

真空设计手册

下 册

国防工业出版社

2

1

TB7 -62
Z 51

真空设计手册

(下 册)

《真空设计手册》编写组 编著

5105/18



国防工业出版社

207424

内 容 简 介

本书是《真空设计手册》上册的续篇，内容较丰富，总结了国内外真空技术最新成果，为从事真空工程技术、航空和空间技术、电子工业技术人员必备之参考书。

本书共分为五章，分别论述真空测量，气体质谱分析，检漏技术以及真空技术的常用材料与工艺。

第十一章介绍各种真空规的原理与结构以及作为真空测量标准的绝对真空规和各类校准系统。此外，还对当前日趋重视的真空测量技术作了详细介绍。

第十二章介绍了各种真空质谱计及其离子源与离子检测器。对真空质谱计的常用术语、主要性能指标和测试方法进行了编纂和统一。此外还简要介绍了国内外商品仪器的技术性能。

第十三章详细介绍了各种检漏的方法和仪器。从理论分析和实际操作两方面对各种检漏方法作了详细论述。

第十四章对真空技术常用材料的性能作了介绍，搜集了国内外有关材料的真空性能数据，如：扩散、溶解、渗透和出气等数据，为真空工程设计提供必要依据。

第十五章扼要介绍了真空系统零（部）件的清洗方法以及各种焊接、封接工艺。

为便于查阅所需资料，本书各章均附有相当数量的图表和参考资料。

真空设计手册

(下册)

《真空设计手册》编写组 编著

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张20¹/₈ 468千字

1981年6月第一版 1981年6月第一次印刷 印数：0,001—6,000册

统一书号：15034·2182 定价：2.10元

前 言

《真空设计手册》分上、下两册。上册的主要内容是真空获得和真空工程方面的公式、数据和图表，可供广大真空工程技术人员在设计真空系统时参考。下册的主要内容是真空测量、质谱分析、检漏、材料和工艺，拟为真空工程技术人员提供一些必要的技术知识。

本手册的主编为金建中同志。上册编者为肖祥正（第一章和附表）、刘玉魁（第二、九、十章）、谈治信（第三、四章）、刘正溥（第四章）、崔遂先（第五、六、七、八、十章）五同志。下册编者为李旺奎（第十一章）、胡炳森（第十二章）、范垂祯（第十三章）、高本辉和薛大同（第十四章）、许启晋（第十五章）六同志。

手册从开始编写到定稿，得到许多兄弟单位和同志的支持。在上册的编写中，达道安、薛大同、梅占先、孙瑞华、尹锡舜、夏正勋等同志曾提供了技术资料，安雅君同志为上册的绘图和清稿作了工作。北京仪器厂、兰州曙光机械厂、上海曙光机械厂、上海阀门二厂、有色金属研究院、中国科学院仪器厂、北京真空仪表厂、天津电炉厂、沈阳真空机械二厂、中国科学院金属研究所、东北工学院、锦州真空仪器厂、锦州电炉电机厂、哈尔滨第一电炉厂、四机部 1412 所等单位提供了技术资料。张景钦同志参与了下册绘制图稿的联系工作。在此表示感谢。

由于我们的工作经验和业务水平有限，手册一定会有许多错误和不足之处，希望广大读者提出宝贵意见。

兰州物理研究所《真空设计手册》编写组

目 录

第十一章 真空度测量与真空规校准

一、引言	1
二、真空规	3
(一) 液体真空规	3
1. U形压力计	3
2. 压缩式真空规	5
(二) 弹性变形真空规	9
1. 布尔登规	9
2. 波纹管规	9
3. 薄膜真空规	10
(三) 热传导真空规	11
1. 原理	11
2. 热偶式真空规	12
3. 电阻式真空规(热阻真空规)	13
(四) 辐射计型真空规	15
1. 原理	15
2. 结构	16
3. 测量范围	17
(五) 粘滞性真空规	18
1. 原理	18
2. 结构	18
(六) 电离真空规	22
1. 概述	22
2. 圆筒型电离规	22
3. 中真空电离规	24
4. B-A 规	26
5. 调制型B-A 规	28
6. 放射线电离规	29
7. 潘宁规	30
(七) 极高真空测量	30
1. 概述	30
2. 极高真空规简介	32
抑制规·弯注规·管型倍增器规·分离规·掩埋	
收集极规·短收集极规·正、反磁控规·触发放	
电规·放射线冷磁控规·热阴极磁控规·其它规	
3. 展望	39
三、真空规校准	41
(一) 概述	41
(二) 绝对真空规比对校准系统	43

(三) 膨胀式校准系统	43
(四) 动态流量法校准系统	45
(五) 趋势	49
四、真空度测量技术	50
(一) 概述	50
(二) 气体种类与真空规	50
(三) 作为“气沉”和“气源”的测量系统	52
(四) 非均匀环境中的真空度测量	55
(五) 特殊条件下的真空度测量	56
(六) 测量值的评价和误差	57
1. 测量值的评价	57
2. 漏气抽气和出气所引起的误差	58
3. 温度引起的误差	59
4. 冷却引起的误差	60
(七) 选择、安装、规程	62

第十二章 真空系统的气体分析与分压强测量

一、引言	66
(一) 真空分析质谱计的主要应用范围	66
(二) 对真空分析质谱计的一般要求	67
(三) 能作真空分析的质谱计	67
二、真空质谱计的离子源	68
(一) 传统电子碰撞式离子源	69
(二) 传统碰撞源的改进形式	69
(三) 磁控管型冷阴极离子源	71
(四) 无磁场放电型离子源	72
(五) 电子振荡型离子源	73
(六) 脉冲电子碰撞源	73
(七) 离子贮存式电子碰撞源	74
三、不同质量分离原理的质谱计	75
(一) 回旋质谱计	75
(二) 离子回旋共振质谱计	78
(三) 磁偏转质谱计	78
(四) 摆线质谱计	81
(五) 飞行时间质谱计	83

