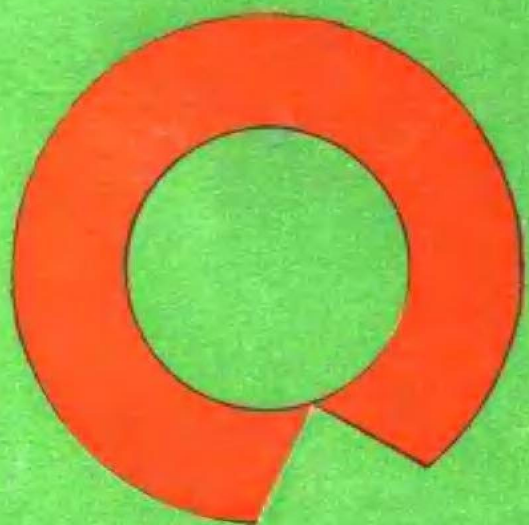


# 气动量仪

QI DONG LIANG YI

刘玉初 编著



机械工业出版社

本书阐述了气动量仪的理论基础,分析了气动量仪的工作原理和特性,介绍了各种型式气动量仪的典型结构和部件,气动量仪在精密测试中的应用,包括各种用途的气动测头的设计方法和量仪的调整、使用、维修方法,以及气动量仪在主动测量、连续测量和自动检验分选机中的应用,还对在不同条件下应用气动量仪能达到的精度作了分析。

本书可供从事气动测量的研究、设计、制造的技术人员,使用气动量仪的检验人员,气动量仪的维修人员和质量管理人员使用,也可供大专院校精密计量仪器专业的师生参考。

## 气 动 量 仪

刘玉初 编著

\*

责任编辑:贺箬龢 责任校对:丁丽丽  
封面设计:田淑文 版式设计:张世琴  
责任印制:王国光

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 39·字数 958千字  
1991年6月北京第一版·1991年6月北京第一次印刷

印数 0,001—2,450·定价:33.00元

\*

ISBN 7-111-01841-9/TH·315

## 前 言

当前，能在生产现场高精度、高效率地精密测量各种几何量的气动量仪正在机械行业中广泛地迅速地推广使用，人们迫切地希望能配合出版一本全面介绍气动量仪的书籍，为此作者根据长期从事气动量仪的研究、设计、制造和应用的经验编写了本书。

本书共分四篇。第一篇阐述气动量仪的理论基础；第二篇介绍气动量仪的工作原理和特性，重点介绍流量式和压力式气动量仪的原理和特性，其中压力式气动量仪的间隙压力特性方程是作者的研究成果，比现在普遍引用的方程更符合实际情况，更便于应用，对于气动变换器的特性也作了详尽的分析，这是设计各种气动测头的基础；第三篇介绍气动量仪的结构和部件，除了介绍常见的浮标式和压力式气动量仪的结构外，对气动量仪的主要部件空气稳压器也进行了详细的分析；第四篇介绍气动量仪的应用，包括静态测量中的应用和在主动测量、连续测量、自动检验分选机中的应用，以及气动测量的误差分析。

本书如果能对想了解气动量仪以及研究、设计、制造和应用气动量仪的读者有所帮助，将是作者最大的欣慰。但作者受工作面的局限，书中难免有不当之处，敬请读者不吝指正。

本书承合肥工业大学费业泰、陈宏杰教授审校，并提出许多宝贵意见。在编写过程中还得到关心本书的有关人士的多方协作，在此一并致以诚挚的谢意。

# 目 录

## 前言

## 第一篇 气动量仪的理论基础

第一章 概论	1
一、气动量仪的分类	1
二、气动量仪的特点	3
三、气动量仪的用途	4
四、气动量仪的发展简史	5
第二章 空气的物理性质和状态变化	7
一、空气的组成与物理性质	7
二、空气的状态变化	12
(一) 理想气体的状态变化	12
(二) 压缩空气及其湿含量	14
第三章 气动测量的流体动力学基础	18
一、流量与有效断面	18
二、连续性方程与流量不变方程	19
(一) 流体的连续性方程	19
(二) 流量不变方程	20
三、气体伯努里方程	20
(一) 不可压缩气体的伯努里方程	20
(二) 可压缩气体的伯努里方程	21
四、气体各状态参数与流速的关系	22
(一) 音速与马赫数	22
(二) 滞止值与临界值	23
(三) 用不可压缩伯努里方程计算的误差	25
(四) 状态参数与气流形状及流速的关系	26
五、气体通过节流孔的流动	28
(一) 由滞止状态流过节流孔的气流的流动	29
(二) 气流在具有节流孔的管道内的流动	31
六、气阻、气容及气容的充放气	35
七、圆管流动的压力损失	37
(一) 层流、紊流及其判别数	37

