不确定度为时尚早，所以仍然采用了精确度等级的性能评定方法。因此，使用前面首先介绍了基本误差的计算方法。这里为了方便今后电磁流量计长期运行的性能考核和误差评定，这里对不确定度分析进行有关说明。

采用精确度等级的测量误差是把标准校准器（流量校验装置）显示的实际流量当作真值的情况下定义的。可以想到，随着要求精确度等级的提高，误差评定方法和校准方法的不同，对上一级标准值的偏离要求会有不同。另外，当测量数据比较少时，即使测量数据能够进入额定精确度范围内，也未必能保证在其他场合下也都能进到额定精确度范围。因此，希望用测量不确定度的方法来评定测量误差。

a) 误差源

电磁流量计校准方面的误差，分如下那样的系统误差和随机误差。

- (1) 作为标准的校准器或校准装置的误差……………系统误差
- (2) 标准校准器对国家基准溯源的误差……………系统误差
- (3) 校准装置因流体条件引起的误差……………系统误差
- (4) 把流量值 q_v 转换为电信号的误差……………系统误差，随机误差

b) 单独不确定度的传播

流量测量中的不确定度是由上述所列的各种来源造成的单独不确定度的合成来估计的。虽然系统误差已经从随机误差中区分出来，每一个系统误差分量的可能值的概率分布基本上是高斯分布。因此，随机误差和系统误差的合成可以全部按真实随机误差处理，并且按照 ISO5168，流量测量的相对标准偏差可取为由各种来源产生的相对标准偏差之平方和的平方根。

因此流量测量的结果是：

$$q_v(1 \pm E_{q_v}) = q_v \left\{ 1 \pm 2 \left[\left(\frac{S_{SX}}{q_v} \frac{\partial q_v}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{S_{RX}}{q_v} \frac{\partial q_v}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{S_f}{q_v} \right)^2 + \left(\frac{S_c}{q_v} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

其置信度水平为 95%。

式中： s_{SX} ——输出信号中与系统误差有关的标准偏差；

s_{RX} ——输出信号中的随机误差的标准偏差；

s_f ——由流动条件所产生的标准偏差；

s_c ——校准关系中的标准偏差。

在校准关系提出 $q_v = K_i X$ 的简单形式的情况下，上述公式写作：

$$q_v = 1 \pm 2 \left[\left(\frac{s_{SX}}{X} \right)^2 + \left(\frac{s_{RX}}{X} \right)^2 + \left(\frac{c_f}{q_v} \right)^2 + \left(\frac{s_C}{q_v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7-39)$$

c) 流量计输出信号的系统误差和随机误差

在流量计校准过程中大家最关心的是真值的可信赖性。因此，很多文献⁽⁹⁾讨论标准校验装置不确定度及其溯源性，这是式(7-39)括号内后面两项。参考文献⁽¹⁰⁾在讨论电磁流量计不确定度时给予了足够的重视。

这里考虑到对于流量计长期应用，如何保证测量的不确定度，需要关心的则是式(7-39)括号内前面两项。也就是说要从 $q_v = K_i X$ 函数关系求偏导，得到流量计自身的误差源。通过对式(7-1)分析，在满足流量计求解基本微分方程边界条件情况下，不确定度误差源包括^[10]：

- | | |
|---|---|
| (1) $v = v_0(x, y, z)$ | 流速分布状态的变化修正； |
| (2) $k = K_0 \cdot (1 + f_1(v))$ | 灵敏度系数(是流速分布状态的函数)的变化修正； |
| (3) $B = B_0 \cdot (1 + f_2(T_{Fluid}, T_{Amb}))$ | 磁感应强度B(是流体温度和环境温度的函数)的变化修正； |
| (4) $D = D_0 \cdot (1 + f_3(T_{Fluid}, p, t))$ | 测量管直径(是流体温度、对使用塑料衬里情形，流体压力和时间的函数)的变化修正。 |

高性能的重复性(低不确定度)要求误差源的修正式中修正系数 f_x 为最低数值。

对于(1)，除了校准装置的流体条件可能引起流速分布状态变化外，电极的磨耗，衬里表面的粗糙度，测量管内壁的污垢等都可能引起流速分布畸变，造成测量误差。特别是小口径这些影响更大。这种误差往往引起随机误差。

对于(2)，小口径的流量计，流量变化比较大，流速分布的流动状态可能处于层流和紊流过渡情况，7.2.4节介绍过灵敏度系数(短路系数)的变化。这种误差应该是系统误差。

对于(3)，流体温度和环境温度可能引起线圈、磁轭、极靴等机械尺寸和磁场空气隙长度的变化，也可能引起导磁材料的导磁率、饱和磁感应强度变化，进而造成测量误差。试验表明，流体温度的影响比环境温度的影响要大。参考文献^[10]给出试验口径为DN50的温度估计误差值如下：

理想磁性材料能够做到的最佳值：0,2 % / 100K (0,002%/K or 0,01% / 5K)

应用一般导磁材料目前能够做到：0,5 % / 100K (0,005%/K or 0,01% / 2K)

按低成本设计的磁路：> 2% / 100K (0,02%/K or 0,1% / 10K)。

对于(4)，不同衬里材质情况，测量管受温度影响，直径的不确定度可从图7-29看出估计值。

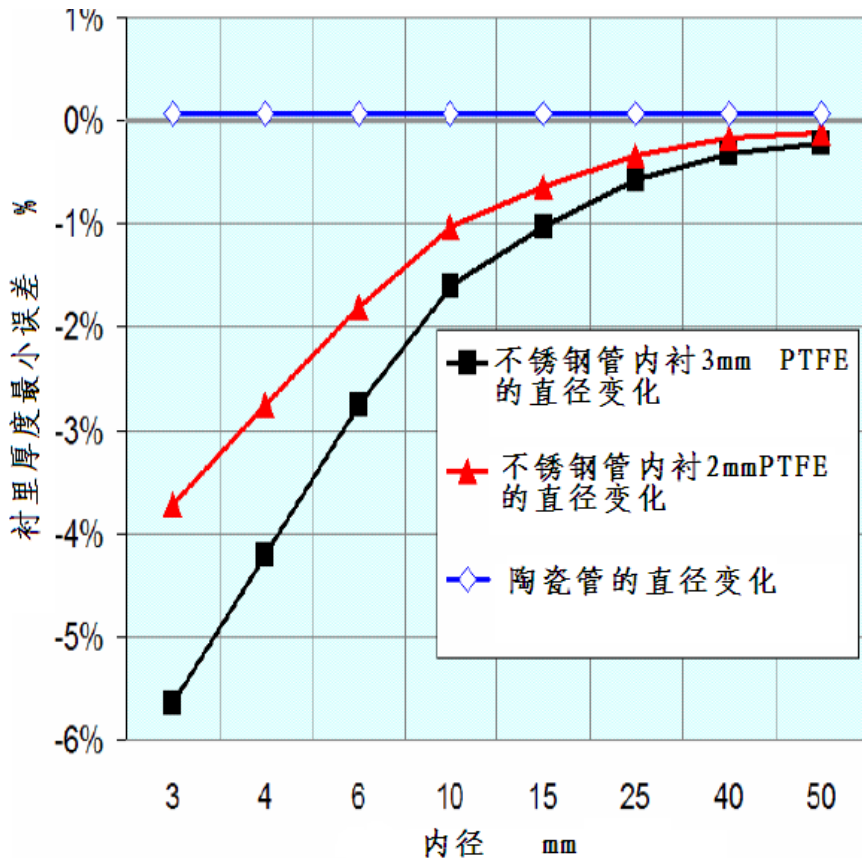


图7-29 温度每变化100K不同衬里材料引起测量管直径的变化

流体内部压力对测量不确定影响从两个方面考虑：

(1) 液体的体积是液体压力的函数， $V=f(p)$ 。

水在20℃时的压缩系数为 $47 \times 10^{-6} / 0.1\text{Pa} = 0.005\% / 0.1\text{MPa}$ 。在0.2MPa以下压力下校准的常规电磁流量计，使用压力可以到4MPa压力，因此液体压力产生的误差在±0.2%以下。但常压情况下校准的电磁流量计使用在高压下，如流体压力30MPa时系统误差将增加±1.5%。

(2) 测量管内直径是液体压力的函数， $D=f(p)$ 。

通常电磁流量计的测量管是在不锈钢内壁贴附绝缘衬里。在4.0MPa压力下一般直径会增大0.2%。就是说直径随压力变化的系统误差大致为：压力每增大0.1MPa，直径增大0.005%；压力每增大0.2MPa，直径增大0.01%。

(3) 随着长时间地使用，流量计的测量管内壁可能结垢、磨损，其尺寸可能发生变化，这将产生随机误差。因此在选型时需要注意合理选择衬里材料避免或减小结垢与磨损。

流量计测量管内壁副附着物不仅改变流通截面的直径影响流速，而且由于附着物的导电

性差别对感应信号的衰减大小不同，因而造成的测量误差大小也不一样。理论证明式(7-40)表示衬里上附着物产生的误差 $\Delta\varepsilon$ 与附着物和测量液体电导率及附着厚度的关系。

$$\Delta\varepsilon = 1 - \frac{2}{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_f}\right) + \left(1 - \frac{\sigma_w}{\sigma_f}\right) \left(1 - \frac{2t}{d}\right)^2} \quad (7-40)$$

