

真空计量新技术

NEW TECHNOLOGY OF VACUUM METROLOGY

李得天 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



1508348

真空计量新技术

李得天 著



图 书 在 册 号 (CIP)

真空计量新技术 / 李得天著. — 北京: 机械工业出版社, 2013.1
ISBN 978-7-111-40830-8

I. ①真... II. ①李... III. ①真空计... IV. ①T...
中国图书馆CIP数据核字 (2013) 第 204713 号

馆藏



淮阴师范学院图书馆 1508348



机械工业出版社

8488021

本书介绍了当今真空计量科学技术的发展水平,特别是详细介绍了我国在真空计量研究方面的新技术。全书共分9章。第1章介绍了与真空计量相关的基本知识和物理基础。第2~5章介绍了真空全压力计量技术。第6~9章分别讨论了真空分压力计量技术、真空漏率计量技术、正压漏率计量技术和虚拟仪器在真空计量中的应用技术,并着重介绍了适合空间环境探测用小型磁偏转质谱计的研制、固定流导法校准真空漏孔技术、恒压法校准正压漏孔技术,以及虚拟仪器技术在恒压式气体微流量计中的应用情况。

本书内容新颖,实用性强,适合于从事与真空计量技术工作有关的工程技术人员、科研人员使用,亦可供大专院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

真空计量新技术/李得天著. —北京:机械工业出版社, 2013. 2
ISBN 978-7-111-40820-8

I. ①真… II. ①李… III. ①真空计量 IV. ①TB935

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第304223号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·18印张·358千字

0 001—2 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40820-8

定价:68.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010)88379772

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010)88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面防伪标均为盗版

前 言

真空计量技术已广泛应用于航空、航天、船舶、电子、核、兵器等国防工业以及石油、化工、制冷等行业。近年来由于真空应用对真空计量不断增长的需要和越来越高的要求,促进了真空计量技术的快速发展,使真空计量的研究领域不断扩大,参数不断扩充,量程不断延伸,精度不断提高。目前,真空计量的研究领域已从传统的真空全压力计量扩展到真空分压力计量和气体微流量(漏率)计量。

为了及时了解国内外在真空计量领域的研究成果,促进真空计量基础科学的发展,笔者和国内许多同行都热切希望有一本系统介绍当今真空计量科学技术的发展水平及真空计量新技术的专著。从2011年开始,笔者开始撰写本书。在许多专家和同事的鼓励与帮助下,经过一年多的努力,这本《真空计量新技术》终于同读者见面了。但愿本书能对读者有所帮助。

本书系统介绍了在真空计量技术方面的最新研究进展,内容涵盖真空全压力计量、真空分压力计量、真空漏率计量、正压漏率计量以及虚拟仪器技术在真空计量中的应用等多个研究方向。在真空全压力计量方面,着重介绍了分流法校准超高/极高真空规、非蒸散型吸气剂技术延伸静态膨胀法真空基础标准校准下限,以及转换器型方向规测量空间定向分子流等新方法。在真空分压力计量方面,着重介绍了适合空间环境探测用小型磁偏转质谱计的设计和研制。在真空漏率计量方面,系统介绍了固定流导法校准真空漏孔的新方法。在正压漏率计量方面,系统介绍了恒压法校准正压漏孔的新方法。在虚拟仪器在真空计量中的应用方面,着重介绍了虚拟仪器技术在恒压式气体微流量计中的应用,实现了气体微流量的全自动化测量。以上都是笔者近年来把握真空计量技术前沿,结合我国重大工程需求,亲身实践并已在工程实际中得到广泛应用的最新研究成果。特别是分流法校准超高/极高真空规、非蒸散型吸气剂技术延伸静态膨胀法真空基础标准下限、固定流导法校准真空漏孔等新方法具有原创性,相关论文都是在国际上首次发表,受到同行的广泛关注和高度评价。本书对这些真空计量新技术进行了总结和详细论述,以便与国内同行分享,这也是撰写本书的目的。

本书在撰写过程中得到了冯焱、成永军、张涤新、赵澜、郭美如、卢耀文、徐婕、马奔等同事的大力支持,在此致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