(二) 圆管流动的沿程压力损失	37
(三) 管道的局部阻力损失	38

## 第二篇 气动量仪的工作原理和特性

第四章 气动量仪的基本气路	43
一、流量式气动量仪的基本气路	43
二、压力式气动量仪的基本气路及其特性	44
(一) 背压式气路及其特性	44
(二) 卷吸背压式气路及其特性	69
(三) 差压式气路及其特性	72
(四) 带功率放大器的背压气路	74
三、流速式气动量仪的基本气路及其特性	75
四、真空式气动量仪的基本气路及其特性	76
五、反射式气动测量气路及其特性	80
六、利用状态变化方程测量容积的基本气路	82
第五章 气动量仪的工作原理	84
一、浮标式气动量仪的工作原理	84
二、文丘利管式气动量仪的工作原理	90
三、低压水柱式气动量仪的工作原理	94
四、差压水柱式气动量仪的工作原理	96
五、水银柱式气动量仪的工作原理	100
六、薄膜式气动量仪的工作原理	102
七、薄膜式气动放大器的工作原理	106
八、差压波纹管式气动量仪的工作原理	109
九、差压膜盒式气动量仪的工作原理	115
十、带功率放大器及振摆演算器的气动量仪的工作原理	117
十一、膜盒式气动放大器的工作原理	120
十二、背压式或差压式电动气动量仪的工作原理	121

(一) 差动变压器式电动气动量仪 .....	121	五、卷吸背压水柱式气动量仪的结构 .....	189
(二) 电容式电动气动量仪 .....	124	六、气动放大器的结构 .....	194
(三) 电磁式电动气动量仪 .....	125	七、波纹管式气动量仪的结构 .....	196
(四) 差动变压器式随动测量气动量仪 .....	127	八、钢板式气动量仪的结构 .....	199
十三、卷吸背压水柱式气动量仪的工作原理 .....	128	九、烟支圆周测量用水柱式气动量仪的结构 .....	200
十四、卷吸背压指针式气动量仪的工作原理 .....	130	十、AA 气电转换器的结构 .....	202
十五、流速式气动量仪的工作原理 .....	133	十一、气动量仪部件及通用件结构 .....	204
(一) 热线流速式气动量仪 .....	133	第八章 气动量仪的性能检定和调修 .....	210
(二) 引射压力指示型流速式气动量仪 .....	134	一、气动量仪的性能指标 .....	210
十六、利用气体状态变化测量容积的测量系统的工作原理 .....	135	(一) 规定气动量仪性能指标的前提 .....	210
第六章 气动传感器的静特性 .....	143	(二) 气动量仪性能指标的术语 .....	210
一、喷嘴挡板的静特性 .....	143	(三) 气动量仪的性能指标 .....	213
(一) 喷嘴挡板机构的形成 .....	143	二、气动量仪的性能检定 .....	219
(二) 平行喷嘴挡板机构的静特性 .....	143	(一) 检定条件 .....	219
(三) 不平行喷嘴挡板机构的静特性 .....	145	(二) 检定工具 .....	219
(四) 不等曲率喷嘴挡板机构的静特性 .....	146	(三) 检定方法 .....	223
(五) 喷嘴挡板机构的压力分布 .....	150	三、气动量仪的调整、修理和维护 .....	228
二、节流孔型长度-流量变换器的静特性 .....	151	(一) 浮标式气动量仪 .....	228
(一) 小孔和环孔的流量特性 .....	151	(二) 波纹管式气动量仪 .....	242
(二) 矩形孔的流量特性 .....	152	(三) 薄膜式气动量仪 .....	244
(三) 锥阀的流量-长度变换特性 .....	152	(四) 24-240 B 水柱式气动量仪 .....	245
(四) 球阀的流量-长度变换特性 .....	154	(五) 膜盒式气动放大器 .....	248
三、轴销挡板式喷嘴的静特性 .....	155	第九章 气动量仪的设计计算 .....	252
四、气动传感器及其组合传感器的参数选择依据 .....	155	一、浮标式气动量仪的设计计算 .....	252
(一) 喷嘴挡板机构的参数选择依据 .....	156	(一) 确定参数的依据 .....	252
(二) 阀式传感器的参数选择依据 .....	161	(二) 锥度玻璃管的设计计算 .....	255
三篇 气动量仪的结构和部件		二、压力式气动量仪的设计 .....	271
第七章 气动量仪的结构及分析 .....	169	(一) 气路形式的确定 .....	271
一、QFP 型浮标式气动量仪的结构 .....	169	(二) 参数的选择原则 .....	271
二、拼合式气动量仪的结构 .....	183	第十章 空气稳压器 .....	285
三、加长型浮标式气动量仪的结构 .....	187	一、空气稳压器的分类和工作原理 .....	285
四、薄膜式气动量仪的结构 .....	187	(一) 空气稳压器的分类 .....	285
		(二) 水管式稳压器和重锤式稳压器的工作原理 .....	285
		(三) 机械式单级空气稳压器的工作原理 .....	288
		(四) 输入背压式二级机械稳压器的原理 .....	289
		(五) 输出背压式二级机械稳压器的原理 .....	292
		(六) 排气控制式机械稳压器的原理 .....	294

