

计量测试技术手册

第6卷 力学(三)

《计量测试技术手册》编辑委员会



中国计量出版社

计量测试技术手册

第6卷 力学(三)

流量 真空 压力

《计量测试技术手册》编辑委员会

中国计量出版社

(京)新登字 024 号

内 容 提 要

《计量测试技术手册》包括计量测试技术基础、几何量、温度、力学、电磁学、电子学、声学、光学、时间频率、电离辐射、化学等量的计量测试技术,全套共 13 卷。

本书为《计量测试技术手册》第 6 卷力学(三),内容包括流量、真空、压力三篇。主要阐述流量、真空、压力计量的各计量仪表基础理论、测量原理、仪表结构及仪表的检定、安装、使用、维护和选用方法,同时还介绍了相应的标准装置与量值传递系统等。

本书供从事计量测试工作的科技人员、管理人员查阅使用,也可供其他有关人员参考。

Abstract

《Handbook of Measurement Technology》consists of the basic principle of measurement and measurement technology for geometrical quantity, temperature, mechanics, electromagnetism, electronics, acoustics, optics, time and frequency, ionizing radiation, chemistry etc. The whole set consists of thirteen Volumes.

This book, Mechanics III, is volume 6 of the Handbook, content of which includes flow, vacuum, pressure. The basic theory, principle of measurement, construction, verification, installation, operation, maintenance and selection of the measuring instruments are described and the dissemination systems of the values of quantities are introduced as well in this book.

图书在版编目(CIP)数据

计量测试技术手册 第 6 卷:力学(三)/《计量测试技术手册》编辑委员会编著. - 北京:中国计量出版社, 1996. 10

ISBN 7-5026-0751-X/TB·466

I. 计… II. 计… III. ①计量-测试技术-手册 ②力学-计量-测试技术 IV. ①TB9-62 ②TB93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10416 号

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 43.50 字数 1450 千字

1996 年 11 月第 1 版 1996 年 11 月第 1 次印刷

*

印数 1-2000 定价: 94.00 元

序

当人类文明的曙光照耀着历史长河的源头时,伴随着生产和社会活动的需求,计量就萌发了。我国古时秦始皇施行了度量衡制度,被看作是一项重要政绩,标志着社会的进步。本世纪欧洲各国也制定了计量单位,如英国的英尺、磅等。直至1898年,国际米制公约公布,号召各国采用统一的米制公斤计量标准,可说是顺应社会发展,时代进步的必然产物。随着科学技术和贸易的发展,大概始于本世纪与上世纪之交,计量又从传统的度量衡扩展到众多的新兴领域。各种计量要求的精确程度及实施的复杂性与日俱增,计量已成为一门独立的学科。特别是在今天高新技术迅速发展的时代,计量更是无所不在和不可缺少的科学手段。今天计量测试技术广泛应用于工农业生产、国防建设、科学研究、国内外贸易、医疗卫生,以及人民生活的各个领域。在现代社会中,人们把人、管理、原材料、工艺装备、计量测试技术列为工业生产的五大支柱。计量测试技术也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础。

在原国家计量局和现国家技术监督局的支持下,由中国计量出版社组织编写的《计量测试技术手册》即将出版。这套手册由100多位长期从事计量测试工作的专家、教授,历经7年编纂而成。该套手册总结了我国40多年来计量科学研究和实践的经验,吸取了国外先进技术,内容丰富,实用性强。并保持了从事计量工作一向遵循的科学上的严谨性,是适用于各个领域科技人员的工具书。

可以指出,编写的手册是一项组织繁杂,集体辛勤劳动的果实,是对我国计量事业做出了一个卓有贡献的贡献。为此,谨向所有付出心血的编者表示敬意。



1995年10月18日

王大珩教授为中国科学院院士、中国工程院院士、中国高科技产业化研究会理事长、何梁何利基金优秀奖获得者。

《计量测试技术手册》编辑委员会

主任委员：陈宽基
副主任委员：倪伟清 徐孝恩 李绍贵 房景富 王东宝
委员：(按姓氏笔画顺序排列)
于 渤 王朋植 王晓莹 史元明 孙维民
师克宽 刘宝兰 刘瑞清 陈小林 陈艳春
何 贡 何伟仁 林宗虎 林鸿初 金士杰
施昌彦 席德熊 徐 鹁 黄秉英 窦绪昕
谢 英 潘君骅 潘秀荣

本卷编辑委员会

主 编：林宗虎
委 员：林宗虎 徐 鹁 郑德修 铁执玲
胡庆康 费祥麟
撰 稿 人：王 栋 林 捷
本卷责任编委：倪伟清
本卷责任编辑：徐 鹁
版 式 设 计：席秀莲
插 图 设 计：孙丽英
责 任 校 对：刘秀英
封 面 设 计：齐洪海

前 言

我国的现代计量测试工作,始于本世纪 50 年代初,经过 40 多年的积累和发展,已建成具有门类较为齐全,覆盖全国的计量测试技术网络,在生产、科研和经贸中发挥着生产力的作用。计量测试队伍也从计量行业扩展到各技术领域的计量、测试人员,形成宏大的专业大军。作为这一专业领域的知识积累——编写《计量测试技术手册》,既是广大计量测试人员的要求,也为推进计量测试技术转化为生产力所需要。

《手册》旨在成为计量测试人员和技术科研、设计人员案头技术咨询的必备工具书,力求以技术科学性、数据准确性、资料实用性、查阅方便性来组织书稿内容。全书按计量测试技术各专业立卷,共 13 卷,覆盖了这一技术领域的全貌。各卷按各自专业特点,要求做到既独立完整,又相互协调统一。

《手册》是在原国家计量局和现国家技术监督局的支持和帮助下,由中国计量出版社组织编写的,并成立了各卷的编审委员会,得到了中国计量科学研究院和一些科研单位、大专院校的大力支持,有上百名计量测试技术专家、学者参与了编写工作,历经 7 个多寒暑,为此付出了艰辛的劳动。值此《手册》面世之际,我们谨向支持和参与《手册》编写、编辑出版的所有人员致以敬意!