式中， σ_w 、 σ_f 分别为附着物和测量液体的电导率，附着物的厚度为 t ，测量管直径为 d 。

若(7-40)式中 $\sigma_w = \sigma_f$ ，则无误差。从图7-30可以看到，当附着物的电导率大于测量流体的电导率，测量出现负误差；当附着物的电导率小于测量流体的电导率，测量出现正误差。

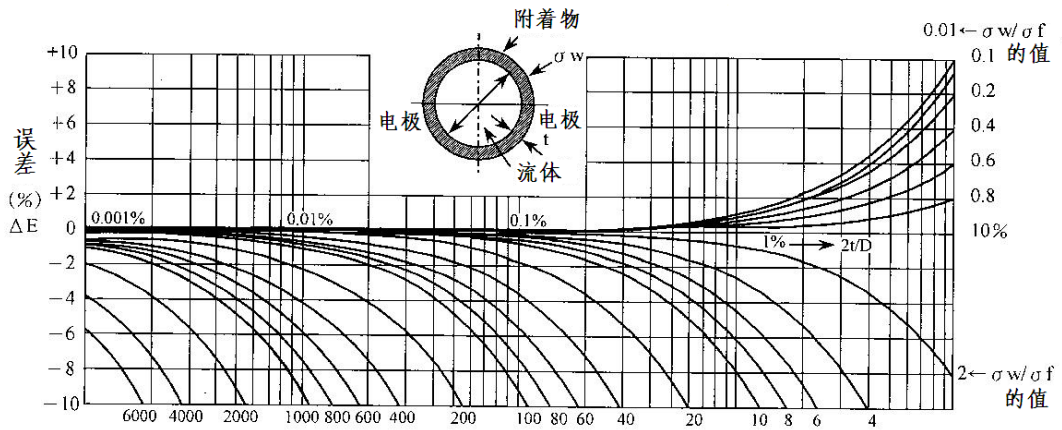


图7-30 测量管内壁附着导电性物质的理论误差

7.4.6 电磁流量计的在线检验方法

在应用过程中，电磁流量计的精确度保证历来为人们所重视。而且，越来越多的电磁流量计用作水、污水等导电液体的计量仪表。依据法定计量规定和供需双方要求，需要对电磁流量计进行定期检验，来验证其测量是否符合出厂规定的精确度等级。严格地讲，流量计的校验必需送到标准的校验设备上进行。但是，随着电磁流量计制造技术的发展和行业应用的扩大，电磁流量计的使用量越来越多、口径越来越大，送回校验装置上校验的难度也越来越大。特别是在给水与排水行业，应用管径大，大多数流量计安装在地下，要做到断流拆表校验，操作起来难度很大，既费时又费力，甚至根本无法拆下来。为此，电磁流量计的应用者和制造商一直都在苦苦寻求能够在线检验电磁流量计的方法，来替代传统的离线校验方法。

在线检验是流量计安装在管道上的条件下,利用相关方法检测仪表中影响不确定度的误差源的数据与出厂时的数值比较,观察其变化是否在允许范围内,来判断应用的电磁流量计的测量不确定度或测量精确度等级。因此,通常需要把出厂校准的流量计特征系数、零点修正值、传感器结构参数、磁场参数(励磁电流值、线圈的电阻值或电感值、探测线圈感应电势等)、转换器参数甚至传感器安装状态下流速分布状态图形等有关参数保存下来。可以随时与检测的这些参数值比较,判断测量的精确度或不确定度。这种方法有点类似司法判案的“指纹”比较,所以有人也称它为流量计的“指纹系统”。

依据原理公式(7-1)和电磁流量计不确定度误差源的分析,在线校验应包含以下内容:

a) 流速分布轮廓的检查

传感器制造出厂时测量管内壁衬有光滑的绝缘衬里,在符合安装要求上下游的直管段长度条件下,可以使流过流量计的流速分布是以测量管中心轴对称,满足基本的测量条件。但是,经过长时间运行,流体在传感器前后管道的腐蚀、杂质结垢、泥沙杂物堆积,会破坏原来的流速轴对称分布。流速的不对称分布破坏了信号电位按对称分布的权重函数曲线关系,产生了测量平均流速的误差,即产生流量测量的误差。因此,检查流速分布轮廓是否轴对称是判别流速测量不确定度误差的重要内容。

流速分布轮廓是应用图7-3电磁流量计权重函数的分布规律来检测的。正常测量状态,测量管上下励磁线圈和磁场部件,使其内部产生的工作磁场磁力线如图7-31所示,呈平行力线垂直向下。如果上下励磁线圈反向串接测量管内磁场被抵消,工作磁场为零。因此,当上下励磁线圈反向串接,即使有流量流过,并且流速以中心轴对称分布,测量输出是零的。而当线圈反向串接,如果有流量流过,流

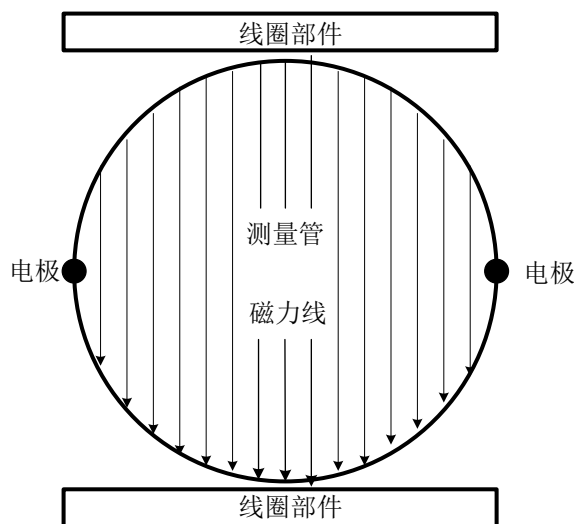


图7-31 测量管内磁力线分布

速不是以中心轴对称分布,测量输出则不为零,其大小与图7-3b)所示位置和图形有关。造成流速分布不对称的原因可能是流体在传感器前后管道的腐蚀、杂质结垢、泥沙杂物堆积,或者衬里脱落、变形。这样,通过检测励磁线圈反向串接时的流量值,就可以提供流速不对称的信息,提醒维护人员进行维护和维修。

b) 灵敏度系数检测

在磁场结构尺寸和衬里绝缘长度一定的情况下，灵敏度系数与流速分布状态有关。磁场结构尺寸通常不可能有大的变化，需要考虑的是衬里绝缘长度的变化。检测流速分布轮廓可以检验出衬里在一定长度内是否被破坏，从而分析是否影响到灵敏度系数变化。另外，灵敏度系数大小与流速分布状态有关，测量管内流动状态在层流和紊流状态变换过渡区域引起涡流造成影响到灵敏度系数。这种情况仅发生在某些小口径流量计应用中。其影响大小可以通过雷诺数计算来判断。

c) 磁感应强度B的在线检测

(1) 电阻—电流法

电磁流量计传感器的磁场是由通电线圈产生。磁场感应强度B与通电线圈的安匝数成正比，许多流量计采用恒流源励磁的方法激磁。这样可以通过测量线圈电阻和励磁电流，判别线圈匝数和励磁电流的变化，间接地判断磁场感应强度B的变化。由于线圈匝数不是很多，其电阻值也不可能很高，而且线圈的铜导线随环境温度、通电温升的影响，阻值会发生变化。考虑到外部电缆串接在励磁回路中，电缆的长短也影响到线圈电阻测量。因此，电阻法匝数的“指纹”检测要考虑这些因素。励磁电流的测试，在技术上不存在太大困难。

电阻—电流法检测，要求励磁线圈和磁路部件牢固地固定在测量管上，不会由于温度、机械振动等原因引起励磁线圈和磁路部件位移变化和变形。

(2) 电感—过渡时间法

自感L宏观地表征一个载流线圈及其周围导磁物质性能的参量，由下式表示

$$L = \frac{n\phi}{i} = \frac{\Psi}{i} \quad (7-41)$$

式中 n —线圈匝数；

ϕ —与线圈交链的磁通，流量计工作磁通 (Wb)；

Ψ —线圈的磁链 (Wb)；

i —励磁电流 (A)。

磁感应强度B与磁通 ϕ 的关系是 $\phi = BS$ ，S是通过磁力线的工作截面积。将 $\phi = BS$ 代入式(7-41)线圈电感L

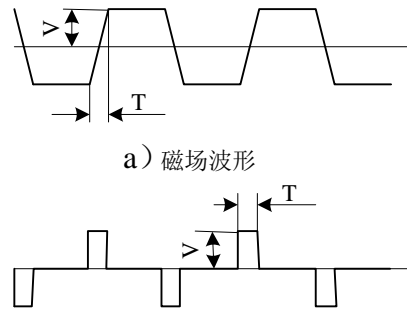
$$L = \frac{n\phi}{i} = \frac{nBS}{i}$$

显然，检测线圈的电感，可以反映工作磁场的磁感应强度B和工作磁场截面积的变化。

励磁线圈电感与电阻的存在,使得流入线圈的矩形波励磁电流的上升沿和下降沿存在过渡时间常数。检测励磁电流过渡时间的与流量计保存的李励磁电流过渡时间进行指纹”比较,可以判断磁场的磁感应强度B的变化。