(六) 射频质谱计	86
(七) 线振质谱计 (静电质谱计)	88
(八) 四极滤质器 (四极质谱计)	90
(九) 单极质谱计	93
(十) 三维四极离子阱	95
四、真空质谱计的离子检测器	97
(一) 电测法离子检测器的分类	97
(二) 法拉第筒	97
(三) 电子倍增器	98
1. 静电式分离打拿极电子倍增器	98
2. 静电式连续打拿极电子倍增器	100
3. 磁式电子倍增器	101
4. 电子倍增器的质量歧视效应	101
五、常用术语和真空质谱计的主要性能指标	102
(一) 常用术语	102
(二) 真空质谱计的主要性能指标	105
六、附表	108

第十三章 真空检漏技术和仪器

一、引言	132
(一) 真空系统中漏气、虚漏与抽气之间的平衡	132
(二) 最大允许漏率	132
(三) 真空检漏的目的	133
二、漏孔、漏率及标准漏孔	134
(一) 漏孔	134
1. 真空容器或器件中的漏孔形式	134
2. 漏孔大小的表示方法	134
3. 漏孔的气流特性	134
4. 气体通过漏孔的时间	136
(二) 漏率及漏率单位	136
(三) 标准漏孔及其校准	136
1. 什么是标准漏孔	136
2. 标准漏孔的分类及特点	137
3. 几种常用的标准漏孔	137
4. 标准漏孔的校准	140
5. 使用标准漏孔的注意事项	141
三、检漏方法和仪器	143
(一) 检漏方法的分类	143
(二) 气泡检漏法	144
1. 打气试漏法	145
2. 外真空法	146
3. 热槽法	147
4. 皂泡法	147

(三) 放电管法与高频火花检漏器	147
(四) 真空规检漏法	148
1. 热传导真空规法	148
2. 电离真空规法	149
3. 差动真空规法	150
4. 热传导真空规、电离真空规及差动真空规法的检漏灵敏度	151
5. 具有冷吸附阱的真空规检漏器	152
6. 扫描方向规检漏	152
7. 其它方法	153
(五) 氢-钡法	154
(六) 静态升压法	154
(七) 离子泵检漏器	155
(八) 卤素检漏仪	156
(九) 氦气检漏法	158
(十) 氦质谱检漏仪	162
(十一) 其它检漏法	162
1. 超声检漏法	162
2. 放射性同位素检漏法	163
3. 荧光检漏法	163
四、氦质谱检漏仪	163
(一) 质谱仪器与检漏技术	163
(二) 氦质谱检漏仪的基本原理与组成	164
(三) 氦质谱检漏仪的主要参数	164
1. 灵敏度及其校准	164
2. 反应时间、清除时间及其测定	167
3. 工作真空、极限真空与节流阀处的抽速	168
(四) 高灵敏度氦质谱检漏仪	168
(五) 返流氦质谱检漏仪	170
(六) 国产氦质谱检漏仪	170
五、如何选择检漏仪器、检漏方法和示漏物质	176
(一) 选择检漏仪器和方法应注意的几个问题	176
(二) 示漏物质的选择及使用中应注意的事项	180
(三) 选择检漏方法和示漏物质时还要考虑的安全因素	181
六、氦质谱检漏技术	182
(一) 检漏的物理过程及有关公式	182
(二) 辅助真空系统	187
(三) 氦罩法检漏	188
(四) 压力检漏法	189
(五) 检漏盒法	189
(六) 背压法检漏	190

(七) 喷吹法	191
(八) 吸嘴法检漏	192
(九) 检漏台	192
(十) 累积法检漏	192
(十一) 用选择性抽气方法提高检漏灵敏度	193
(十二) 各种质谱检漏方法的应用	194
七、检漏的实践	194
(一) 在真空工作的各个阶段都要考虑检漏工作	194
(二) 检漏工作人员与检漏实验室(车间)	196
(三) 如何进行检漏	196

第十四章 真空技术领域常用材料

一、材料的真空性能	200
(一) 引言	200
(二) 扩散、溶解、渗透	200
1. 概述	200
2. 石英、玻璃、陶瓷	202
3. 金属	209
4. 橡胶、塑料	211
(三) 出气	215
1. 概述	215
2. 常温下材料的出气速率	216
国产材料·铜·其它金属·无机材料·有机材料	
3. 常温下材料中各种气体的出气速率	226
4. 高温下材料的出气速率及组份	230
国产材料·铜·铁·其它金属·无机材料	
5. 高温下的出气总量和气体组份	240
(四) 蒸气压、蒸发、升华速率	247
1. 概述	247
2. 各种元素和无机物的蒸气压	247
3. 有机物的蒸气压	249
4. 蒸发速率	250
二、真空材料	255
(一) 壳体材料	255

1. 金属及合金	255
2. 玻璃和石英	257
(二) 焊接、连接和封接材料	259
1. 永久性连接	259
2. 可拆连接	259
橡胶、塑料类垫圈材料·软金属垫圈	
3. 活动连接和堵漏材料	260
(三) 泵工作物质	260
1. 机械泵、蒸汽流泵工作液	260
2. 吸气剂和吸气剂泵材料	263
电子管用吸气剂·升华泵和溅射离子泵的工作金属	
3. 冷吸附泵、阱用物理吸附剂	264
4. 低温泵、阱用冷冻剂	265
(四) 真空规、质谱计用材	265
(五) 高温真空装置用材	267