编写如此浩大又涉及众多学科的《手册》,是一项系统而又细致的工程实践,要做到全面、完整、准确、统一是十分困难的,虽经共同努力,层层把关,也难免存在术语上的不统一,内容上有一定交叉重复,符号不太一致等问题。还会有错漏和不足,诚请广大读者批评指正,以便在《手册》再版和修订中改正。

《计量测试技术手册》编辑委员会

1995 年 9 月

编者的话

随着科学技术和生产的发展,流量、真空和压力的测量范围逐渐扩展,测量方法也不断创新。至今,应用各种原理进行测量的流量计、真空计和压力计已发展到品种繁多、不胜枚举的地步。此外,现代测量技术不仅要求测量准确度高,而且要求测量范围广。测量对象包括有处于各种温度和压力下的具有不同粘度的气体、液体和多相流体。因此,对于流体的流量、真空和压力的测量方法进行系统的分类论述,使工程技术人员能迅速掌握这些测量方法和相应仪表的主要特性及使用方法,并根据具体情况正确选用相应的流量计、真空计和压力计具有重要意义。

本卷分为三篇,即:流量篇、真空篇和压力篇,共18章。在各篇中均分章系统地介绍了相应的测量方法和特殊条件下的测量方法。主要阐述计量仪表的基础理论、测量原理、仪表结构及仪表的检定、安装、使用、维护和选用方法,同时还介绍了相应的标准装置与量值传递系统等。

本书取材全面、图表丰富,并注意选材于国内外计量测试新技术、新成就和新的国际标准、国内标准、最新的国家计量检定规程的内容。在编写中力求科学性强、引用数据可靠、依据可靠、表达简明扼要,便于读者查阅。希望能够成为一本受到读者喜欢使用的必备工具书。

本书由中国工程院院士林宗虎任主编。流量篇由林宗虎(第1~4章)、王栋(第6章)、林捷(第5章)编写;真空篇由郑德修(第10~13章)和铁执玲(第7~9章)编写;压力篇由胡庆康(第14、15及18章)和费祥麟(第16、17章)编写。书后附录由林宗虎编写。

编写手册是一项繁复而细致的工作,我们虽然尽了很大努力,但限于水平与时间,缺点及疏漏之处在所难免,我们诚恳地希望读者提出批评和意见,以便改正。

主编 林宗虎

目 录

第 1 篇 流 量

第 1 章 流量计量基础

1 引言	(1)
1.1 流体概述	(1)
1.2 流量及其测量	(1)
2 流体力学基础知识	(2)
2.1 流体的主要物理性质	(2)
2.2 流体流动型式分类及其流速分布	(15)
2.3 流体力学的基本方程式	(22)
3 流量计量基础知识	(24)
3.1 流量计量与流量计量系统	(24)
3.2 流量计的性能特性	(25)

第 2 章 流量计的原理、检定和使用

1 流量计的分类	(28)
2 差压式流量计	(28)
2.1 差压式流量计的工作原理及流量 计算式	(28)
2.2 节流装置的结构及其取压方式	(30)
2.3 标准节流装置	(31)
2.4 非标准节流装置	(84)
2.5 节流装置的检定、安装、使用和维护	(95)
2.6 差压计及差压变送器	(103)
3 浮子流量计	(115)
3.1 玻璃浮子流量计	(115)
3.2 电远传金属管浮子流量计	(117)
3.3 气远传金属管浮子流量计	(118)
3.4 浮子流量计的测量范围及工作条件	(120)
4 容积式流量计	(120)
4.1 椭圆齿轮式流量计	(121)
4.2 腰轮式流量计	(121)
4.3 刮板式流量计	(122)
4.4 往复活塞式流量计	(123)

4.5 旋转活塞式流量计	(123)
4.6 圆盘式流量计	(125)
4.7 湿式气体流量计	(125)
4.8 气囊式流量计	(125)
4.9 伺服式流量计	(126)
4.10 容积式流量计的检定、安装、使用 和维护	(127)
5 涡轮流量计	(129)
5.1 涡轮流量计的工作原理	(129)
5.2 涡轮流量计变送器的结构	(130)
5.3 涡轮流量计的前置放大器和显示仪表	(134)
5.4 涡轮流量计的检定、安装、使用和维护	(135)
5.5 具有流体温度、粘度补偿装置的 涡轮流量计	(137)
6 水表	(138)
6.1 叶轮式水表的工作原理及结构	(138)
6.2 水表特性以及水表的检定、安装、 使用和维护	(139)
7 流体振动式流量计	(139)
7.1 涡街流量计	(140)
7.2 旋涡进动流量计	(145)
7.3 射流流量计	(147)
8 电磁流量计	(147)
8.1 电磁流量计的工作原理	(147)
8.2 电磁流量计的结构	(148)
8.3 其它类型的电磁流量计	(152)
8.4 电磁流量计的检定、安装、使用和维护	(154)
9 超声流量计	(157)
9.1 超声流量计的类型及特性	(157)
9.2 超声流量计的工作原理及结构	(158)
9.3 超声流量计的检定、安装、使用和维护	(164)
10 靶式流量计	(165)
10.1 靶式流量计的工作原理	(165)