(3) 测线圈—基准电压法

有些流量计传感器装有磁场探测线圈。探测线圈能够感应出磁场基准电压,基准电压正比于磁场磁感应强度B。矩形波励磁的流量计探测线圈感应的电压波形是磁场上升沿和下降沿的波形,如图7-32所示。磁场基准电压通常表示为脉冲宽度和脉冲幅度之积。例如开封仪表厂的VKB型电磁流量计基准电压是163 μVs 。准确地测量出脉冲的幅度和脉冲宽度就能够保证磁场测量的准确度。



b)基准电压波形
 $V=20\text{mV}$, $T=8\text{ms}$
 基准电压160 μVs

图7-32 磁场基准电压

(4)霍尔效应法磁场测量

在传感器磁场内放置一个霍尔元件,使元件的平面垂直于磁场方向,让磁力线垂直穿过霍尔元件;在霍尔元件的电流控制极间通以恒定直流电流,在磁场下霍尔电势输出极两端会有电势出现,测量霍尔电势大小能够测量出磁场磁感应强度B。

需要注意的是,霍尔效应法检测的磁场磁感应强度B是一个点矢量值,要得到工作断面的平均磁感应强度,需要按式(7-35)权重函数计算平均值。霍尔效应法检测的磁场磁感应强度B值与“指纹”值相比较,是在测量管流速分布状态不发生变化的条件下才有效。

电磁流量计传感器的磁场磁感应强度B比较低。尤其大口径,大约在零点几个mT。用霍尔效应法检测应考虑到霍尔的不等位电势和地磁场的影响。

d) 电极接液电阻的检测

参考文献^[2]详细地解析了电极接液电阻大小,有公式

$$R = \frac{1}{d\sigma} (\Omega)$$

公式中, d——电极直径, m;

σ ——流体电导率, S/m。

上面公式是指两电极之间的电阻,通常测量的是一个电极对接地点(或基准电位点)之间的电阻。所以,记为 $R_e = \frac{1}{2d\sigma}$ 。

从公式可以看到,电极接液电阻大小与流体电导率成反比关系。于是,检测电极接液

电阻可以用来检查流体电导率的变化、检验流体电导率是否超限。也可用来判别液体是否空管（不满50%测量管）。

即时地检测电极接液电阻与初始的“指纹”比较，可以判断电极是否被污染、覆盖和结垢。当检测的电极接液电阻大于初始的“指纹”值，电极会被覆盖绝缘性物质，这时可以用通交流电的方法加热溶解附着物或振动击碎附着物，清洗电极。当检测的电极接液电阻小于初始的“指纹”值，电极会被覆盖导电性物质，这时可以用通直流电的方法进行电化学反应清洗电极。

检测的电极接液电阻不对称而且小于初始“指纹”值，同时伴有趋于零的现象，可能是电极发生了泄漏。

e) 电极噪声的检测

零点对电磁流量计测量的线性度和精确度影响很大。静态零点由电极引线处于工作磁场的位置所决定，牢固地安装在测量管上的电极引线机械位置一定，静态零点不会发生变动。静态零点已经在校准中给予检测，并作为常数存入“指纹”系统。然而，电极上的各种噪声形成的动态零点，会严重地影响到流量计的测量精确度和测量的稳定性。电极上的噪声主要来自如图7-33所示电极对地之间的各种电化电势。它们的幅度远高于电磁流量计流量信号电压几个数量级。通过检测电极对流体间极化电压大小及两电极对流体间的不对称性，可以判别电极是否被介质腐蚀。

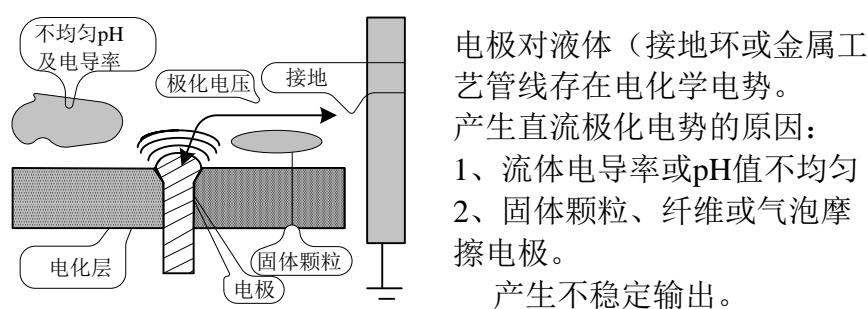


图7-33 电极直流极化电势形成的噪声

噪声或动态零点往往是由现场安装、运行的工艺流程和工艺条件所引起的。噪声或动态零点使得测量不稳定，不可靠，甚至无法测量。只有合理地选择仪表和使用仪表，才能得到准确地、可靠地测量。所以，通过在线检测分辨出噪声类型，能够提供处理方法的信息，帮助用好流量计。

f) 转换器特性的检查（传输系数、线性度、精确度、抗噪声性能、功能输出等的检查）

现代的电磁流量转换器一方面要向传感器提供低频矩形波励磁电流，另一方面要将传

感器感应微弱的流量信号电压进行线性放大、除去噪声、变换成可以为接收设备接受的电流、频率以及数字通讯信号。因此，转换器变换系数的准确度、线性度直接影响到流量计的性能和功能。所以，检验转换器的传输系数、线性度、精确度、抗噪声性能、功能输出等，是在线分析流量计不确定度重要部分。

在线检验转换器，首先需要建立电磁流量计精确地的标准模拟信号源。参考文献^[2]介绍有标准模拟信号源的电路。在线标准模拟信号源往往是用来对一个流量点进行检测。

另外一种在线标准模拟信号源方法，是通过线性改变励磁电流大小检测输出变化实现。这种方法对于智能化转换器比较方便。

国产的 MBmag 转换器程序中保存有“仪表出厂系数”，检验“仪表出厂系数”就是用于检验转换器传输系数的规格化值。厂家可以提供标准信号源来检验转换器长期工作是否变化。为了方便检查电流输出的精确度，程序中也保存有“电流满度修正”和“电流零点修正”。检验“电流满度修正”和“电流零点修正”，可检测 4-20mA 的满度和零点是否准确。

应用微计算机的电磁流量转换器在线检测还需要对各部分硬件进行检查，以便为用户提供维修信息。这些硬件包括：AD、存贮器等。

7.5 电磁流量计的几种发展品种

随着电磁流量计测量技术发展，为满足不同测量领域的需要，不断有新形式的电磁流量计出现。目前大致有下面几种新的发展品种：

7.5.1 电容式电磁流量计

把电极埋入衬里内，使被测流体与电极不接触，这样能从根本上解决电极腐蚀、污染、泄露问题。检测的流量电动势通过电极与被衬里形成的电容耦合传输到转换器，这就是电容式电磁流量计。为了增大电容的容量，减少容抗上的信号损失，通常采用大面积电极或多电极结构，并提高转换器的输入电阻到 $10^{12}\Omega$ 以上。由此，又带来了电容电磁流量计能够测量低电导率液体的优点。譬如，经脱去离子净化水处理的纯水，其电导率可能在 10^{-5}S/m 以下。用一般电磁流量计按分析会达 5% 以上测量误差。

耦合电容的容量大约在几个至几十个 pF。耦合电容容量的变动将造成大的噪声，会影响测量。为此，对用作电容电介质的衬里材料，要求具有绝缘强度高、介质损耗系数小、温度系数小、压缩系数小、刚性好等特性。新型衬里材料 PFA 聚四氟乙烯和高纯铝工业陶瓷能够满足这些要求。为了降低信号传输容抗，电容电磁流量计使用的励磁频率比较高，一般在 100Hz 以上。

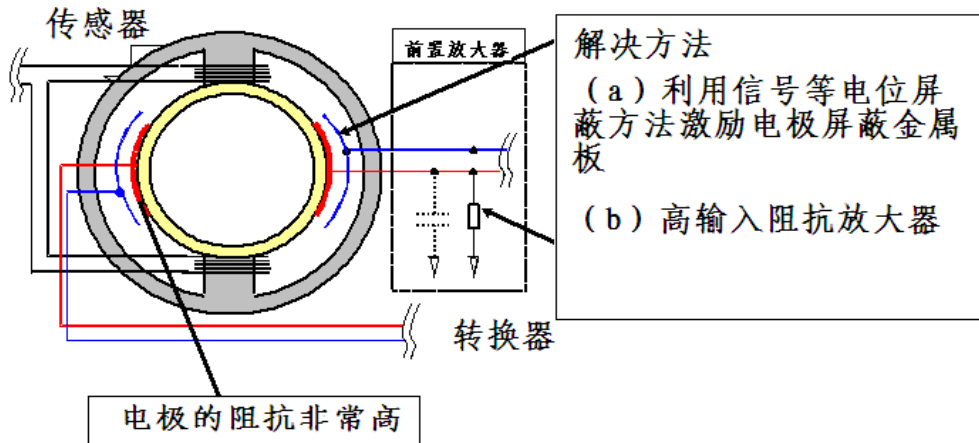


图 7-34 电容电磁流量计的自举阻抗转换和静电屏蔽

励磁线圈与电极间存在的分布电容和绝缘电阻，电容耦合增大了信号内阻抗。励磁电压通过励磁线圈与电极间分布电容和绝缘电阻与信号内阻抗分压，在电极上形成大的共模干扰电压。因此，提高共模抑制比成为电容电磁流量计的另一技术难点。电容电磁流量计的共模抑制比要求在 $CMRR \geq 120\text{db}$ 。通常把前置放大器放在传感器内，采用图 7-34 的自举阻抗转换和等电位激励静电屏蔽措施，能有效地抑制了大的共模干扰。

