

# 电磁流量计

## 1. 概述

电磁流量计（以下简称 EMF）是利用法拉第电磁感应定律制成的一种测量导电液体体积流量的仪表。50 年代初 EMF 实现了工业化应用，近年来世界范围 EMF 产量约占工业流量仪表台数的 5%~6.5%。

70 年代以来出现键控低频矩形波激磁方式，逐渐替代早期应用的工频交流激磁方式，仪表性能有了很大提高，得到更为广泛的应用。

## 2. 原理与机构

EMF 的基本原理是法拉第电磁感应定律，即导体在磁场中切割磁力线运动时在其两端产生感应电动势。如图 1 所示，导电性液体在垂直于磁场的非磁性测量管内流动，与流动方向垂直的方向上产生与流量成比例的感应电势，电动势的方向按“弗来明右手规则”，其值如下式

$$E = kBD\bar{V} \quad (1)$$

式中  $E$ ——感应电动势，即流量信号，V；

$k$ ——系数；

$B$ ——磁感应强度，T；

$D$ ——测量管内径，m；

$\bar{V}$  —— 平均流速，m/s。

设液体的体积流量为

$$q_V (\text{m}^3/\text{s}), q_V = \pi D^2 \bar{V} / 4$$

则

$$E = (4kB/\pi D)q_V = Kq_V \quad (2)$$

式中  $K$  为仪表常数， $K = 4KB/\pi D$ 。

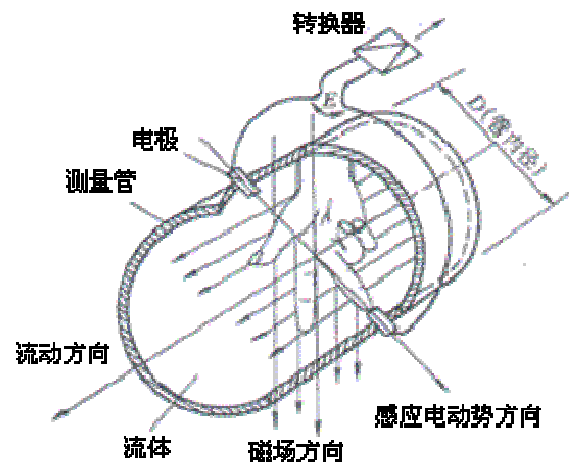


图1 测量原理

EMF 由流量传感器和转换器两大部分组成。传感器典型结构示意图如图 2，测量管上下装有激磁线圈，通激磁电流后产生磁场穿过测量管，一对电极装在测量管内壁与液体相接触，引出感应电势，送到转换器。激磁电流则由转换器提供。

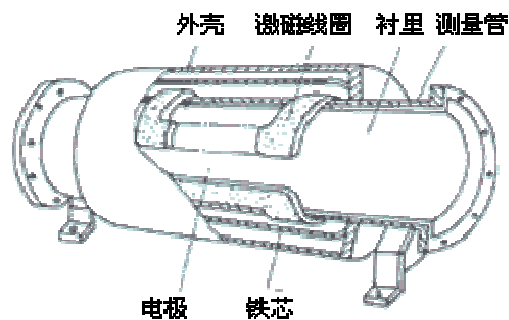


图2 传感器结构

## 3. 优点



EMF 的测量通道是一段无阻流检测件的光滑直管，因不易阻塞适用于测量含有固体颗粒或纤维的液固二相流体，如纸浆、煤水浆、矿浆、泥浆和污水等。

EMF 不产生因检测流量所形成的压力损失，仪表的阻力仅是同一长度管道的沿程阻力，节能效果显著，对于要求低阻力损失的大管径供水管道最为适合。

EMF 所测得的体积流量，实际上不受流体密度、粘度、温度、压力和电导率（只要在某阈值以上）变化明显的影响。

与其他大部分流量仪表相比，前置直管段要求较低。

EMF 测量范围度大，通常为 20: 1~50: 1，可选流量范围宽。满度值液体流速可在 0.5~10m/s 内选定。有些型号仪表可在现场根据需要扩大和缩小流量（例如设有 4 位数电位器设定仪表常数）不必取下作离线实流标定。