10.2	靶式流量计的流量系数及压力损失	(166)
10.3	靶式流量计的结构	(170)
10.4	靶式流量计的检定、安装、使用和维护	(172)
11	热式流量计	(174)
11.1	热线风速计	(174)
11.2	托马斯气体流量计	(176)
11.3	热式微流量计	(177)
11.4	边界层流量计	(178)
12	皮托(Pitot)管和阿纽巴(Annubar)流量计	(178)
12.1	皮托管	(178)
12.2	阿纽巴流量计	(182)
13	分流旋翼式流量计	(194)
13.1	分流旋翼式流量计的工作原理及结构	(194)
13.2	分流旋翼式流量计的检定、安装、使用和维护	(195)
14	质量流量计	(197)
14.1	差压式质量流量计	(197)
14.2	应用麦格纳斯(Magnus)效应的质量流量计	(199)
14.3	角动量式质量流量计	(199)
14.4	陀螺式质量流量计	(200)
14.5	哥氏(Coriolis)力振式质量流量计	(201)
14.6	双涡轮式质量流量计	(202)
14.7	Q变送器和密度计组合式质量流量计	(203)
14.8	ρQ^2 变送器和Q变送器组合式质量流量计	(205)
14.9	ρQ^2 检测器和密度计组合式质量流量计	(205)
14.10	温度、压力补偿式质量流量计	(206)
15	层流流量计	(206)
16	弯管流量计	(207)
17	冲量式流量计	(209)
17.1	冲量式流量计的工作原理及型式	(209)
17.2	冲量式流量计的结构	(209)
17.3	冲量式流量计的检定、安装、使用和维护	(211)
18	圆球流量计	(211)
19	翼形流量计	(212)
20	进口流量计	(213)
21	标记法测流量	(214)

21.1	标记法分类	(214)
21.2	盐速度法	(214)
21.3	加入热流体或冷流体法	(214)
21.4	放射性同位素法	(215)
21.5	加入CO ₂ 或N ₂ O法	(215)
21.6	加入染料法	(215)
21.7	核磁共振法	(215)
21.8	相关法	(215)
21.9	混合稀释法	(215)
21.10	气体电离法	(216)
22	堰式流量计和槽式流量计	(216)
22.1	堰式流量计	(216)
22.2	槽式流量计	(221)
23	流量计的选用	(226)

第3章 流量测量方法

1	一般流量测量方法	(234)
2	大流量测量方法	(234)
2.1	河流的流量测量	(234)
2.2	大型明渠的流量测量	(239)
2.3	大型管路液体流量测量	(243)
2.4	气体的大流量测量	(244)
3	微小流量的测量	(244)
4	高温流体的流量测量	(246)
4.1	应用差压式流量计	(246)
4.2	应用电磁流量计	(247)
5	低温流体的流量测量	(248)
5.1	低温流体及低温金属	(248)
5.2	低温流体的流量计	(248)
6	脉动流体的流量测量	(249)
7	生物体内流量测量方法	(251)
7.1	血流量测量	(251)
7.2	呼吸流量测量	(259)
8	气液两相流体的流量测量方法	(261)
8.1	气液两相流动及其流动结构	(261)
8.2	气液两相流体流量测量方法的类型及工作原理	(262)
8.3	气液两相流量计的结构及使用	(262)
8.4	气液两相流体密度计	(268)
9	气固两相流体的流量测量方法	(271)
9.1	气固两相流动及其流动结构	(271)
9.2	气固两相流体流量测量方法的类型及工作原理	(271)
9.3	气固两相流量计的结构及使用	(272)

9.4 气固两相流体密度计	(278)
10 液固两相流体的流量测量方法	(280)
10.1 液固两相流动及其流动结构	(280)
10.2 液固两相流体流量测量方法的类型及工作原理	(280)
10.3 液固两相流量计的结构及使用	(280)
10.4 液固两相流体密度计	(282)
11 多相流体的流量测量方法	(283)
11.1 应用测量五个参数方法测量三相流体的质量流量	(283)
11.2 应用测量体积流量、密度和导电系数的方法测量三相流体的质量流量	(284)
11.3 应用核磁共振法测量液相流量,再用测两相流体方法测定其它两相流量 ..	(284)
11.4 应用三个不同性能的流量计测量三相流体流量	(284)
11.5 应用分离法测量含气石油流量	(285)
11.6 应用涡轮流量计和电容式密度计测量含气石油流量	(285)
11.7 铁矿浆中的铁矿石流量测量	(285)
12 流体泄漏检测方法	(286)

第4章 流量标准装置及计量检定系统

1 流量计的检定装置	(288)
2 水流量检定装置	(288)
2.1 静态容积法水流量检定装置	(288)
2.2 动态容积法水流量检定装置	(289)
2.3 静态质量法水流量检定装置	(289)
2.4 动态质量法水流量检定装置	(290)
2.5 标准流量计式检定装置	(291)
3 气体流量检定装置	(291)
3.1 钟罩式气体流量检定装置	(291)
3.2 容积法气体流量检定装置	(292)
3.3 应用风洞检定气体流量计	(292)
3.4 应用音速喷嘴检定气体流量计	(292)
3.5 应用标准流量计检定气体流量计	(294)
3.6 应用肥皂膜校验器检定气体流量计	(294)
4 油流量检定装置	(295)
4.1 动态质量法油流量检定装置	(295)
4.2 标准体积管法油流量检定装置	(295)
5 液固两相流体流量检定装置	(297)

