

文章编号: 2095-2163(2020)03-0076-07

中图分类号: TH814

文献标志码: A

液体流量测量方法研究

朱孟超, 高秀敏, 李 阳, 常 敏

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 随着工农业的发展,水资源利用率和供需之间的矛盾愈发激烈,注重节约能源,提高经济效益和产品质量显得尤为重要。在工业生产过程中,为了有效监测生产过程,通常需要对生产过程中的各种液体介质进行测量,用以管控生产;在农业生产中,对灌溉用水等的计量有助于达到水资源利用最大化,所以流量计量在工业生产和日常生活中起着越来越重要的作用。目前,流量测量方式多种多样,而其中基于速度式的流量计应用最为广泛。本文通过大量文献调研,介绍了几种常见的速度式液体流量计的原理和发展历程,并探讨分析了其各自的优缺点及适用场景等,为从事流量测量研究工作提供了一定基础指导。

关键词: 多普勒频移; 卡门涡街; 漩涡发生体; 精确度; 锁相环技术; 电磁感应

Research on liquid flow measurement method

ZHU Mengchao, GAO Xiumin, LI Yang, CHANG Min

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】 As the industry and agriculture develop, the contradiction between water resources utilization rate and supply and demand is becoming more intense. It is particularly important to pay attention to saving energy and improving economic benefits and product quality. In the process of industrial production, in order to monitor the production process effectively, it is usually necessary to measure all kinds of liquid media in the production process so as to control the production. In agricultural production, the measurement of irrigation water is helpful to maximize the utilization of water resources, so the flow measurement plays a more important role in industrial production and daily life. At present, there are many ways of flow measurement, among which the flowmeter based on velocity is the most widely used. Through reading and investigating a large number of literatures, the principle and development process of several common velocity liquid flowmeters are introduced, and their respective advantages and disadvantages and applicable scenarios are analyzed in this paper, which provide some basic guidance for the research of flow measurement.

【Key words】 Doppler Shift; Karman vortex street; vortex Shedder; accuracy; phase locked loop; electromagnetic induction

0 引言

通常,用单位时间内流过某一截面的流动介质的体积或者质量来表示工业中的流量,因此,即可分别用体积流量和质量流量来表示,但大多数情况以体积为主。只是因为受限于科技发展水平,直到20世纪50年代,还只有皮托管、浮子流量计、孔板等极少数流量计在工业上得到应用^[1-2]。近年来,随着管道化、工业化的普及和电子技术的发展,时下研发面世的流量计已达上百种。针对以速度式液体为主的流量测量技术,本文拟探讨主流超声波流量计、电磁流量计、涡街流量计和涡轮流量计的测量原理,发展研究现状以及优缺点等,本文可为后续流量计的选型、优化等工作提供一定的条件基础。对此可做研究论述如下。

1 超声波流量计

超声波流量计是过程监控、测量和控制仪器的研发领域中发展最快的技术之一,根据检测方式可以分为多普勒法,时差法等不同的流量计。超声波流量计受到流体声学特性的影响,并且温度、密度、粘度以及悬浮颗粒也会影响其精确度。对此可得阐释分述如上。

(1) 基于时差法的超声波流量计。其主要原理是在管道两侧夹带2个超声波换能器,相对管道轴线以安装角 θ 安装,组成2个通道。一个通道顺着流动方向发射超声波,一个通道逆着流动方向发射超声波,换能器之间的距离为 L ,流动方向如图1所示^[3]。

