

涡街流量传感原理与特性

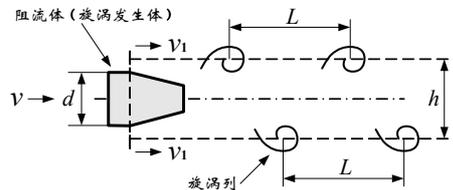
宁波水表股份有限公司（浙江省水表研究院） 姚灵

1 概述

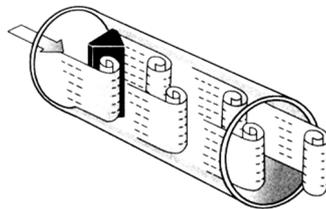
涡街（Vortex）流量传感技术也是流体振荡型流量传感技术的一种。它是依据卡曼涡街原理，用垂直插入流体中的非流线型阻流体产生旋涡分离现象，并应用各种检测方法和技術进行旋涡频率测量，进而实现管道中流量或流速测量的一种较新的流量传感技术。虽然该技术已经发展了数十年历史，但它尚属发展中的技术，其理论和实践经验均有待于深化和积累，各种检测技术的应用也有待于不断完善。

2 传感器工作原理

当流体绕过非流线型柱体时，由于边界层的不稳定性，很容易引起流体分离而形成旋涡，并使分离后的旋涡具有一定的规律性。当雷诺数较高时，旋涡在柱体的一侧形成并分离时，另一侧就不可能形成旋涡，只有当一侧旋涡离开柱体一定距离后，另一侧才有可能形成旋涡。于是，随着流体的连续运动，在柱体两侧形成交替的、有规律的旋涡列，这就是所谓的“卡曼（Karman）涡街”现象。卡曼涡街的平面和立体形状特征见图1的（a）和（b）。



(a) 卡曼涡街平面示意图



(b) 封闭圆管道中的卡曼涡街示意图

图1 卡曼涡街

对于卡曼涡街来说，发生体分离出的旋涡频率 f 与流速 v_1 成正比，而与发生体的特征宽度 d 成反比，见下式与图1（a）。

$$f = Sr \frac{v_1}{d} \quad (1)$$

当两列旋涡间的距离 h 与同列旋涡中两个旋涡的间距 L 之比满足 $h/L = 0.2806$ 时，这样的旋涡列才是稳定的。虽然圆管中的流速分布是三维的，但经过阻流体（发生体）的作用后，就可获得二维的卡曼涡街，见图 1（b）。

经大量实验表明，当阻流体的形状和尺寸确定后，在一定的雷诺数范围内， Sr 可视为常数。这样式（1）中的旋涡频率 f 与流速 v_1 之间就成为线性关系。图 2 是涡街流量传感器测量时 Sr 与 Re 之间的特性关系图。

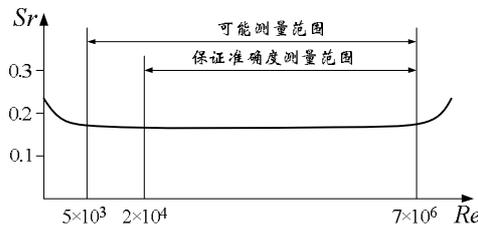


图 2 Sr 与 Re 特性关系图

根据流体连续性原理

$$v_1 = \frac{v}{m} \quad (2)$$

式中 v —测量圆管道内的平均流速，m/s； m —阻流体两侧面积之和与测量圆管道截面积之比，见下式

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\frac{d}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} + \arcsin\left(\frac{d}{D}\right) \right] \quad (3)$$