目 录

前言

第1章 真空计量基础知识	1
1.1 真空的概念和测量单位	1
1.1.1 真空的概念	1
1.1.2 真空度及测量单位	2
1.2 真空区域的划分	4
1.3 真空技术与真空计量	4
1.4 真空计量的物理基础——气体分子运动论	5
1.4.1 气体分子运动论的基本原理	5
1.4.2 气体的压力	7
1.4.3 气体分子的速率分布——麦克斯韦速率分布	8
1.4.4 气体分子平均自由程	9
1.4.5 电子碰撞气体引起的电离	10
1.4.6 分子从表面的反射——余弦定律	11
1.4.7 热流逸现象	11
1.4.8 气体在管道中的流动	13
1.4.9 气体通过小孔的流动	15
1.4.10 常用流导的计算	16
第2章 超高/极高真空测量技术	18
2.1 电离规的分类	18
2.2 热阴极电离规（发射阴极电离规）	18
2.3 冷阴极电离规（交叉场电离规）	22
2.4 新型场致发射阴极电离规	24
2.4.1 金属微尖（阵列）场致发射阴极电离规	24
2.4.2 碳纳米管（阵列）场致发射阴极电离规	25
2.5 电离规的小型化	27
2.6 真空的激光电离测量技术	28
2.7 我国在 UHV/XHV 测量方面的研究进展	29
2.7.1 电离规的研制	29
2.7.2 电离规计量学特性研究	30
2.8 小结	42
第3章 静态膨胀法真空标准校准下限延伸技术	43
3.1 研究现状	43

3.2	校准下限的延伸方法	48
3.3	静态膨胀法真空标准装置的组成	49
3.4	校准方法	50
3.4.1	一级膨胀法	50
3.4.2	二级膨胀法	51
3.4.3	三级膨胀法	51
3.5	容积比的测量及不确定度评定	52
3.5.1	测量方法	52
3.5.2	测量结果	54
3.5.3	测量不确定度评定	64
3.6	性能测试	67
3.6.1	极限真空的获得	67
3.6.2	非蒸散型吸气剂泵抽气特性的研究	68
3.6.3	静态压力变化的测试	69
3.6.4	分离规的校准	71
3.6.5	测量不确定度评定	75
3.7	小结	77
第4章	分流法超高/极高真空校准技术	78
4.1	研究现状	78
4.2	分流法基本思想	81
4.3	分流法 UHV/XHV 校准装置的组成	81
4.4	分流法校准原理	84
4.5	分流法 UHV/XHV 校准装置的参数确定	86
4.5.1	容积的测量	86
4.5.2	气体流量的测量	91
4.5.3	小孔流导 C_{15} 的测量	96
4.5.4	小孔流导比 R_c 的测量	100
4.5.5	小孔流导 C_9 的确定	102
4.5.6	返流比 R_p 的测量	105
4.6	分流法 UHV/XHV 校准装置的性能测试	106
4.6.1	极限真空度测试	106
4.6.2	非蒸散型吸气剂泵的抽气特性	107
4.6.3	分离规的校准	109
4.6.4	冷阴极电离规的校准	111
4.6.5	测量不确定度评定	111
4.6.6	测量不确定度验证	113
4.7	小结	115
第5章	转换器型方向规及其校准技术	116