7-5.2 两线制电磁流量计

输出的 4~20mA 信号串在直流供电的电源回路中，包括传感器和转换器一体的电磁流量计，只有电源一条传输电缆，这样的结构就构成两线制电磁流量计。两线制仪表可以减少电缆的敷设，统一电源，节约成本，便于维护和管理，尤其容易实现产品的本安防爆。

两线制电磁流量计技术难度在于解决仪表的低功耗问题。它要求仪表的工作电流不大于 4mA。首先考虑减低传感器励磁电流，从而降低磁场强度，减低感应的流量信号（两线制设计传感器感应信号一般为 1m/s 小于 $40\mu\text{V}$ ）。传感器结构上可以采用导磁率高、矫顽力小、新型的非晶态磁性材料作为铁心可减少漏磁，提高励磁效率和减小温度

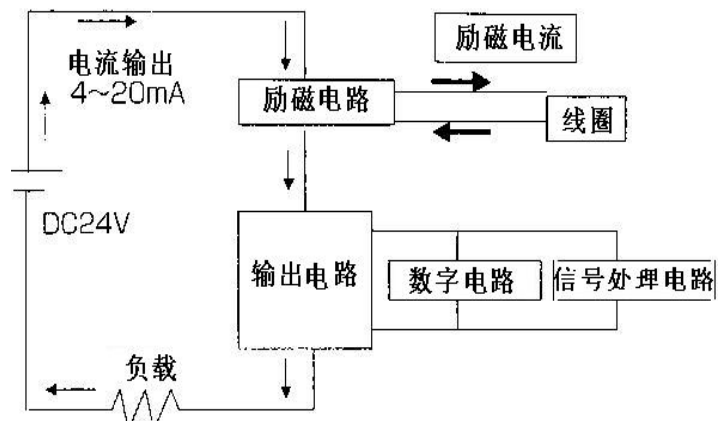


图 7-35 典型的两线制电磁流量计原理框图

变化的影响。转换器则要求选择低功耗器件和采用高增益、低噪声的电路。并且采用脉冲调制的隔离措施来为模拟电路及数字电路提供不同的供电电压，以便提高其抗干扰性能。

图 7-35 为典型的两线制电磁流量计原理框图。图 7-36 为一种电压控制型多段励磁方案，它能够在常用测量的量程范围获得较高的信号电压值，从而提高了测量精确度。

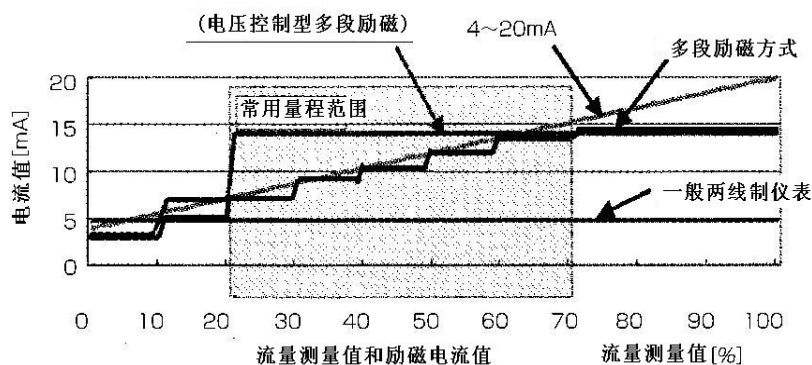


图 7-36 电压控制型两线制多段励磁

7.5.3 潜水型电磁流量计

潜水电磁流量计是把电磁流量计的测量原理结合节流装置的理论用于明渠流量测量的一种流量计。在渠道的断面中设置一带孔闸板，将潜水电磁流量传感器安装在闸板孔内，让水全部从传感器流过。测量流过传感器的流量，即是渠道流量。

与节流装置相似，水在自然流下时，渠道平均流速较低，带孔闸板将造成上下游的水位差。按能量转换的规则，该水位差将低的明渠流速转化为测量管内较高的平均流速。设上下游水位差为 h ，重力加速度 g ，局部阻力系数 F ，孔（测量管）内平均流速 V ，则

$$u = \frac{1}{\sqrt{F}} \sqrt{2gh}。$$

这就是说，通过测量潜水电磁流量传感器的流量就可测量出渠道的流量。为了减小局部阻力，使进入传感器测量管的水能够满足以中心轴对称流速分布要求的前提条件，传感器测量管前后必须安装有喷嘴形式的导流管（导流喷嘴，俗称喇叭口）。图 7-37 所示潜水电磁流量计的工作原理。

按照分析，流过导管的流速仅与上下游水头损失 h 有关，渠道上下游的行近流速和远离流速对其影响很小。所以我们在闸板上可安装与传感器几何尺寸相同的假传感器（仿真传感器），它们导管内的平均流速与传感

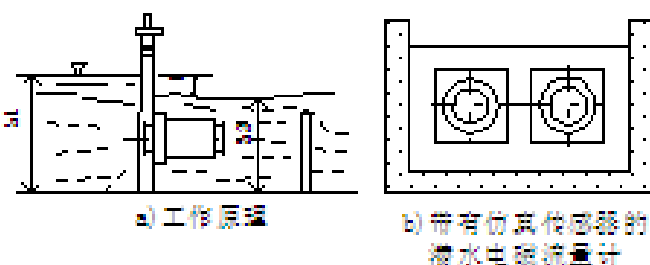


图 7-37 潜水电磁流量计

器测量的流速相同。用潜水电磁流量计测得的流量乘以仿真传感器和潜水传感器的总个数即得到明渠的流量。图 7-37b) 所示用一只潜水电磁流量计加仿真传感器的示例。

潜水电磁流量计是明渠流量计中测量精度较高的流量计，它不仅具有电磁流量计的所有特点。而且不受渠道下游潮汐和河水上涨的影响。但是应注意，流量较小时水不能充满测量管，这时传感器下游要加装堰板，抬高水位；流量过大时水位差使上游水位抬得过高，造成上游溢流，这时应加仿真传感器，加大流通面积，降低水位。

7.5.4 非满管道电磁流量计

在断面一定情况下，电磁流量计实际是测量流速，再乘以断面积就得到流量。有许多场合，比如市政排水、废水处理、农用灌溉，流体靠自然流下，或低压输送。这时流体可能不满管道。为满足这方面用户需要，非满管道电磁流量计的开发与研究成为当前电磁流量计的热门课题。

非满管道电磁流量计的设计，完全摆脱传统的仪表灵敏度恒定的思路。而是采用对各种影响因素的比率做仪表灵敏度补偿的新思想。

可以想象，影响电磁流量计灵敏度有：水位变化和在恒定水位下流速分布变化两个重要因素。水位可以包含在流速分布变化中。由水力学可知，非满管道内流速分布取决于水力坡度。因此，重要的是，要研究水位和水力坡度两个参数，以补偿仪表灵敏度。此外，自然流下的非满管道流体会出现流体电导率不一致和电极被污染。为此，研究测量流体电导率变化用以参与仪表灵敏度补偿有一定价值。

非满管道传感器往往采用大面积弧形电极或多对电极。大面积电极和多电极安装是以垂直轴为对称，水平轴偏下，目的是低水位也可以测。传感器的上下励磁线圈可以单独驱动，这样将产生不同磁通密度分布的磁场，使不满管道电磁流量计有不同的权重函数分布规律。每种权重函数分布适于相应流体流速分布，产生不同的电动势 E_1 和 E_2 。由电动势可得到流速分布信息，即水位信息所对应的灵敏度 K_1 和 K_2 。流体导电性的信息可由接通、断开接地的 100 欧电阻所获得，对应的电动势为 E_3 和 E_1 。由此可得到水位与电动势比率 E_1/E_2 的函数关系，电导率与电动势比率 E_3/E_1 的函数关系。水力坡度在进行水位和电导率计算同时采用一组数据代入求得。把水位、电导率、水力坡度相关的补偿系数制成补偿表由 CPU 对仪表灵敏度的变化给予补偿，保证了非满管道流量测量的准确性。