第十五章 真空技术的常用工艺

一、引言	270
二、真空零、部件的表面处理	274
(一) 概述	274
(二) 表面处理的基本方法	271
(三) 清洗实例	274
三、真空设备制造中常用的几种焊接方法	277
(一) 氩弧焊	277
(二) 钎焊	281
(三) 电子束焊	289
(四) 其它焊接方法	292
四、玻璃、陶瓷工艺	292
(一) 金属-陶瓷封接	292
(二) 玻璃-金属封接	303
(三) 玻璃的熔接和切割工艺	307

第十一章 真空度测量与真空规校准

一、引言

真空度测量与真空规校准是真空技术的重要组成部分。

真空度测量指的是在低于大气压的条件下,对气体全压的测量。

真空规是测量低于大气压的气体全压的仪器,一般包括规管和控制线路两部分。

真空测量标准可分为绝对真空规和绝对真空校准装置两大类。

绝对真空规指的是从所测出的物理量就能直接计算出气体压强的真空规。

绝对真空校准系统是一种从所测出的物理量就能计算出系统中气体压强的真空装置。

相对真空规是输出信号与气体压强之间的关系要用真空测量标准标定后才能确定的真空规。这种标定称作真空规的校准。

目前,从大气压到 10^{-12} 托压强范围内真空度的测量问题已经解决了。一般是采用不同类型的真空规去测量不同压强区间的气体压强。但是在解决 $10^{-12} \sim 10^{-16}$ 托压强范围的极高真空测量方面,进展是缓慢的。要直接用已有的真空规去测量特殊条件下的真空度是困难的,还需要对规的结构、工艺、理论等多方面的问题进行探讨。真空系统中稀薄气流的非均匀分布问题,以及对非均匀气流的压强测量,已成为近年来详加研究的课题。

在从大气压到 10^{-12} 托的压强范围内,虽然已经有了各种类型的绝对真空规和绝对真空校准系统,但精度和准确度都不高,也还没有达到国际间的统一。

用“气体压强”这个各向同性的物理量来表征真空度,虽然在某些情况下显得很不确定,但是现在仍沿用着。

在国际单位制(SI)中,压强的单位是帕斯卡(Pascal),简写为帕(Pa)。帕是牛顿/米²(N·m⁻²)的专门名称。

在真空技术领域,最常用的压强单位是托(torr)和毫米汞柱(mmHg),这两单位之间仅相差 $1/7 \times 10^{-6}$,所以可大致认为两单位相等。

$$1 \text{ 毫米汞柱} = \frac{101325.0144354}{760} \text{ [帕]} = 1.00000014 \text{ [托]}$$

$$1 \text{ 托} = \frac{1}{760} \text{ [标准大气压]} = \frac{101325.0}{760} \text{ [帕]} = 133.3224 \text{ [帕]}$$

$$1 \text{ 帕} = 7.50062 \times 10^{-3} \text{ [托]}$$

在SI的有关文件中,曾建议不采用[托]而采用[帕],近来有些文章已采用[帕],但要做到普遍改用[帕],还需要一个过程,故本手册仍沿用[托],现把常用的一些压强单位间的换算关系列于表 11-1 中:

表11-1 压强单位换算系数表

	帕斯卡 (Pa)	巴 (bar)	微巴 (达因/厘米 ²)	标准大气压 (atm)	托 (torr)	千克力/厘米 ²	磅力/英寸 ²
帕斯卡 (Pa)	1	10 ⁻⁵	10	9.86923 × 10 ⁻⁶	7.50062 × 10 ⁻³	1.019716 × 10 ⁻⁶	1.450377 × 10 ⁻⁴
巴 (bar)	10 ⁶	1	10 ⁶	9.86923 × 10 ⁻¹	7.50062 × 10 ²	1.019716	1.450377 × 10
微巴 μbar (达因/厘米 ² , dyn/cm ²)	10 ⁻¹	10 ⁻⁶	1	9.86923 × 10 ⁻⁷	7.50062 × 10 ⁻⁴	1.019716 × 10 ⁻⁶	1.450377 × 10 ⁻⁵
标准大气压 (atm)	1.013250 × 10 ⁵	1.013250	1.013250 × 10 ⁶	1	7.60000 × 10 ²	1.033227	1.469595 × 10
托 (torr)	1.333224 × 10 ²	1.333224 × 10 ⁻²	1.333224 × 10 ³	1.315789 × 10 ⁻³	1	1.359510 × 10 ⁻³	1.933678 × 10 ⁻²
千克力/厘米 ² (kgf/cm ²)	9.80665 × 10 ⁴	9.80665 × 10 ⁻¹	9.80665 × 10 ⁵	9.67841 × 10 ⁻¹	7.35559 × 10 ²	1	1.422334 × 10
磅力/英寸 ² (lbf/in ²)	6.89476 × 10 ⁸	6.89476 × 10 ⁻²	6.89476 × 10 ⁴	6.80460 × 10 ⁻²	5.17149 × 10	7.03070 × 10 ⁻²	1

注: 除 1 及定义值是精确值外, 其它各值的相对不准确度均不大于 1 × 10⁻⁶。

二、真 空 规

(一) 液体真空规

1. U 形压力计

U形压力计采用水银或低蒸气压油为工作液体, 从这种压力计的两个支管的液面高度差 h 可计算出两个支管液面上的压强差:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h \quad (11-1)$$