EMF 的口径范围比其他品种流量仪表宽，从几毫米到 3m。可测正反双向流量，也可测脉动流量，只要脉动频率低于激磁频率很多。仪表输出本质上是线性的。

易于选择与流体接触件的材料品种，可应用于腐蚀性流体。

#### 4、缺点

EMF 不能测量电导率很低的液体，如石油制品和有机溶剂等。不能测量气体、蒸汽和含有较多较大气泡的液体。

通用型 EMF 由于衬里材料和电气绝缘材料限制，不能用于较高温度的液体；有些型号仪表用于过低于室温的液体，因测量管外凝露（或霜）而破坏绝缘。

#### 5、分类

市场上通用型产品和特殊型仪表可以从不同角度分类。

如按激磁电流方式划分，有直流激磁、交流（工频或其他频率）激磁、低频矩形波激磁和双频矩形波激磁。几种激磁方式的波形见图 3。

按输出信号连线和激磁（或电源）连线的制式分类，有四线制和二线制。

按转换器与传感器组装方式分类，有分离型和一体型。

按流量传感器与管道连接方法分类，有法兰连接、法兰夹装连接、卫生型连接和螺纹连接。

按流量传感器电极是否与被测液体接触分类，有接触型和非接触型。按流量传感器结构分类，有短管型和插入型。

按用途分类，有通用型、防爆型、卫生型、防浸水型和潜水型等。

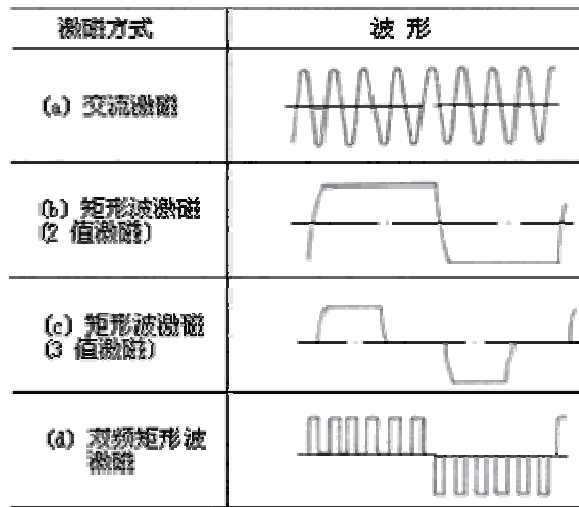


图3 各种激磁方式的波形

## 6. 选用考虑要点

### 6.1 应用概况

EMF 应用领域广泛。大口径仪表较多应用于给排水工程。中小口径常用于固液双相等难测流体或高要求场所，如测量造纸工业纸浆液和黑液、有色冶金业的矿浆、选煤厂的煤浆、化学工业的强腐蚀性液体以及钢铁工业高炉风口冷却水控制和监漏，长距离管道煤的水力输送的流量测量和控制。小口径、微小口径常用于医药工业、食品工业、生物工程等有卫生要求的场所。

### 6.2 精度等级和功能

市场上通用型 EMF 的性能有较大差别，有些精度高、功能多，有些精度低、功能简单。精度高的仪表基本误差为  $(\pm 0.5\% \sim \pm 1\%) R$ ，精度低的仪表则为  $(\pm 1.5\% \sim \pm 2.5\%) FS$ ，两者价格相差 1~2 倍。因此测量精度要求不很高的场所（例如非贸易核算仪以控制为目的，只要求高可靠性和优良重复性的场所）选用高精度仪表在经济上是不合算的。

有些型号仪表声称有更高的精确度，基本误差仅  $(\pm 0.2\% \sim \pm 0.3\%) R$ ，但有严格的安装要求和参比条件，例如环境温度  $20 \sim 22^\circ C$ ，前后置直管段长度要求分别大于  $10D, 3D$ （通常为  $5D, 2D$ ）甚至提出流量传感器要与前后置直管组成一体在流量标准装置上作实流校准，以减少夹装不善的影响。因此在多种型号选择比较时不要单纯只看高指标，要详细阅读制造厂样本或说明书做综合分析。

