

高压齿轮流量计 理论与实验研究

张 军 李宪华 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

国家自然科学基金项目资助 (编号: 51175005)

高压齿轮流量计 理论与实验研究

张 军 李宪华 著

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本书介绍了根据行星齿轮传动工作原理设计的一种行星齿轮流量计。以行星齿轮流量计为研究对象,采用理论分析、计算机仿真和实验验证相结合的研究方法,对其进行了系统的分析研究。推导了行星齿轮流量计的瞬时流量公式和流量脉动公式,确定了该类流量计的配齿方案,对其结构参数进行了优化设计;对行星齿轮流量计的动态模型进行建模、仿真与分析,使用有限元分析软件对各个齿轮的运动进行了仿真研究;完成了行星齿轮流量计的模式分析研究,并对其端面泄漏做了有关流场分析;设计并加工了一台实验样机,设计了流量计标定实验方案,做了相关实验,为进一步研究行星齿轮流量计提供了设计和实验依据。

本书可作为高等学校机电专业高年级本科生或研究生的教学用书,也可供相关技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压齿轮流量计理论与实验研究/张军,李宪华著. —北京:
冶金工业出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-5024-6950-4

I. ①高… II. ①张… ②李… III. ①行星齿轮—齿轮
流量计—研究 IV. ①TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 182747 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 廖 丹 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6950-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2015 年 8 月第 1 版, 2015 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.25 印张; 235 千字; 183 页

40.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



前 言

在液压系统的实验研究和故障诊断中,流量信号是需要测量和控制的重要参数之一,系统动态流量的测量,对评价伺服阀、比例阀等控制元件,以及控制液压系统的动态特性都有非常重要的意义。动态流量的测试特别是高压侧液体流量的测试,已成为液压测试中的重点和难点之一,目前国内尚无性能较好的流量计能满足动态测量的要求。本书提出的动态流量测量方法,具有现实意义。

本书针对液压系统高压侧流量难以测量的现状,在对各类流量计的原理和应用进行分析的基础上,对国内外专家、学者在液压系统流量测量方面的研究成果进行了比较,指出齿轮流量计是容积式流量计,具有测量精度高、不受环境条件限制的优点,但其流量脉动大的缺点,一直制约着它的广泛使用。作者在深入研究齿轮流量计原理的基础上,提出了一种基于行星传动理论的新型齿轮流量计——行星齿轮流量计。该类流量计具有排量大、流量脉动小的特点,可用于液压系统高压流量的测量。本书采取理论分析与计算机仿真及计算机有限元研究相结合,并通过实验加以验证的研究方法,对行星齿轮流量计进行了系统的研究。

本书共分7章,介绍了各类流量计的工作原理,提出了一种新型流量计——行星齿轮流量计,然后依次介绍了行星齿轮流量计的原理与分析、齿轮流量计瞬态流量特性研究、三型外啮合齿轮流量计、行星齿轮流量计动态特性研究、三型行星齿轮流量计的有限元研究、齿轮流量计的结构设计、齿轮流量计的实验研究等。

特别感谢中国矿业大学（北京）贾瑞清教授对本书的审阅和修改。本书的出版得到了国家自然科学基金委、安徽理工大学领导和安徽理工大学机械工程学院的大力支持，在此也表示真诚的感谢。

因作者水平有限，书中难免存在不足，热忱期望读者批评指正。

— 作 者
2015 年 4 月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 流量计的分类	1
1.2.1 差压式流量计	1
1.2.2 容积式流量计	2
1.2.3 超声流量计	3
1.2.4 漩涡流量计	4
1.2.5 质量流量计	6
1.2.6 热膜(丝)流量计	7
1.2.7 叶轮式流量计	8
1.2.8 其他形式的流量计	9
1.3 高压液压系统动态流量测试的国内外研究概况	9
1.3.1 国内研究进展	10
1.3.2 国外研究概况	12
1.4 本书研究内容和目的	13
1.4.1 研究背景	13
1.4.2 研究内容和意义	15
1.4.3 研究技术方案	17
2 行星齿轮流量计的原理与分析	18
2.1 行星齿轮流量计的原理	18
2.1.1 外啮合齿轮流量计	18
2.1.2 内啮合齿轮流量计	20
2.1.3 三型行星齿轮流量计	21
2.2 三型行星齿轮流量计特性分析	23
2.3 齿轮流量计动态测量原理	25
3 齿轮流量计瞬态流量特性研究	27
3.1 外啮合齿轮流量计	27