作者简介: 朱孟超(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:光电信息与计算机工程研究。

通讯作者: 朱孟超 Email: mengchaoself@foxmail.com

收稿日期: 2019-11-13

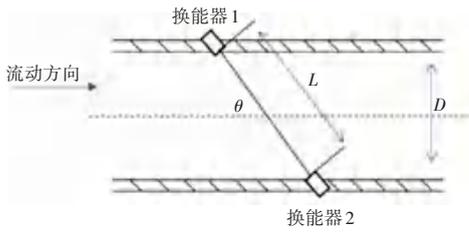


图1 时差法超声波流量计原理

Fig. 1 Principle of travel time ultrasonic flowmeter

流体在管道中流动时,超声波换能器发射声波的速度是声速 C_0 和流体在传播方向分量 $v \cos \theta$ 相叠加得到的,因此超声波在顺、逆流方向的传播所用时间是:

$$t_1 = \frac{L}{C_0 + v \cos \theta}, \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{L}{C_0 - v \cos \theta}, \quad (2)$$

由此,可以得出时间差为:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Dv \cos \theta}{\sin \theta (C_0^2 - v^2 \cos^2 \theta)}, \quad (3)$$

考虑到流体的流速相对声速而言很小,即 v^2 远远小于 C_0^2 ,因此可得:

$$v = \frac{C_0^2 \sin \theta}{2D \cos \theta} \Delta t, \quad (4)$$

从而可以测出流体体积为:

$$Q = Av = \frac{\pi D^2}{4} \frac{C_0^2 \sin \theta}{2D \cos \theta} \Delta t, \quad (5)$$

由前文的推算可以得知,已知管径 D ,换能器安装角 θ ,声速一定时就可以根据时间差 t 求得流体的流量体积 Q 。

如何准确地计算出声波的传输时间是保证测量精确度的一个重要条件,尤其是在短声道的环境下,分析可知液体中的声音传播速度非常快,可以达到纳秒级,所以 Ma 等人^[4]提出了一种改进时间差的算法,而且也同步研究了安装位置角度等因素对结果精确度的影响。

(2)基于多普勒法的超声波流量计,如图2所示。根据多普勒效应,超声波换能器发射出的超声波在接触到移动的杂质颗粒时会产生频率的改变,此时根据反射回来的超声波频率变化可以计算出杂质颗粒的移动速度,所以这种方式适用于杂质丰富的污水管道的流量测量,便于超声波的反射。计算公式如下:

$$v = \frac{f_0 \times c}{2 \times f_c \times \cos \alpha}. \quad (6)$$

其中, v 是流体流速; f_0 是发射和接收超声波频率的频率差; f_c 是超声波换能器发射的声波频率; c 是光速; α 为换能器安装角度,从而可以计算出流体的流速和流量。

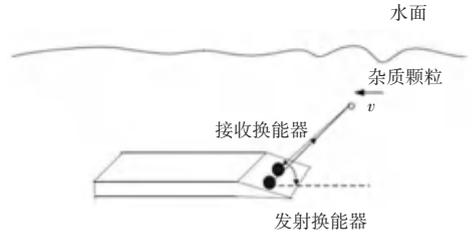


图2 多普勒超声波流量计

Fig. 2 Doppler ultrasonic flowmeter

利用声波测量流体流速的研发可追溯至上世纪50年代^[5],美国国家标准总局在利用“鸣环法”为海军测声速,后来基于这种方法研制出了频差法、时差法的超声波流量计^[5-6]。Erdrich 等人于1858年研发出了一款折射式超声波换能器,消除了管道反射引起的超声波信号相位失真,为非侵入式测流量打下了坚实基础。此后,又随即推出了一种基于锁相环路技术的超声波流量计。接下来, Jackson 等人^[7]又提出了多声道超声波流量测量技术,通过多声道测量提高了精确度。Caiogirou 等人^[8]通过对管道流体流场进行了分析研究,为提高流量计的测量精度提供了理论依据。Eren 等人^[9]设计了一种通过超声波传播速度能够分析出所测流体成分的超声波流量计。

总的来说,基于时差法的超声波流量计具有运行稳定,测量准确可靠等优点,适用于非接触式管道测量,特别是在大口径流量测量方面有较为突出的优势,但同时也存在诸多影响因素,比如如何对信号进行有效采集和处理,而且当压力和介质变化时换能器的性能会受到影响等。

