

精密气动计量仪器

成都科技大学 王仁富 编

MQDJLYQ

机械工业出版社

前 言

本书是根据全国高等学校仪器仪表类专业教材编审委员会 1986 年春召开的会议上确定的大纲编写的。

编写本书的主要宗旨是使学生全面掌握精密气动计量仪器和测量装置的设计、使用和精度分析,并给学生开拓高速气体技术在精密仪器设计中的理论应用,使学生有较强的工作能力。本书是精密仪器专业的一门选修课。它较全面地系统讲述精密气动计量仪器原理、设计使用和精度;比较深入地讲述了可压缩和不可压缩气体仪器的设计理论基础和它们对仪器精度的影响,并对新型的气动传感器引射理论作了论述;对国内外几种典型气动仪器系统的计算进行了详细的分析;从使用的角度讲述了各种测量装置和设计方法,以充分体现气动测量的万能性和为用户提供了方便;其它,如对仪器设计实用的相似模拟理论基础、气动信息的两次转换装置、仪器辅助设备的选用和精度分析等也都作了较完整的介绍,并提供了有关的参数。内容包括:绪言,气动量仪的基本知识,气动测量的理论基础,气动测量系统的计算,气动测头,形位和角度的气动测量装置,气动变送器,气动测量的附属设备,气动测量的误差分析。

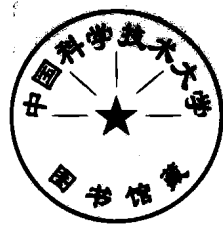
本书除作为精密仪器专业选修课教材外,亦可供仪器系其它专业参考。对于计量仪器,特别是有关的几何量计量仪器的设计单位、研究所和工厂内的工程技术人员来说也都有一定的参考价值。

该书作者系成都科技大学王仁富,合肥工业大学陈宏杰教授担任主审。本书经 1987 年 12 月底在成都召开的精密气动计量仪器教材审稿会审阅通过。参加审稿会的还有:天津大学王春和副教授,陕西机械学院王世凯副教授,国家机械委成都工具研究所华士通高级工程师,成都市科委高级工程师徐仁,成都量具刃具厂工程师林震。本书在编写过程中,得到了成都科技大学精密仪器教研室张凝、黄凤翔副教授的指导和教研室同志的大力支持。不少工厂和科研单位也为编写提供了资料。在此,深表谢意。

由于本书内容涉及面广,加之编者水平有限,书中错误在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编者

1987 年 12 月



目 录

绪论	1
第一章 气动量仪的基本知识	3
§ 1-1 气动精密测量的特点及仪器的优点	3
§ 1-2 气动量仪的度量指标	4
§ 1-3 气动测量方法概述	5
§ 1-4 常用气动量仪简介	10
§ 1-5 气动量仪设计和使用的基本原则	20
第二章 气动测量的理论基础	22
§ 2-1 气体的静态参数和特性	22
§ 2-2 气体的能量特性	24
§ 2-3 理想气体的流动特性	27
§ 2-4 气体在喷管中的流动	31
§ 2-5 喷管流速的计算	34
§ 2-6 喷管流量和最大流量计算	37
§ 2-7 可压缩与不可压缩气体的误差	33
§ 2-8 喷管的变工况和节流	40
§ 2-9 气体自由喷射及引射原理	43
§ 2-10 可压缩气体的特性方程	49
§ 2-11 实际气体的特点和相似理论	52
第三章 气动测量系统的计算	62
§ 3-1 气动测量系统计算的任务和条件	62
§ 3-2 低压式气动量仪测量系统的计算	63
§ 3-3 高压式气动测量系统的计算	69
§ 3-4 气动测量系统的图解法	74
§ 3-5 差动测量系统的计算	76
§ 3-6 流速式气动测量系统的计算	79
§ 3-7 高压薄膜式气动测量系统的计算	82
§ 3-8 波纹管式气动测量系统	86
§ 3-9 流量式气动测量系统的计算	89
第四章 气动测头	95
§ 4-1 气动测头及分类	95
§ 4-2 气动测头的特性和要求	99
§ 4-3 喷嘴挡板机构的几何特性	100
§ 4-4 节流阀形机构的几何特性	107
§ 4-5 抛物线阀形的特性	110
§ 4-6 气动测头参数的选择	114

§ 4-7 气动内径测头的设计	127
§ 4-8 气动外径测头的设计	135
§ 4-9 气动测头的校规	136
§ 4-10 几种特殊的气动测头	138
第五章 形位误差和角度测量装置	143
§ 5-1 形位误差测量装置的要求和类型	143
§ 5-2 直线度气动测量装置	144
§ 5-3 平面度和圆度的气动测量装置	149
§ 5-4 平行度气动测量装置	152
§ 5-5 垂直度的气动测量装置	156
§ 5-6 同轴度气动测量装置	159
§ 5-7 对称度和位置度的气动测量装置	162
§ 5-8 角度的气动测量装置	166
第六章 气动变送器	169
§ 6-1 气动变送器概述	169
§ 6-2 接触式液体变送器	170
§ 6-3 其它形式的变送器	173
§ 6-4 气动弹性元件	179
§ 6-5 电接触机构	188
第七章 气动测量的附属设备	196
§ 7-1 附属设备及其作用	196
§ 7-2 气体减压阀	197
§ 7-3 空气滤清器	198
§ 7-4 气体压力稳压器	201
§ 7-5 稳压器的检查	206
第八章 气动测量的误差分析	208
§ 8-1 气动测量误差分析的任务	208
§ 8-2 气动量仪的本身误差“ Δ_{10} ”	209
§ 8-3 气动测量装置的误差	214
§ 8-4 气动测量的异特性误差	221
§ 8-5 气动测量的条件误差	222
§ 8-6 气动测量总误差	224
参考文献	224