5.1	研究现状	116
5.1.1	方向规	116
5.1.2	方向规的校准	118
5.2	转换器型方向规	119
5.2.1	定向分子流测量思想的提出	119
5.2.2	转换器型方向规的研制	120
5.2.3	转换器型方向规的性能参数	121
5.3	转换器型方向规的校准	123
5.3.1	转换器型方向规校准思想的提出	123
5.3.2	校准装置	123
5.3.3	校准方法	126
5.4	参数确定及性能研究	130
5.4.1	校准装置参数确定	130
5.4.2	校准装置性能研究	137
5.4.3	转换器型方向规性能研究	142
5.4.4	分子流场分布的验证	147
5.5	小结	151
第6章	小型磁偏转质谱计	152
6.1	小型磁偏转质谱计的应用与现状	153
6.1.1	月球探测中的应用	153
6.1.2	火星探测中的应用	154
6.1.3	国内研究现状	154
6.2	小型磁偏转质谱计离子源的设计与仿真	155
6.2.1	离子源的设计	155
6.2.2	离子透镜的数值计算	156
6.3	小型磁偏转质谱计分析器的设计与仿真	168
6.3.1	分析器的设计	168
6.3.2	分析器空间磁场分布的有限元分析与计算	168
6.4	小型磁偏转质谱计测控系统设计	182
6.4.1	离子接收/检测系统	182
6.4.2	电控系统设计	183
6.4.3	软件设计	184
6.5	小型磁偏转质谱计性能研究	185
6.5.1	质荷比与扫描电压之间关系的研究	186
6.5.2	性能测试	187
6.6	小结	191
第7章	固定流导法校准真空漏孔技术	193
7.1	真空漏孔校准方法比较	193

7.2 真空漏孔校准装置的组成	196
7.3 校准原理	198
7.3.1 流量测量原理	198
7.3.2 真空漏孔漏率校准原理	198
7.4 小孔流导的测量方法	199
7.4.1 小孔流导测量装置	199
7.4.2 小孔的选择	199
7.4.3 小孔流导的测量	201
7.5 真空漏孔校准装置性能测试	209
7.5.1 质谱分析室极限真空度的测试	209
7.5.2 稳压室极限真空度的测试	209
7.5.3 质谱分析室真空质量谱图分析	209
7.5.4 质谱分析室漏放气的测试	210
7.5.5 稳压室漏放气的测试	211
7.5.6 真空漏孔校准装置全量程气体微流量测试	212
7.5.7 真空漏孔的校准	213
7.5.8 真空漏孔校准装置的不确定度评定	214
7.6 基于非蒸散型吸气剂泵的极小气体流量测量技术	214
7.6.1 极小气体流量测量装置的组成	215
7.6.2 稳压室及真空管道漏放气特性研究	215
7.6.3 流量下限测量	216
7.6.4 极小漏率真空漏孔的校准	217
7.6.5 基于静态膨胀法真空标准的极小气体流量测量方法	217
7.7 小结	217
第8章 恒压法校准正压漏孔技术	219
8.1 研究现状	219
8.2 恒压法正压漏孔校准装置的组成	225
8.3 校准装置的性能测试	229
8.3.1 真空检漏	230
8.3.2 正压检漏	230
8.3.3 定容室容积的测量	231
8.3.4 定容室容积测量不确定度评定	233
8.3.5 各部分校准用容积的测量	234
8.3.6 恒温实验	235
8.3.7 本底漏率测量	237
8.3.8 动密封结构的漏率测量	238
8.3.9 恒压法小孔流导的测量	240
8.4 正压漏孔的校准实验	241

8.4.1	压力锯齿波动恒压法校准正压漏孔	242
8.4.2	压力锯齿波动恒压法测量不确定度评定	246
8.4.3	PID 恒压控制法校准正压漏孔	246
8.4.4	PID 恒压法测量不确定度评定	249
8.4.5	定容法校准正压漏孔	250
8.4.6	定容法测量不确定度评定	253
8.4.7	三种校准方法的比较	254
8.4.8	校准结果的比对验证	254
8.4.9	技术指标总结	254
8.5	小结	255
第 9 章	虚拟仪器在真空计量中的应用技术	258
9.1	虚拟仪器	258
9.1.1	虚拟仪器的构成	258
9.1.2	在 LabVIEW 中实现远程虚拟仪器的方法	259
9.2	虚拟仪器技术在真空计量中的应用	260
9.2.1	在恒压式气体微流量计中的应用	260
9.2.2	在正压漏孔校准装置中的应用	269
9.2.3	在分压力质谱计校准装置中的应用	271
9.2.4	在超高/极高真空校准装置中的应用	272
9.3	小结	276
参考文献		277