2 电磁流量计

电磁流量计源起自上世纪五十年代中期,并借助其便捷性、准确性等等优点迅速成为最为实用的工业检测仪表之一,在其后的发展中逐步加入了当时的一些热门高新技术,如微电子技术、计算机技术等等,尽管电磁流量计在不断更新,但其更新速度却仍无法满足信息科技时代的检测要求,从而吸引了各行业的大批学者加入到对电磁流量计的研究中,并已取得了可观的研究成果。

电磁流量计主要基于法拉第电磁感应原理。当导体在磁场中切割磁感线时,会产生感应电动势。对于电磁流量计来说,导电性的流体在非磁性管道

内流动时,使管道垂直于磁场,在磁场的垂直方向和流体流向上会产生与流量成比例的感应电动势,其大小为:

$$E = kBDv, \quad (7)$$

其中, E 为感应电动势; k 为常数; B 为磁感应强度; D 为电极之间的距离也就是管道内径的宽度; v 为流体流速。

若令流体体积流量为 Q , 则:

$$Q = \frac{1}{4}\pi D^2v, \quad (8)$$

故而可以求得:

$$E = \frac{4kB}{\pi D}Q, \quad (9)$$

分析可知,感应电动势 E 和流体流量 Q 成正比^[10]。

在电磁流量计的发展过程中^[11],里程碑式的事件可追溯至 20 世纪的中后期, Shercliff^[12] 通过对有限长的磁场电磁流量计进行数学建模分析,第一次提出了电磁流量计权函数这一概念。基于此,电磁流量计的结构和测量精确度有了极大的突破,并且开始在工业中广泛应用。

姜玉林等人^[13]利用较高的磁激励频率和非接触式噪声控制,设计出了一种可以检测更低流体电导率的电磁流量计,扩大了测量范围。赵宇洋等^[14]研发了一款可以检测不同粘度流体的流量计,经过多次实验研究证实了此种流量计测量效果良好。张昊等人^[15]通过对传统电磁流量计无法测量电导率低的流体这一问题进行了分析和研究,提出可以抑制共模电压、基准点变动和高阻抗转换等方式加以解决。为了进一步降低电导率要求, Turner^[16]用长条电极代替点电极,使得励磁线圈的长度在流体方向上得到延长。Crshing^[17]提出了一种新的信号处理方法来消除零点漂移的影响。Amare^[18]设计了一种新型电容式电磁流量计,包括静电防护电极和探测电极。其中,探测电极用来获取电势信号,静电防护电极负责减小容性耦合,通过锁相环技术有效抑制了干扰。经过不断的优化,现在电磁流量计对流体电导率的要求已经降低了两三个数量级。

电磁流量计的量程宽,已不会受到流体温度、粘度、压力等条件的影响,对流体没有任何的影响,在测量流速时所产生的感应电动势和流体平均流速同步变化,几乎不存在延迟,极大地方便了流量的测量。但由于测量原理限制,却仍需要被测流体具有一定的导电性,而且为了避免外界的电磁干扰,流体

需满管,管道内壁也不能有沉积物等。

3 涡街流量计

涡街流量计是一种广谱流量计,可用于大多数蒸汽、气体和液体流量的计量、测量和控制,且独具较好的通用性、高稳定性和高可靠性,无移动部件,结构简单,故障率低。同时,因其简单的流量测量系统和易于维护,涡街流量计相对经济。现已广泛用于重工业应用、电力设施和能源工业,更多地是应用在蒸汽工艺中。