# VI

二、空气稳压器的特性和检测方法	295
(一) 空气稳压器的性能指标	295
(二) 空气稳压器性能的检测方法	297
三、空气稳压器的结构与分析	300
(一) 水管式稳压器	300
(二) 油缸重锤式空气稳压器的结构	302
(三) 机械式单级空气稳压器的结构与分析	302
(四) 输入背压式二级机械稳压器的结构与分析	309
(五) 输出背压式二级机械稳压器的结构与分析	312
(六) 排气控制式机械稳压器的结构与分析	314
四、定值器	315
第十一章 空气的净化与气动量仪的配管	318
一、气动测量对气源的要求	318
二、空气的净化	319
三、空气压缩机后的净化设备	325
四、气动量仪的配管	330

## 第四篇 气动量仪的应用

### 第十二章 气动量仪在静态测试中的应用

一、气动测头和校对规的结构	331
(一) 气动轴向测头和高度校对规	331
(二) 气动旁向测头	336
(三) 气动内径测头和内径校对规	336
(四) 气动外径测头和外径校对柱	350
(五) 槽宽、厚度气动测头和校对规	358
(六) 圆锥角气动测头	363
(七) 形状误差气动测头	366
(八) 位置误差气动测头	373
二、气动测头及其校对规的参数选择	381
(一) 气动测头参数的选择原则	381
(二) 气动轴向测头及其校对规的参数选择	383
(三) 气动内径测头及其校对规的参数选择	387
(四) 气动外径测头及其校对规的	

参数选择	391
------	-----

(五) 槽宽和厚度气动测头及其校对规的参数选择	394
(六) 圆锥角气动测头及其校对规的参数选择	394
(七) 形状误差气动测头及其校对规的参数选择	399
(八) 位置误差气动测头及其校对规的参数选择	405
三、气动测头的设计要点和设计程序	424
四、气动测头的加工和装调	437
(一) 气动测头的技术要求和加工工艺	437
(二) 气动测头的装调	439
五、气动量仪在使用时的调整	444
(一) 用气动轴向测头测量高度时的调整	444
(二) 用气动内径测头测量孔径时的调整	446
(三) 用气动外径测头测量外径时的调整	447
(四) 用圆锥角气动测头测量圆锥角时的调整	447
(五) 测量形状误差时的调整	450
(六) 测量位置误差时的调整	453
六、气动测量	461
(一) 内径测量	461
(二) 外径测量	471
(三) 槽宽测量	473
(四) 圆锥角测量	473
(五) 形状误差测量	476
(六) 位置误差测量	482
(七) 表面粗糙度气动测量方法的探讨	488
(八) 其它气动测量	499
第十三章 自动测量用气动传感器	505
一、水银触点传感器	506
(一) 背压式触点水银传感器	506
(二) 差压式双触点水银传感器	507
(三) 多信号差压式水银传感器	508
(四) 水银的清洗方法	510
二、电触点传感器	511
(一) 压力式气动量仪用电触点传	