式中 ρ ——工作液体的密度;

g ——重力加速度。

(11-1) 式表明, U形压力计是一种绝对真空规。对油U形压力计来说, 因油密度约为水银密度的十五分之一, 所以它的灵敏度要比水银U形压力计高十五倍。

在真空测量中, 通常所用的U形压力计有如下几种形式:

图 11-1 为开管式U形压力计, 它是一种以大气压作为参考压强的U形压力计。

图11-2为闭管式U形压力计, 其封闭支管中的气体压强与被测气体压强相比, 可以忽略。

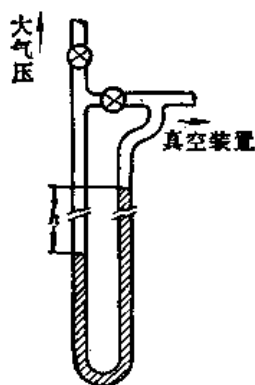


图11-1 开管式U形压力计

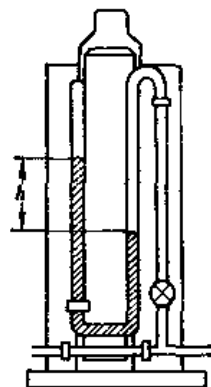


图11-2 闭管式U形压力计

图 11-3 是采用电学方法测量液面差的水银U形压力计, 它的两个支管中装有电阻丝(钨丝或铂丝), 随着水银液面的上升或下降, 丝的电阻值随之减小或增大, 以此来测出两液面之差。

图 11-4 是倾斜式U形压力计, 它是根据所测出的 L 由 $h = L \sin \theta$ 来算出液面差。此种结构形式可以提高灵敏度 5~10 倍。

图11-5是一种油U形压力计。

除通常使用的U形压力计外, 特殊设计的精密U形压力计可作为 $760 \sim 10^{-8}$ 托压强范围的真空测量标准。它的历史悠久, 经受了长期实践的考验, 被公认为是真空测量标准中最成熟、可靠性最高的标准。

精密U形压力计是真空测量标准的基础, 而另外三种主要真空测量标准都可以说是它

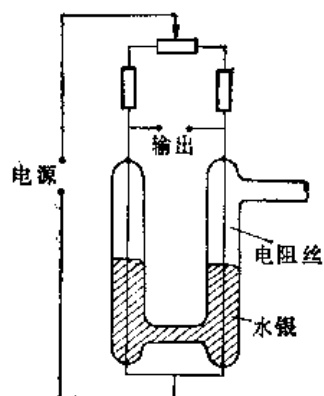


图11-3 用电学法测量液面差的U形压力计

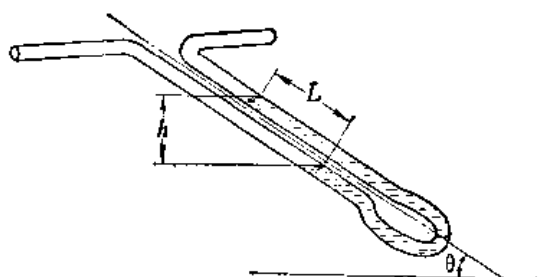


图11-4 倾斜式U形压力计

的发展。压缩式真空规可认为是“具有放大系数的U形压力计”；膨胀式校准系统的前级标准是精密U形压力计；动态流量法校准系统的上游标准是压缩式真空规或精密U形压力计。

制做精密U形压力计时要考虑如下几点：

- (1) 选用较大内径的玻璃管（~30 毫米），以降低毛细管作用。
- (2) 选用透光性好的薄壁玻璃管，以降低光的不规则折射对读数的影响。
- (3) 采用三支管甚至四支管的结构，以降低安装倾斜所带来的误差。
- (4) 严格恒温，以减小温差和温度变化所引起的误差。

(5) 采用先进的精密测长技术和仪器。已采用的测长仪器有测高仪（精度为 0.02 毫米），点接触测微计（精度为 0.002 毫米），光学干涉仪，超声干涉仪等。

带有点接触测微计的精密U形压力计如图 11-6 所示。这种结构的精密油U形压力计的误差为 $\left(1.2 \times 10^{-4} \text{ 托} + \frac{6}{10^6} \text{ 读数值}\right)$ 。这种结构的精密水银U形压力计的误差为 $\left(3 \times 10^{-3} \text{ 托} + \frac{3}{10^6} \text{ 读数值}\right)^{[1]}$ 。