3.1.1 瞬态流量分析	27
3.1.2 流量脉动分析	28
3.1.3 流量特性仿真	30
3.2 内啮合齿轮流量计	31
3.2.1 瞬态流量分析	31
3.2.2 流量脉动分析	31
3.2.3 流量特性仿真	33
3.3 三型外啮合齿轮流量计	34
3.3.1 瞬态流量分析	34
3.3.2 流量脉动分析	36
3.3.3 流量特性仿真	37
3.3.4 中心齿轮齿数与流量的错位叠加关系	38
3.4 三型内啮合齿轮流量计	39
3.4.1 瞬态流量分析	39
3.4.2 流量脉动分析	41
3.4.3 流量特性仿真	41
3.4.4 内齿轮齿数与流量的错位叠加关系	42
3.5 三型行星齿轮流量计	42
3.5.1 齿轮齿数选择与流量的错位叠加关系	43
3.5.2 瞬态流量分析	46
3.5.3 流量脉动分析	48
3.5.4 流量特性仿真	48
4 行星齿轮流量计动态特性研究	50
4.1 齿轮动能及其影响	50
4.1.1 外啮合齿轮流量计	50
4.1.2 内啮合齿轮流量计	51
4.1.3 三型行星齿轮流量计	52
4.2 流体动能及其影响	53
4.2.1 外啮合齿轮流量计	53
4.2.2 内啮合齿轮流量计	54
4.2.3 三型行星齿轮流量计	55
4.3 行星齿轮流量计动态特性分析	56
4.3.1 传递函数的推导	56
4.3.2 动态特性分析	59

4.3.3 稳定性分析	62
4.3.4 快速性分析	63
5 三型行星齿轮流量计的有限元研究	65
5.1 三型行星齿轮流量计实体建模	65
5.1.1 中心齿轮渐开线齿廓的生成	65
5.1.2 齿轮实体的生成	65
5.1.3 其他零件的实体建模和装配	67
5.2 三型行星齿轮流量计的静力分析	68
5.2.1 研究专题的建立和材料定义	68
5.2.2 载荷与约束的添加	68
5.2.3 网格划分	69
5.2.4 计算结果分析	70
5.2.5 齿轮改用的 MC 尼龙材料	72
5.3 行星齿轮流量计运动仿真	75
5.3.1 外啮合齿轮运动分析	75
5.3.2 内啮合齿轮运动分析	82
5.3.3 行星齿轮运动分析	84
5.3.4 小结	85
5.4 行星齿轮流量计的模态分析	86
5.4.1 模态分析概述	86
5.4.2 三型行星齿轮流量计的模态分析理论	88
5.4.3 三型行星齿轮流量计的模态分析	90
5.4.4 小结	98
5.5 行星齿轮流量计泄漏的流场仿真	98
5.5.1 计算流体动力学	99
5.5.2 Cosmosflow 软件	101
5.5.3 流场仿真数学模型	101
5.6 基于 AMESim 液压系统旁路法数值模拟实验	108
5.6.1 旁路法测量装置	109
5.6.2 旁路法系统中主油路和支油路平均流量分配关系	110
5.6.3 旁路法原理中系统流量的动态流量测量	118
6 齿轮流量计的结构设计	124
6.1 齿轮流量计的结构和特点	124