式中 D —测量圆管道的内经，m； d —圆柱形旋涡发生体的直径，m。

将式（2）代入式（1）得

$$f = Sr \frac{v}{md} \quad (4)$$

而测量圆管道内的体积流量 q_v 为

$$q_v = \left(\frac{\pi D^2}{4Sr} md \right) \cdot f \quad (5)$$

3 涡街流量传感器的旋涡发生体

旋涡发生体（阻流体）是涡街流量传感器的重要部件，通常由不锈钢材料所组成。传感器的流量测量特性和阻力特性与它的几何参数和排列方式有关。为了产生强力和稳定的涡街

并在较宽雷诺数范围内有稳定的旋涡分离点，必须保持旋涡发生体的特征宽度 d 不变，以确保斯特劳哈尔数 St 为常数。总而言之，旋涡发生体应满足如下基本要求：

- 1) 形状和结构尽量简单，便于加工和安装；
- 2) 上下截面形状应相等，左右应对称；
- 3) 有钝截面形状，使旋涡分离点稳定；
- 4) 柱状体要有一定的陡度，便于产生强烈的涡街；
- 5) 材质应符合被测流体的要求；
- 6) 旋涡振荡频率应避开传感器的固有频率。

旋涡发生体几何参数目前还没有比较成熟的计算方法，大多通过实验来确定。图 8-3 是常用旋涡发生体形状的截面图。

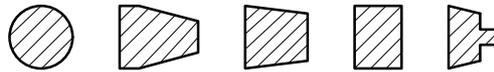


图 3 常用涡街旋涡发生体形状截面图

4 涡街流量传感器的信号检测

涡街流量传感器的信号检测形式主要有：力敏式、电磁式、热敏式、超声式、电容式及振动体式等。下面对力敏式中的应力检测方法和恒磁励磁电磁检测方法作出简要介绍。

4.1 应力传感信号检测方法

应力式信号检测方法的检测元件其结构及安装方式有多种，其中有代表性的一种见图 4。但无论采用哪种方式都是把检测元件感受到的力以应力形式作用到敏感元件上，通过敏感元件将应力转变成电信号进行输出。

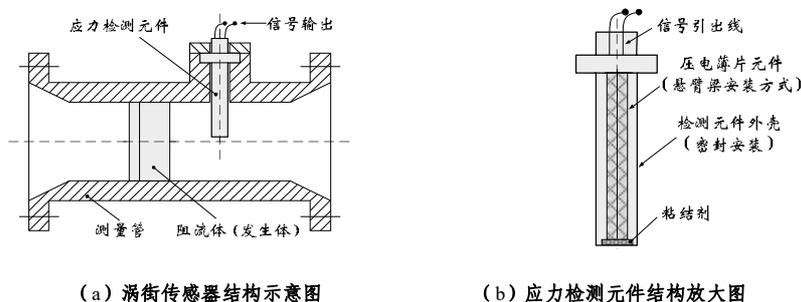
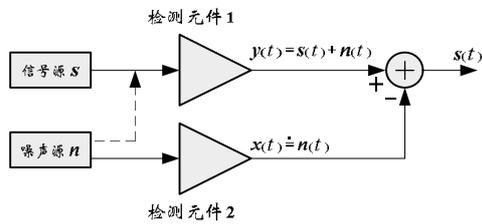


图 4 应力式检测元件的结构及安装示意图

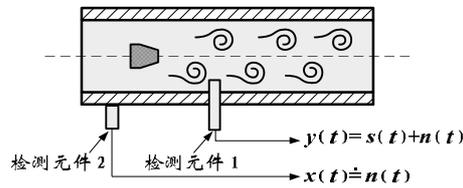
压电元件具有频率响应快、检测灵敏度高、结构形式简单等特点，因此非常适合用作应力检测中的敏感元件。图 4 所示的结构形式采用了悬臂梁安装结构和长条形薄片压电敏感元

件，使敏感元件工作于横向振动模式（横向压电常数为 d_{31} ）。当由旋涡产生的应力作用于压电检测元件时，压电敏感元件的下部就会发生形变，其两电极就会产生与旋涡频率 f 相同的交变电荷信号。该信号经电荷 - 电压转换、以及放大、滤波、整形等处理，可以由电子水表或流量计自带的嵌入式计算机做作出相应的数据处理和运算。