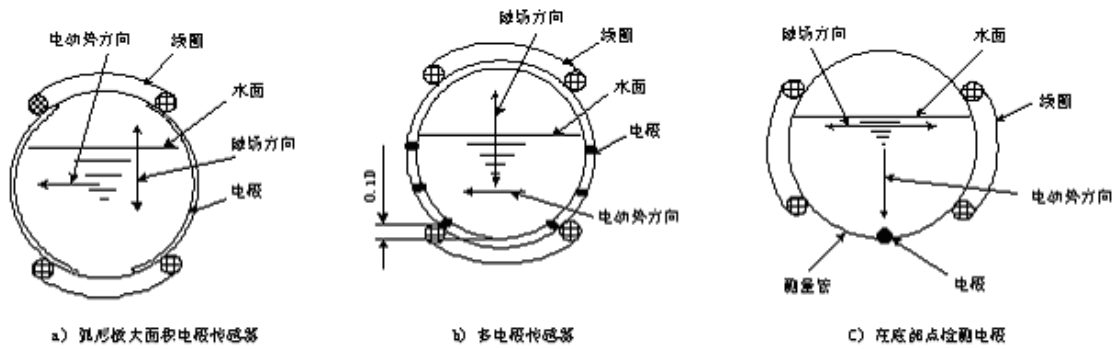


图 7-38 非满管道电磁流量计的结构原理
水位的测量也可用电容法得到。

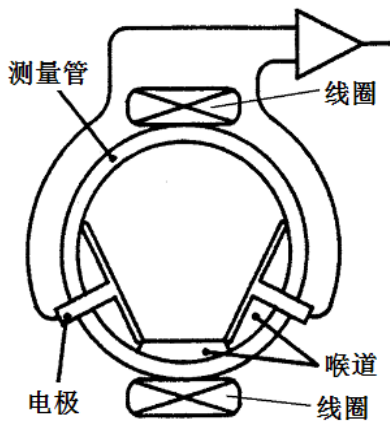


图 7-39 P-B 式非满管道电磁流量计

为了扩大流量测量范围，提高流量计测量下限的灵敏度，通常非满管道流量计的传感器测量管采用缩径或将节流部件置于内部的方法来实现。图 7-39 是一种将明渠 P-B 式流量计与电磁流量计相结合的非满管道流量计结构原理。通过测量管的喉部，流速提高，电极感应的电动势得以增加，流量计信噪比提高。因此提高了下限流量的测量。

7.5.5 电磁水表

与大量使用的水表相比，电磁流量计无活动部件。许多场合它可以更好地替代水表，完成水的计量任务。水表以检测累计总量为主，不用外部电源，要求仪表使用寿命在 8 年以上。电磁式水表也必须以这两点为基本设计思路。因此，说到底电磁式水表的技术关键也在于低功耗。表内用锂电池；使用寿命达 8 年，意味着功耗不大于 2mW。

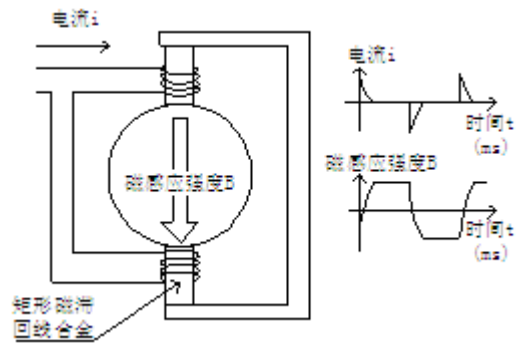


图 7-40 电磁水表

如同两线制电磁流量计，解决低功耗问题在于解决励磁电流和功耗。根据当代测量技术，电磁水表的电动势大小可以设计在每 1m/s 流速 $20\mu\text{V}\sim 40\mu\text{V}$ ，励磁电流可以设计在几十个毫安。一些厂商利用降低测量的频率，如 5~15 秒测量一次，使用锂电池供电达到 6~8 年的使用期是可能的。明显地看到，这种方式的励磁频率对于水量频繁变化的情况会带来测量误差。

为此，可以使用如图 7-40 那样的尖脉冲电流去激磁，由矩形磁滞回线磁性材料的铁心

将磁感应强度变换为矩形波磁场。这样方法励磁频率仍可以使用 6.25HZ，励磁电功也很小，完全能克服流量变化测量不能跟随的问题。所以，从原理上讲这是先进的技术。

电磁式水表必须使用微功耗微处理器、运算放大器芯片和 LCD 显示器。同时应该注意到作为水表，电磁水表也应该符合在室外、窰井安的 IP68 环境条件。

7.5.6 电磁流速计和插入式流量计⁽¹²⁾

与一般电磁流量计不同的是，电磁流速计在传感器外侧形成外发射磁场。测量电极在传感器的端部或两侧。值得注意的是，外发射磁场电磁流速传感器的感应信号受流场和磁场的边界层厚度影响，会降低测量的灵敏度和线性度。

对较大水路面积，流速计测量可以看成是点流速测量。较大管径内的流体流动速度分布规律也多是紊流状态。如果以管轴中心为对称，式（7-42）是圆管内流速分布的指数表达式。式中， V_0 ：中心轴流速； V_x ：圆断面任一点流速； r_x ：圆中心轴距该点的矢径； R ：圆管半径； n ：与雷诺数有关的数， n 值由尼古拉兹指数表查得也可按米勒公式[15]计算。

$$U_x = \left(1 - \frac{r_x}{R}\right)^{1/n} U_0 \quad (7-42)$$

由上式可以得到式（7-43）的管道中平均流速 \bar{v} 。

$$\bar{v} = \frac{2n^2}{(2n+1)(n+1)} v_0 \quad (7-43)$$

式中， $\frac{2n^2}{(2n+1)(n+1)}$ 为平均流速对管道中心最大流速的比值，即速度轮廓系数 F_p 。图 7-41

所示公称通径 DN200 至 DN2000 的速度轮廓系数 F_p 。

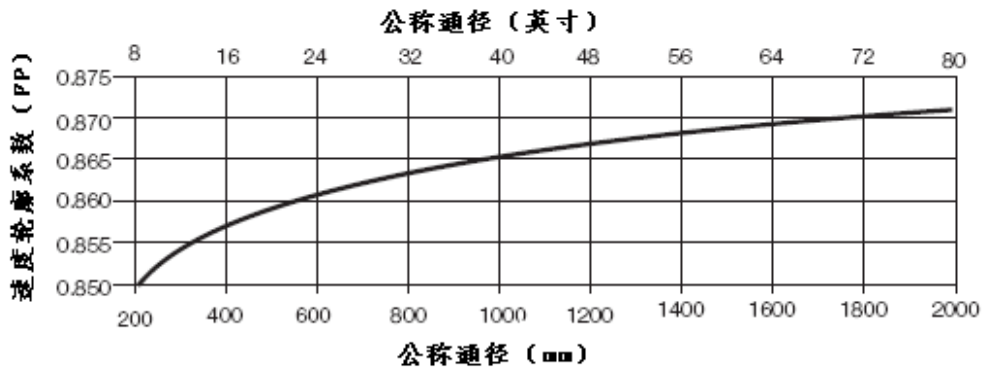


图 7-41 公称通径 DN200 至 DN2000 的速度轮廓系数 F_p

结合式（7-42）和式（7-43）能够得到圆管道断面平均流速点的位置在距管壁约为 1/8

直径的同心圆上。因此，如果在圆管道的中心测量流速，其平均流速需要用读数值乘以该公称通径的速度轮廓系数 F_p ；如果在距管壁约为 1/8 直径的同心圆上一点测量流速，该点的速度即为平均流速，其速度轮廓系数 $F_p=1$ 。

流速计放在管道中心位置和平均流速点的位置测量的体积流量可用式 (7-44) 表示：

$$q_v = A \cdot F_0 \cdot F_1 \cdot F_p V \quad (7-44)$$

式中， A ——管道面积；

F_0 ——阻塞系数，是由检测探头插入流体中引起流通面积减少流速微小的增加，为限制阻塞影响，IS07145 建议检测探头直径 d 和管道直径 D 之比 $d/D \leq 0.06$ ；一般取 $F_0=1$ ；

F_1 ——插入系数，补偿插入检测头引起速度分布畸变影响，由实验求取；

ABB 公司提供的 AquaProbe 插入电磁流量计插入系数为例：

当流速计插入在管道中心时： $F_1 = \frac{1}{1-(38/d)}$ ；当流速计插入在管道平均流速点处：

$$F_1 = +1 \left[\frac{12.09577}{d} + \frac{1.3042118}{\sqrt{d}} + \frac{146.3077892}{d^2} \right]。式中，d 是管道内径，mm。$$

F_p ——速度轮廓系数，在管中心测得的流速是最大流速 V_0 ，其与平均流速 \bar{v} 之间的比即为图 7-41 所示；当流速计插入在平均流速点处 $F_p=1$ 。

V ——所测得的局部流速，在平均流速点位置 \bar{v} ，在中心位置 $V=V_0$ 。

插入电磁流量计是测量点流速，用点流速代表管道中的平均流速。因此，需要保持管道内流速分布在测量段内比较规则的轴对称分布。为此，流量计的安装，国际和国家标准有严格地要求。表 7-10 是 IS07145 第 2.2 章：1982 规定的安装要求。

表 7-10 流速计安装上游直管段长度

测量断面 上游扰动类型	上游最小直管段长度（管道直径倍数）	
	在平均流速点处测量	在管道中心处测量
90° 弯头或 T 型弯头	50	25
同平面几个 90° 弯头	50	25
不同平面几个 90° 弯头	80	50
总收缩角在 18° 到 36°	30	10
总收缩角在 14° 到 28°	55	25
全开蝶阀	45	25
全开旋塞阀	30	15

为了应用好插入流量计，需要对流场速度分布对称性进行检查。特别是对流场速度分布对称性有任何疑问情况下，需要做试验得到离管道中心轴线等距离的两点流速值进行比较。一般比较管道插入深度 1/8 和 7/8 处两点的流速值。因为这两点通常是流场的平均流速点。