绪 论

一、精密气动计量仪器及其发展史

精密气动计量仪器简称气动量仪,它是利用空气作为介质,根据气体的动、静力学原理,对长度尺寸进行测量的一种比较式仪器,在机械制造行业和其它工业部门的检测工作中应用很广泛。

气动测量是一种较为成熟的精密测试技术,目前仍在继续发展。在古代,我国就有人利用简单的水柱式压力计来了解炉内的燃烧情况。1914年,世界上出现了用喷嘴挡板反映空气压力变化的测量装置。1929年,水柱式气动量仪才开始使用。1932年,有人在气动测量系统中采用了差动气路,致使气动测量的精度和仪器的性能有了较大的突破。而气动测量技术和仪器的发展还是在第二次世界大战时期。当时,由于军事工业的迅速发展,对精密测试技术和仪器精度的要求不断提高,作为制造容易、精度又高的气动量仪当然被广泛采用。与此同时,气动测量技术和气动量仪的研究也相继发展起来。

目前,国外从事气动量仪的制造、研究的机构和公司有:瑞典的约翰逊公司(CEJ)、民主德国的蔡司(Zeiss)、英国的光学仪器公司(OMT)、墨塞尔公司(Mercer)、日本的东京测范公司、东京精密、美国的非得尔(Federal)、苏联的互换局(БЕ)等。

我国在气动测量技术方面,很早就有应用了,但大多处于初始阶段。解放前夕除了几家军事工厂曾使用过一些水柱式气动量仪以外,其它行业很少应用。当然,更谈不上制造和研究了。解放后,我国气动测量技术的应用和气动量仪的制造都有了很大的发展。先后在大连、哈尔滨、成都、上海、三门峡等地建立了量仪制造厂,同时在长春汽车厂,机械委工具研究所和一些高等院校也进行了对精密气动测量技术和多种类型的气动量仪的研究。目前,我国在精密气动测量、气动量仪以及气动控制等各个方面有了较大的发展,已成为一门独立的应用技术。

二、气动量仪的发展特点

气动量仪的发展,从国内外情况来看,有以下一些特点:

(一) 气动量仪产品的发展具有“高”,“差”,“多”的特点

“高”是指气动量仪的工作压力高,即由低压向高压气动量仪发展(仪器工作压力由 $1 \times 10^3 \sim 7 \times 10^5 \text{Pa}$);“差”是指气动测量系统由单气路变为差动气路(或称高反压式);“多”是指仪器适宜做多尺寸测量,现已有56个测点同时使用的。

(二) 气动量仪向扩大测量对象和使用领域发展

通用和专用性的气动量仪产品在逐渐发展。在机械加工中,气动量仪已从单纯孔径和长度尺寸的测量发展到零件的几何形状、相对位置和角度等多种内容的测量。就行业来说:轻化工业中的精密测量也都采用了专用的气动计量仪器。

(三) 气动量仪已由静态转向动、静态都可测量的仪器

由于气动量仪对使用的条件要求不高、抗干扰强、并易于信息的转换,故仪器已发展成为能在生产过程中测量,甚至可直接在加工的机床上,按照被测零件的几何参数要求来控制

机床的加工。

(四) 零件被测信息的转换和处理已采用机、光、电多种原理

由于气动量仪对被测信息的放大(从单级到多级)、转换和处理采用了机、光、电技术,所以综合原理应用的气动量仪品种繁多。如:气动机械式,气动射流式,气动光电式,气动电磁式和气动数字式等。这些应用综合技术的气动量仪在仪器的精度、使用性能等方面都相对原来仪器有了很大的提高。

(五) 气动量仪的成套性

气动量仪的成套性是指仪器本体的通用性和测量装置专用性的总和。

气动量仪本体就其本质来说是一种精密的压力计或流量计。而气动测量装置则是专用性很强的部件(它包括气动测头和测量用的标准件)。

为了确保气动量仪的成套性,扩大仪器的使用性能,目前气动量仪制造厂不仅生产供应气动量仪的本体,而且同时还按用户的需要供应气动测量装置。

(六) 气动自动测量和分选

随着加工工业的自动化和自动线的广泛采用,对批量大的单一性工件(如轴承零件、枪弹和通用标准件等)的测量已采用了气动自动测量仪器。对于在线主动检测中采用气动自动测量仪器也是常见的,特别是在精密切削加工、真空电子管零件的装配,以及轻化工产品生产过程中的检测上应用较多。

在产品和零件的分检中,以气动量仪为核心的气动分选设备也已相继出现。

电子计算机与气动量仪相结合,促使气动测量和仪器的发展更快。

第一章 气动量仪的基本知识

§ 1-1 气动精密测量的特点及仪器的优点

气动测量是利用空气作为介质,由被测长度尺寸的微小变化而引起的空气流量(或压力)的变化来实现测量的。由于测量是利用空气作为中间介质传递被测量和测量仪器之间的信息,因此测量具有不接触测量的特点(即测量头可以不与被测件直接接触)。另一方面,由于空气来源比较方便;空气的压力和流量的改变又很容易转换为其它物理参数的改变。因此气动量仪有如下一些优点:

1. 气动量仪可作接触和非接触测量

气动量仪除了可以作长度参数的接触法测量外,还可作非接触法测量。特别是在被测工件表面不允许接触的情况下,采用气动测量尤为优越。如被测工件是非金属塑性零件、微型薄壁零件、软金属、巴氏合金轴承、电镀层(电子工业中)、涂料层等,采用非接触测量则无测头的磨损和无测量力引起的接触变形的测量误差。

2. 传动比大,分辨率高

计量仪器的传动比和分辨率是仪器的主要技术指标,一般仪器总希望有较高的分辨率和较大的传动比。随着传动比的增大(计量仪器结构变得复杂)后,仪器的稳定性、失真度以及精度等都会受到严重的影响。所以,一般光、机、电计量仪器的传动比大都在 $10\sim 10^4$ 之间。而气动量仪的传动比却常在 $10^3\sim 10^5$ 之间,最高可达数十万倍。其分辨率可达到 $1\sim 0.025\mu\text{m}$,仪器的精度也较高。