第1章 真空计量基础知识

真空计量学(Vacuum Metrology)是有关真空测量和校准的一门学科,是计量学的一个新的独立分支。真空计量学要满足真空应用中量大面广的实际应用需要,解决真空测量和校准问题,为真空应用提供计量服务和技术保障。真空应用领域对真空计量不断增长的需求和越来越高的要求促进了真空计量技术的发展,使真空计量学的研究领域不断扩大,参数不断扩充,量程不断延伸,精度不断提高。目前,真空计量学的研究领域已从传统的真空全压力测量与校准扩展到真空分压力测量与校准、气体微流量(漏率)测量与校准。

1.1 真空的概念和测量单位

1.1.1 真空的概念

真空是指在给定空间内低于环境大气压的气体状态,也就是该空间内分子数密度低于该地区大气压的分子数密度。不同的真空状态,就意味着空间中具有不同的分子数密度。在标准状态(STD:即 0°C , 101325Pa)下,气体的分子数密度为 $2.687 \times 10^{25}\text{m}^{-3}$ 。在真空度为 $1.33 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 时,气体的分子数密度只有 $3.24 \times 10^{16}\text{m}^{-3}$ 。

地球的周围有一层厚厚的空气,在通常情况下,地面附近空气的密度大约为 1.29g/L 。地球周围的空气层非常厚,在几十公里以上的高度还有空气存在。这一厚层空气受到地球的引力作用,对地面上的一切物体产生压力,这就是大气压力。

国际标准 ISO 3529:1981 把真空定义为:真空是指低于环境大气压的稀薄气体状态或环境。通常用中性气体压力来表征真空度,把真空测量归结为中性气体的压力测量。

随着真空技术的发展,在高真空和超高真空系统中,定向流动和不等温状态常常是不可避免的。热力学平衡遭到破坏,此时分布均匀的、各向同性的流体静力学的物理量——压力^①,已具有不明确的物理意义,有人提出用“有效压力”“定向压力”“动态压力”“分子数密度”等新的物理量来表征。ISO 标准关于“压力”的定义也

① 应为压强,工程中习惯用压力,故本书中均使用压力。

增添了新的内容。

随着真空研究和应用范围的拓宽和进入更广更深的层次,人们继续在探索表征“真空度”更为主要的物理量是什么?真空的本质是什么?

在宏观方面,广阔无垠的宇宙就是一个无边无际的真空环境,从海平面向上伸展到 10^3km ,中性气体压力从一个大气压到 10^{-8}Pa 变化,直接测量出月球表面的气体压力是 10^{-8}Pa (日升) $\sim 10^{-10}\text{Pa}$ (日落),卫星同步轨道($3.6 \times 10^4\text{km}$)压力为 10^{-11}Pa ,行星际空间气压为 10^{-13}Pa (约 $1.0 \times 10^5\text{m}^{-3}$),恒星际空间气压可能低到 10^{-19}Pa (1m^3 中不到一个分子)。在 10^5km 的高空,气体电离度已达 $1/2$,在 15 倍地球半径以外的空间主要的物质是太阳风(质子 + 电子),在外地球辐射带(赤道平面以上 $10^5 \sim 10^6\text{km}$)中主要是电子环境,在深度宇宙空间存在的是极稀薄的尘埃吸光物质、宇宙尘、微流星、弥散性星云等。在深度宇宙空间用带电粒子、宇宙尘埃、微流星等状态来表征真空度,不是更确切吗?

在微观方面,在电子与原子核之间是否存在“绝对真空”?爱因斯坦在广义相对论中首先提出:真空不过是引力场的一种特殊状态。狭义相对论和量子力学结合,产生了一个两者都没有的新概念:真空乃是以量子场形式存在的物质的一种特殊的(即能量最低的)运动状态。量子场论认为:真空是一个不含实粒子,而处于基态量子场的空间,是被某种场穿透时所具有的最低能量的稳定状态,是量子场系统的基态。真空中的虚粒子吸收一定能量便可转化为粒子。在强大的万有引力场附近,如黑洞附近,这虚的空间也会破裂,引起连续的粒子发射。真空的零点振动和真空涨落所引起的微小物理效应,已被近代物理的精密实验所证实。量子场的激发和退激就是粒子的产生和消失。真空是量子场的未激发态或基态,它形成了自然界的某种背景,一切物理现象都是相对于这样的背景发生的。所以在一般的物理实验中难于直接观测它。真空是一个物理实体已被理论物理界所接受。这种新的认识已成为现代物理学一个基本概念,它将把我们带到一条通向物理学未知世界的道路。真空奥秘的探索,开辟了认识微观世界的途径。