市场上 EMF 的功能差别也很大，简单的就只是测量单向流量，只输出模拟信号带动后位仪表；多功能仪表有测双向流、量程切换、上下限流量报警、空管和电源切断报警、小信号切除、流量显示和总量计算、自动核对和故障自诊断、与上位机通信和运动组态等。有些型号仪表的串行数字通信功能可选多种通信接口和专用芯片（ASIC），以连接 HART 协议系统、PROFIBUS、Modbus、CONFIG、FF 现场总线等。

### 6.3 流速、满度流量、范围度和口径



选定仪表口径不一定与管径相同，应视流量而定。流程工业输送水等粘度不同的液体，管道流速一般是经济流速 1.5~3m/s。EMF 用在这样的管道上，传感器口径与管径相同即可。

EMF 满度流量时液体流速可在 1~10m/s 范围内选用，范围是比较宽的。上限流速在原理上是不受限制的，然而通常建议不超过 5m/s，除非衬里材料能承受液流冲刷，实际应用很少超过 7m/s，超过 10m/s 则更为罕见。满度流量的流速下限一般为 1m/s，有些型号仪表则为 0.5m/s。有些新建工程运行初期流量偏低或在流速偏低的管系，从测量精度角度考虑，仪表口径应改用小于管径，以异径管连接之。

用于有易粘附、沉积、结垢等物质的流体，选用流速不低于 2m/s，最好提高到 3~4m/s 或以上，起到自清扫、防止粘附沉积等作用。用于矿浆等磨耗性强的流体，常用流速应低于 2~3m/s，以降低对衬里和电极的磨损。

在测量接近阈值的低电导液体，尽可能选定较低流速（小于 0.5~1m/s），因流速提高流动噪声会增加，而出现输出晃动现象。

EMF 的范围度是比较大的，通常不低于 20，带有量程自动切换功能的仪表，可超过 50~100。

国内可以提供的定型产品的口径从 10mm 到 3000mm，虽然实际应用还是以中小口径居多，但与大部分其他原理流量仪表（如容积式、涡轮式、涡街式或科里奥利质量式等）相比，大口径仪表占有较大比重。某企业近万台仪表中，50mm 以下小口径、65~250mm 中口径、300~900mm 大口径、1000mm 以上超大口径分别占 37%、45%、15% 和 3%。

#### 6.4 液体电导率

使用 EMF 的前提是被测液体必须是导电的，不能低于阈值（即下限值）。电导率低于阈值会产生测量误差直至不能使用，超过阈值即使变化也可以测量，示值误差变化不大，通用型 EMF 的阈值在  $10^{-4}$ ~( $5 \times 10^{-6}$ ) S/cm 之间，视型号而异。使用时还取决于传感器和转换器间流量信号线长度及其分布电容，制造厂使用说明书中通常规定电导率相对应的信号线长度。非接触电容耦合大面积电极的仪表则可测电导率低至  $5 \times 10^{-8}$  S/cm 的液体。

工业用水及其水溶液的电导率大于  $10^{-4}$  S/cm，酸、碱、盐液的电导率在  $10^{-4}$ ~ $10^{-1}$  S/cm 之间，使用不存在问题，低度蒸馏水为  $10^{-5}$  S/cm 也不存在问题。石油制品和有机溶剂电导率过低就不能使用。表 1 列出若干液体的电导率。从资料上查到有些纯液或水溶液电导率较低，认为不能使用，然而实际工作中会遇到因含有杂质而能使用的实例，这类杂质对增加电导率有利。对于水溶液，资料中的电导率是用纯水配比在实验室测得的，实际使用的水溶液可能用工业用水配比，电导率将比查得的要高，也有利于流量测量。