应力式信号检测方法对被测管道的振动非常敏感，这主要是悬臂梁安装方式的压电元件对振动敏感造成的，此时可采用差动检测方式来消除振动干扰的影响。在图 5 中，测量管外壳上安装与流量信号检测元件完全相同的另一应力检测元件，用以单独测量管道振动信号，通过差动电荷放大器对两个检测元件测量到的振动信号作相减处理，可以大幅度地抵消由管道振动产生的干扰信号，提高流量测量的信噪比。



(a) 共模振动干扰信号处理原理图



(b) 双组检测元件安装示意图

图 5 管道振动干扰信号的抵消

如果能在测量管内找到旋涡列振荡相位相反的两个位置分别安装信号检测元件，不但可以消除管道振动的共模干扰，还能使被测差模信号输出幅值增加至 2 倍，进而可进一步提高流量测量的信噪比，见图 6。

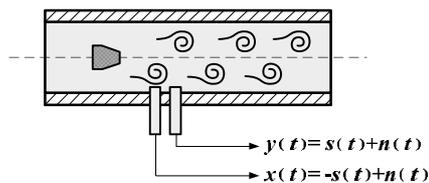


图 6 消除管道振动干扰的差动信号检测方法

4.2 恒磁励磁电磁检测方式

恒磁励磁电磁检测方式主要是按照插入式电磁流量计工作原理和射流振荡频率电磁检测技术进行工作的，它的安装结构和工作原理见图 7。

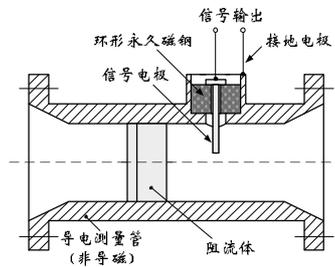


图 7 恒磁励磁电磁检测方式的结构与原理

当涡街旋涡切割磁力线时，测量管内的金属电极就会产生感应电动势，电动势幅值的周期变化反映了被测流体旋涡的振荡频率，因此只要获知电动势的变化频率就能测得流体的流速或流量、乃至累积流量值。

5 涡街流量传感器特性

5.1 主要优点

涡街流量传感器的主要优点是具有流体振荡型流量传感器的共同特点，即频率量输出特性和信号处理的便利性。同时它还具有以下这些有利特性：

- 1) 传感器的压力损失值较小；
- 2) 安装方式灵活，可以水平、垂直、倾斜安装；
- 3) 结构形式多样，可以是满管式，也可做成插入式；
- 4) 可根据不同被测介质和测量条件，可供选择的检测方法较多；
- 5) 输出信号是与流量成正比的频率（脉冲）信号，无零点漂移；
- 6) 在一定的雷诺数范围内，输出信号频率不受被测流体物性和组分变化影响，仪表系数仅与旋涡发生体形状和尺寸有关。

5.2 不利因素

1) 涡街的稳定性易受流场畸变和旋转流影响。传感器安装时要根据仪表阻流件的不同形式配备足够的上、下游直管段，或者安装流动调整器，消除流场的影响。

2) 不适合在低雷诺数流量测量。大多数涡街流量传感器在雷诺数大于 2×10^4 时，流量特性才进入线性区域。故在粘度高、流速低、口径小的场合应用会受到一定的限制。

3) 当采用力敏（如应力、应变）式信号检测原理时，传感器极易受到外部机械振动影

响。特别是管道振动频率与涡街旋涡频率非常接近且振动方向与检测元件受力方向一致时，对测量影响就特别严重。

4) 涡街流量传感器的仪表系数 K 值较低，且随传感器口径的增大而快速下降，仪表分辨力也急剧降低。因此满管式涡街流量传感器不适合制作成大口径电子水表或流量计，通常测量口径应小于 DN300。

作者联系方式：宁波市 江北区 洪兴路 355 号，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

2016 年 2 月 10 日