3. 可作特殊部位的测量

常用的精密长度计量仪器,对于一般尺寸的测量是比较方便的。但是对于一些特殊零件(如过小过细的零件)和特殊部位尺寸(如深孔、小缝隙等)的测量采用气动测量尤为方便。如 $\phi 1\text{ mm}$ 以下的孔, $\phi 0.5\sim \phi 0.05\text{ mm}$ 的轴和间隙的宽度,电子工业中电子枪阴栅距的测量(内部尺寸测量),常采用气动测量。

4. 气动量仪的测量条件要求不高

精密计量常常需要具有防震设备;为了保证供电品质,则要求有稳压和稳频装置;同时对测量现场的室温、气压、干湿度等也有一定的规定。另一方面,对于有爆炸性和放射性零件(如枪弹和铍罐等)的测量,由于多种原因,常用计量仪器的使用也受到限制。

气动量仪的使用条件则一般不受上述情况的限制,甚至被测零件表面的清洁度较差(如有灰尘和残油膜),测量的结果仍然有较高的可靠性。这是由于气动测量的高速气流具有“自洁”的作用。

5. 气动量仪测量功能的多样化

气动量仪除了具有一般测量功能以外,还可对被测参数进行和、差以及均值的测量。

6. 可进行多参数和多点位同时测量

气动量仪可同时对被测工件的数个参数进行测量,也可就同一参数在不同测位点同时测量。我国生产的 QFP-10 型浮标式气动量仪就可同时测量 2~10 个点位。另外,随着浮标锥管的增多测点的数目还可增加。目前国际上多点位测量其测点数已多达 56 个。

7. 气动量仪具有通用性

气动量仪本体具有通用性,而气动测量装置则具有专一性。

当气动量仪配上各种不同的气动测量装置后可扩大使用范围。如可作长度尺寸、形位、角度参数的测量。

8. 适用于较远距离的测量

由于气动量仪本体与被测零件可通过通气导管相连,因此可作较远距离 (5~10 m) 的测量。

9. 综合多种技术,实现主动测量和自动化检测

空气流量和压力的变化很容易转换成其它物理参数的变化,并可借助于电磁学、电子学、电算技术、射流技术等原理,使仪器既能显示测量结果又能控制加工机床,从而实现主动测量和测量的自动化。

10. 仪器操作使用简便、测量效率高

气动量仪的结构比其它仪器简单、直观,所以使用和操作比较方便,可由一般技术工人操作。

气动量仪本体如配上专用的气动测量装置,对于成批同类零件的测量效率很高。此外,它还常用于自动分选机上,把零件进行分类筛选。

其它:如成本低、维护方便等都是气动量仪的优点。

气动量仪也有不足之处。如仪器反应速度慢 (一般反应最高速度为弹性介质中的声速: 354 m/s), 动态特性较差,仪器长时间工作示值的稳定性差,对空气的清洁、工作压力和温度要求较高。

§ 1-2 气动量仪的度量指标

气动量仪的度量指标是仪器技术性能的重要标志。它说明仪器的工作性能,是选择和使用仪器的依据,也是设计仪器和鉴定产品的标准。气动量仪的度量指标有:刻度值、刻度间距、示值范围、放大倍数、示值误差、示值稳定时间、示值稳定性、测量最大和最小间隙、气耗量等。现分述如下:

(1) 刻度值。指标尺 (度盘) 上每相邻刻度所代表的被测量大小。

由于刻度盘上的刻度值是线性关系 (等刻度间距),考虑到仪器有较大放大倍数和惯性,一般刻度值都取成 $0.02 \sim 5 \mu\text{m}$,且按 1、2、5 的倍数取值。

(2) 刻度间距。指标尺 (刻度盘) 上相邻两刻度线中心间的实际距离。

刻度间距常取在 $0.75 \sim 2.5 \text{ mm}$ 之间。当然,如采用光电技术做后继处理,刻度间距可以减小。

(3) 示值范围。指在仪器刻度装置的范围内能显示被测量变化的范围。

由于气动量仪的放大倍数可调,故示值范围是可变的。一般浮标式气动量仪为 $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$;压力式气动量仪为 $0.001 \sim 0.65 \text{ mm}$ 。

(4) 放大倍数 (灵敏度)。指仪器输出的变动量与引起输出变动的被测值的变动量之比。

一般情况下, 输出量和被测值之间是函数变化关系, 设仪器指示的实际位移量为 Δh , 引起 Δh 变动的被测量 s 的变动量为 Δs , 放大倍数为

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (1-1)$$

式中的 Δh 和 Δs 取绝对值。如示值与被测量之关系为 $h = f(s)$, 则 K 为曲线方程的斜率。如 c 为刻度间距, i 为刻度值, 则式 (1-1) 的微分形式为

$$K = \frac{dh}{ds} = \frac{c}{i} \quad (1-2)$$

(5) 示值分散性。在外界条件不变的情况下, 仪器对同一被测量重复测量时, 测量结果的最大差值称为示值分散性。

一般规定重复测量次数为 5~15 次, 示值的变动量应为 $(0.2 \sim 0.3) \times i$ 。高精度的仪器取下限, 低精度仪器取上限。

(6) 最大和最小测量间隙。最大和最小测量间隙是指在满足一定的精度要求下, 线性测量范围的上下起始值。

气动量仪在测量时对测量间隙的要求, 对接触测量和非接触测量都是一样的。最大和最小测量间隙之差 (即仪器量程) 愈大愈好, 测量间隙起始的绝对值常直接影响仪器的使用范围。一般来说在确保量程的要求下, 最大和最小测量间隙愈大愈好。

(7) 示值的稳定时间。是指信息输入到示值稳定所需的时间。

气动量仪是以气体的压力波来传递信息的。压力波的速度为 345 m/s , 它比光和电场迟缓得多, 而且仪器的工作压力不稳定, 气路有振荡, 机构有惯性, 故仪器示值的稳定时间较长。