6.2 两齿轮流量计的结构参数设计	124
6.2.1 两齿轮流量计的几何排量和流量	124
6.2.2 齿轮参数的选取	125
6.2.3 齿轮齿根弯曲疲劳强度校核和齿面接触疲劳强度校核	130
6.2.4 卸荷槽尺寸设计	132
6.2.5 滑动轴承和齿轮轴的选取	132
6.2.6 连接螺栓的设计计算	134
6.2.7 其他零部件参数的设计	134
6.3 多齿轮流量计的结构参数设计	135
6.3.1 多齿轮流量计的结构和特点	135
6.3.2 多齿轮流量计的几何排量和流量	137
6.3.3 齿轮参数的选取	138
6.3.4 齿轮齿根弯曲疲劳强度校核和齿面接触疲劳强度校核	139
6.3.5 卸荷槽、滑动轴承和齿轮轴的选取	141
6.3.6 连接螺栓的设计计算	141
6.3.7 其他零部件参数的设计	142
6.4 行星齿轮流量计多目标优化设计	142
6.4.1 MATLAB 多目标优化问题	143
6.4.2 行星齿轮流量计优化数学模型	145
6.4.3 运用 MATLAB 工具箱求解	148
6.4.4 小结	149
7 齿轮流量计实验研究	150
7.1 多功能齿轮流量计转速检测实验台	150
7.1.1 实验台搭建的目的和意义	150
7.1.2 实验台简介	151
7.1.3 实验台配套零部件的设计	154
7.2 齿轮流量计转速信号采集	156
7.3 实验内容及结果分析	158
7.3.1 传感器安装位置的确定	158
7.3.2 传感器测试距离的确定	159
7.3.3 不导磁材料在不同磁钢强度下的测试距离	163
7.4 实验样机设计	164
7.4.1 实验样机结构形式的确定	164
7.4.2 材料和技术要求	166

7.4.3 样机模型	166
7.5 流量计校准实验台	166
7.6 实验设计及信号采集	169
7.6.1 流量计仪表系数标定实验	170
7.6.2 压力损失及压力脉动实验	172
7.7 动态液压缸实验台	175
7.8 流量计动态信号实验台	176
参考文献	178

1 绪 论

本章针对液压系统高压侧流量测量困难的现状,对各类流量计的原理和应用做了综述,在分析和总结国内外专家、学者在液压系统流量测量方面研究的基础上,提出了一种新型的流量计——行星齿轮流量计,介绍了本书研究的背景,阐明了本书研究的主要意义、内容和技术方案。

1.1 引言

在液压系统的实验研究和故障诊断中,流量信号往往是需要测量和控制的重要参数之一。流量测量通常包括测量液压系统的稳态平均流量和动态流量。其中,利用安装在回油管上的低压流量计可实现对系统稳态平均流量的测量,并检测出系统总泄漏量。而液压系统动态流量的测量,对评价伺服阀、比例阀等控制元件,以及控制液压系统的动态特性都有非常重要的意义。动态流量的测试特别是高压侧液体流量的测试,已成为液压测试中的重点和难点之一,成为制约测试系统的完善和发展的瓶颈^[1~4]。例如,在比例流量阀的测试中,目前国内尚无性能较好的流量计能满足动态测量的要求^[5~7],所以发现并提出动态流量测量中的新理论和新方法,具有重要的现实意义。

1.2 流量计的分类

目前,流量测量仪表按其工作原理来分,主要有测容积流量和测质量流量两种,测容积流量又分为直接测量(如容积式流量计)和间接测量(如差压式流量计、漩涡流量计、超声波流量计等)。

1.2.1 差压式流量计

差压式流量计由把流量转变成静压差的一次装置(节流装置)和把静压差转变成标准信号并显示流量值的二次仪表组成^[8~10]。其流量方程式一般可表示为:

$$Q = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)} \quad (1-1)$$

式中, α 为流量系数; A_0 为孔板的孔口面积, m^2 ; ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; p_1 为进口压力,Pa; p_2 为出口压力,Pa。