感器 .....	511	(二) 自动检验分选机的组成 .....	544
(二) A-D气电转换器 .....	513	二、气动自动检验分选机 .....	546
三、气压传感器 .....	515	(一) 针阀体中孔自动分选机 .....	546
(一) 双膜片式气压传感器 .....	515	(二) 活塞自动检验分选机 .....	550
(二) 射流传感器 .....	515	(三) 轴套自动检验分选机 .....	557
(三) 波纹管背压式传感器 .....	516	第十六章 气动连续测量 .....	563
四、气电转换传感器 .....	517	一、板状工件的连续测量 .....	563
(一) 膜盒式气电转换器 .....	519	二、线径的连续测量 .....	565
(二) 硅力敏式气电转换器 .....	520	第十七章 气动测量的误差分析 .....	568
五、光电传感器 .....	520	一、量仪本体的误差分析 .....	568
(一) 浮标光电传感器 .....	520	(一) 浮标式气动量仪的误差分析 .....	568
(二) 差压光电传感器 .....	522	(二) 压力式气动量仪的误差分析 .....	570
六、气动组合传感器 .....	523	二、测头和测量装置的误差分析 .....	582
(一) 气压触点传感器 .....	523	(一) 标准件误差 .....	582
(二) 喷嘴挡板气电传感器 .....	524	(二) 相对位置误差 .....	582
第十四章 气动主动测量 .....	525	(三) 测头间隙选择不当引起的非 线性误差 .....	598
一、气动主动测量装置和主动测量仪 的分类 .....	525	(四) 气动测头附加阻力损失引起的 误差 .....	599
二、加工中主动测量装置 .....	531	(五) 接触式气动测头的原理误差 .....	604
(一) 外圆磨削主动测量装置 .....	531	(六) 流量法测量小孔孔径的非线 性误差 .....	609
(二) 内圆磨削主动测量装置 .....	532	三、测量环境引起的误差 .....	611
(三) 珩磨主动测量装置 .....	533	(一) 工件与标准件材质不同引起 的误差 .....	611
(四) 配磨测量系统 .....	537	(二) 测头热变形引起的误差 .....	611
(五) 主动测量的注意事项 .....	537	(三) 温度变化对气动量仪的影响 .....	611
三、加工后主动测量——自动补调 .....	538	(四) 由人手温度引起的被测工件 尺寸的变化 .....	611
(一) 磨加工自动补调 .....	538	参考文献 .....	614
(二) 车、镗加工自动补调 .....	542		
第十五章 气动自动检验分选机 .....	544		
一、自动检验分选机的分类和组成 .....	544		
1. 自动检验分选机的分类 .....	544		

# 第一篇 气动量仪的理论基础

## 第一章 概 论

气动量仪是以空气作为介质，利用空气流动时的特性进行几何量测量的仪器。它将尺寸等几何量的变化量转换成流量压力等的变化量，然后在流量计、压力计或其它指示器上进行指示和读数。

气动量仪至今只有 50 多年的历史，由于它具有—般量仪所没有的一系列的优点，如性能稳定，工作可靠，结构简单，易于操作，气动传感器很小，以及可以实现非接触式测量或测量力很小等，因而在机械制造各行业获得了愈来愈广泛的应用。

### 一、气动量仪的分类

#### 1. 按工作原理分类

按工作原理不同可以分为：

- (1) 流量式气动量仪
- (2) 压力式气动量仪
  - 1) 背压式气动量仪
  - 2) 差压式气动量仪
- (3) 流速式气动量仪
- (4) 真空式气动量仪

#### 2. 按气动量仪的工作压力大小分类

从量仪的稳压器输出的空气压力称为量仪的工作压力。按工作压力大小可以分为：

- (1) 低压式气动量仪  
工作压力  $p_c \leq 0.01 \text{ MPa} (p_c \leq 0.1 \text{ kgf/cm}^2) \ominus$ 。
- (2) 中压式气动量仪  
工作压力的范围为  $0.01 \text{ MPa} < p_c \leq 0.05 \text{ MPa} (0.1 \text{ kgf/cm}^2 < p_c \leq 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$ 。
- (3) 高压式气动量仪  
工作压力的范围为  $0.05 \text{ MPa} < p_c \leq 0.15 \text{ MPa} (0.5 \text{ kgf/cm}^2 < p_c \leq 1.5 \text{ kgf/cm}^2)$ 。
- (4) 超高压式气动量仪  
工作压力  $p_c > 0.15 \text{ MPa} (p_c > 1.5 \text{ kgf/cm}^2)$ 。

#### 3. 按感受压力的方式分类

按感受压力的方式可以分为：

---

$\ominus 1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.0980665 \text{ MPa} \approx 0.1 \text{ MPa}$ 。