涡街流量计原理如图 3 所示。在流体灌注的管道中放入具有一定形状的漩涡发生体,也就是组流体,当流体绕过发生体时,在发生体的两边会交替产生有规律的漩涡,称其为卡门漩涡。研究推导后可以求出流体的体积 Q 和漩涡的频率 f 满足以下关系,即:

$$Q = f / K, \quad (10)$$

其中, K 为流量计的流量系数,在一定雷诺数范围内 K 为常数,此时只要求得 f 就可以得出流体体积 Q ^[19]。

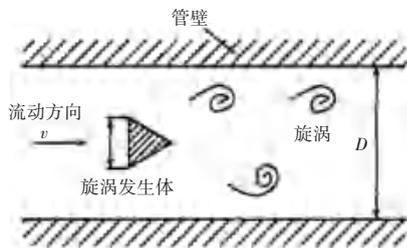


图 3 涡街流量计原理

Fig. 3 Principle of vortex flowmeter

最初, Strouhal^[20]在 1878 年首次发现了涡街现象, Kallnan 对涡街的稳定条件进行了大量研究,通过数学推导证明了圆柱形漩涡发生体产生稳定漩涡的条件。1993 年, Lavante 等人^[21]提出了一种半圆柱与凹背面半圆柱中间带狭缝的漩涡发生体,通过实验测得这种漩涡发生体具有良好稳定的漩涡发生效果,并且强度也更好。Popiel 等人^[22]通过可视材料观察到了漩涡生成的过程,发现了漩涡生成的位置是凹背面圆柱两边,如图 4 所示,凹面半圆柱的尺寸在相当程度上影响着漩涡的形成。

Lgarashl^[23]在 1978 年研究了带狭缝的漩涡发生体,此后于 1999 年对 3 种不同的漩涡发生体进行试验研究^[24],发现带狭缝的漩涡发生体比常规的梯形漩涡发生体压力损失系数小百分之五十,而且当狭缝宽度和漩涡发生体宽度比在 0.1 的时候性能更好。稍后又在 2000 年对 2 种不同的漩涡发生体进行试验研究^[25],一种是带狭缝漩涡发生体,另一种

是半圆形和三角形组合的带狭缝漩涡发生体。发现带狭缝双漩涡发生体与传统单漩涡发生体相比,减少了40%~60%的压力损失,并且在线性度、信号的灵敏度以及流量计的量程比上均占有显著优势。



图4 漩涡发生体

Fig. 4 Vortex generating body

Miau 等人^[26]设计了一种T形漩涡发生体,提高了涡街频率和流速的线性度,这种新型漩涡发生体的创新具有很高的地位,且通过实验证明延伸长度和发生体宽度比在1.56~2.0的时候具有很强的发生漩涡。Cheng 等人^[27-28]把前述3种漩涡发声体进行了低雷诺数的数值模拟,通过分析结构和压力分布发现漩涡形成与脱离的特点及各剪切层间的相互影响,得出柱面的宽度对漩涡参数影响的变化规律,即柱面的宽度越大,剪切层间相互作用就越小,涡街频率也会越高。Hans^[29]首次将超声波技术应用到涡街流量检测,大大减小漩涡发生体的体积,从而降低了计量仪器的压力损失。

杨军等人^[30]通过一种双钝体组合结构强化流体振动的方式,使得涡街流量计的计量初值变得更低,用差动式传感器来抑制共模信号干扰让其抗振性能进一步提高。而且对双钝体涡街流量计进行了大量研究,为此后流量计的发展优化提供了基础。后来,Peng 等人^[31]也对双三角形发生体间距进行了研究,得到了最优间距,从而提高了涡街信号信噪比,进一步降低了流量计初值。

Bentley 等人^[32-33]将双漩涡发生体和单漩涡发生体进行原理上的比较,研究了在管道的不同检测位置,不同形状的双漩涡发生体对测量斯特劳哈尔数的影响。王慧等人^[34]通过实验数值模拟了3种不同形状的漩涡发生体,得出带狭缝的圆柱漩涡发生体生成的漩涡最强,同时仪表的压力损失较低,而且具有更好的斯特劳哈尔数线性度。