表 1 若干液体在 20℃ 时的电导率

液体名称 电导率	液体名称 电导率	液体名称 电导率
石油 $(3 \sim 5) \times 10^{-13}$	液氨 $1.3 \times 10^{-7}$	硫酸 (5%~99.4%) $(2.1 \times 10^{-1}) \sim (8.5 \times 10^{-3})$
丙酮 $(2 \sim 6) \times 10^{-8}$	甲醇 $(4.4 \sim 7.2) \times 10^{-7}$	氨水 (4%~30%) $(1 \times 10^{-3}) \sim (2 \times 10^{-4})$
纯水，高度蒸馏水 $4 \times 10^{-8}$	饮用水 $\approx 10^{-4}$	氢氧化钠 (4%~50%) $(1.6 \times 10^{-1}) \sim (8 \times 10^{-2})$
苯 $7.6 \times 10^{-8}$	海水 $\approx 4 \times 10^{-2}$	食盐水 (2.5%) $2 \times 10^{-1}$

根据使用经验，实际应用的液体电导率最好要比仪表制造厂规定的阈值至少大一个数量级。因为制造厂仪表规范规定的下限值是在各种使用条件较好状态下可测量的最低值。是受到一些使用条件限制，如电导率均匀性、连接信号线、外界噪声等，否则会出现输出晃动现象等。我们就多次遇到测量低度蒸馏水或去离子水，其电导率接近阈值  $5 \times 10^{-6}$  S/cm，使用时出现输出晃动。

#### 6.5 液体中含有混入物

混入成泡状流的微小气泡仍可正常工作，但测得的是含气泡体积的混合体积流量；如气体含量增加到形成弹（块）状流，因电极可能被气体盖住使电路瞬时断开，出现输出晃动甚至不能正常工作。



含有非铁磁性颗粒或纤维的固液双相流体同样可测得二相的体积流量。固体含量较高的流体，如钻井泥浆、钻探固井水泥浆、纸浆等实际上已属非牛顿流体。由于固体在载体液中一起流动，两者之间有滑动，速度上有差别，单相液体校验的仪表用于固液双相流体会产生附加误差。虽然还未见到 EMF 应用于固液双相流体中固形物影响的系统实验报告，但国外有报告称固形物含量有 14% 时误差在 3% 范围以内；我国黄河水利委员会水利科学研究所的实验报告称，测量高沙含量水的流量，含沙量体积比 17%~40%（沙中值粒径 0.35mm），仪表测量误差小于 3%。

在浆液内有较大颗粒擦过电极表面，在频率较低的矩形激磁的 EMF 中会产生尖峰状浆液噪声，使流量信号不稳，就要选用较高频率的仪表或有较强抑制浆液噪声能力的仪表，也可选用市电交流激磁的仪表或双频激磁的仪表。

含有铁磁性物质的流体对通常的 EMF，因测量管内磁导率受铁磁体的不同含量而变化，会产生测量误差。但在磁路中置有磁通检测线圈补偿的 EMF，可减小混入铁磁体的影响。上海光华仪表厂在交流激磁仪表的实验报告中称，水中含有液固重量比约 4:1，颗粒度≤0.15mm 铁精矿石的矿浆，以 80mm 口径仪表作清水和浆液对比流量试验，通常的仪表示值变化 7%~10%，装有磁通检测线圈的仪表，示值误差在±2%FS 以内。

对含有矿石颗粒的矿浆应用，应注意对传感器衬里的磨损程度，测量管内径扩大会产生附加误差。这种场合应选用耐磨性较好的陶瓷衬里或聚氨酯橡胶衬里，同时建议传感器安装在垂直管道上，使管道磨损均匀，消除水平安装下半局部磨损严重的缺点。也可以在传感器进口端加装喷嘴形护套，相对延长使用期。

### 6.6 附着和沉淀

测量易在管壁附着和沉淀物质的流体时，若附着的是比液体电导率高的导电物质，信号电势将被短路而不能工作，若是非导电层则首先应注意电极的污染，譬如选用不易附着尖形或半球形突出电极、可更换式电极、刮刀式清垢电极等。刮刀式电极可在传感器外定期手动刮出沉垢。国外产品曾有电极上装超声波换能器，以清除表面垢层，但现已少见。也有暂时断开测量电路，在电极筒短时间内流过低电压大电流，焚烧清除附着油脂类附着层。易产生附着的场所可提高流速以达到自清扫的目的，还可以采取较方便的易清洗的管道连接，可不拆卸清洗传感器。