6 气液两相流体流量检定装置	(300)
7 气固两相流体流量检定装置	(300)
8 流量计量检定系统	(302)

第5章 流量计误差及数据处理

1 流量计误差	(304)
2 随机误差的应用与分析	(305)
2.1 随机误差	(305)
2.2 随机误差的正态分布规律及示例	(305)
2.3 随机误差的学生(Student)分布规律及应用	(308)
3 过失误差	(309)
3.1 过失误差的剔除方法及示例	(309)
4 系统误差的应用与分析	(311)
4.1 系统误差的类型及特点	(311)
4.2 固定系统误差消除方法	(312)
4.3 变化的系统误差消除方法	(313)
4.4 修正值法	(314)
5 误差的传递计算	(314)
6 综合误差计算方法	(315)
7 流量计的测试数据处理及示例	(315)

第6章 微型计算机在流量测量中的应用

1 概述	(322)
1.1 微机化流量计的组成	(322)
1.2 微机化流量计的特点	(322)
1.3 微机化流量计的发展前景	(323)
2 微机在测量数据处理方面的应用	(323)
2.1 数字滤波	(323)
2.2 非线性补偿	(323)
3 微机在测量自动化方面的应用	(324)
4 微机在改造现有设备方面的应用 ..	(326)
4.1 硬件组成	(326)
4.2 软件组成	(326)
5 流量计量中的微机通用程序	(327)
5.1 水和水蒸气的物性计算程序	(327)
5.2 数字滤波程序	(331)
参考文献(流量篇)	(333)

第2篇 真空

第7章 真空物理基础

1 引言	(335)
2 真空单位和真空区域的划分	(335)
2.1 真空单位	(335)
2.2 真空区域的划分	(335)
3 稀薄气体的基本性质	(336)
3.1 气体分子运动论的基本假设	(336)
3.2 理想气体及其定律	(337)
3.3 麦克斯韦速度分布定律	(337)
3.4 气体的压力	(338)
3.5 平均自由程及自由程长度分布律	(339)
3.6 碰撞频度、余弦定律	(340)
3.7 气体中的输运现象	(341)
3.8 蒸气	(344)
4 抽气过程及真空技术的基本方程	(356)
4.1 真空状态下的气体流动	(356)
4.2 抽气过程	(357)
4.3 真空技术的基本方程	(357)
5 气体分子在器壁表面的吸附与脱附	(358)
5.1 表面吸附	(358)
5.2 表面脱附	(360)
5.3 表面扩散(表面迁移、表面徙动)	(362)
5.4 吸附的动力平衡与吸附量	(363)
5.5 混合气体的吸附	(365)
5.6 气体在固体中的溶解、扩散与渗透	(366)

第8章 真空测试技术基础

1 真空的获得	(367)
1.1 真空泵的分类	(367)
1.2 真空泵的使用范围	(367)
1.3 真空泵的性能	(367)
1.4 真空泵的型号及规格表示法	(368)
1.5 气体传输泵	(369)
1.6 气体捕集泵	(371)
2 真空系统的构成	(376)
2.1 对真空系统的基本要求	(376)
2.2 真空系统的图形符号	(377)
2.3 典型真空系统的构成	(379)

第9章 全压力真空计的原理、 检定与使用

1 真空计的分类	(383)
2 绝对真空计	(383)
2.1 波登真空计	(383)
2.2 薄膜真空计	(384)
2.3 U型管真空计	(385)
2.4 压缩式真空计	(386)
2.5 辐射计型真空计	(389)
3 相对真空计	(390)
3.1 振膜真空计	(390)
3.2 热传导真空计	(391)
3.3 电离真空计	(395)
3.4 冷阴极电离真空计	(405)
3.5 放电管真空指示器(盖斯勒放电管)	(406)
3.6 极高真空测量	(408)
4 真空计的使用	(412)
4.1 真空计的选择原则	(412)
4.2 被测气体对真空计的影响	(415)
4.3 真空计的安装	(415)

第10章 真空计量检定装置 及检定系统

1 真空计的校准方法	(418)
1.1 绝对校准方法	(418)
1.2 相对校准方法	(422)
2 绝对真空计比对检定装置	(423)
2.1 比对检定装置的设计原则	(423)
2.2 标准真空计	(423)
2.3 压缩式真空计动态检定系统	(424)
3 膨胀式检定装置	(424)
3.1 单级膨胀式检定系统	(424)
3.2 二级膨胀式检定系统	(425)
4 动态流导法检定装置	(426)
4.1 动态流导法检定原理	(426)
4.2 动态流导法检定系统的设计原则	(427)
4.3 小孔流导计算	(427)
4.4 二级动态流导检定系统	(428)
5 副标准真空计检定装置	(428)
5.1 副标准电离真空计	(429)

5.2 副标准电容薄膜真空计	(429)
5.3 副标准磁悬浮转子真空计	(430)
5.4 副标准真空计比对检定系统	(430)
6 真空度计量检定系统	(430)
6.1 国家真空基准	(430)
6.2 标准真空计量器具	(431)
6.3 工作用真空计量器具	(433)
6.4 真空检定系统	(433)