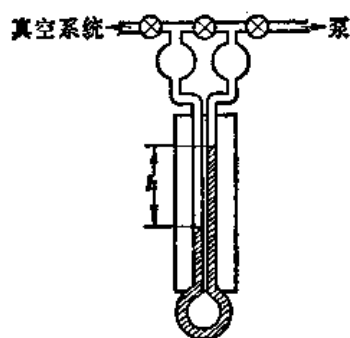


图11-5 油U形压力计

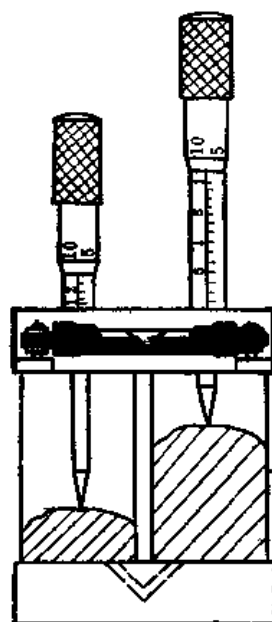


图11-6 点接触测微计U形压力计

美国国家标准局研制成功的脉冲超声干涉仪压力计^[2]是四支管结构的U形压力计（图 11-7），其测长分辨率为 0.01 微米。

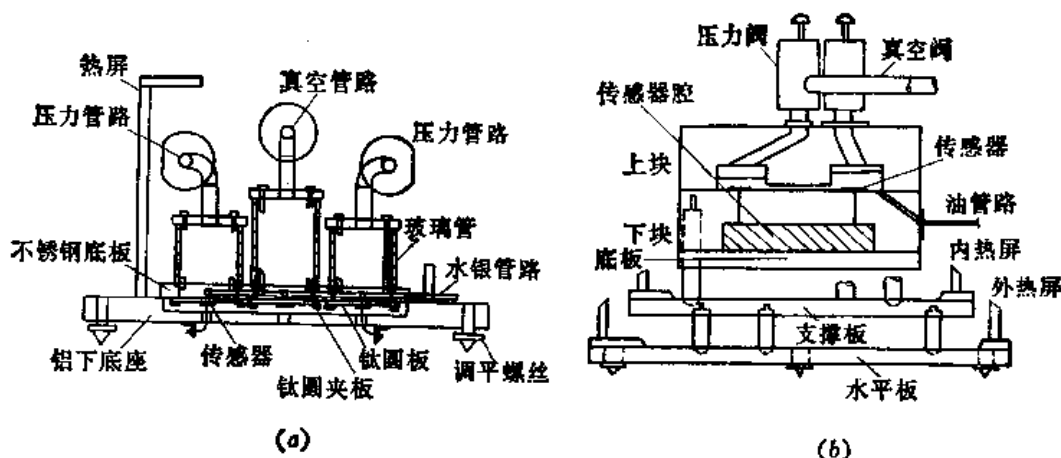


图11-7 脉冲超声干涉仪压力计
(a) 汞压力计; (b) 油压力计。

日本研制成功的激光干涉仪U形压力计的测长分辨率为0.3微米^[3]。

2. 压缩式真空规

1874年麦克劳^[4]制作的压缩式真空规是采用提升水银的方法把大体积 V 中压强为 p 的气体压缩到毛细管的小体积 v 中,使小体积中的压强增大到 P ,再按U形压力计原理测出 P ,根据波义耳定律 $p = \frac{v}{V} P$ 计算出被测气体压强 p 。压缩式真空规又称麦克劳规,是一种绝对真空规。

图11-8是压缩式真空规的结构图, D 为测量毛细管, B 为比较毛细管,两个毛细管的内径相同($d_1 = d_2 = d$)。当把大体积 V 中的低压气体(p)压缩到测量毛细管 D 中后,就可得到下面的关系:

$$pV = (p + h)v \quad (11-2)$$

式中 h ——两毛细管中水银面的高度差。

如 $h \gg p$, 则

$$p = h \frac{v}{V} \quad (11-3)$$

从所测出的物理量 h 、 v 、 V 按照公式(11-3)可直接计算出气体压强值 p 。

图11-9给出压缩式真空规的三种不同的定标方法。

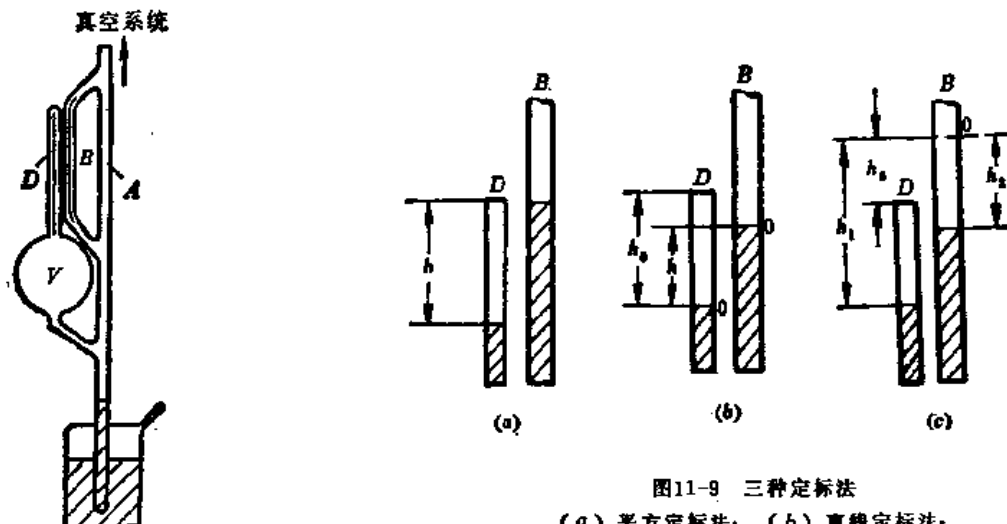


图11-8 压缩式真空规结构

图11-9 三种定标法
(a) 平方定标法; (b) 直线定标法;
(c) 无标定标法。

如把 B 中的水银面提升到 D 顶点进行读数 (图 11-9 a), 则得平方定标公式:

$$\begin{aligned} pV &= hv = Ah^2 \\ p &= -\frac{A}{V} h^2 \end{aligned} \quad (11-4)$$

式中 A ——毛细管截面积 ($A = \pi d^2/4$)。

如把 D 中水银面提到一固定参考点 0 进行读数 (图 11-9 b), 则得直线定标公式:

$$\begin{aligned} pV &= hv = hAh_0 \\ p &= \frac{h_0 A}{V} h \end{aligned} \quad (11-5)$$

式中 h_0 ——常数。

如任选一固定参考点 0 , 将水银面提升到毛细管 D 中任意位置进行读数 (图 11-9 c), 则得无标定公式:

$$\begin{aligned} pV &= (h_1 - h_2) A (h_1 - h_0) \\ p &= \frac{A}{V} (h_1 - h_2) (h_1 - h_0) \end{aligned} \quad (11-6)$$