非接触型电极 EMF 附着非导电膜层，仪表仍能工作，但若为高导电层则同样不能工作。

### 6.7 与流体接触零部件材料的选择

与流体接触的传感器零部件有衬里（或绝缘材料制成的测量管）、电极、接地环和密封垫片，其材料的耐腐蚀性、耐磨耗性和使用温度上限等影响仪表对流体的适应性。由于零部件少，形状简单，材料选择灵活，电磁流量传感器对流体的适应性强。

#### (1) 衬里材料（或直接与介质接触的测量管）

常用衬里材料有氟塑料、聚氨酯橡胶、氯丁橡胶和陶瓷等。近年有采用高纯氧化铝 99.7% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷制成衬里的，但只限中小口径传感器。

氯丁橡胶和玻璃钢用于非腐蚀性或弱腐蚀性液体，如工业用水、废污水及弱酸碱，价格最为低廉。氟塑料具有优良的耐化学腐蚀性，但耐磨性差，不能用于测量矿浆液。氟塑料中最早应用的是聚四氟乙烯，因与测量管间仅靠压贴，无粘结力，不能用于负压管道，后开发各种改性品种，实现注塑成形，与测量管有较强结合力，可用于负压，聚氨酯橡胶有极好的耐磨耗性，但耐酸碱的腐蚀性较差。它的耐磨性相当于天然橡胶的 10 倍，适用于煤浆、矿浆等；介质温度要低于 40~60/70℃。氧化铝陶瓷有极好的耐磨耗性和对强酸碱的耐腐蚀性，耐磨性约为聚氨酯橡胶的 10 倍，适用于具有腐蚀性的矿浆；但性脆，安装夹紧时疏忽易碎，可用于较高温（120~140/180℃）但要防止温度剧变，如通蒸汽灭菌，一般温度突变不能大于 100℃，升温 150℃ 要有 10min 时间。

通用型 EMF 几种材料的压力温度大体适用范围可参阅图 4。

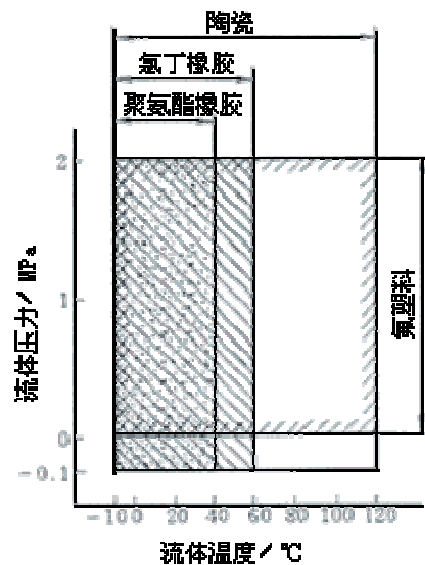


图4 流体温度压力范围



## (2) 电极和接地环材料

电极对测量介质的耐腐是选择材料首先考虑的因素，其次考虑是否会产生钝化等表面效应和所形成的噪声。

1) 选择耐腐蚀材料 EMF 电极的耐腐蚀性要求很高，常用金属材料有含钼耐酸钢 Icr18Ni12Mo2Ti，哈氏合金（耐蚀镍基合金）B、C、钛、钽、铂铱合金，几乎可覆盖全部化学液。此外还有适用于浆液等的低噪声电极，它们是导电橡胶电极、导电氟塑料电极和多孔性陶瓷电极，或包覆这些材料的金属电极。在原则上电极材料的选择应从使用者借鉴该介质在其他设备的应用实际和以往的经验来确定。有时后要做必要的实验，如现场取液体样品在实验室做待用材料的腐蚀性试验。最好的实验是现场挂片，这是最接近实际应用条件的腐蚀性试验，可以得出比较可靠能否适用的结论。