真空概念在发展,表征“真空度”的物理量也在变化,从而使真空计量的任务和研究领域也在拓宽。虽然有关真空本质的探讨,离我们面对现实的任务还很远,但有些已是我们要去解决的新课题。例如定向流、非稳定流、非均匀分子流的测量与校准问题,以及宇宙真空的探索 and 开发等问题。

1.1.2 真空度及测量单位

在真空技术中,真空度是表示在真空状态下气体的稀薄程度。但是,由于历史原因,真空度不是用气体的分子数密度来表示,而是用压力单位来度量。从气体分子运动论的观点来看,气体压力是大量分子作无规则的热运动,不断与物体表面进行碰撞的统计平均结果。气体越稀薄,真空度越高,气体压力越低。

按照国际单位制和我国的法定计量单位,压力的单位是帕(斯卡),符号为 Pa。在真空计量中,它表示这样的含义;如果真空环境中 1m^2 面积上所受到的气体力为 1N ,那么这个环境的真空度或压力就是 1Pa 。

$$1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2$$

大气压力最先由托里拆利使用汞柱高度(单位: mmHg)表示。这种单位直观简便,沿用了多年。地球上的大气压随着地点、时间、太阳活动等因素的变化而变化,在中纬度春秋季节,中等太阳活动期,海平面大气压的年平均值约为 760mmHg 。依据此数据,1927 年第七次国际计量大会(CIPM)通过了用汞柱高度定义的大气压,即在标准重力加速度 $g = 980.665\text{ cm/s}^2$ 和在 0°C 的纯汞密度 $\rho = 13.5951\text{ g/cm}^3$ 下,汞柱高度 $h_{\text{Hg}} = 76\text{cm}$ 所产生的压力为一个大气压力,即

$$\begin{aligned} p_n(1927) &= h_{\text{Hg}} \cdot \rho_{\text{Hg}} \cdot g_n = 76 \times 13.5951 \times 980.665 \\ &= 1013250.144354 (\text{dyn/cm}^2) \\ &= 101325.0144354 (\text{N/m}^2) \end{aligned}$$

用汞柱高度定义的标准大气压使用了许多年,这期间人们不仅发现 $p_n(1927)$ 受限因素过多,而且还发现汞由多种同位素组成,同样是 760mm 汞柱,汞同位素不同时,表示的压力也不相同,标准大气压力的定义显得不严密。为了消除这一不确定因素,1954 年第十次国际计量大会对标准大气压重新进行了定义,就把 $p_n(1927)$ 的小数点后的数字去掉,定义为

$$\begin{aligned} p_n(1954) &= 1013250\text{dyn/cm}^2 \\ &= 101325.0\text{N/m}^2 \end{aligned}$$

有了这个新的定义,用汞柱高度作为单位表示压力或真空度已失去了理论依据。但由于这种定义方式在数值上相差极小,汞柱高度单位使用起来直观方便,所以应用广泛。

与汞柱高度单位相关联,一些国家,包括我国曾用“托”(Torr)作为真空度的单位。在开始时, 1Torr 表示 1mmHg 的压力。国际标准化组织也接受了这个单位,并定义为

$$1\text{Torr} = 1\text{atm}/760$$

按照这个新的定义, 1mmHg 比 1Torr 大 0.00019dyn/cm^2 ,在实际的使用中,人们常把它们视为相等。

各国和各科学技术领域中使用的压力单位,来自于各种单位制或制外单位,多而复杂,容易产生混乱。1969 年国际计量委员会统一命名国际单位制的压力单位为 Pa,并在 1971 年第十四届国际计量大会上正式通过。1984 年我国国务院发布命令,决定在我国实行以国际单位制为基础的法定计量单位。其中压力单位用 Pa 表示,真空度单位也用 Pa 表示,使真空度有了统一的计量单位。