第11章 分压力测量及真空质谱计

1 分压力测量	(435)
1.1 分压力测量方法	(435)
1.2 对分压力计的一般要求	(435)
2 真空质谱计的分类及主要性能参数	(436)
2.1 真空质谱计的分类	(436)
2.2 真空质谱计的主要性能参数	(436)
3 小型磁偏转质谱计	(438)
3.1 磁偏转质谱计的工作原理	(438)
3.2 磁偏转质谱计的分辨本领	(439)
3.3 扇形磁偏转质谱计	(439)
3.4 摆线质谱计	(440)
4 回旋质谱计	(441)
4.1 回旋质谱计的工作原理	(441)
4.2 具有旁电极的回旋质谱计	(442)
4.3 回旋质谱计的其它结构形式	(443)
4.4 回旋质谱计中谐振离子的主要参数	(443)
5 四极质谱计	(445)
5.1 四极质谱计的工作原理	(445)
5.2 四极质谱计的结构	(447)
5.3 四极质谱计的主要参数	(451)
5.4 其它四极电场质谱计	(451)
6 其它质谱计	(453)
7 分压力测量技术	(457)
7.1 气体进样技术	(457)
7.2 分压力的确定方法	(459)
8 真空质谱计的选用	(472)

第12章 真空检漏技术

1 检漏技术的基本概念	(473)
-------------------	-------

1.1 检漏的目的及任务	(473)
1.2 真空系统漏气的判定	(473)
1.3 漏孔的漏气速率	(474)
1.4 对检漏工作的一般要求	(476)
2 检漏方法	(476)
2.1 检漏方法的分类	(476)
2.2 气泡检漏法	(478)
2.3 高频火花检漏法	(479)
2.4 卤素检漏法	(480)
2.5 氦检漏法	(481)
2.6 真空计检漏法	(483)
2.7 其它检漏方法	(486)
3 氦质谱检漏技术	(488)
3.1 氦质谱检漏的基本原理	(488)
3.2 氦质谱检漏仪的主要技术参数	(489)
3.3 氦质谱检漏方法	(493)
3.4 氦质谱检漏仪的使用及维护	(495)
4 检漏技术的一般注意事项	(498)
4.1 检漏应贯穿于真空工作的全过程	(498)
4.2 检漏工作程序	(499)
4.3 示漏物质的选择与使用	(499)
5 标准漏孔及检漏仪器的校准	(500)
5.1 标准漏孔及其特性	(500)
5.2 标准漏孔的漏率测定	(502)
5.3 检漏仪器的校准	(503)

第13章 真空测量技术展望

1 真空测量技术的应用	(504)
1.1 微电子工业中的应用	(504)
1.2 在电工行业中的应用	(504)
1.3 机械制造工业中的应用	(505)
1.4 真空冶金中的应用	(505)
1.5 薄膜技术的进展	(505)
2 真空测量技术的发展动向	(506)
2.1 真空测量技术的主要发展方向	(506)
2.2 氦质谱检漏技术的发展	(506)
2.3 开发研究计算机在真空测量技术中的应用	(507)
参考文献(真空篇)	(509)

第3篇 压 力

第14章 压力计量基础知识

- 1 引言 (511)
- 2 压力计量基础知识 (511)
 - 2.1 压力的概念 (511)
 - 2.2 流动的分类 (512)
 - 2.3 音速 (513)
 - 2.4 激波 (513)
 - 2.5 运动流体内的静压力测量原理 (513)
 - 2.6 运动流体内的总压力测量原理 (513)
- 3 压力单位及压力计算基准 (514)

第15章 压力计的原理、 检定和使用

- 1 压力计的分类 (515)
 - 1.1 按压力计作用原理分类 (515)
 - 1.2 按测量压力范围分类 (515)
 - 1.3 按仪表测量准确度等级分类 (515)
 - 1.4 按用途分类 (516)
 - 1.5 按显示方式分类 (516)
 - 1.6 按使用目的分类 (516)
 - 1.7 按形状分类 (516)
 - 1.8 压力计的部件和其特点 (516)
- 2 液体式压力计 (520)
 - 2.1 U形管式压力计 (520)
 - 2.2 单管式压力计 (520)
 - 2.3 气压计 (521)
 - 2.4 斜管压力计(斜管微压计) (521)
 - 2.5 多管压力计 (523)
 - 2.6 补偿式微压计 (523)
 - 2.7 差动式微压计 (524)
 - 2.8 环天平式微压计 (524)
 - 2.9 钟罩式微压计 (524)
 - 2.10 液体式压力计的检定、安装、使用和维护 (525)
- 3 弹性压力计 (528)
 - 3.1 弹性敏感元件的特性 (530)
 - 3.2 弹簧管压力计 (531)
 - 3.3 螺旋(多圈)弹簧管压力计 (532)
 - 3.4 波纹管压力计 (532)
 - 3.5 膜式压力计 (532)