从式 (1-1) 中可以看出, 只要测得压力差即 $p_1 - p_2$, 就可以得出流量。

差压式流量计适用于水、油、气、蒸汽等多种介质; 结构简单, 无可动部件, 能适合较恶劣的工作条件; 具有较长的应用历史, 并形成了国家标准和国际标准。但差压式流量计也有很多不足之处, 最主要的就是它的压力损失 Δp 很大, 为信号差压的 50% ~ 70% 左右, 给被测管路系统造成较大的能耗; 其次, 适用的流量范围较小, 其量程比仅为 1: 3。差压式流量计的工作原理如图 1-1 所示。另外, 值得注意的是, 对其管道条件和安装条件的要求都比较严格, 若不按规程, 将会给测量带来附加误差。这种流量计具有适应范围大、性能好等特点, 但其输出特性为非线性, 量程受制约并且实际使用精度不高。近几年许多知名公司对差压变送器进行了深入的研究与开发, 相继推出了性能优异的智能变送器, 如罗斯蒙特公司的 3051 型、霍尼韦尔公司的 ST3000 型、福克斯波罗公司的 LA 系列智能差压变送器, 它们的测量精度、量程比、使用温度范围以及信号处理与通信功能都得到了很大的改善和提高。传统的节流装置本身在近些年来没有明显的改进, 但出现了专利环形孔板流量变送装置, 它革新了旧式环形孔板取压方式, 提高了测量精度和可靠性。

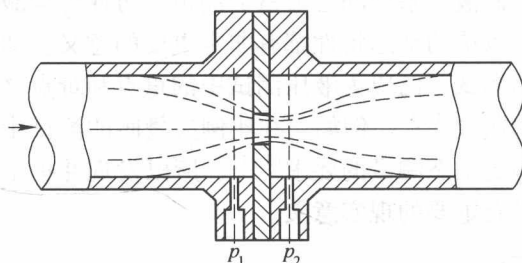


图 1-1 差压式流量计工作原理

1.2.2 容积式流量计

容积式流量计亦称正排量流量计, 其种类繁多, 可以根据不同的原则来分类。通常按照测量元件的结构分为转子式、刮板式、旋转活塞式、往复活塞式和膜片式等, 转子式最为常用。转子式流量计主要由转子和计量腔 (由流量计壳体内腔所形成) 以及计数机构组成, 流体介质周期性地充满计量腔, 并推动转子旋转, 其转速正比于流速。目前生产的产品, 根据回转体形状的不同可分为: 适用于测量液体流量的齿轮流量计、椭圆齿轮流量计、腰轮流量计 (如图 1-2 所示)、旋转活塞式流量计、刮板式流量计; 适用于测量气体流量的伺服式容积流量计、皮膜式流量计和转筒流量计等。这类流量计具有测量准确度高、重复性好、对直管段要求不高、介质黏度变化对测量显示值影响较小等特点^[11, 12]。

容积式流量计的使用量约占所有工业用流量计的 10% 左右。从原理上讲,它在测量体积流量时,不受流体的密度和黏度的影响。对于流动状态,速度分布无特殊要求,但是由于容积式流量计自身的转动部件,且动静部件之间的间隙很小,因此要求介质纯净,不含杂质,以免转子磨损或卡住,使测量精度降低或损坏仪表。另外,较大的进出油口压力损失所引起的能量消耗也是容积式流量计的缺点之一。再次就是容积式流量计本身带有元件运动惯性较大,对于测量流量的动态特性不是很好,并且还存在一定的泄漏。但是,如果改进它的结构设计,降低惯性和泄漏,无疑是解决动态测量问题最直接有效的办法。