2) 避免电极表面效应 电极的耐腐蚀性是选择材料的重要因素，但有时候电极材料对被测介质有很好的耐腐蚀性，却不一定是适用的材料，还要避免产生电极表面效应。

电极表面效应分为表面化学反应、电化学和极化现象以及电极的触媒作用三个方面。

化学反应效应如电极表面与被测介质接触后，形成钝化膜或氧化层。他们对耐腐蚀性能可能起到积极保护作用，但也有可能增加表面接触电阻。例如钽与水接触就会被氧化，生成绝缘层。

对于避免或减轻电极表面效应的介质-----电极材料匹配，还没有像腐蚀性那样有充足的资料可查，只有一些有限经验，尚待在实践中积累。

接地环连接在塑料管道或衬绝缘衬里金属管道的流量传感器两端，他们的耐腐蚀要求比电极低，充分有一定腐蚀，定期更换。通常选用耐酸钢或哈氏合金。因体积大从经济上考虑较少采用钽铂等贵金属。如金属工艺管道直接与流体接触就不需要接地环。

## 7、安装使用注意事项

### 7.1 使用时应注意的一般事项

液体应具有测量所需的电导率，并要求电导率分布大体上均匀。因此流量传感器安装要避开容易产生电导率不均匀场所，例如其上游附近加入药液，加液点最好设于传感器下游。

使用时传感器测量管必须充满液体（非满管型例外）。有混合时，其分布应大体均匀。

液体应与地同电位，必须接地。如工艺管道用塑料等绝缘材料时，输送液体产生摩擦静电等原因，造成液体与地间有电位差。

### 7.2 流量传感器安装

#### (1) 安装场所

通常电磁流量传感器外壳防护等级为 IP65（GB 4208 规定的防尘防水级），对安装场所以下列要求。

1) 测量混合相流体时，选择不会引起相分离的场所；测量双组分液体时，避免装在混合尚未均匀的下游；测量化学反应管道时，要装在反应充分完成段的下游；

2) 尽可能避免测量管内变成负压；

3) 选择震动小的场所，特别对一体型仪表；

4) 避免附近有电机、大变压器等，以免引起电磁场干扰；

5) 易于实现传感器单独接地的场所；

6) 尽可能避开周围有高浓度腐蚀性气体；

7) 环境温度在 -25/-10~50/600℃ 范围内，一体形结构温度还受制于电子元器件，范围要窄些；

8) 环境相对湿度在 10%~90% 范围内；

9) 尽可能避免受阳光直射；



10) 避免雨水浸淋, 不会被水浸没。

如果防护等级是 IP67 (防尘防浸水级) 或 IP68 (防尘防潜水级), 则无需上述 8)、10) 两项要求。

(2) 直管段长度要求

为获得正常测量精确度, 电磁流量传感器上游也要有一定长度直管段, 但其长度与大部分其它流量仪表相比要求较低。90° 弯头、T 形管、同心异径管、全开闸阀后通常认为只要离电极中心线 (不是传感器进口端连接面) 5 倍直径 (5D) 长度的直管段, 不同开度的阀则需 10D; 下游直管段为 (2~3) D 或无要求; 但要防止蝶阀阀片伸入到传感器测量管内。各标准或检定规程所提出上下游直管段长度亦不一致, 汇集如表 2 所示, 要求比通常要求高。这是由于为保证达到当前 0.5 级精度仪表的要求。

扰流件名称		标准或检定规程号				
		ISO 6817	ISO 9104	JIS B7554	ZBN 12007	JJG 198
上游	弯管、形管、全开闸阀、渐扩管	10D 或制造厂规定	10D	5D	5D	10D
	渐缩管			可视为直管		
	其他各种阀			10D		
下游	各类	未提要求	5D	未提要求	2D	2D

如阀能开使用时, 应按阀截流方向和电极轴成 45° 角度安装, 则附加误差可大为减少。

(3) 安装位置和流动方向

传感器安装方向水平、垂直或倾斜均可, 不受限制。但测量固液两相流体最好垂直安装, 自下而上流动。这样可以避免水平安装时衬里下半部局部磨损严重, 低流速时固相沉淀等缺点。