用最精确的方法测量管道内径，计算并设置插入系数；如果流速计插入深度为 1/8 和 7/8 直径，速度轮廓系数 $F_p=1$ 。读取记录两处流速值，计算两个记录值的比值。如果它们的比值在 0.95 至 1.05 之间，流场分布对称性可以接受，安装条件应该满足测量要求。

7.6 使用

7.6.1 选型原则和方法

电磁流量计选型可按图 7-42 所示程序进行。

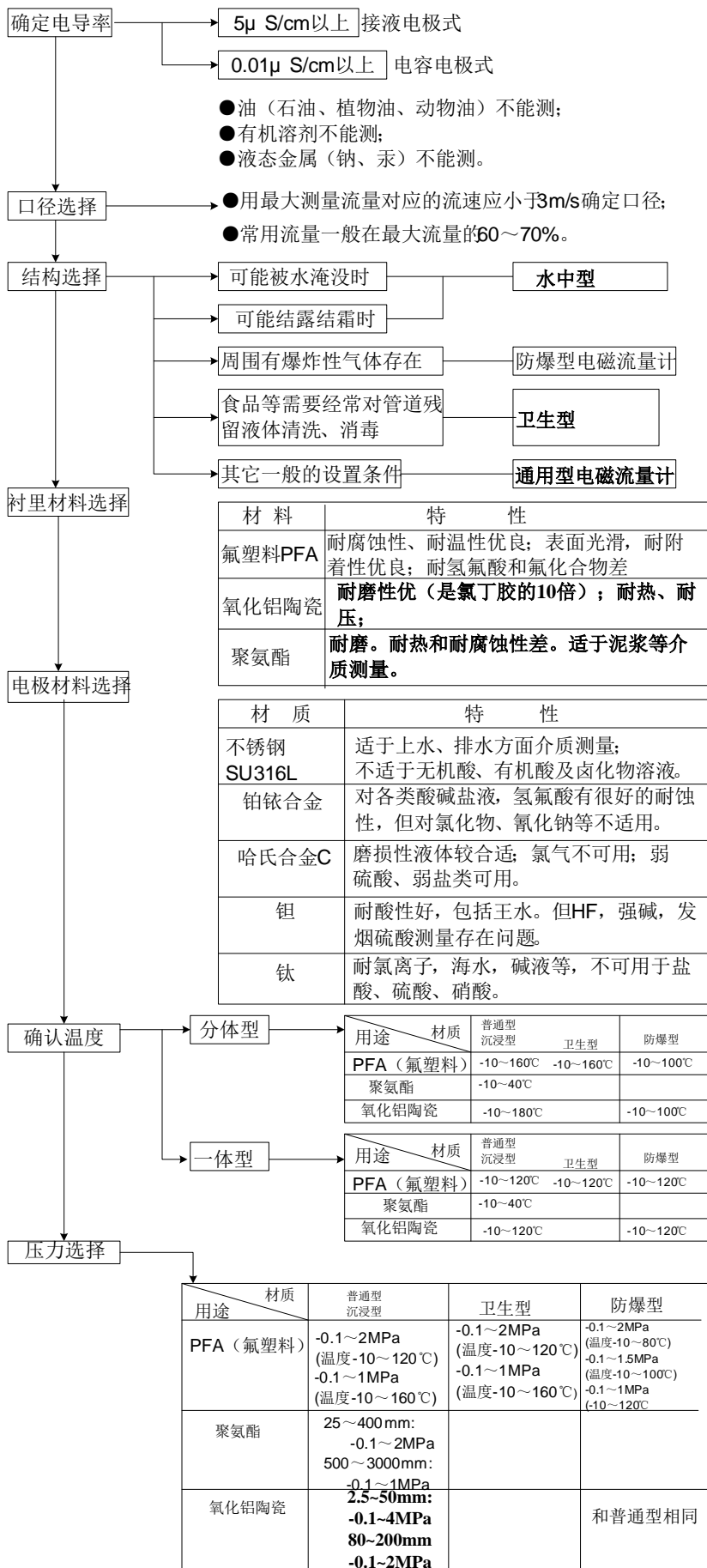


图 7-42 电磁流量计选型方法

7.6.2 合理安装

(1) 配管条件

1) 保证测量精度的配管方法

a. 最小直管段长度

为防止传感器内出现偏流现象，传感器上下游直管段长度应符合有关标准及厂家规定的图 7-25 所示要求。

b. 阀门位置

为防止传感器内出现偏流现象，防止管道放空，一般调节阀门安装在流量计下游。同时，注意上游安装阀门不能使用蝶阀，只能使用闸阀，并且使用时上游闸阀必须全开状态。

c. 注入药液

为防止传感器内液体电导率不均匀引起测量误差，注入药液时应在电磁流量计下游进行。如果一定要在上游进行，应在电磁流量计上游 50D（D：管道通径）以上进行。

d. 相分离

在容易出现固相、气相与液相分离的情况，为防止分离造成的测量误差，流量计应该垂直安装。并且，让流体自下而上流动。

2) 保证传感器内充满流体的配管方法

a. 安装姿势

传感器安装方式可以是水平安装，也可以是垂直安装。原则是电极必须良好地接液和充满液体。为此，总希望流量计下游排液管道位置高于传感器的安装位置，有适当的背压。

b. 阀门设置

为防止传感器内液体放空，一般调节阀门安装在流量计下游，并且流体自下向上流动。

c. 液体内含有气泡

液体内含有气泡的情况，流量计的配管内不能涡集气泡。因此流量计下游出口应有背压，以便排气。或者调节阀门在传感器下游，以保持流量计内压力高于出口压力。

3) 含有固体杂质液体的配管方法

a. 含有固体颗粒的液体

含有泥沙，石子等固体颗粒的导电液体，容易在管内发生沉淀，这时传感器最好垂直安装，并且流体应该是自下向上流动。

b. 管道内有可能有鱼游动的测量流体

管道内鱼在其中游动，会发生测量不稳定。为此，应该在传感器上游设置鱼网拦截鱼进入传感器。

4) 为方便维护的配管方法

a. 预留适当的接线、维护空间

为方便接线、操作和维护，传感器安装场所应预留适当的工作人员活动空间。通常传感器左右与墙壁应该留有 1m 以上活动余地，传感器与地面至少有 30cm 以上的活动余地。

b. 安装旁通阀

为检查零点，调试和维护拆卸方便，建议传感器安装旁通阀和上游闸阀，下游流量调节阀。如图 7-43 所示。

c. 传感器安装位置

为操作和维护方便，建议传感器垂直安装距地面高度在 1~1.5m；传感器水平安装距地面高度在 0.3m 以上。

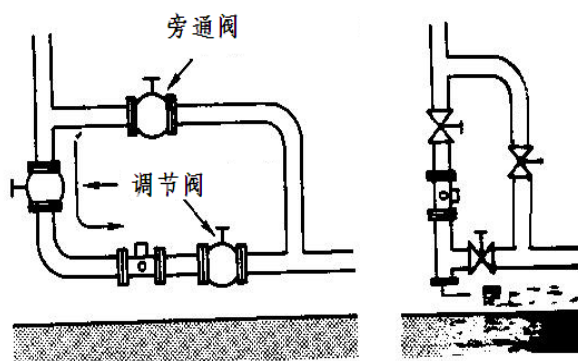


图 7-43 装旁通阀

(2) 传感器的安装

1) 传感器两端连接管道内壁平整，避免突出物造成流速分布的不对称，产生测量误差。

2) 传感器与两端管道连接不应出现倒角与偏心。满足流量计内流速以中心轴为对称分布。

如图 7-44。

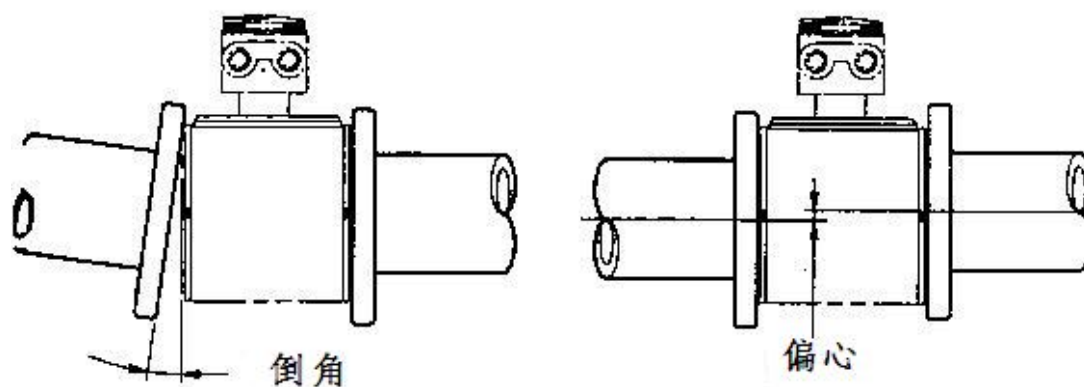


图 7-44 相邻配管的倒角与偏心

3) 新设计的工艺管线在安装传感器之前应进行扫线清理管线。除去管道内的木片，泥块，废旧杂物和金属块，防止杂物损坏衬里产生测量误信号。

4) 在安装起吊传感器时，需要用起吊螺栓和绳子吊装传感器，不能用金属棒插进传感

器以防损伤衬里。

5) 传感器与两端管道连接注意垫圈不能深入管道内过多，以防改变流速分布。

6) 当流量计配管是塑料管道时，应该如图 7-45 所示那样，加装金属接地环。以保证测量液体与感应电势是同电位。金属接地环和密封垫圈材料应具有耐被测液体的腐蚀性能。