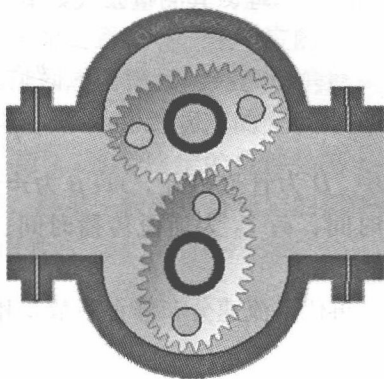


图 1-2 容积式流量计工作原理

容积式流量计是利用一个精密的标准容器对被测流体进行连续测量的,因而影响测量准确度的因素较少,不会受到流体黏度、密度、流动状态以及雷诺数的影响,测量的准确度也较高。尤其是近年来,随着其在材料选取、结构设计、加工工艺等方面很大的改进,性能也在不断提高。德国某公司 VS 系列的属于容积式流量计的齿轮流量计的精度达到了 $\pm 0.3\%$, 而 KRAL 公司的 OM 系列的螺杆流量计的精度可以达到 $\pm 0.1\%$ 。DresserWayne 公司刮板式流量计的精度甚至可以达到 $\pm 0.05\%$, 而且其重复性也很好。

1.2.3 超声流量计

这是一种基于超声波在流动介质中传播速度等于被测介质的平均流速与声波在静止介质中速度的矢量和的原理开发的流量计^[13] (如图 1-3 所示),主要由换能器和转换器组成,有多普勒法、速度差法、波束偏移法、噪声法及相关法等不同类型。由于其检测元件不与被测介质接触,所以克服了接触式测量方式中存在的问题。具有无压力损失、不干扰流场、节能、通用性好等特点,尤其适合于强

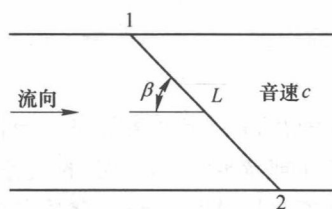


图 1-3 超声流量计工作原理

腐蚀、易爆、污染等流体的测量。这类流量计特别适于液压系统的状态监测与故障诊断,可以方便地进行多点测量。但提高小口径超声波流量计的测量准确度仍是今后研究的方向^[14]。

超声流量计是将超声波传感器夹装在被测管道的外侧,利用超声波信号在流体中传播时所载流体的流速信息来测量流体的流量的。超声流量

计的测量原理,其测量公式如下:

$$v = \frac{D}{\sin 2\beta} \cdot \frac{T_1 - T_2}{(T_0 - \tau)^2} \quad (1-2)$$

$$T_0 = (T_1 + T_2)/2$$

式中, D 为管道内径, m; β 为声速进入流体介质的折射角, ($^\circ$); T_1 为顺流传播时间, s; T_2 为逆流传播时间, s; τ 为流体以外声传播时间及电路延迟时间之和, s。

再代入流速分布修正系数 k 和管道内径 D 即可由式 (1-3) 求得流量。

$$Q = \frac{1}{k} \cdot \frac{\pi D^2}{4} v \quad (1-3)$$

一般的超声流量计主要由超声探头、主机 (包括电源电路、主机板和键盘显示电路板) 和传感器夹组成。超声流量计具有以下特点:

(1) 节约能源。超声流量计不管是外夹式或是内贴式,基本上都不扰乱流场,无可动部件,无压力损失。

(2) 安装维护方便。超声流量计安装、维修时不必停产。尤其是对大口径流量系统,可以节约大量的人力物力。

(3) 超声流量计的形式种类多,可以适用各种介质和工况条件,适用性强。除了测量水、石油等一般流体外,还可测高温、高压、强腐蚀、非导电、易爆和放射线等导声流体。既可用于管流又可用于明渠流。

(4) 不受流体的物理性能或参数 (如粗糙度、导电率、温度等) 的影响,输出与流量成良好的线性关系,因此测量范围较大。

(5) 传感器以微机为中心采用锁相环路或新型计时方法,实现各种补偿运算,解决了信号衰减、噪声干扰及电路故障等影响,还具有自检功能、雷诺数修正,可自动修正流场分布的变化等所造成的误差^[15]。

超声流量计一般设有标准的通用接口^[16],可方便地由计算机进行控制,测量结果可以自动显示和打印,并可与计算机监控系统直接联网运行,自动化程度高。但是超声流量计也有其自身的缺点,即换能器的安装直接影响到计量的准确度与可靠性,因此对安装要求十分严格。目前各生产厂家都在探讨、制定确保准确度的安装方法^[17]。