一般, 仪器示值的稳定时间要求不大于 2 s , 当仪器用于自动分选机或自动测量机上时, 则应不大于 0.5 s 。

(8) 示值误差。是指示值与被测工件的实际值之差。它由偶然误差和系统误差组成。系统误差消除后, 其残余部分可作偶然误差处理, 故常取

$$\delta = \pm \sigma$$

式中 σ ——均方误差;

δ ——示值误差。

(9) 气耗量。是指在单位时间内, 气动量仪所消耗的空气量。由于压缩空气来源方便, 气动量仪的耗气量又比较少 (大公差和长时间连续测量除外), 故一般不予考虑。

(10) 气源压力变化特性。是指在一定的流量范围内, 输出压力与流量的变化关系一般要求是: 在最大流量时, 输出压力与额定值之差 $\Delta p \leq 5\%$ 。

§ 1-3 气动测量方法概述

一、气动量仪的种类

气动量仪由于侧重点不同, 仪器分类的方法也不一样, 最常用的分类有:

(一) 按测量原理分类

1. 压力式气动量仪

压力式气动量仪是指被测尺寸的变化为仪器测量室压力变化的参变数, 而且压力的变化是被测尺寸变化的单值函数。

2. 流量式气动量仪

流量式气动量仪是指在稳定情况下, 被测尺寸的变化是通过仪器测出的流量(即流入大气中的流量)的变化来反映的。这时测量室的压力始终保持一常数, 而且尺寸变化又是流量变化的单值函数。

显然, 测量仪器的本体是一个反映气体流量多少的容积式流量计。故也有时把流量式气动量仪称为容积式气动量仪。

3. 速度式气动量仪

速度式气动量仪是指在稳定的状态下, 被测尺寸的变化是通过气体流动速度变化的速度计来表示的

$$w = T(s)$$

式中 w ——气体流速。

4. 综合式气动量仪

这种仪器是将气动测量系统与光学、电学、电子学、机械学等原理相结合, 从而提高仪器放大倍数和测量精度。这是目前气动量仪发展的一个方向。

(二) 按量仪的工作压力分类

气动量仪的工作压力是指工作气体在仪器入口处的压力。根据工作压力的不同可分为:

1. 低压式气动量仪

低压式气动量仪的工作压力是 $3 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^4 \text{ Pa}$, 一般用水柱高度进行稳压。由于仪器的空间限制, 故水柱一般高度在 $300 \sim 1500 \text{ mm}$ 之间。

2. 高压式气动量仪

仪器工作压力在 $0.05 \sim 0.4 \text{ MPa}$ 之间, 采用机械式稳压器进行稳压, 其精度低、工作压力波动大。为了减少工作压力不稳定对仪器精度的影响, 常在气动系统中采用差动式气路, 或者用双重串联稳压器的方法加以改进。由于工作压力高, 各种管路和气室的密封性都比低压式气动量仪的要求高。

(三) 按示值的指示方式分类

1. 液柱指示计式量仪

低压式气动量仪多采用水柱高或水银柱高作为指示计。这种仪器适用于中等精度单件或小批量生产的工件测量。

2. 浮标式气动量仪

这是一种用浮标流量计作指示的气动量仪。浮标的相邻处配有刻度尺作为流量的指示值, 这种仪器有多参数和单参数几种。

3. 气动光学量仪

由气动敏感元件将被测信号转换放大后, 经光学杠杆作进一步位移放大, 最终在读数影屏上显示其测量结果。这种仪器放大倍数极大, 分辨率很高, 能扩大使用范围。

4. 气动机械式量仪

长度变化信息由气动敏感元件转换后，再经过机械式的位移放大处理，最后用指针显示出结果。

这种仪器是典型的位移模拟式。成都量具刃具厂生产的高压薄膜式气动量仪就是这种类型。该仪器具有电信号发讯装置，能用于自动测量上。

5. 电表式气动量仪

长度尺寸的变化由气动敏感元件放大成压力或位移的变化，经变换器再转换成电信号（电压、电流），最后由电表读出结果。如气动电感测微仪，压电式气动量仪等。

6. 数字式气动量仪

这种仪器是将气动的测量信号通过数字处理在电子计数器上显示其测量结果。

二、气动测量方法

气动测量的常用方法有：

（一）压力测量法

在图 1-1 中，气源 1 提供恒定压力的气体通过降压气嘴 2（或称进气喷嘴）进入压力气室 3。3 与仪器的测量喷嘴 5 相通，压力气体从测量喷嘴 5 的端面与被测工件 6 的表面间的间隙 s 处排入大气。当被测工件 6 的高度发生变化时， s 即发生改变，引起压力室压力按照一定关系变化，并由压力表 4 指示出 s 的大小。

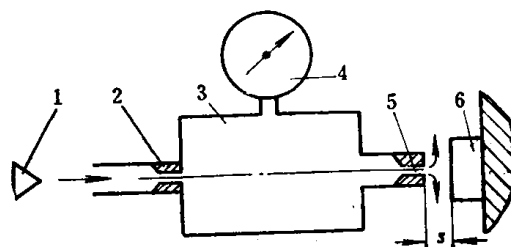


图 1-1

（二）流量测量法

在图 1-2 中，气体由气源 1 经过滤器进入流量计 2，从测量喷嘴 4 和被测工件所组成的间隙 s 排入大气。图中的 6 和 3 分别为仪器的放大倍数和调零的节流阀门。当测量间隙 s 发生变化时，浮子的悬浮高度和流经浮子流量计的空气流量 q_v 与 s 成正比例变化。