一般情况下很少采用无标定标法, 只有在高精度测量中才采用。毛细管 D 的有效顶点与实际观察到的顶点会有差别, 采用无标定标法可以从实验中求出有效顶点的位置 h_0 。

对于日常的测量来说, 压缩式真空规并不是一种很好的测量工具。因为它的工作液水银对人体有伤害, 操作也比较复杂, 而且如果没有熟练的操作技术, 就很难获得精确可靠的读数。

但是压缩式真空规在 $1 \sim 10^{-5}$ 托压强范围内是一种很好的真空测量标准, 在它一百多年的发展过程中, 逐渐发现和消除了一些误差源, 是一种研究得较深入的真空标准。曾经进行过压缩式真空规之间的互校、压缩式真空规与静态膨胀式校准系统之间的互校、压缩式真空规与动态流量法校准系统之间的互校, 都获得了良好的一致性。在国际上已公认压缩式真空规具有很高的可靠性, 并普遍将它定为国家级的真空测量标准。

压缩式真空规的误差源有: 不稳定的毛细作用、水银蒸气流效应、静电效应、温度变化、结构尺寸不准和偏离理想气体的波义耳定律等。其中前两项是主要的误差源。

1939年卢森堡⁽⁶⁾用磨毛的毛细管制作了压缩式真空规。由于对毛细管内壁进行了磨毛加工, 因而该真空规能有一对均匀内径的毛细管, 并降低了由水银在毛细管中的一些异常现象所引起的误差。他认为他的压缩式真空规在 10^{-5} 托时的精度为 $\pm 6\%$ 。

在卢森堡之后二十二年, 日本人⁽⁶⁾和德国人⁽⁷⁾在1961年先后独立地发现了压缩式真空规的一个新误差源, 即水银蒸气流效应可引起近20%的系统误差。他们还采取了相应措施, 克服了八十五年来这种未被人们认识的误差源, 使压缩式真空规的可信程度大大提高了一步。

然而, 直到目前为止, 在国外发表的文献中, 对影响压缩式真空规测量精度的主要因素——毛细管中水银不规则运动所引起的一系列异常现象, 尚未完全探清其本质, 也没有从实践中找到根本消除这些异常现象的方法, 因此卢森堡的方法一直延用到现在。

1963年兰州物理所⁽⁸⁾为了提高压缩式真空规的测量精度, 着重研究了水银在毛细管中

的运动状态, 基于大量的实验观察, 提出了“摩擦阻力是引起毛细管中水银不规则运动的主要原因”的假设, 用“流动”模型和“塞流”模型解释了毛细管中所发生的一系列异常现象。在此理论的指导下, 从实践中找到了涂油润滑的新方法, 即在毛细管内表面涂一层厚度约为 3 微米的均匀油膜 (DC-704 油), 较彻底地消除了毛细管中发生的一系列异常现象。

基于上述理论分析和实验研究, 设计制作了一种新型标准压缩式真空规 (图11-10)。这种真空规采用了内表面涂油的毛细管, 消除了毛细管异常现象所引起的误差, 而且在规的交叉口处安置了两个磨口阀门, 配合使用这两个阀门可较彻底地消除水银蒸气流效应所引起的误差, 致使新型标准压缩式真空规的测量精度有了很大提高。

一台新型标准压缩式真空规主要参数为: 直径 $d=0.6404$ 毫米, 体积 $V=1246.86$ 毫升, 实验中测得有效顶点 h_0 的偏差 $< \pm 0.1$ 毫米。在 1×10^{-6} 托时, 测量误差为 $\pm 2.3\%$; 在 1×10^{-4} 托时测量误差为 $\pm 0.83\%$; 在 1×10^{-3} 托时, 测量误差为 $\pm 0.48\%$ 。

已将新型标准压缩式真空规与高真空膨胀式校准系统进行了直接比对, 取得了良好的一致性⁽⁸⁾。

由于波义耳定律仅适用于理想气体, 对于真实气体则应该采用范德瓦耳方程:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (11-7)$$

式中 a 和 b 是与气体性质有关的常数 (见11-2表)。

表11-2 气体性质的有关常数

气 体	$T_c < T_k \quad T_k = 288K$				
	$T_c(K)$	p_0 (厘米汞柱)	a (厘米汞柱·厘米 ³ /克分子 ²)	b (厘米 ³ /克分子)	$p_0(T_k)$ (厘米汞柱)
Ar	151	3.65×10^3	1.02×10^8	3.22×10^1	
CO	134	2.66×10^3	1.13×10^8	3.99×10^1	
He	5.1	1.72×10^2	2.58×10^8	2.37×10^1	
H ₂	33.1	9.73×10^2	1.85×10^7	2.66×10^1	
Kr	210	4.11×10^3	1.76×10^8	3.98×10^1	
CH ₄	190.5	3.48×10^3	1.71×10^8	4.28×10^1	
Ne	44.3	1.97×10^3	1.60×10^7	1.71×10^1	
NO	179	4.94×10^3	1.02×10^8	2.80×10^1	
N ₂	125.9	2.54×10^3	1.05×10^8	3.92×10^1	
O ₂	154.2	3.78×10^3	1.63×10^8	3.20×10^1	