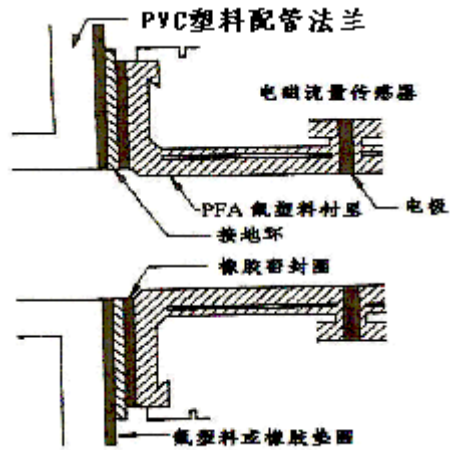


图 7-45 塑料管道的安装

7.6.3 检查、保养和维护

(1) 定期检查项目

- 1) 端子盒内防潮防水性能检查：一般一年至少检查一次；
- 2) 配管连接螺栓是否松动检查：一年至少两次；
- 3) 电极、衬里的检查：对附着性液体，磨损性液体必要时要经常检查。通常可以检测电极电阻来判断电极附着和、腐蚀和衬里泄漏。

(2) 故障检查

智能化电磁流量计一般具有“自诊断功能”，出现异常情况转换器能够提示报警。

1) 励磁线圈检查

当转换器提示“励磁报警”时，请检查线圈电阻是否在 150Ω 以下或与制造厂提供数值相差太大；检查励磁电缆是否接通；励磁回路的保险丝是否被烧断。

2) 检查励磁线圈和接线端子对地（传感器金属壳体）的绝缘电阻和绝缘强度是否明显下降。通常，线圈对地绝缘电阻在 $10M\Omega$ 以上（如果采用基准采样，可以在 $1M\Omega$ 以上）；线圈对地绝缘强度在 $500VDC$ 以上（对低频矩形波励磁方式）。