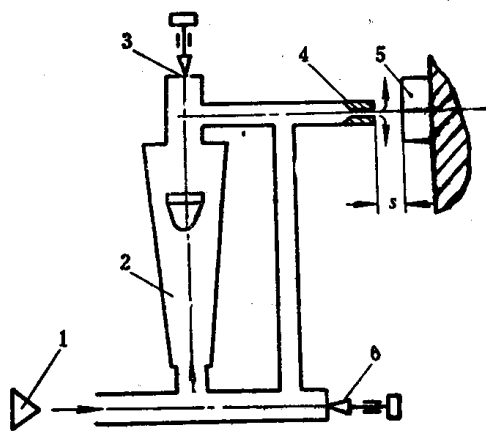


图 1-2

（三）压差测量法

压差测量法是压力测量法的一种改进形式。它的主要特点是：压力计的指示值是压力差。在图 1-3 中，1 为气源，2 是进气喷嘴，4 和 5 是两个气路的出气喷嘴。可用调节阀 6 调节零位。当被测零件尺寸改变时，将引起压力计 3 的上下气室间压力差 ΔP 的改变。

压力差测量法的优点是：可以提高仪器测量的稳定性和精度。

（四）平衡位移测量法

在图 1-4 中，恒压气体经过滤器由进气喷嘴 1 分别进入上下气室 3 和 2（两气室间是弹性膜片）。当被测工件尺寸 s_1 变化时，下气室 2 的压力随之变化，使弹性片在压差作用下发

生位移, 改变了气阻阀 4 的出气面积, 直到上、下气室压力平衡时, 弹性片才静止。图中 5 是测量喷嘴。

由于平衡时的压力与位移的对应, 故这种测量方法具有位移量的平衡过程。设被测长度变化为 s_1 , 而输出的位移为 s_2 , 则它们之间的关系是

$$s_2 = K f(s_1)$$

式中的 K 为无因次系数, 它与仪器的气路结构有关。上式也可表示为

$$p = f(s_1) \quad (1-3)$$

平衡位移测量法从本质上讲仍是压力测量法。

(五) 气流速度测量和换热测量法

图 1-5 a 中, 由气源 1 经处理的恒压气体在文氏管 3 处加速, 由该管前后两断面上的测速计 2 记下流速的变化。当调零阀 4 开度一定时, 被测间隙 s 的改变将引起气体流量的变化, 流过文氏管 3 处的气体速度也发生改变。速度的变化与 s 的变化成比例。设 Δw 为文氏管流速的变化量, 其对应的被测尺寸的变化量为 Δs , 然而流量 q_v 又与式中 w 成对应关系, 故最终的表示式可写成

$$q_v = K f(s) \quad (1-4)$$

式中的 K 是与结构有关的系数。

图 1-5 b 所示的是一种换热测量法。测量电桥一个臂 R_x 的热电阻 2 散失的热量决定于

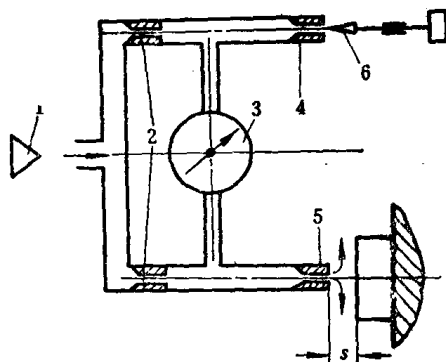


图 1-3

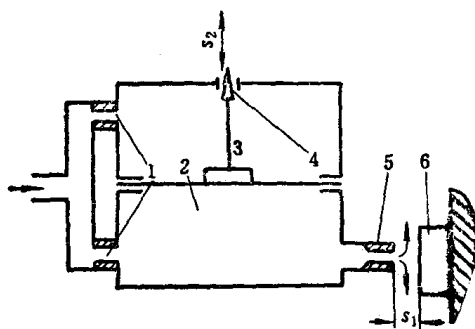


图 1-4

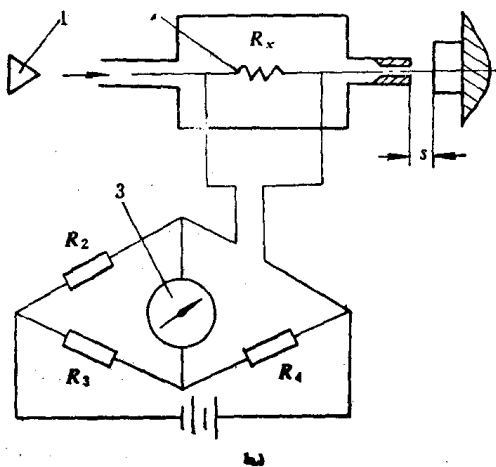
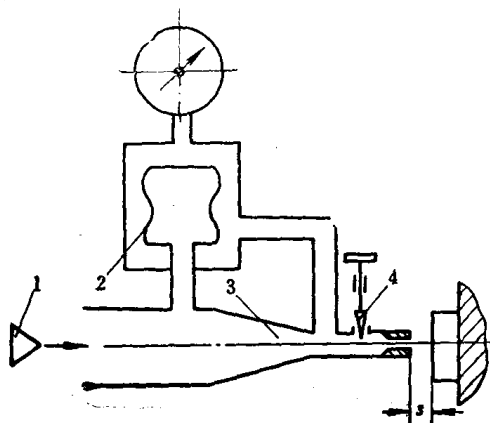


图 1-5

流过它的气体流量 q_m ，而 q_m 值由测量间隙 s 决定，其 s 数值由电桥电流计 3 读出。图中 1 是气源。

(六) 气流喷射测量法

图 1-6 中，气体由气源进入压力室 3，在测量喷嘴 2 处被加速，从测量间隙 s 处排入大气。当测量喷嘴的高速气流流经测压管 1 的出气口时，使该区域形成低压区，测压管内的气体被吸出，并被主气流吸卷、带走。这时测压室中的压力下降。事实表明：测压室 1 的压力下降的变化与 s 成比例，即代表测压室压力的压力计 4 可以直接指出被测间隙 s 的大小。