### (1) 液柱式气动量仪

- 1) 水柱式气动量仪
- 2) 水银柱式气动量仪

### (2) 弹性元件式气动量仪

- 1) 膜片式气动量仪
- 2) 膜盒式气动量仪
- 3) 波纹管式气动量仪
- 4) 巴登管式气动量仪
- 5) 膜盒组式气动量仪

### 4. 按指示方式分类

#### (1) 柱式气动量仪

这类量仪的刻度是直的而且是垂直放置的，如液柱式气动量仪及浮标式气动量仪等。

#### (2) 指针式气动量仪

这类量仪由指针指示读数，刻度尺一般是表盘式的。

### 5. 按测量参数的多少分类

- (1) 单参数气动量仪
- (2) 多参数气动量仪

指针式气动量仪一般都是单参数量仪；多参数气动量仪基本上是柱式气动量仪，所以多参数气动量仪常称作多管量仪，如两管、三管气动量仪等。

### 6. 按量仪的组合性分类

根据量仪的可组合性，可以分为：

#### (1) 固定式量仪

这类量仪的管数是固定的、不能变更的。

#### (2) 拼合式量仪

这类量仪在结构上可以实现各种需要管数的自由组合。

### 7. 按放大级数分类

按气动量仪的放大级数，可以分为：

#### (1) 单级放大气动量仪

这类量仪只有一级放大，如一般的浮标式气动量仪，只有一级锥度玻璃管-浮标指示放大。

#### (2) 多级放大气动量仪

这类量仪具有两级以上的放大环节。一般压力式气动量仪大多属于此类量仪。

### 8. 按多级放大的工作原理分类

多级放大气动量仪，其第二级及其后的放大环节常采用机械、气动、电感、电容等原理，因此可以分为：

#### (1) 气动机械式气动量仪

这类量仪的第二级及其后环节采用机械放大原理。

#### (2) 多级气动放大式气动量仪

这类量仪的第二级及其后环节均采用气动放大原理。

### (3) 气动电感式气动量仪

这类量仪的第二级及其后环节采用电感放大原理。

### (4) 气动电容式气动量仪

这类量仪的第二级及其后环节采用电容放大原理。

### (5) 气动光学式气动量仪

这类量仪的第二级采用光学放大原理。

## 9. 按气动量仪的用途分类

按气动量仪的用途可以分为：

### (1) 精密测量用气动量仪

### (2) 自动测量用气动量仪

## 二、气动量仪的特点

气动量仪与其它种类的量仪相比，具有一系列的优点。

1. 气动量仪倍率高，一般可以达到几千倍至几万倍。如浮标式气动量仪的倍率系列为1000、2000、5000、10000、20000、40000倍，因而刻度间隔大，指示清晰，读数方便，适合于精密测量。

2. 应用气动量仪的气动测量属于相对测量，只要相应地提高标准件的精度，气动测量就可以获得很高的测量精度。尤其是测量直线性、圆度等形状误差时，在测量过程中，只需读出指示的变化量，就可以获得很高的精度。

3. 气动量仪的传感器，如喷嘴挡板极为简单，尺寸极小，特别适合于用其它量仪很难测量的小孔( $\phi 1\text{mm}$ 左右)、深孔(几米)、窄槽(1mm)等参数的测量。

4. 气动量仪可以实现非接触测量，不会划伤工件表面，测量力很小(0.05~1N或5~100gf)，适合于表面粗糙度较低的光洁表面以及如铝、橡胶、胶木、胶片等低硬度材料工件的测量。

5. 中压工作压力以上的气动量仪能吹去附于工件表面的油、水和灰尘，具有自洁作用，能提高测量精度。

6. 有些气动量仪在工作时，由于没有可动部件，无摩擦和磨损，因而没有回程误差，精度保持性好。

7. 气动测头与工件之间的间隙较大，因而不象一般塞规那样易于磨损，使用寿命较长。

8. 使用气动量仪测量时个人误差很小，不同的测量人员，不管有没有经验，都可以获得相同的测量值。

9. 气动量仪操作简单，倍率、零位调整非常方便，初学者很快即可掌握。

10. 气动量仪的结构一般比较简单，维修比较方便。

11. 除较高倍率的气动量仪之外，对周围环境的要求不高，适用于生产现场使用。

12. 稳定性好，倍率和位移的漂移甚小。

13. 气动测头和气动量仪是分开的，因而适当加长连接管的长度，可以方便地测量大型、重型工件上的某个部位的尺寸，还能适用于如高温、放射性等苛刻条件下的测量。

14. 适合于多参数的测量, 设计合适的测头可以快速地一次测量很多参数。
  15. 可以方便地测量用一般方法较难测量的参数。如直线度、同轴度、垂直度等。
  16. 可以很方便地实现各种自动测量。
- 但气动量仪也具有一些不足之处。如:

1. 离不开压缩空气, 而气源则不如电源那样方便;
2. 一般来说响应特性不如电动量仪高。

### 三、气动量仪的用途

气动量仪的用途极为广泛, 可以用于精密测试, 也可以用于自动测量。

#### 1. 精密测试

气动量仪与测头一般是分开的, 两者之间用软管连接起来。作为“量仪”, 应该包括从测头到指示部的一个完整的测量链, 但一般所说的“气动量仪”, 实际上仅仅只是“气动量仪指示部”。它与气动测头在一起才能构成一台完整的“量仪”。

由于气动量仪的特点、生产和使用的需要, 气动量仪指示部与测头在设计、生产、使用、更换等方面都是独立的。习惯上把气动量仪指示部就称为气动量仪了。

气动测头将被测参数的变化转换成空气流量、压力等参数的变化, 在气动量仪上进行指示, 因此只要是能利用气动测头转换成流量、压力等变化的所有参数, 都可以用气动量仪进行测量。例如厚度、孔径、轴径、槽宽、槽深、配合间隙等尺寸参数, 圆度、平面度等形状参数, 孔面垂直度、两孔或两轴平行度, 孔(轴)心距等位置参数以及能转换成长度量如容积、重量、力等其它的物理量。所以说, 如果掌握了各种气动量仪的原理和特点以及气动测头的设计方法, 几乎所有的参数都是可以用气动量仪来进行测量的。

用于精密测量的量仪的种类很多, 都具有各自的特点, 根据气动量仪的特点, 主要用于如下几个方面。

(1) 孔径、槽宽的测量, 特别是深孔, 小孔直径、窄槽宽度的测量。如直径  $\phi 10\text{mm}$ 、长度  $1\text{m}$  的深孔的孔径,  $\phi 3\sim 1\text{mm}$  的小孔径,  $3\sim 1\text{mm}$  的槽宽等的测量, 用一般的测量方法是非常困难, 甚至不可能的, 而用气动测量则比较方便。

(2) 非接触式测量。如表面粗糙度低, 表面不允许有微小划痕的工件的测量, 用气动测量, 可以完全不接触工件表面。

(3) 铝、塑料、橡胶等软材料的尺寸测量。这些材料由于表面硬度低, 易于变形, 用一般方法测量, 测量精度很低, 用气动测量因测力很小, 可以获得较高精度。

(4) 大批量生产中精密零件的尺寸测量。一般气动测头只适合于测量一种工件某个尺寸, 即测头是专用的, 因此特别适合于大批量生产, 可以获得高效、高精度的良好效果。

(5) 多参数同时测量。如发动机的活塞可以同时测量出销孔径、裙部直径、槽底径等, 活塞销可以同时测量轴向三个截面的直径, 非常方便。

(6) 形状误差的测量。如孔轴线的直线度测量, 用一般方法非常困难, 用气动测量则非常方便。

(7) 很多用一般测量方法非常困难的位置精度的测量。如孔心距的测量, 孔的平行度测量, 气动测量比一般方法效率要高几十倍, 其它如孔轴线与端面的垂直度, 同轴孔的同轴度

等等，用气动测量都是极其方便的。

(8) 大型零件上的某些参数的精密测量。如箱体上的孔径测量，这种零件不可能搬到精密的仪器上进行测量，而气动测量时，因气动测头可以远离气动量仪，所以测量十分方便。

(9) 配合间隙的测量。配合间隙一般是分别测量出孔和轴的尺寸来确定的。由于受测量精度的限制，常常不能满足要求。用气动测量可以使高压空气(或其它气体)流过配合间隙，并测出其流量，从而获知其间隙值。这种综合测量方法的精度和效率都比较高。