涡街流量计的测量原理决定了其仪表系数不受测量流体的影响,测量元器件结构简单,使用寿命比较长,并且时下的涡街流量计压力损失也很小,所以测量的准确度高。但对污水等比较浑浊的介质测量效果较差,容易被浑浊物缠绕污染,而且对直管段的

要求比较高,耐温度效果不好,不能测量超过300度的流体。

4 涡轮流量计

涡轮流量计在设计上是通过测量其内部叶轮转动的角速度进而计算得出流量,其中利用了叶轮转动速度和流体流速成正比的关系。设计研发原理如图5所示。

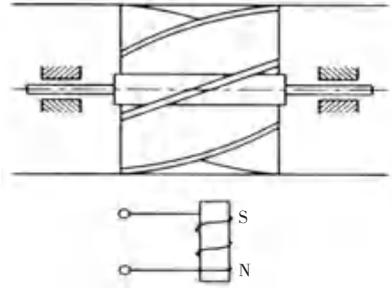


图5 涡轮流量计原理

Fig. 5 Principle of turbine flowmeter

将涡轮安装在管道的中心,同时两端有轴承支承,当有流体在管道流通时,流体会冲击涡轮的叶片,驱动涡轮克服外力旋转。在某个流量范围内,涡轮转动的角速度与流体流速成比例的关系,因此可以通过测量涡轮的角速度来得到流体流速,最终计算流过管道的流体流量。涡轮角速度的测量,是通过外壳的感应线圈来实现的,涡轮旋转时会切割外壳壳体内的磁钢产生磁力线,这会改变感应线圈的磁通量。感应线圈将磁通变换信号经过处理传到单片机芯片,可以计算出流量值^[35]。

在国内研究方面,1985年赵学端等人推出涡轮流量计中各种阻力矩的公式,此后刘正先等人^[37]将涡轮流量计各部件压力损伤进行了对比,改善结构使其更加稳定,郭亮等人^[38]通过分析实验数据得出4个影响其测量性能的最佳取值。王振等人^[39]推出了可准确反映切向式涡轮流量计流场特性的公式和分析方法,吴海燕等人^[40]首次提出影响传感器性能的新参数—速差因子,为涡轮流量计的设计发展提供了新解决方案。王菊芬等人^[41]通过仿真方法提出新型涡轮流量计,改进叶轮结构设计,可以极大减小前导流器对测量精度的影响,通过实验对比证明了此种模型的正确性。应启夏等人^[42]基于各种力矩理论推导,得出仪表常数、叶轮转速和旋转角度之间的关系式,并计算了旋流强度、前直管段长变化是仪表常数的变化。关松^[43]通过理论分析和数值模拟,设计了一种更适用于低流量测量领域的高精度涡轮流量计。杨振^[44]得出叶轮片处流体速度剖

面影响测量精度的研究结论,设计了一种新型径向非均匀多空式整流器,可有效提高传感器测量精度。刘民杰等人^[45-46]对3种叶片安装角度进行研究,得出55°安装角的仪表系数稳定且压损小,有着更高的精度。王建中等人^[47]通过动量模型进行模拟计算,最终发现叶前角在小于90°时效果更好。张晓钟等人^[48]结合传统涡轮流量计和光纤涡轮流量计的测量方法,研制出双光纤传感器,且证明了该种双光纤涡轮流量计的量程比远高于传统涡轮流量计。查美生等人^[49]推出了一款适用于核反应领域的涡轮流量计,测量更加准确。齐峰^[50]结合GPRS系统研制了一款电涡流式涡轮流量计,用户可远程观测流量等参数。赵延文等人^[51]提出应使用集流式流量计以减小误差。