1.2.4 漩涡流量计

漩涡流量计是利用流体振动原理来进行测量的,即在特定流动条件下,流体一部分能产生流体振动,且振动频率与流体的流速 (或流量) 有一定的关系。漩涡流量计主要有涡街流量计、旋进漩涡流量计、射流流量计和空腔振荡流量计等几种,通常涡街流量计的使用最多。

涡街流量计利用流体力学中著名的卡门涡街原理（如图 1-4 所示），即在流动的流体中插入一个非流线型断面的柱体，流体流动受到影响，在一定的雷诺数范围内将在柱体下游产生漩涡分离，当这些漩涡排列成两排且两列漩涡的间距 h 与同列中两相邻漩涡的间距 l 之比满足 $h/l = 0.281$ ，就能得到稳定的交替排列漩涡，这种稳定而规则地排列的涡列称为“卡门涡街”。这个稳定的条件是冯·卡门（Von Karman）对于理想涡街研究分析得到的，后来一般把错排稳定的涡街称作“卡门涡街”，这就是卡门涡街流量计名称的由来。

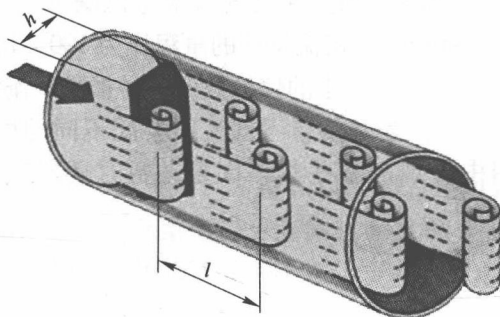


图 1-4 涡街流量计原理

理论和实验的研究都证明，漩涡分离频率，即单位时间内由柱体一侧分离的漩涡数目 f 与流体速度 v_1 成正比，与柱体迎流面的宽度 d 成反比，即

$$f = Sr \frac{v_1}{d} \quad (1-4)$$

式中， f 为漩涡分离频率，Hz； Sr 为斯特劳哈尔数（无量纲），对于一定柱型在一定流量范围内是雷诺数的函数； v_1 为漩涡发生体两侧的流速，m/s； d 为漩涡发生体迎流面宽度，mm。

用管道内平均流速 $\bar{v}$ 代替 v_1 ，则有：

$$f = Sr \frac{\bar{v}}{\left(1 - 1.25 \frac{d}{D}\right)d}$$

一旦柱体和流道的几何尺寸及形状确定后， f 便与 $\bar{v}$ 成正比关系，因而检测出漩涡的频率，便可以测得流速，并以此推知其流量。

涡街流量计主要由漩涡发生体、感测元件、信号处理和显示部分组成，是一种无运动部件的流量计，一般由壳体、漩涡发生体和放大器组成。涡街流量计主要特点有：测量范围宽，准确度高，工作可靠性高，线性频率输出，使用寿命长，再现性好，但不能用于测量低雷诺数（ $Re \leq 10^4$ ）流体且对直管段要求较高^[18]。

涡街流量计是一种数字式流量计,它直接输出的脉冲信号的频率与流量呈线性关系,同时具有量程宽、重复性好的特点,便于远距离无精度损失的传输。此外仪表常数及精度不受介质的压力、温度、密度等变量的影响。一旦流量计的结构确定,流体振荡频率也就确定了。由于仪表一般采用压电传感器将机械振动转化为电信号输出。目前采取的放大、整形、计数的信号处理方法,在应用中存在以下缺点:

(1) 易受测量现场各种干扰的影响,实际测量精度远远低于实验室标定的精度。干扰来源主要是流场不稳定、管道振动和电磁噪声。

(2) 量程比受限。理论上涡街流量计的量程比为 $100:1$,而实际上一般只达到 $10:1$ 。这是因为小流量时,产生的信号微弱,易被噪声淹没。

(3) 不同口径的一次仪表和测量不同流体要配不同的处理电路。由于测量原理复杂,对于实用中出现的某些具体问题,暂时还没有完整统一的标准来规范^[13]。

1.2.5 质量流量计

质量流量计有直接式和间接式两类。这类流量计具有直接测量质量流量、准确度高、与各种类型参数无关、压力损失小等特点。这是一种发展中的流量仪表,目前仍有许多问题需要进一步解决,如流体介质的相态与物性影响问题、零点漂移问题、最佳振动管形状选择问题、管材选择问题等^[19]。

由于对直接式质量流量计的需求,开辟了流量计量的新领域。人们企图用已有的各种科学知识来实现质量检测的目的,因而出现了不同形式、测量不同介质的质量流量计。固、气、液三种流量均可直接测量其流量,但固体流量计从产生至今,均只能是测量质量流量。而早期的气、液流量计,主要是测量容积流量,再通过换算变成质量流量。直接测量质量流量还是近几年的事。因此,通常所说的直接质量流量计是指测量气、液流量的质量流量计。质量流量计可分为采用差压原理、采用动量变化原理和采用热量原理三类流量计。其中,应用较多、影响较大的是科里奥利流量计。

科里奥利流量计可以直接测量质量流量,其工作原理基于流体振动原理。它包括 U 形管、直管、激振器、传感器等。如图 1-5 所示,它通过激振器激 U 形管,产生振荡信号,当流体通过振动管时,U 形管发生扭曲(科里奥利原理),扭曲角度通过计算 U 形管前后两端相角差得到。用光学或电磁学的方法测出挠曲量,即可测得质量流量。

科里奥利流量计主要有以下特点:

(1) 直接测量质量流量,测量精度高,多用于贸易交接。

(2) 测量值不受介质温度、压力、密度、黏度、流态、导电率的影响。

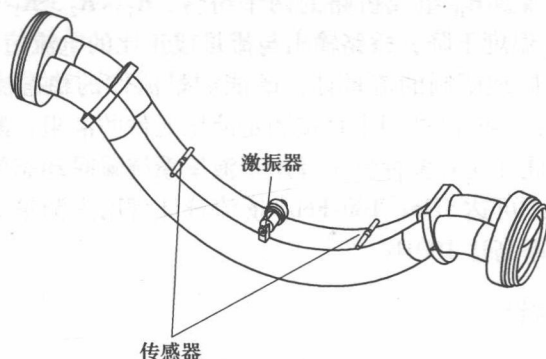


图 1-5 科里奥利流量计原理

(3) 可测量多个参数，如质量、密度、温度等，还可以测量体积流量、容质浓度、液固双相流体（或不相溶双组分液体）中异相（或异分）的含量。

(4) 对流速分布不敏感，因而安装时无上、下游直管段要求。

(5) 对外界振动干扰较敏感。为防止管道振动的影响，流量传感器安装要求较高。

(6) 液体中气泡含量超过某一界限会显著影响测量值。

(7) 零点漂移较大。

(8) 价格高，大口径流量计价格更高^[20]。

1.2.6 热膜（丝）流量计

热膜（丝）流量计通过测量流体的流速而确定流量，亦称流速仪，其基本原理是测敏感元件和它周围流体介质的对流热交换强度。

图 1-6 所示为一种热膜（丝）流量计的工作原理图。由很细的铂丝制成的发

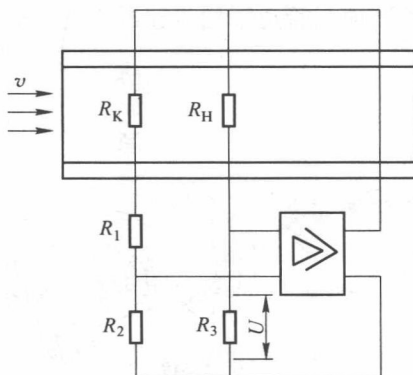


图 1-6 热膜（丝）流量计工作原理图