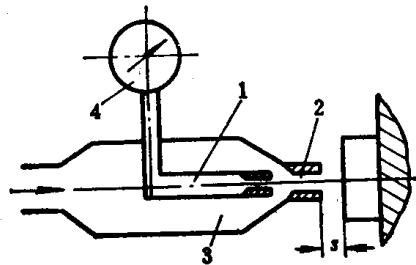


图 1-6

根据实践和理论可以导出指示压力 P 与测量间隙 s 的函数关系。当然此函数关系与前面不同，它的函数区间增大了很多。

(七) 其它测量法

如利用弹性介质声波传递的物理性能进行长度的气动测量（声振测量）等。

图 1-7，它是声振测量法的示意图。由工频发电机 1 发出工频电压，供给电磁振荡器 2 上的电磁芯 3，致使振动膜片 4 以同样频率振动，并输出声波，传向测压室 5 的各方。这种声波在弹性介质中以压力波的形式传递能量和振幅。膜片 6 接收其振动能量后开始振动，但其振动的振幅却随测量室气体的压力而改变。测量喷嘴 11 和

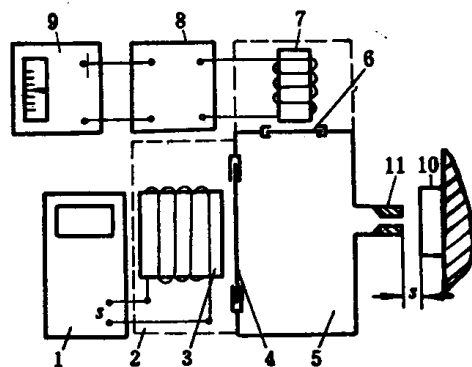


图 1-7

被测表面 10 之间的间隙 s 的大小可使测压室 5 中的压力发生变化。当 s 变化时，膜片 6 的振幅也发生改变，使电磁感应器 7 的感应电势发生变化，变化信号送入放大器 8 处理后，由显示器 9 指示出尺寸 s 的变化大小。显然，这种声振测量法实质上就是压力测量法和电磁转换的综合气动测量法。这种测量方法目前尚处于试用之中，工业中的广泛应用还不多。

另外，还有压差硅敏测量法，此法是采用气压差和硅敏电量转换的测量方法。它是一种气、电综合的测量方法，且结构极为简单。

硅敏元件变送器，以美国霍尔尼威尔公司（Honey-Well）产品“扩散硅压差变送器”为最佳。我国近几年来也有较好产品供应。

差压硅敏测量的过程是：被测量的变化引起硅敏元件上气压的变化，通过半导体变换器直接转换成对应的电信号。再经放大处理后，直接显示出被测尺寸的大小。由于该测量法灵敏度较高，性能好，充分发挥了气、电结合的特点，故我国一些单位正进行研制。

三、测量方法的数学函数式

气动精密的测量方法虽然很多，但总结起来大体上可以分为两种类型：压力测量法和流量测量法。即

$$P = f(s)$$

$$q_m = \phi(s)$$

实际上在设计和调整仪器时往往要引起许多物理参数的变化。压力 P 、流量 q_m 不只是参变量 s 的函数，还与其它物理参数有关，故其数学模型应是

$$P = f(s, A, p_0, T, \alpha, w \dots t) \quad (1-5)$$

$$q_m = \phi(s, A, p_0, T, \alpha, w \dots t) \quad (1-6)$$

式中 A ——喷嘴流通面积；

T ——气体的温度；

p_0 ——仪器的工作压力；

α ——流量系数；

w ——气流速度；

t ——时间。

当自变量中任一参数改变时，输出量 P 和 q_m 将随之变化。其全微分为：

$$dP = \frac{\partial P}{\partial s} ds + \frac{\partial P}{\partial f} df + \frac{\partial P}{\partial p_0} dp_0 + \dots + \frac{\partial P}{\partial t} dt \quad (1-7)$$

$$dq_m = \frac{\partial q_m}{\partial s} ds + \frac{\partial q_m}{\partial f} df + \frac{\partial q_m}{\partial p_0} dp_0 + \dots + \frac{\partial q_m}{\partial t} dt \quad (1-8)$$

在气动量仪中，如要进一步转换成其它形式的物理量时〔如最终输出量为：电流 I （或电压 U ），位移 H （或转角 β ）〕，须将 P 和 q_m 代换，则

$$dI = \frac{\partial I}{\partial P} \times \left(\frac{\partial P}{\partial s} ds + \frac{\partial P}{\partial f} df + \dots + \frac{\partial P}{\partial t} dt \right) \quad (1-9)$$

$$dH = \frac{\partial H}{\partial q_m} \times \left(\frac{\partial q_m}{\partial s} ds + \frac{\partial q_m}{\partial f} df + \dots + \frac{\partial q_m}{\partial t} dt \right) \quad (1-10)$$

式（1-7）、（1-8）、（1-9）、（1-10）都反映了测量方法的因果关系，式中的各项传递函数也相应地反映出各种特性（而这些特性又说明了气动量仪的各种性能）。我们将在以后的章节中分析讨论。

§ 1-4 常用气动量仪简介

为了进一步了解气动量仪，我们从原理上、结构上对一些常用的气动量仪给予介绍和说明。

一、低压式气动量仪

低压式气动量仪大部分采用水柱式。工作压力的水柱高度 H 一般为 300~1500mm。水箱用于稳定工作压力（水柱式稳压器），其高度为 500mm。

图 1-8 表示为低压水柱式气动量仪的原理图。经过滤、初步稳压的清洁空气，经管道 1 进入五只串联的节流喷嘴 2，稳压管 3。如 3 中有多余的空气，则从 3 下端的开口处排出，并从水箱的自由水面逸出。因稳压管底部开口到水箱自由水面的高度是固定的，所以稳压管中的气体压力换算成水柱高为 H 。气体经主喷嘴 4 进入测压气室 5，从测量喷嘴 6 与被测工件 8 的表面之间所构成的间隔 s 处排入大气。测压气室的压力大小由间隔 s 的大小来决定。测压气室又通过连通管 7 与水箱相连，连通管的水柱高度的变化将代表测压室压力的变化。这里的高度是指水柱的表面与水箱的自由水面之差，也是被测工件尺寸的变化。