国外在1960年以来已研发了2种涡轮流量计响应特性的理论模型,即机翼模型和动量理论模型。以Thompson-Grey^[52]为代表剖析了机翼模型理论并将其应用在叶轮的受力分析上,建立叶轮所受驱动力矩与各力矩的数学式,构建的数学模型现已广泛用于推导流量流入分布的各种力矩。在低流量段, Lee^[53]将流量段归入层流段中分析了叶轮叶片的结构,从管道内流体速度分布情况着手,基于动量定理对涡轮流量传感器进行数学建模,从而得到了其数学模型。此后的研究大部分均立足于这两种模型基础上。López-González等人^[54]应用物理学中的质量守恒定理、动量方程、角动量方程和能量方程建立气体式涡轮流量计的动态数学模型,并且可以用软件实现后续的计算。Pope等人^[55]将雷诺数、轴承阻力、阻力受粘度影响等因素加以考虑,拓展了Lee的理论模型,并用DN25mm口径传感器在多粘度条件下对其进行验证,结果表明此模型在整个实验雷诺数范围内的测量误差小于3.6%。XU^[56-57]提出通过计算叶轮片的气动特性来得到转子的驱动力矩,分析出了一种性能模型。Van Dellen^[58]分析了双弯头对传感器性能的影响,得出了安装前置整流器能够减小对其的影响。Philippe等人^[59]将2只长螺旋形状的叶片设计在叶轮上,同时验证了流体粘度对此种涡轮流量传感器的影响较低,为叶片结构的优化提供了新的思想。Fletcher等人^[60]为减少插入的部分影响流体分布,通过多普勒测速仪测量了管道的流体速度,从而得出仪表系数在不同流体旋转强度和前直管长度的变化情况,设计出了一类旋转发生器。Furness^[61]在机翼理论的基础上提出无轴承叶轮阻力矩模型,通过实验比较,此种流量计所产生

的线性度误差远小于带轴承的流量计。Sanchez等人^[62]研究得到电信号检出器能够影响到小口径涡轮传感器的性能,这也表明电信号将一个附加力矩施加到了叶轮上。Minemura等人^[63]验证了在气体和原油管道的计量中,涡轮流量计也是可行的,并通过数学计算得到了其关系式,此种方法的精确度很高。

涡轮流量计可以做成封闭结构,因此对环境的高压条件适应性较高。由于其准确度高,稳定向好等优点,普遍应用于有机液体、液化天然气、石油等测量对象。但仍要指出因为受流体粘度影响较大,致使其使用场景受到限制,而且其轴和轴承在使用时会有较为严重磨损,一般来说寿命都比较短。

5 结束语

流量测量在生产生活中发挥越来越重要的作用,随着科学技术的不断发展,计量方式也在发生着变化,各种不同测量原理的流量计都在各自适宜的场景中展现出优秀的量测性能及效果,其发展趋势也在朝着智能化、便携化方向发展,测量范围和精度在日趋提高。各种测量条件的限制则可利用电子软件得到部分解决,如通过减少或取消运动部件,采用高可靠性的传感器和电子元器件,遵循可靠性原理的设计使仪表可靠性大幅度提高,流量计的使用和发展必将在以后的生产生活占据突出地位。

参考文献

- [1] 梁国伟,蔡武昌. 流量计测量技术及仪表[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 蔡武昌.“流量测量方法与仪表选用”讲座—第十三讲浮子流量计的选用(一)[J]. 自动化仪表,1998,19(3):42.
- [3] 姜勇. 时差法超声波流量计设计与研发[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [4] MA Liling, LIU Jia, WANG Junzheng. Study of the accuracy of ultrasonic flowmeters for liquid[J]. AASRI Procedia,2012,3:14.
- [5] 赵敏涛. 科氏质量流量计的应用研究[D]. 西安:西安石油大学,2013.
- [6] 王贤妮. 超声波流量计的研究现状[J]. 工业计量,2015,25(6):38.
- [7] JACKSON G A, GIBSON J, HOLMES R. A three-path ultrasonic flowmeter for small diameter pipelines[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments,2000,22(8):645.
- [8] CALOGIROU A, BOEKHOVEN J, HENKES R. Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2001,12(3):219.
- [9] EREN H, LOWE A M, BASHARAN B. Processing ultrasonic signals to identify fluid contents in transit-time flowmeters[C]// IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2002,2:1491.
- [10] 蔡武昌. 流量计应用指南:电磁流量计[M]. 北京:中国石化出版社,2004.
- [11] 黄宝森,孔昭育,施希行. 电磁流量计[M]. 北京:原子能出版