1.2 真空区域的划分

在真空技术中,通常根据真空度的高低,把整个真空范围分成若干个区域,但是真空区域的划分,国际上尚未有统一的规定,各国的划分方法也不尽相同。一般来说,随着真空度的变化,气体表现出不同的性质,按真空度范围分为五个区域。真空区域的划分见表 1-1。

表 1-1 真空区域的划分及主要特征

区域	真空度范围/Pa	主要特征
粗真空	$10^5 \sim 10^2$	处于黏滞流状态, $\lambda^{①}$ 远远小于 $d^{②}$
低真空	$10^2 \sim 10^{-1}$	处于黏滞流向分子流过渡状态, λ 约等于 d
高真空	$10^{-1} \sim 10^{-5}$	处于分子流状态, λ 远远大于 d
超高真空	$10^{-5} \sim 10^{-9}$	以气体分子与容器壁表面的相互作用为主
极高真空	$< 10^{-9}$	分子数量极为稀少,统计涨落现象较为严重

① λ 为分子平均自由程。

② d 为容器尺度。

就气体的物理现象来说,粗真空以分子相互碰撞为主,即分子平均自由程 λ 远远小于容器尺度 d ;低真空下分子相互碰撞和分子与器壁碰撞不相上下,即 λ 约等于 d ;高真空时以分子与器壁碰撞为主,即 λ 远远大于 d ;在超高真空下,分子的平均自由程极大,分子之间的碰撞几乎不可能发生,只与器壁发生碰撞,这时以分子与器壁表面的相互作用为主;极高真空的特点是分子数目极为稀少,以至于统计涨落现象已较为严重(大于 5%),建立在经典统计规律之上的理论发生偏离。

事实上,真空区域的划分没有严格的界限,只给叙述上带来一定的方便。实际上,气体的性质、真空的获得方法、真空度的测量,不是按真空区域截然分开。对于真空计量来说,重要的是掌握真空的性质,获得和利用真空,以及正确地使用仪器测量真空。

1.3 真空技术与真空计量

真空技术是 20 世纪初发展起来的一门新的技术学科。作为一门实用的基础技术,它提供了稀薄的气体氛围和清洁的环境条件,具有利于除气、干燥、蒸发、升华、蒸馏、凝结、浓缩、浸渍、杀菌等特征,获得了越来越广泛的应用。真空技术已用于航天、航空、高能物理、可控热核聚变、表面物理、半导体与微电子等尖端

科学研究领域,还用于电子管、电光源、电气、化学、光学、精密机械、冶金、汽车、核能、制冷、医学、制药、运输、食品、包装、玩具、装饰、日常用品等众多的工业和服务业领域。

真空计量是真空物理和技术的重要组成部分,已成为计量学的一个新的独立分支,在国际上得到了承认。真空计量中最基本的三个物理量是真空气度(真空全压力 p 和分压力 p_1)、气体微流量(或漏率)(Q)和抽速(S)。真空计量的主要研究范围可概括为:①真空全压力测量和校准;②分压力测量和校准;③气体微流量的测量和校准。真空计量已从真空全压力的计量,扩展到了分压力、气体微流量的计量,满足了真空应用对真空计量的需求。

在国际上,许多国家建立了真空计量中心,建立了国家级真空计量标准,形成了真空量值的传递系统。在真空全压力测量和校准方面,粗低真空、中真空、高真空区域内的绝对真空标准装置已经建立。1979年由国际标准化组织(ISO)发起,德国联邦物理技术研究院(PTB)组织,12个国家参加了国际间真空计量标准的比对工作,在世界范围内开展了统一真空气度量值的工作。1990年以来,真空计量的研究重点放在了气体微流量和分压力的测量与校准上,建立了相应的计量标准,进行了真空漏孔量值的比对。真空技术的广泛应用使精密真空测量、特种真空测量技术以及真空仪表的数字化、集成化和智能化技术得到了飞速发展,使真空传递标准得到普及。国际标准化组织设立的真空科学技术委员会(TC)颁布了一系列有关真空计量方面的国际标准,促进了国际范围内真空量值的统一。