低压水柱式气动量仪的优缺点：

工件尺寸是用水柱的高度来表示的，所以测量方便、直观、结构简单、成本低、耗气量少。

仪器的工作压力是利用水箱基本恒定的水面高来稳压的。它稳压精度高、结构简单、制造方便，是低压式仪器最常用的装置。

仪器的放大倍数大（最高可达 10^5 倍以上）、分辨率高，宜于作较高精度的测量。

仪器的缺点是：线性指示范围窄，气流速度小，没有“自洁”作用。由于水柱的惯性造成了指示稳定时间长，所以检验效率不高。另外，长时间测量时，因蒸发会造成仪器的重复精度差。

二、高压流速式气动量仪

为了改善低压水柱式气动量仪，长春汽车制造厂生产了 24-240 B 型和类似型号的流速式气动量仪。该仪器的原理和结构参看图 1-9 和图 1-10。测量时被测尺寸的变化将引起测量气室的流速的变化，根据动能与静压势能守恒的原理，U 型水柱压力计将反映出被测尺寸的大小。

(一) 速度仪器的基本性能参数

(1) 工作压力为 $9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$;

(2) 标尺推荐长度 200 mm;

(3) 倍率调整范围：单喷嘴为 3000~12000 倍；双测量喷嘴为 4000~15000 倍；

(4) 在上述示值范围内，示值误差随放大倍数的不同而变化，误差为 1~2.5%；

(5) 重复精度为 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$;

(6) 水柱抖动为 $\pm 1 \text{ mm}$;

(7) 示值稳定时间为 1 s。

(二) 速度仪器的工作原理和结构

在图 1-9 中，经过滤和稳压的压缩空气，从压力室 1 经主喷嘴 2 进入测压室 3，并通过管路 6 和测量喷嘴 7，从测量喷嘴的端面与被测工件表面之间的间隙 s 处排出大气。测量气室是一圆柱孔，且直径很小。入口处（即主喷嘴的出口）气体的速度增高，静压变低。静压变化与间隙 s 变化成一定的函数关系，即

$$H = f(s)$$

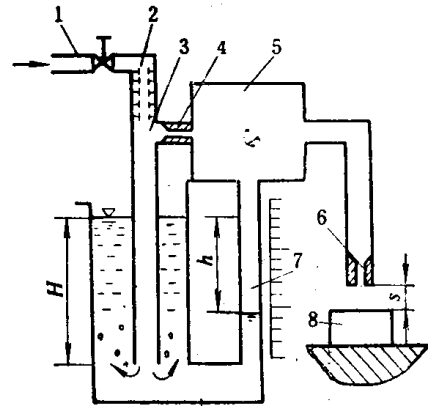


图 1-8

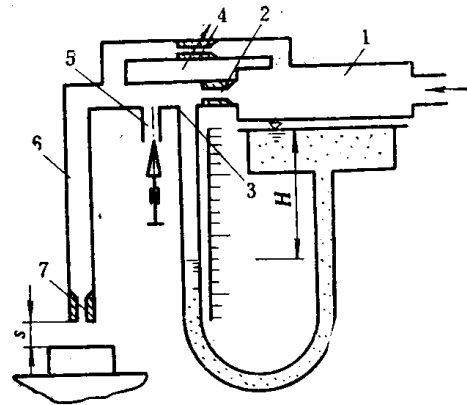


图 1-9

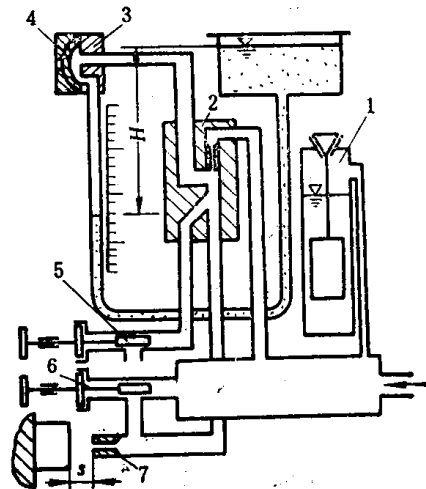


图 1-10

H 的大小可从U型水柱压力计上读出。测量时可通过适当的参数调整,使水柱高 H 在400mm以内变化。

图中5是调节阀,用以调节倍率。它是以旁路气体流量的大小来改变仪器的放大倍数。开口大则倍率低,反之则倍率高。4是零位节流阀,它是旁通阀门。当阀门打开时,水柱 H 下降,反之则 H 上升。

图1-10,它是仪器的主要结构。1是重锤式稳压器,它使进入仪器的气体具有恒定的压力。重锤式稳压器由油缸、杠杆重锤、锥形排气阀三个元件组成。当重锤式稳压器不工作时,重锤处于油缸最低位置。工作时,在工作气压作用下,重锤上、下端面的作用力不相等,则重锤就向上浮起,同时改变了锥形阀的开口面积。当施于其上的重力、浮力和压差力处于平衡时,重锤稳定在一定的高度上,锥形气阀的开度也一定。

2是用有机玻璃制成的测压室,它有测量气道通孔、倍率调节通孔、压力计通孔和进气通孔,这些孔的相对位置和其表面的加工质量都有一定的要求,它对于仪器的精度和测量示值的稳定性关系极大。

3是由排水道和橡胶膜4组成的隔水阀。当测量喷嘴全开时,压力计气道内为负压,这时橡胶膜在压差的作用下封死了通往测压室的气体,这样就防止了压力计中的水进入测压室内。5是倍率调节旋钮,6是零位调节旋钮,7是测量喷嘴。