(10) 容积、漏气量、密封性、通气性等用一般测量方法比较困难，如利用空气状态的变化规律和流动特性进行测量，则很方便。

## 2. 自动测量

自动测量，包括自动检验、自动分选、主动测量、自动补调等方面。由于自动测量需要自动控制或干预工艺过程，一般来说，用电动量仪较为合适。但是电动量仪多数情况下只适用于外尺寸等一般易于测量的参数，对于诸如小孔磨削主动测量，内孔珩磨主动测量、孔类零件的自动分选和自动检测，则仍以气动测量最为合适。另外如各种形状、位置误差的自动检测，也以气动测量见长。即使是一般的外圆磨削主动测量，使用气动测量也具有高精度、高效率、低成本和易于实现等优点。

## 四、气动量仪的发展简史

气动量仪是在 19 世纪 20 年代末出现的。在西方，1928 年，法国人梅纳逊(Menneson)在比利时王国申请了气动量仪专利。而苏联则声称在 1926 年之前已开始采用气动测量方法了。最早的气动量仪是低压水柱式的，它被用于汽车零部件的检测，如气缸体的孔径和喷油嘴的测量。以后逐渐在德国、法国等国得到了普遍的应用。

美国最早也使用低压水柱气动量仪，鉴于这种量仪在使用上有种种缺点，于是进行了中、高压气动量仪的研究。随着高性能的中高压空气稳压器的出现，终于从 1940 年前后开始进行高压量仪的实用研究和开发，随后作为生产现场用量仪在美国得到了推广和普及。从此在美国，除了实验室之外，低压水柱量仪基本上不再被应用了。特别是在 1941 年 Sheffield 公司研制成了浮标式气动量仪，由于它具有许多优点，很快得到普及，对于美国的机械工业的发展作出了很大的贡献。在多参数测量中，大多采用这种气动量仪。

随后，Federal 公司研制成差压式指针型气动量仪。这种量仪具有发讯号电接点，可以用于自动测量。

1946 年 Sheffield 公司研制成含有气电转换器等测量元件的大规格的自动检验机和自动分选机。与福特汽车公司合作完成了缸体、曲轴等大量生产用的测量装置。之后还有不少公司如 Taft-Peirce 公司、Deaborn 公司、Boice 公司等陆续研制成各种高压式气动量仪。

在欧洲，很多国家如英国、法国、捷克斯洛伐克、瑞典等在水柱式气动量仪的基础上研制成了各种中、高压的指针型气动量仪。广泛地应用于机械制造业，发挥了气动量仪独特的性能。

日本是在 1937 年左右引进气动量仪的。首先应用于轴承行业和柴油机偶件的生产中。至 1945 年前尚未大量推广。1950 年受美国的影响开始对高压式气动量仪进行研究，1953 年开始生产高压式气动量仪，从此首先应用于轴承、汽车行业，然后迅速地推广到机械制造各行

业。

我国 50 年代初期,从苏联引入了水柱式气动量仪。用来测量汽车和拖拉机的精密偶件。1958 年哈尔滨量具刃具厂开始生产低压水柱式气动量仪,并开始研制浮标式气动量仪。成都量具刃具厂 60 年代初开始生产薄膜式气动量仪,该量仪带有两个电接点,主要用于主动测量。1960 年前后,上海柴油机厂、洛阳拖拉机厂等单位联合研制成功了利用差压式薄膜传感器和斜板发讯系统发讯的针阀体中孔自动分选机,分选精度可达  $2\ \mu\text{m}$ ,效率约为 10 件/min。1965 年前后,大连气动量仪厂在大连工学院的协助下开始生产倾斜管式水银柱气动量仪,后来改型为立式水银柱气动量仪,但因各种原因未能持续生产。总之在 1966 年之前,我国的气动量仪仅处于研制摸索的阶段,水平还比较低。

1966 年,中原量仪厂开始生产从日本株式会社东京精密引进的浮标式气动量仪、气动放大器和各种相应的气动测头和测量装置,开始了我国气动量仪的新的—页。

目前气动量仪已为汽车、拖拉机、飞机、纺织机械、兵工、机床、工具、油泵油嘴、等各机械行业普遍采用。但大都限于内、外径等简单参数的测量。在自动测量方面,气动测量也已出现不少成功的例子,但还很不普遍。

随着我国机械工业在以提高产品质量为中心的技术改造中不断发展,气动量仪必然会以其独特的性能,继续在精密测量和自动测量方面作出其应有的贡献。

## 第二章 空气的物理性质和状态变化

### 一、空气的组成与物理性质

#### 1. 空气的组成

自然界的空气是由氮(N<sub>2</sub>)、氧(O<sub>2</sub>)、氩(Ar)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)以及其它一些气体混合而成的。一般空气中,还含有若干水蒸气。我们称含有水蒸气的空气为湿空气,称不含水蒸气的空气为干空气。