- 3.6 其他形式弹性压力计 (532)
- 3.7 弹性压力计的检定、安装、使用和维护... (535)
- 4 活塞式压力计 (541)
 - 4.1 活塞式压力计的原理和结构 (541)
 - 4.2 活塞式压力计的分类 (541)
 - 4.3 活塞式压力计的检定、安装、使用和维护 (546)
- 5 压力传感器 (547)
 - 5.1 电阻式压力传感器 (547)
 - 5.2 压阻式压力传感器 (553)
 - 5.3 电容式压力传感器 (553)
 - 5.4 电感式压力传感器 (555)
 - 5.5 涡流式压力传感器 (555)
 - 5.6 霍尔式压力传感器 (555)
 - 5.7 振频式压力传感器 (557)
 - 5.8 力平衡式压力传感器 (559)
 - 5.9 压杆式压力传感器 (559)
 - 5.10 压电式压力传感器 (559)
 - 5.11 压力传感器的检定、安装、使用和维护... (561)
- 6 数字式压力计 (562)
 - 6.1 液体式数字压力计 (563)
 - 6.2 具有伺服机构的力平衡式数字压力计... (563)
 - 6.3 具有数字-模拟变换器的力平衡式数字压力计 (563)
 - 6.4 弹簧力平衡式数字压力计 (563)
 - 6.5 磁电力平衡式数字压力计 (563)
 - 6.6 振动筒数字压力计 (563)
 - 6.7 数字式气压计 (563)
 - 6.8 电容式数字压力计 (567)
 - 6.9 多圈弹簧管数字压力计 (567)
 - 6.10 压阻式数字压力计 (567)
- 7 压力计的选用 (567)

第16章 压力测量技术及方法

- 1 各种状况流体的压力测量方法 (570)
 - 1.1 普通状况流体的压力测量 (570)
 - 1.2 产生冷凝液的气体的压力测量 (585)
 - 1.3 水蒸气的压力测量 (585)
 - 1.4 易蒸发液体的压力测量 (585)
 - 1.5 腐蚀性流体的压力测量 (587)
 - 1.6 凝固性液体的压力测量 (588)

1.7 高温和低温流体的压力测量	(589)
1.8 层分离流体的压力测量	(590)
1.9 多相流体的压力测量	(590)
1.10 差压的测量	(591)
2 动态压力的测量方法	(592)
2.1 概述	(592)
2.2 压力传感器的静态特性和动态特性	(592)
2.3 动态压力测量系统	(598)
3 超高压的测量方法	(606)
3.1 概述	(606)
3.2 超高压的测量原理	(606)
3.3 超高压的测量方法	(607)

第17章 压力标准装置 及计量检定系统

1 压力计的检定	(612)
1.1 液体压力计的检定	(613)
1.2 弹性压力计的检定	(621)
1.3 活塞式压力计的检定	(624)
2 液体式活塞压力标准器	(630)
2.1 液体式活塞压力标准器的原理和结构	(630)
2.2 液体式活塞压力标准器的基本性能 参数和误差因素	(631)
2.3 液体式活塞压力标准器的工作介质 (压力介质)	(635)
2.4 液体式活塞压力标准器的使用	(635)
3 气体式活塞压力标准器	(636)
3.1 气体式活塞压力标准器的原理和结构	(636)
3.2 气体式活塞压力标准器的基本性能 参数和误差因素	(636)
3.3 气体式活塞压力标准器的工作介质 (压力介质)	(636)
3.4 气体式活塞压力标准器的使用	(636)
4 特殊活塞式压力标准器	(636)
4.1 特殊活塞式压力标准器的原理和结构	(636)
4.2 特殊活塞式压力标准器的基本性能 参数和误差因素	(638)
4.3 特殊活塞式压力标准器的工作介质 (压力介质)	(638)
5 激波管法	(638)
5.1 激波管法——动态压力检定方法	(638)
5.2 激波管法的检定原理和检定装置	(638)
6 压力计量检定系统	(641)
6.1 概述	(641)

6.2 压力基准(压力基准器)与压力标准 (压力标准器)	(642)
6.3 压力量值传递系统	(642)

第18章 压力测量技术的发展

1 压力测量新技术的发展	(648)
2 激光压力传感器	(648)
3 光导纤维压力传感器	(649)
4 数字式石英压力传感器	(650)
5 带微机的数字压力计	(650)
6 其他新型压力计	(651)
参考文献(压力篇)	(652)

附 录

1 有关非法定单位向法定单位的换算	(653)
2 部分气体的动力粘度 μ	(655)
3 部分气体的运动粘度 ν	(656)
4 饱和水与饱和水蒸气的比容、 比内能、比焓和比熵	(657)
4.1 按温度排列的饱和水蒸气表	(657)
4.2 按压力排列的饱和水蒸气表	(659)
5 饱和水和饱和水蒸气的其它物性	(661)
5.1 饱和水和饱和水蒸气的密度、比定 压热容、热膨胀系数和导热系数	(661)
5.2 饱和水和饱和水蒸气的动力粘度、 运动粘度、普朗特数、表面张力和 汽化热	(662)
6 过热水蒸气的比容 v 、比内能 u 、 比焓 h 和比熵 s	(663)
7 过冷水与过热水蒸气的其它物性	(667)
7.1 过冷水与过热水蒸气的导热系数	(667)
7.2 过冷水与过热水蒸气的动力粘度	(667)
7.3 过冷水与过热水蒸气的运动粘度	(668)
7.4 过冷水与过热水蒸气的普朗特数	(668)
8 几种制冷剂的物性	(669)
8.1 氟利昂-12 的饱和蒸汽表	(669)
8.2 氟利昂-22 的饱和蒸汽表	(670)
8.3 氨的饱和蒸汽表	(670)
8.4 一些制冷剂的其他物性	(671)
9 其他液体的物性	(672)
9.1 几种油的物性	(672)
9.2 几种常用液体的密度	(673)
9.3 几种液体的表面张力系数	(673)