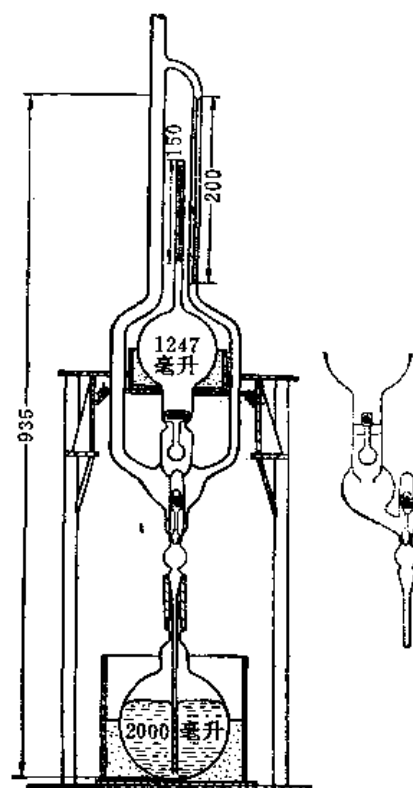


图11-10 新型标准压缩式真空规

(续)

$T_c > T_k$ $T_k = 288\text{ K}$			$p_s(T_k)$ [厘米汞柱]		
NH_3	405.4	8.47×10^3	3.17×10^3	3.71×10^1	5.3×10^2
C_2H_2	309	4.71×10^3	3.33×10^3	5.13×10^1	2.9×10^3
C_6H_6	561.5	3.63×10^3	1.36×10^3	1.16×10^2	6×10^4
CO_2	304.1	5.55×10^3	2.72×10^3	4.27×10^1	3.8×10^3
Hg	>1823	$>1.52 \times 10^4$	6.12×10^3	1.70×10^1	7.76×10^{-5}
NO_2	431	7.52×10^3	4.01×10^3	4.43×10^1	5.65×10^1
SO_2	430.2	5.91×10^3	5.08×10^3	5.65×10^1	2.1×10^2
H_2O	647	1.64×10^4	4.14×10^3	5.06×10^1	1.28×10^1
Xe	289.6	4.42×10^3	3.10×10^3	5.10×10^1	4.4×10^3

注: T_c : 临界温度; T_k : 测量温度; p_c : 临界压强; $p_s(T_k)$: T_k 时的饱和蒸气压。

用压缩式真空规测量真实气体压强时, 如果按照波义耳定律进行计算, 将引起如下误差:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{p}{RT} \left(\frac{a}{RT} - b \right) \quad (11-8)$$

式中 p —— 被压缩后的气体压强;

R —— 气体常数。

图11-11是一种改进型压缩式真空规, 又称为摩塞尔-波尔兹 (Moser-Poltz) 规^[9]。此种规的测量下限可以延伸到 10^{-10} 托^[10, 11]。

把这种规的水银面提升到毛细管小腔下端 R 处, 再使水银稍微上升或下降, 则水银面在 R 处可呈现出凸月面(1), 平面(2)和凹月面(3)三种情况。当水银面为平面时, 就不会产生毛细

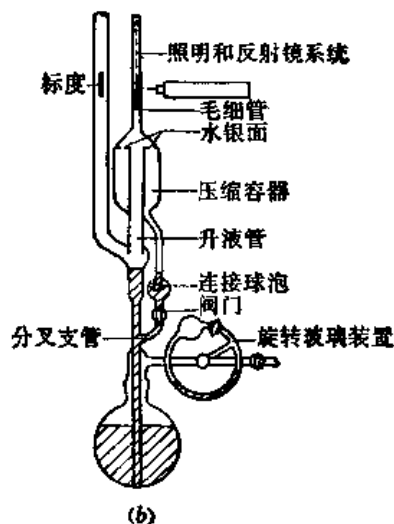
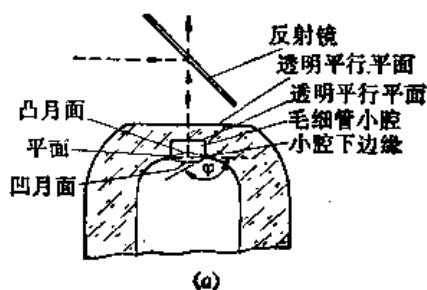


图11-11 摩塞尔-波尔兹 (Moser-Poltz) 规

(a) 毛细管顶端图; (b) 全图。

压低值。但是完全调平水银面是困难的, 所以还会有较小的毛细压低值。为了进一步消除这个残存的毛细压低值, 这种规采用了两次压缩的方法来进行测量。在第一次压缩时的压缩体积为 V_1 , 第二次压缩时, 压缩体积减小为 V_2 , 如果被测压强为 p , 则有

$$p = \frac{v}{V_1} (h_1 - h_r - h_a) \quad (11-9)$$

$$p = \frac{v}{V_2} (h_2 - h_r - h_a) \quad (11-10)$$

式中 v ——毛细管小腔体积;

h_1 ——第一次压缩后粗比较管内水银面的高度;

h_2 ——第二次压缩后粗比较管内水银面的高度;

h_r ——毛细管小腔下端 R 处的高度;

h_a ——水银面在小腔 R 处引起的毛细压低值。

由式 (11-9) 和 (11-10) 得:

$$p = \frac{v}{V_1 - V_2} (h_1 - h_2) \quad (11-11)$$

由于此规结构复杂, 制作工艺困难, 测量重复性差, 而且还需要采用精密的光学测量系统, 致使它难以推广。近年来对此规的误差源和重复性还进行了许多研究^[12], 并对其光学测量系统进行了改进^[13]。

(二) 弹性变形真空规

弹性变形真空规是利用弹性元件随气压变化所产生的变形来测量压差的一种真空规。它的特点是: 规管灵敏度与气体种类无关, 对被测气体干扰小, 可测腐蚀性气体和可凝蒸气的压强。此类规存在的主要问题是, 金属弹性元件的蠕变现象和弹性系数的温度效应。

1. 布尔登规 (图11-12)