(三) 速度仪器的优缺点

24-240B型流速式气动量仪较低压水柱式量仪有如下优点:

- (1) 示值范围大(0.15~0.35mm),测量条件有较大改善;
- (2) 可以在一定范围内任意进行倍率调整,以适应被测工件不同测量精度的要求;
- (3) 零位调节方便,初始测量间隙大,测量适应性强;
- (4) 结构简单,造价低廉,调整、维护较方便;
- (5) 仪器可拼合作多尺寸同时测量,可进行电触点控制,实现主动测量。

缺点是:稳定精度差,水柱的抖动和蒸发有待解决。

三、高压汞柱式气动量仪

高压汞柱式气动量仪,目前应用极少,但在一些特殊要求下仍需使用。现简介如下:

图1-11表示为高压汞柱式气动量仪的工作原理图。

它的工作过程是:0.3~0.6MPa的高压空气经过清洁过滤处理后,经机械式稳压器1稳压后输出稳定压力 p_0 在0.1~0.2MPa范围内的气体,在气室2中被分成两路。一路经主喷嘴5进入测压室7;另一路则进入预压室13。测压室7与汞压力计的下部和测量喷嘴6相通,空气则从测量喷嘴和被测工件表面之间的间隙 s 处排入大气。3是预压室的进气喷嘴。

预压室13分别与汞压力计上端和预压阀4相连,气体可从有开度的预压阀4泄入大气中。

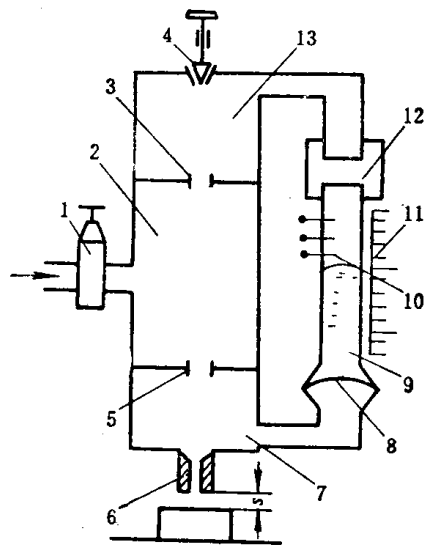


图 1-11

仪器示值的零位是由4的开度来调整。当零位调定后,根据稳定流动可以认为预压室内压力是恒定的。

若零件尺寸变小,则间隙 s 增大,测量室7中的压力下降,作用在汞柱上、下表面的压力差变大,使汞柱向下移动,由标尺11指示出示值。反之,若被测尺寸变大时,汞柱向上移动,标尺的示值就增加。当然,汞压计可以相反地与预压室和测压室相连,这时指示的数字恰好相反。

由于采用了高压测量,故使测量范围变大。但由于是机械式稳压器,故稳压精度较差。

为克服机械式稳压器不能较好地稳定有波动的工作压力,它采用差动式气动测量系统。这种系统是把经过稳压器后的压缩空气分别通入汞压计的上下两端,当气压发生波动时,作用在汞压计上下表面压力变化大小相等,方向相反,故使工作压力波动得到减少或较满意的补偿。

预压阀4除了有调零的作用外,还可以改变量程的大小。仪器的防溢瓶12是防止汞液的上溢。乳胶膜8是隔离汞液的。由于胶膜面积大,刚性小,故它的灵敏性好,微小的压力变化都能使汞柱9移动。11是汞柱移动的标尺。

该仪器的放大倍数为1000~50000倍。重复性也较好,它与水柱式气动量仪相差甚微。仪器有三个电接触点10,可控制界限性信号,适于主动测量。

汞柱式气动量仪的缺点是:对人体有危害,汞的氧化还可产生误动作。

图1-12,它是另一种斜管汞柱式气动量仪的原理图。

该仪器的标尺由铅垂改为倾斜,刻度可进行再细分以提高分辨率,同时还可以组合成多参数测量。

四、浮标式气动量仪

图1-13是QFP型浮标式气动量仪的工作原理图。图1-14是该仪器的结构示意图。结构图中,1是滤气器,2是开关,3是稳压器,4为锥形玻璃管,5是浮标,6是分气塞,7是倍率阀,8是零位阀,9是测压气管。

由图1-13可知该仪器的工作过程是:气体经滤气器1、气阀2、稳压器3后,以 $0.7 \times 10^5 \text{Pa}$ 的恒压状态分两路流向测量喷嘴8。

气体一路向上进入带有内锥度的玻璃管4,在气流的作用下,把管内由质量较轻的物质制成的浮标5悬浮在某一高度 H 上,空气从管内壁与浮标之间的间隙流过。一部分从节流控制阀6逸出到大气中,另一部分则通过测量喷嘴8与被测零件表面之间的间隙 s 断面流入大气中。

另一路的空气经倍率调节阀7,同样从间隙 s 断面处流入大气中。

仪器采用并联气路系统提高了示值的稳定性(可使测量间隙 s 的瞬时变化或其它原因使工作压力的波动对测量所产生的误差减小)。

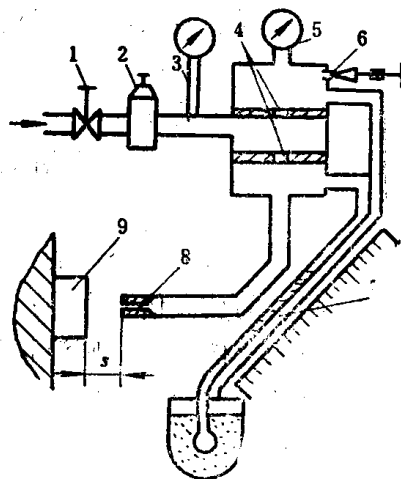


图 1-12

- 1—进气阀 2—稳压器 3—工作压力计
4—主喷嘴 5—预压室压力计 6—调零阀
7—汞柱压力计 8—测量喷嘴 9—被测零件