真空计量的发展可概括为:研究真空全压力、分压力和气体微流量计量标准的体系,建立计量标准,提高测量精度,延伸校准范围,制定抽速测量的文字标准,发展特殊环境条件下的真空测量与校准技术,不断开拓新的研究领域。

在国内,已建立了较完整的真空全压力、分压力和气体微流量的计量标准体系,建成了国防科技工业真空校准实验室,满足了国防科技工业和国民经济建设对真空计量的需求。

1.4 真空计量的物理基础——气体分子运动论

气体是真空测量的对象,了解和掌握气体的性质、变化规律,对于学习真空计量非常重要。本节主要介绍与真空计量有关的气体分子运动规律。

1.4.1 气体分子运动论的基本原理

气态是物质存在的各种状态中最简单的一种状态。气态的最主要特征是既无一定形状,又无一定体积。一定质量气体,都能无限制地膨胀而充满任何形状与大小的容器。任何不同种类的气体,不论其比例如何,都能混合成均匀状态。

早在 17 世纪,人们开始通过实验研究气体的特性,在大量实验的基础上,概括了下述气体基本定律。

(1) 玻意耳定律 一定质量的气体当温度保持不变时,它的体积与压力成反比,则有

$$pV = K \quad (1-1)$$

式中 p ——压力,单位为 Pa;

V ——体积,单位为 m^3 ;

K ——取决于温度的一个常数,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3$ 。

(2) 盖-吕萨克定律 一定质量的气体当压力保持不变时,它的体积与热力学温度成正比,则有

$$V_T = V_0 \alpha_v T \quad (1-2)$$

式中 V_0 ——温度为 273K 的气体体积,单位为 m^3 ;

V_T ——温度为 T 时的体积,单位为 m^3 ;

T ——热力学温度,单位为 K;

α_v —— p 不变时气体的体积膨胀系数,单位为 K^{-1} 。

(3) 查理定律 一定质量的气体当体积保持不变时,它的压力与热力学温度成正比,则有

$$p_T = p_0 \alpha_p T \quad (1-3)$$

式中 p_0 ——温度为 273K 的气体压力,单位为 Pa;

p_T ——温度为 T 的气体压力,单位为 Pa;

T ——热力学温度,单位为 K;

α_p —— V 不变时气体压力的温度系数,单位为 K^{-1} 。

大量的实验表明,在常温常压下,这三个实验定律基本上符合永久气体的真实情况。温度越高,压力越低,符合得越好;反之,温度越低,压力越高,偏离程度就越大。对一切气体都有

$$\alpha_v = \alpha_p = 1/273\text{K}^{-1} \quad (1-4)$$

(4) 理想气体状态方程 把严格遵守玻意耳定律、盖-吕萨克定律、查理定律的气体称为理想气体。根据上述三个定律,对于一定质量的理想气体,其状态可由 p 、 V 、 T 三个参量来描述,则有

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad (1-5)$$

式中 m ——气体的质量,单位为 kg;

μ ——气体的摩尔质量,单位为 kg/mol;

R ——普适气体常量,为 $8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

这个方程称为理想气体状态方程,也称克拉伯龙方程。在真空状态下,气体

分子十分稀薄, 压力很低, 非常接近于理想气体的条件, 可按理想气体进行处理。

在式(1-5)中, 如取 1mol 的气体分子, 则有

$$pV = RT \quad (1-6)$$

这是理想气体状态方程的另一种形式。如果其中两个参量已知, 可以求出第三个参量。

(5) 阿伏加德罗定律 这个定律可表述为, 在相同的温度与压力下, 在相等体积内所含任何气体的分子数相等。1mol 的任何气体, 含有 6.02×10^{23} 个分子, 该常数称为阿伏加德罗常数。