对信号部分，在传感器液体放空的情况下，要求电极对地绝缘电阻在 $100M\Omega$ 以上；电极对地的绝缘强度也是在 $500V$ 以上。

(3) 故障检查的实例

- ①有流量无显示，见图 7-46；
- ②零点不稳定，见图 7-47；
- ③输出摆动，见图 7-48。

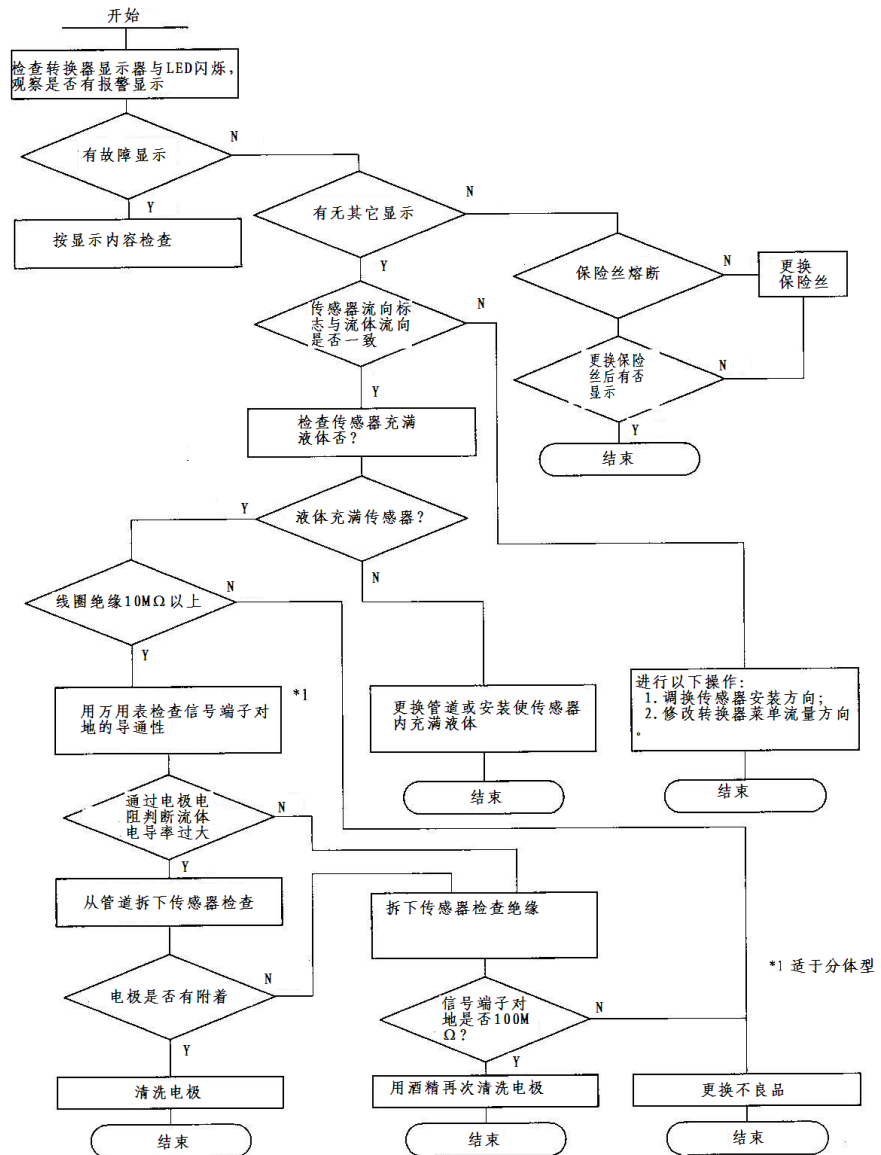


图 7-46 有流量无显示的故障检查

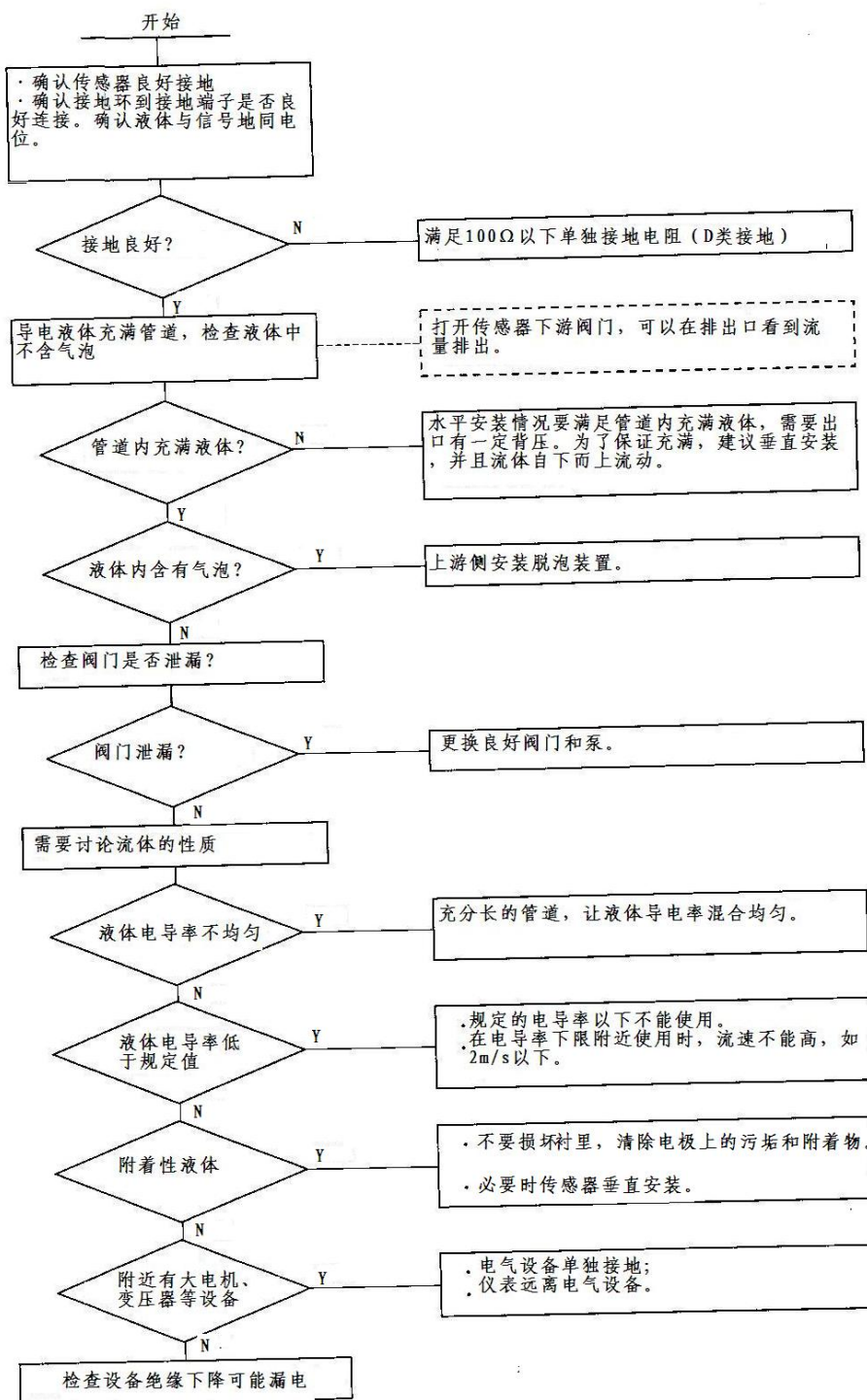


图 7-47 零点不稳定故障的检查程序

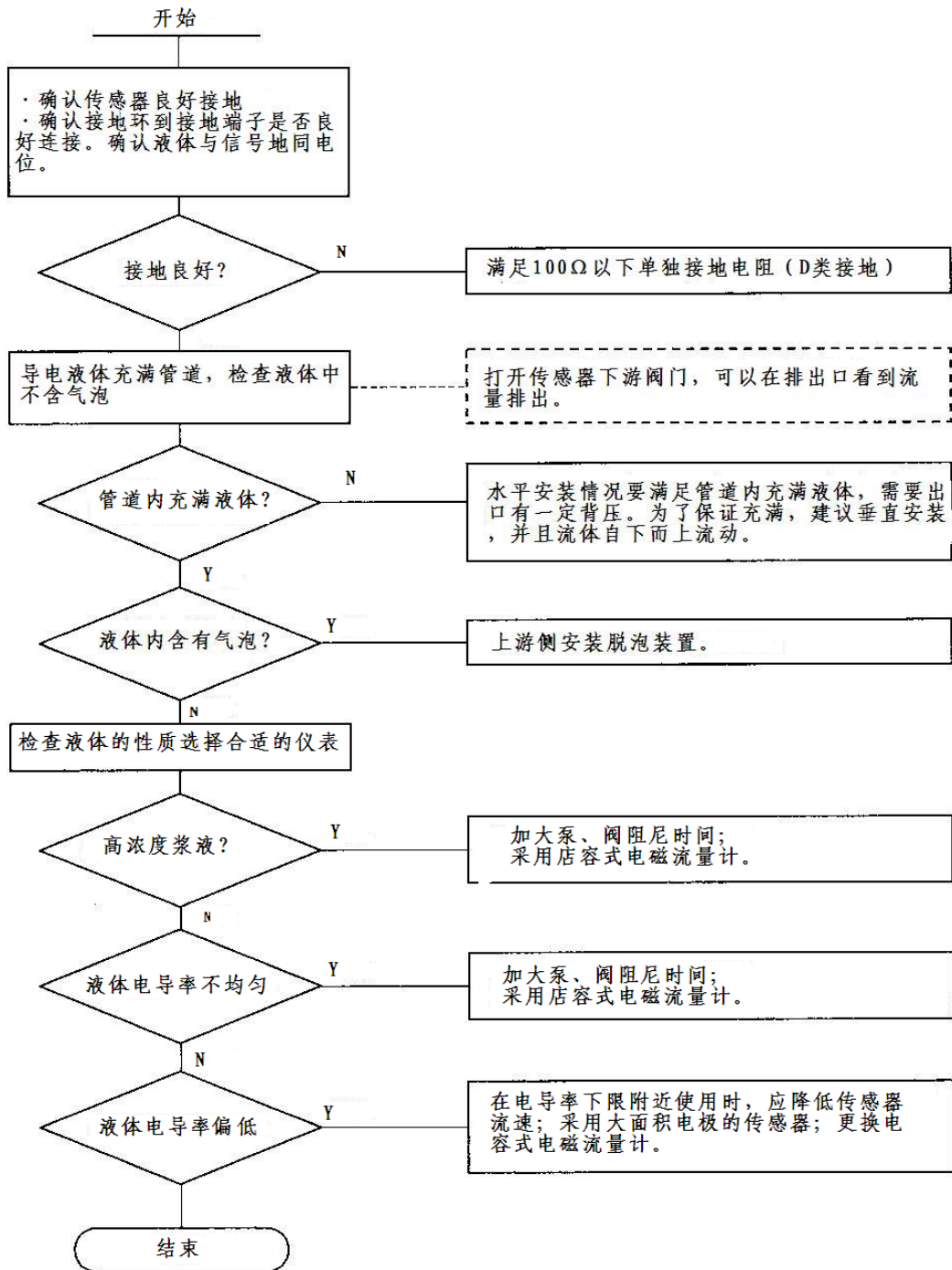


图 7-48 输出摆动故障检查的程序

7.6.4 附着物的影响和电极清洗

前面叙述过电极附着物可以用传感器拆卸清洗；机械方式擦拭；也可用在线通电清洗。由于附着物可能是导电性物质，也可能是绝缘性物质，通电清洗的原理也不一样。对导电性物质附着物，使用的是直流电压，应用电化学的方法使附着在电极上的带电离子，被所加负电场推开，随流体流动带走。所以，导电附着物清洗时两电极对接地电位（液体电位）所加

负的是等电位电压。而对绝缘性物质附着，在两电极之间加上交流电压，是附着在电极上的油脂等绝缘物得到热量，融化后被流体流动带走。

7.6.5 混入气泡的影响

基本上均匀分散的气泡混入导电液体情形下，电磁流量计测量的体积流量是包含气泡在内总的体积流量。如果气泡混入不是均一的，会产生：

1) 气泡混入这部分的感应电动势降低。

2) 气泡集中在 $B \times W$ 积（磁感应强度 \times 权重函数）低的部分，输出增高；相反气泡集中在 $B \times W$ 积（磁感应强度 \times 权重函数）高的部分，输出降低。从图 II-7-49 可以看出这种影响。同时，也可以看到高粘度液体内的气泡容易均匀分散混入，低粘度液体混入的气泡往往向管道上部偏移。

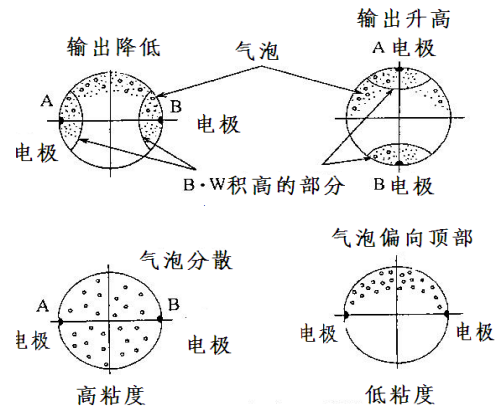


图 7-49 气泡混入的影响

7.6.6 固体两相流测量

固体混入的流体由于密度的不同，在低流速情况下会发生固体在管道内沉淀引起固液两相分离，流速不均匀发生。显然，密度大的固体会沿管道底部流动，密度小的流体会沿管道顶部流动。因此测量两相流动需要注意到流速的不均匀和电导率的不均匀。

含有固体颗粒和纤维物质的流动更需要注意这些物质与金属电极的摩擦，破坏电极表面的化学保护膜，加剧电极与流体介质的电化学反应，形成大幅度变动的极化电压，影响流量计测量的输出摆动。这时，应用高频、双频励磁和电容电极能够得以解决固液两相测量问题。

参考文献

[1] Shercliff.J.A: The Theory of Electromagnetic Flow-measurement, Cambridge Univ, Press (1962)

[2] 蔡武昌, 马中元, 王松良等编著, 电磁流量计, 北京: 石油化工出版社, 2004, 55

[3] Engl.W.L : Der Induktive Durchflussmesserv mit Inhomogenem Magnetfeld , Arch.f.Electrotechn, Vol.5.No.6.344/359(1970)

[4] Schommartz,G: Induktive Durchflussmesseing, VEB Verlag echnik (1974)

[5] Roger C. Baker, Flow Measurement Handbook, Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS 2000, 296

[6] Magaoki kayma 等,高精度电磁流量计-YEWMAG, 横河技报(日),Vo1.28 No1.1984

[7] JIS B 7544-1997 电磁流量计

[8] GB/T 18660—2002 idt ISO 6817: 1992 封闭管道中导电液体流量的测量 电磁流量计

的使用方法

[9] 王池主编, 王自和校, 流量测量不确定度分析, 北京: 中国计量出版社, 2002年2月, 77~80

[10] Friedrich Hofmann, KROHNE Messtechnik, Electromagnetic Flowmeters for use as Transfer Standards State of the art 2003 Possibilities to improve, EMATEM Workshop Vienna, May 22,2003

[11] 浦瑞斯仪表(上海)有限公司 MBmag 电磁流量转换器使用说明书

[12] ABB AquaProbe **Insertion-Type Electromagnetic Probe Flow meter** Installation Guide IM/AQP/SF_2

流量测量技术全书

王池等编著

第7章 电磁流量计为马中元编写

该书正在由化工出版社出版中, 已获以下国家项目。

2011年“十二五”国家重点出版规划400种精品项目

2011年度国家出版基金拟资助项目

“十二五”时期(2011—2015年)国家重点图书、音像、电子出版物出版规划项目