水平安装时要使电极轴线平行于地平线, 不要处于垂直于地平线, 因为处于地步的电极易被沉积物覆盖, 顶部电极易被液体中偶存气泡擦过遮住电极表面, 使输出信号波动。图 5 所示管系中, c、d 为适宜位置; a、b、e 为不宜位置, b 处可能液体不充满, a、e 处易积聚气体, 且 e 处传感器后管段短也有可能不充满, 排放口最好如 f 形状所示。对于固液两相流 c 处亦是不宜位置。

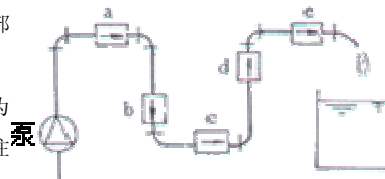


图5 传感器安装位置  
a, b, e-不良; c, d-良好

(4) 旁路管、便于清洗连接和预置入孔

为便于在工艺管道继续流动和传感器停止流动时检查和调整零点, 应装旁路管。但大管径管系因投资和位置空间限制, 往往不易办到。根据电极污染程度来校正测量值, 或确定一个不影响测量值的污染程度判断基准是困难的。除前文所述, 采用非接触电极或带刮刀清除装置电极的仪表, 可解决一些问题外, 有时还需要清除内壁附着物, 则可按图 6 所示, 不卸下传感器就地清除。

对于管径大于 1.5~1.6m 的管系在 EMF 附近管道上, 预置入孔, 以便管系停止运行时清洗传感器测量管内壁。

(5) 负压管系的安装

氟塑料衬里传感器须谨慎地应用于负压管系; 正压管系应防止产生负压, 例如液体温度高于室温的管系, 关闭传感器上下游截止阀停止运行后,

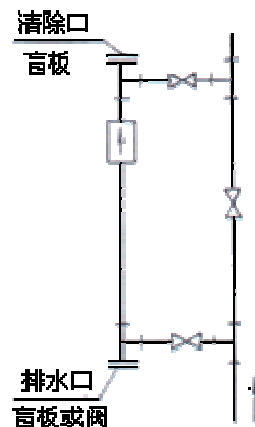


图6 便于清洗管道连接



流体冷却收缩会形成负压，应在传感器附近装负压防止阀，如图 7 所示。

有制造厂规定 PTFE 和 PFA 塑料衬里应用于负压管系的压力可在 200C、1000C、1300C 时使用的绝对压力必须分别大于 27、40、50KPa。



图7 负压防止连接

1、4-截止阀；2-传感器；  
3-负压防止阀

#### (6) 接地

传感器必须单独接地（接地电阻 100Ω 以下）。分离型原则上接地应在传感器一侧，转换器接地应在同一接地点。如传感器装在有阴极腐蚀保护管道上，除了传感器和接地环一起接地外，还要用较粗铜导线（16mm<sup>2</sup>）绕过传感器跨接管道两连接法兰上，使阴极保护电流于传感器之间隔离。

有时后杂散电流过大，如电解槽沿着电解液的泄漏电流影响 EMF 正常测量，则可采取流量传感器与其连接的工艺之间电气隔离的办法。同样有阴极保护的管线上，阴极保护电流影响 EMF 测量时，也可以采取本方法。

### 7.3 转换器安装和连接电缆

一体型 EMF 无单独安装转换器；分离型转换器安装在传感器附近或仪表室，场所选择余地较大，环境条件比传感器好些，其防护等级是 IP65 或 IP64（防尘防溅级）。安装场所的要求与 7.2 节之（1）中 3）、4）、6）、8）、9）、10）各条相同，环境温度受电子件限制，使用温度范围比 7）规定所列要窄些。

转换器和传感器间距离受制于被测介质电导率和信号电缆型号，即电缆的分布电容、导线截面和屏蔽层数等。要用制造厂随仪表所附（或规定型号）的信号电缆。电导率较低液体和传输距离较长时，也有规定用三层屏蔽电缆。一般仪表“使用说明书”对不同电导率液体给出相应传输距离范围。单层屏蔽电缆用于工业用水或酸碱液通常可传送距离 100m。

为了避免干扰信号，信号电缆必须单独穿在接地保护钢管内，不能把信号电缆和电源线安装在同一钢管内。