- 社,1981.
- [12] SHERCLIFF J A. The theory of electromagnetic flow - measurement [M]. New York:Cambridge University Press, 1962.
- [13] 姜玉林,丁文斌. 改进的电磁流量计感生电势计算方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(12):1883.
- [14] 赵宇洋,张涛,LUCAS G,等. 基于区域权函数理论的多电极电磁流量计电极设计[J]. 传感器与微系统,2014,33(2):94.
- [15] 张昊. 低功耗电池供电的电磁流量计研究与设计[D]. 天津:天津大学,2015.
- [16] Turner R B. Electromagnetic flowmeter for low conductivity fluids [P]. United States;007117749B2,2004-06-18.
- [17] CUSHING V. Electromagnetic flowmeter for insulating liquids [C]//IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No. 00CH37276). Anchorage, AK, USA;IEEE,2002;103.
- [18] AMARE T. Design of an electromagnetic flowmeter for insulating liquids[J]. Measurement Science and Technology,1999,10(8):755.
- [19] 黄咏梅,张宏建,孙志强. 涡街流量计的研究[J]. 传感技术学报,2006,19(3):776.
- [20] 姜仲霞,姜川涛,刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京:中国石化出版社,2006.
- [21] LAVANTE E V, PERPÉET S, HANS V, et al. Optimizatin of acoustic signals in a vortex-shedding flowmeter using numerical simlation[J]. Int.J.Heat Fluid Flow,1999,20:402.
- [22] POPIEL C O, ROBINSON D I, TUNER J T. Vortex shedding from a circular oylinder with a lit and concave rear face [J]. Applied Scientific Research, 1993,51:209.
- [23] LGARASLI T. Flow characterisrics around a circular cylinder with a lit[J]. Bil.JSME,1978,154:1389.
- [24] LGARASLI T. Flow resistance and strouhal number of a rortex shedder in a circular pipe[J]. JSME International Journal Series B, 1999,42(4):586.
- [25] LGARASLI T. Perfomance of new type vortex shedder for vortex flowmeter,Flucome 2000[C]//Proceedings of the Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization. Sharbroake(Q),Canada,2000;13.
- [26] MIAU J J, YANG C C, CHOU J, et al. A T-shaped vortex shedder for a Vortex flow-meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation,1993,4(4):259.
- [27] CHENG M,LIU G R. Effects of after body shape on flow around prismatic cylinders[J].Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2000,84(2):181.
- [28] CHENG M,CHEW S T,LOU S C. A hybrid vortex method for flow over a bluff body [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,1997,24:253.
- [29] HANS V H. New aspects of arrangement and geometry of bluff bodies in ultrasonic vortex flow meters [C]// IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Anchorage, AK, USA;IEEE,2002;1661.
- [30] 杨军,傅新. 双钝体涡街流量计钝体组合的试验研究[J]. 工程设计学报,2003,10(1):35.