第1章 流量计量基础

1 引言

1.1 流体概述

在自然界中流体是广泛存在的,常见的空气、水、油和血液等均属于流体。流体是由分子组成的,由于流体分子的体积很小,例如在标准状况下,一立方厘米的空气有 2.7×10^{16} 个分子,以及分子间的距离也很小,为研究方便起见,一般均将流体看作是一种无间隙的连续介质。按连续介质概念得到的研究结果和实际情况是很符合的。

流体有两种基本形态,即液体和气体。液体有力求使自身体积缩到最小的特性,与其它流体形成一个分界面;气体则总是充满其所占有的全部空间。由液体、气体和固体颗粒混合而成的流体称为多相流体。

流体与人类的关系是十分密切的,水、空气和人体内的血液均为维持人类生命必不可少的要素。人类的日常生活和工农业生产实践也都离不开流体。石油、重油、汽油和煤气等能为人类提供生活、交通和生产必需的能源;空气能帮助燃料燃烧;水能用以灌溉农田;各种机器设备的运动部件均需机油或其它润滑流体加以润滑;各种工业设备及其管路系统中流动的工质均为流体;各种工业设备排出的废气和废液也均为流体。由此可见流体对于人类的生存、生活和生产的重要性。

1.2 流量及其测量

1.2.1 流量

单位时间内(如秒、分、小时),流体流过管道或设备某处横截面的数量称为流量。人们在使用各种流体时常需了解其流量,因而需要进行流量测量。例如在工业生产中,为了指导工艺操作、监视设备运行工况及进行经济核算常需进行流量测量。在石油工业中,油品的配比、成品油计量、原油和天然气的输送与外贸、油品的贮存等方面也均需进行流量测量。在化学工业中,流量测量更为重要,因为各种化学反应过程都必须严格按照各种物质间的一定比例来进行的。在电力工业中,为了监视锅炉和汽机的效率也需进行各种流体的流量测量。在轻工业中,油脂、纸浆等的生产过程中也需进行流量测量。在冶金工业中,炼铁炉的煤气和空气配比过程以及纯氧顶吹炼钢时的耗氧量计量也需依靠流量测量。在医学研究方面,为了研究血液流量的变化对人体活动机能的影响,需要测量血液流量。此外,在日常生活中煤气公司、自来水厂和加油站为了计费而对各用户进行的煤气量、水量和加油量的测量就更为大家所熟知。

1.2.2 体积流量与质量流量

流体流量可用单位时间内流过通道横截面的流体体积或质量来表示,前者称为体积流量,用 Q 表示,单位为 m^3/s ,后者称为质量流量,用 G 表示,单位为 kg/s 。

体积流量 Q 的计算式为:

$$Q = uA \quad (1-1)$$

式中, A 为与流速 u 相垂直的通道横截面积, m^2 ; u 为沿通道横截面上的流体平均速度, m/s 。

质量流量 G 的计算式为:

$$G = \rho Q = \rho u A \quad (1-2)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m^3 。

1.2.3 瞬时流量和累积流量

式(1-1)和式(1-2)表示的流量也称为瞬时流量。有时需要测量某一段时间内流过通道的流体总量,称为累积流量,这种流量等于这一段时间内体积流量或质量流量对时间的积分,其单位为 m^3 或 kg 。

1.2.4 流量测量

流量测量是一项极其复杂的工作。就测量对象而言,有各种液体、气体和多相流体;测量条件差别也很大,进行流量测量时的流体温度范围可自高温至低温乃至极低温;压力范围可自超高压至低压;流量范围可自大流量至微小流量;粘度范围可自低粘度至高粘度;流态范围有层流、紊流、脉动流和各种多相流型。因此在具体进行测量时应根据测量对象和各种测量条件采用相应的流量测量方法。

1.2.5 流量计

测量流量的仪器称为流量计。流量计的种类繁多,其测量原理、结构特性、适用范围以及使用方法各不相同。在测量流量时,测量人员必须全面了解各种测量方法和流量计特征以便选用合适的流量计。

为了准确地进行流量测量,除选用合适的流量计外,测量人员还必须掌握装有流量计的整个测量管路可能产生的影响流量测量的各种因素及其防止措施。例如,在流量计的上流管路中所装设的弯头或其它产生局部阻力的管件均会使管路中的流速分布以及多相流体的各相分布发生变化,这些都将影响测量的准确性。对此,在流量计上流侧应根据具体情况装设合适的整流装置以消除上述影响。

此外,流量计在使用过程中的维护管理,防止因摩擦、积垢等因素对流量计及其附属装置正常工作的影响,以及定期校验流量计等工作均对保证准确测量流量有重要意义。

近年来,随着流量测量技术的进展和电子技术的发展,微处理机已引入流量测量领域,这对于解决测量参数多、运算复杂的一些流量测量问题是一种行之有效的方法。

综上所述可见,为了满足流量测量工作的要求,近代流量测量工作者应熟悉流体的物理特性、了解有关的流体力学基础理论、较全面掌握各种流量测量方法和流量计的原理、结构、安装、维护和校验等方面的知识,并具有运用相应微处理机的能力。此外,为了能准确地组织流量测量工作和分析处理测量结果,还应具备误差分析和数据处理的知识。