1.4.2 气体的压力

从分子运动论的观点来看, 气体压力是大量分子不断碰撞器壁的结果。由此可知, 气体的压力具有统计性质, 它是大量气体分子碰撞器壁的平均结果。对于一个气体分子来说, 它每次碰撞到什么地方、有多大的动量, 都是偶然的、不确定的。但对于容器内大量的气体分子而言, 每时每刻都有大量的气体分子碰撞到器壁上, 符合统计的规律, 就是施加在器壁上的压力。

气体压力是指气体分子从某一假想平面通过时, 沿该平面的正法向的动量改变率除以该平面面积, 或气体分子作用于其容器壁表面上的力的法向分量除以该表面面积。

气体的分子数密度就是单位体积内所包含的气体分子数。根据阿伏加德罗定律, 1mol 的任何气体所含的分子数 N_A 是个定值, 可把理想气体状态方程改写为

$$p = \frac{\frac{m}{\mu} N_A}{V} \frac{R}{N_A} T \quad (1-7)$$

显然, $\frac{m}{\mu} N_A$ 就是体积为 V 、质量为 m 的气体分子的总数。它除以该体积 V , 就是气体的分子数密度。 $\frac{R}{N_A}$ 就是玻耳兹曼常数。则有

$$p = nkT \quad (1-8)$$

式中 n ——分子数密度, 单位为 m^{-3} ;

k ——玻耳兹曼常数, 为 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

在真空技术中经常遇到的是混合气体。关于混合气体的压力, 可采用道尔顿分压定律进行计算。这一定律可表述为: 容器中混合气体对器壁所产生的压力等于在同样的温度、体积条件下组成混合气体各成分单独存在时的分压力之和。

道尔顿分压定律只适合于混合的理想气体, 对于实际气体, 在压力较低时才近似成立。若各种气体的分子数密度分别为 $n_1, n_2, \dots, n_i$, 则这些气体施于器壁的

分压力分别为 $p_1 = n_1 kT$, $p_2 = n_2 kT$, $\dots$, $p_i = n_i kT$, 所以总压力为

$$p = nkT = \sum_i n_i kT = \sum_i p_i \quad (1-9)$$

式中 p ——混合气体的总压力, 单位为 Pa;

p_i ——某一气体成分的分压力, 单位为 Pa。

1.4.3 气体分子的速率分布——麦克斯韦速率分布

一个容器中的气体, 若不受任何外界影响, 放置一定时间后, 能自动建立起平衡状态。所谓平衡状态, 就是该容器内气体的温度、密度、压力等各处一致。这是由于气体分子在运动中不断相互碰撞, 使分子的速率及方向不断改变, 最后建立起平衡状态。

处于平衡状态下的理想气体分子以不同的速度运动, 由于碰撞, 每个分子的速率都不断地改变, 使分子具有各种速度, 最后却能够建立起一个确定的速率分布。麦克斯韦于 1859 年从纯概率考虑导出了速率分布律, 后来玻耳兹曼通过对碰撞过程的细致考虑, 将其作为碰撞达到平衡时的一个稳定分布而导出。

当气体分子的相互作用可以忽略时, 在平衡状态下, 设有 N 个分子, 速率为 $v \sim v + dv$ 的分子数的平均值为 dN , 与分子总数 N 和所考虑速率区间 dv 的大小成正比, 则有

$$dN = Nf(v) dv \quad (1-10)$$

式中, $f(v)$ 是 v 的连续函数, 即气体分子的速率分布函数。麦克斯韦求出这个函数, 即

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (1-11)$$

速率为 $v \sim v + dv$ 的分子数为

$$dN = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \quad (1-12)$$

式中 v ——分子速率, 单位为 m/s;

m ——分子质量, 单位为 kg;

k ——玻耳兹曼常数, 为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T ——热力学温度, 单位为 K。

式(1-12)便是麦克斯韦速率分布律。

麦克斯韦速率分布函数如图 1-1 所示。图中横坐标为 v , 纵坐标为 $f(v)$, 图中阴影部分的面积与曲线下总面积之比表示分布在 $v \sim v + dv$ 速率区间的分子数 dN 与总分子数 N 之比。

由图看出, 速率很大和很小的分子所占的比例都很小。1920 年斯特恩最先用