- [31] PENG Jiegang,FU Xin,CHEN Ying. Experimental investigations of strouhal number for flows past dual triangulate bluff bodies[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2008,19(6):350.
- [32] BENTLEY J P, BENSON R A, SHANKS A J. The development of dual bluff body vortex flowmeters[J]. Flow Measurement and Instrumentation,1996,7(2):85.
- [33] BENTLEY J P, MUDD J W. Vortex shedding mechanisms in single and dual bluff bodies [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2003,14(1):23.
- [34] 王慧,黄咏梅. 不同形状涡街发生体流场仿真及特性研究[J]. 中国计量学院学报,2013,24(3):237.
- [35] 范志华,刘枫. 涡轮流量计在流量测量中的应用[J]. 气象水文海洋仪器,2007(4):20.
- [36] 赵学端,应启夏,沈显明. 涡轮流量计数学模型与优化设计[J]. 上海机械学院学报,1985(2):1.
- [37] 刘正先,孟庆国,梁水超,等. 气体涡轮流量计的改进及实验测量[J]. 流体机械,2003(5):8.
- [38] 郭亮,高庆,满万海,等. 扩大双叶片气体涡轮流量计测量范围的试验研究[J]. 油气田地地面工程,1996,15(3):42.
- [39] 王振,张涛,徐英. 测量小流量的切向式涡轮流量传感器的仿真与实验[J]. 天津大学学报,2007,40(9):1048.
- [40] 吴海燕,秦永廉. 涡轮流量计转子内流动特性与仪表特性的关系[J]. 上海建材学院学报,1994,7(3):209.
- [41] 王菊芬,孟浩龙. 涡轮流量计内部流场数值模拟研究[J]. 计量技术,2009(6):75.
- [42] 应启夏,陈光富. 涡轮流量传感器在旋转来流中的特性研究[J]. 仪器仪表学报,2000,21(5):508.
- [43] 关松. 基于 ANSYS 的高精度涡轮流量计设计[J]. 化工自动化及仪表,2014,41(9):1012.
- [44] 杨振. 高精度液体涡轮流量传感器结构研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [45] 刘民杰,阎兵. 叶片螺旋角对气体涡轮流量计性能影响的分析[J]. 仪表技术与传感器,2015(11):18.
- [46] 刘民杰,阎兵. 气体涡轮流量计旋转部件内流场模拟与性能分析[J]. 机械工程师,2016(2):42.
- [47] 王建中,王京安,党志勇. 涡轮流量传感器叶前角对其性能的影响[C]//2014年全国流量计量学术交流会论文集.贵阳:中国计量科学研究院,2014:1.
- [48] 张晓钟,薛水发,奚晓春. 应用双光纤传感器的涡轮流量计结构、特性及试验研究[J]. 仪器仪表学报,1999(1):106.
- [49] 查美生,王秀清,聂孟晨. NRTM 型涡轮流量计的研制及对 5MW 低温供热堆堆芯冷却剂流量的测量[J]. 核科学与工程,1995(1):27.
- [50] 齐峰. 基于 GPRS 无线通讯的电涡流式涡轮流量计的研究[D]. 天津:天津大学,2008.
- [51] 赵延文,吴锡令,聂在平. 涡轮流量计的原理、应用及其测井曲线的解释[J]. 西南石油学院学报,1995,17(3):44.
- [52] THOMPSON R E, GREY J. Turbine flowmeter performance model [J]. Journal of Basic Engineering,1970(11):712.
- [53] LEE W F Z, KARLBY H. A study of viscosity effect and its compensation on turbine-type flowmeters [J]. ASME Journal of Basic Engineering,1960(9):717.
- [54] LÓPEZ - GONZÁLES L M, SALA J M, GONZÁLES - BUSTAMANTE J A, et al. Modeling and simulation of the dynamic performance of a natural - gas turbine flowmeter [J]. Applied Energy,2006,83(2):1222.
- [55] POPE J G, WRIGHT J D, JOHNSON A N, et al. Extended Lee model for the turbine meter & calibrations with surrogate fluids [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2012,24:71.
- [56] XU Y. Calculation of the flow around turbine flowmeter blades [J]. Flow Measurement and Instrumentation,1992,3(1):25.
- [57] XU Y. A model for the prediction of turbine flowmeter performance [J]. Flow Measurement and Instrumentation,1992,3(1):37.