流量篇的内容即是根据上述要求分章论述的。

2 流体力学基础知识

2.1 流体的主要物理性质

在流量测量中需要用到的流体物性值为:密度、动力粘度或运动粘度、比热容、液体体积膨胀系数和气体压缩系数。

2.1.1 密度

均质流体的密度等于其质量与体积的比值,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

式中, ρ 是密度, kg/m^3 ; m 为流体质量, kg ; V 为流体的体积, m^3 。

液体的密度可以用浮力式、压力式和重力式等密度计测得。常用液体的密度可从液体性质表中查到,表 1-1 示有多种常用液体在温度为 20°C 、压力为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的密度值 ρ_{20} ,表中 p_c 为液体的临界压力, t_c 为液体的临界温度, ρ_c 为液体在临界点的临界密度, t_m 为熔化温度, t_b 为沸腾温度。

液体密度随温度和压力的变化而变化。在一般温度和压力下,压力变化对液体密度影响很小,可略而不计,此时工作状态下的液体密度可按下式计算:

$$\rho = \rho_{20}[1 - \alpha_v(t - 20)] \quad (1-4)$$

式中, ρ 为工作状态下的液体密度, kg/m^3 ; α_v 为液体在 20°C 和 $t^\circ\text{C}$ 范围内的平均体积膨胀系数(见表 1-1), $1/^\circ\text{C}$; t 为液体的工作温度。

这种密度不随压力变化而变化的流体称为不可压缩流体,反之,则称为可压缩流体(如气体及高压下的液体)。

表 1-1 液体性质表

名 称	分子式	相对 分子质量	$\rho_{20}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$t_m/^\circ\text{C}$	$t_s/^\circ\text{C}$	$t_c/^\circ\text{C}$	$p_c \times 1.02$ / 10^5 Pa	$\rho_c /$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\alpha_v \times 10^5 /$ $^\circ\text{C}^{-1}$
溴	Br_2	159.8	3 120	-7.3	58.8	311	105.4	1 180	113
水银	Hg	200.6	13 545.7	-38.83	356.95	1 460	107.6	5 000	18.1
硝酸	HNO_3	63.0	1 512	-41	86.0	—	—	—	124
水	H_2O	18.0	998.2	0.00	100.00	374.15	225.65	307	18
硫酸	H_2SO_4	98.1	1 834	10.5	—	—	—	—	57
二硫化碳	CS_2	76.1	1 263	-112	46.3	279	80.6	440	119
三氯化砷	AsCl_3	181.3	2 170	-16	130.3	356	—	—	102
三氯化磷	PCl_3	137.4	1 578	-91	76.0	286	—	—	—
四氯化碳	CCl_4	153.8	1 595	-22.8	76.7	283.2	46.5	558	122
异硫氰烯	$\text{C}_4\text{H}_5\text{NS}$	99.1	1 018	-80	151	—	—	—	—
酸丙酯									
苯已酮	$\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{O}$	176.2	1 010	—	260	—	—	—	85
戊醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	88.1	810	-78	138	348	—	—	88
苯胺	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	93.1	1 022	-6.2	184	425.6	54.0	340	85
乙醛	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	44.0	783	-123.5	17.4	188	—	—	—
丙酮	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	58.1	791	-94.3	56.1	235.5	48.1	273	143
苯	C_6H_6	78.1	879.1	5.5	80.1	289	50.2	300	106
溴苯	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$	157.0	1 495.2	-30.6	156	397	46.1	458	92
戊基溴	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{Br}$	151.0	1 223	-95	126	307	—	—	—
乙基溴	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	109.0	1 450	-119	38.4	230.7	63.5	507	142
丁醇	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	74.1	810	-90	117.7	288	50.6	—	—
己烷	C_6H_{14}	86.2	660	-95.3	68.73	234.7	30.9	234	135
己醇-1	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	102.2	820	-50	157	—	—	—	—
己烯-1	C_6H_{12}	84.1	683	-98.5	64	244	—	—	—
庚烷	C_7H_{16}	100.2	684	-90.6	98.4	267.0	27.9	235	124
庚醇-1	$\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$	116.2	823	-34.3	176	365.3	—	—	—
甘油	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	92.1	1 260	18.0	290	—	—	—	50
顺萘烷	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}$	138.2	900	-51	193	—	—	—	—
反萘烷	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}$	138.2	870	-36	185	—	—	—	—
二碘甲烷	CH_2I_2	267.9	3 325	6.0	180	—	—	—	81
二氯甲烷	CH_2Cl_2	84.9	1 336	-96.5	40	245	108	—	—
反式-1,2-	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$	96.9	1 283	-80	60	—	—	—	—
二氯乙烯									
顺式-1,2-	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$	96.9	1 265	-50	48.4	243	55.8	—	—
二氯乙烯									
二乙胺	$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$	73.1	711	-39	56	223	37.8	243	—
双甘醇	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$	106.1	1 120	-10.5	245	—	—	—	—
二乙醚	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	74.1	714	-116.3	34.48	194	36.8	264	162
戊酸乙酯	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	130.2	873	—	141	326	—	—	114
异戊醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	88.1	810	-117	131	309	—	—	93
异丁醇	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	74.1	804	-108	108	272	50.0	—	94
甲基碘	CH_3I	141.9	2 279	-66.3	42.5	47	255	—	—
乙基碘	$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$	156.0	1 934	-111	72.5	281	—	—	117
烯烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	136.2	855	-10	160	376	—	—	97
间二甲苯	C_8H_{10}	256.1	864	-47.9	139.2	346	37.2	—	99
邻二甲苯	C_8H_{10}	256.1	880	-25.3	144	358.4	38.1	—	97
对二甲苯	C_8H_{10}	252.1	861	13.3	138.4	345	36.1	—	102