布尔登规是一种用富有弹性的金属材料制成的椭圆形截面的空心管, 全管弯成弧形, 一端封死并与指针相连接, 另一端与被测系统相连。当管内压强增高时, 截面形状向圆形变化, 使弯管向外扩张而拉动指针偏转。反之, 当管内压强下降时, 指针则朝相反方向偏转。

金属布尔登规主要用于测量高压强, 很少作为真空规使用。指示大气压以下的压强, 表盘上用红线来标度, 这种标度是很粗略的。

图11-13是用石英制成的布尔登规, 空心的扁平石英管被绕成螺旋形, 在封死的一端吊一个小镜, 通过小镜用光杠杆的办法来测量布尔登管上下运动的距离, 再求得压差值。此规灵敏度较高, 可检测出 10^{-1} 托的压差。

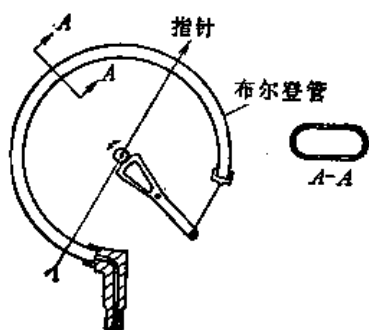


图11-12 布尔登规

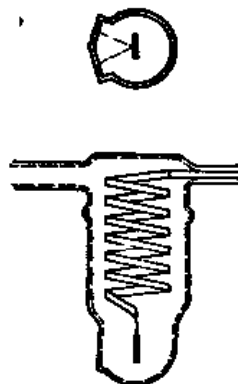


图11-13 石英布尔登规

2. 波纹管规

此规的波纹管一端封死, 另一端与被测系统相连, 当管中压强变化时, 波纹管内外的压强差产生变化, 使得波纹管随之伸缩。规的灵敏度与波纹管的壁厚和形状有关。波纹管

材料的弹性系数随温度变化而变化是此规的主要误差源。

图11-14是用光学方法检测波纹管变形的波纹管规，其测量下限可达 10^{-4} 托。

图11-15是一种用玻璃制作的波纹管规。当波纹管伸缩变化时，毛细管中的水银位置也随之变化。此种结构可提高仪器灵敏度，当压强从较高的真空度变到大气压时，水银位移可达600毫米。此规的缺点是对温度变化太敏感，并要求恒温。

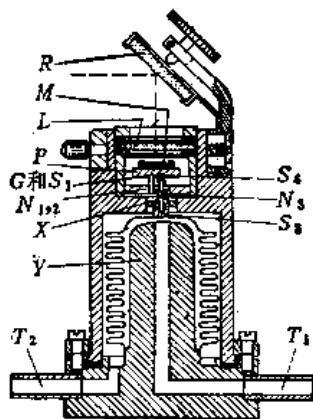


图11-14 光学法检测型波纹管规

R—反射镜；M—平面镜；L—透镜；P—镜座；
G, S₁, S₃~4—槽；N₁, N₂, N₃—尖针；X—
支架；Y—波纹管；T₁, T₂—导管。

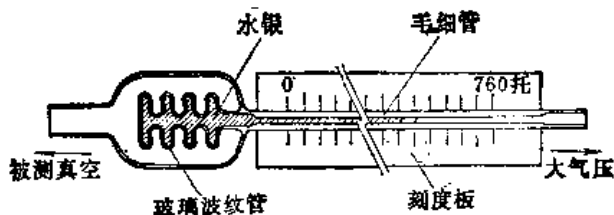


图11-15 具有毛细管结构的波纹管规

3. 薄膜真空规

用金属弹性薄膜把规分隔成两个小室，一侧接被测系统，另一侧作为参考压强室。当压强变化时薄膜随之而变形，其变形量可用光学方法测量，也可转换为电容或电感量的变化用电学方法来测量，还可用薄膜上粘附的应变规来进行测量。

近年来，电容薄膜规有了很大发展，它的优点有：在很宽的量程上（ 10^5 量级）具有很好的精度（0.03~2%），稳定性好（在满刻度为1托时，长期稳定性为 1×10^{-5} 托；短期稳定性为 1×10^{-6} 托），灵敏度与气体种类无关，可测蒸气和腐蚀性气体的压强，结构牢固，使用方便。电容薄膜规在科研和工业领域已被广泛使用。并可作为粗低真空的副标准和传递标准。

为了防止规的薄膜发生蠕变，通常采用零位法测量，即采用静电力补偿压强差，使变形的薄膜重新回到零位置。图11-16是零位法薄膜规的原理图。

采用零位法时的计算公式为：

$$p = KE^2 \quad (11-12)$$

$$K = C_0/d_0 \quad (11-13)$$

式中 E ——补偿电压；

d_0 ——固定电极与薄膜间的距离；

C_0 ——固定电极与薄膜间的静电电容。

一个直径为60毫米、厚度为25微米的不锈钢膜制成的电容薄膜规，其极间电容 $C_0=600$ 微微法，灵敏度为200微微法/托，量程为 $0.4 \sim 10^{-4}$ 托，误差为 $\pm 1\%$ 。

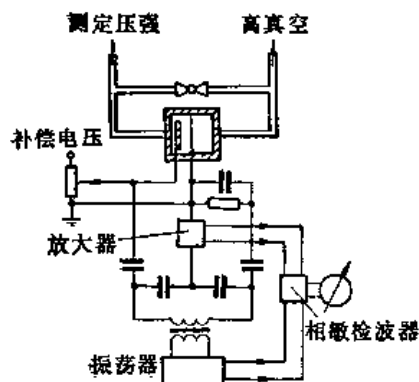


图11-16 零位法薄膜规的原理图