经分析测定,在标准状态(温度为0°C,大气压力为0.101325MPa(760mmHg),重力加速度为980.665cm/s<sup>2</sup>)下,干空气的组成如表2-1所列。

表 2-1 干空气的组成

成 分	氮 (N <sub>2</sub> )	氧 (O <sub>2</sub> )	氩 (Ar)	二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	其 它
体积百分比 (%)	78.09	20.95	0.93	0.03	
重量百分比 (%)	75.5	23.1	1.28	0.045	0.075

#### 2. 空气的物理性质

##### (1) 压力(压强)

单位面积上受到的气体的作用力称为气体压力强度,简称压强,但在工程上人们习惯称为压力,用符号  $p$  表示。我国法定计量单位规定为 Pa,工程上常用的单位为 kgf/cm<sup>2</sup>、mmHg 等。常用各单位及其换算关系列于表 2-2。

表 2-2 各种压力单位及换算表

帕斯卡 (Pa)	巴 (bar)	标准大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)	千克力每平方厘米 (kgf/cm <sup>2</sup> )	工程大气压 (at)	毫米水柱 (mmH <sub>2</sub> O) ①
10 <sup>5</sup>	1	0.986923	750.06	1.01972	1.01972	10197.2
101325	1.01325	1	760	1.03323	1.03323	10330
9.80665 × 10 <sup>4</sup>	0.980665	0.967841	735.56	1	1	10000

注:英制压力单位:1psi=11bf/in<sup>2</sup>=6.895 × 10<sup>3</sup>Pa。

① 通常还常用Aq或W.C来作为水柱的代号。

压力的表示方法有两种。一种是以绝对真空作基准测得的压力,称为绝对压力,用于学术上以及真空表等方面;另一种是以大气压作为基准测量得的压力,称为表压。

表压( $p_a$ )与绝对压力( $p_a$ )的关系如下:

$$p_a = p_a + p_B \quad (2-1)$$

式中  $p_B$ ——大气压力。

在工程上,一般是以表压来表示压力的。除特殊情况下,如不注明的话,就可以认为是

表压。如果为了避免发生混淆，也可以特别注明是绝对压还是表压。在国际上，一般绝对压用符号“a”，表压用符号“ü”或“G”来标记。例如：

1 ata 表示绝对压为 1 个气压；

1 atü 表示表压为 1 个气压；

1 kgf/cm<sup>2</sup>G 表示表压为 1 kgf/cm<sup>2</sup> 压力。

当以某个压力为基准来表示压力时，称这个压力为差压。因此差压只与这两个压力之差有关，与两者的绝对值无关。上述表压即某压力与大气压的差压。

### (2) 密度与重度

气体的密度是指单位体积内所含气体的质量，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-2)$$

式中  $m$  —— 气体的质量(kg)；

$V$  —— 气体的容积(m<sup>3</sup>)；

$\rho$  —— 气体的密度(kg/m<sup>3</sup>)。

单位体积内气体受到的重力为气体的重度，用下式表示：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-3)$$

式中  $G$  —— 气体的重力(N)；

$V$  —— 气体的体积(m<sup>3</sup>)；

$\gamma$  —— 气体的重度(N/m<sup>3</sup>)。

对于非均质气体，容器中各点的密度和重度不同，可以用点密度  $\rho = \frac{dm}{dV}$  和点重度  $\gamma = \frac{dG}{dV}$  来描述。

密度与重度的关系如下式：

$$\gamma = \rho g \quad (2-4)$$

式中  $g$  —— 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)。

空气的密度及重度与温度和压力有关。表 2-3 为大气压 0.101 MPa(760 mmHg) 下干空气在不同温度下的密度和重度值。

表 2-3 干空气的密度和重度值

温 度 (°C)	-20	0	10	20	40	60	80	100
密 度 (kg/m <sup>3</sup> )	1.393	1.295	1.246	1.207	1.118	1.059	0.991	0.942
重 度 (N/m <sup>3</sup> )	13.656	12.684	12.164	11.831	10.987	10.399	9.712	9.221

### (3) 压缩性和膨胀性

气体在压力的作用下，能改变自身体积大小的特性称为压缩性。当温度变化时，气体能改变自身体积的特性称为膨胀性。

气体的压缩性可以用压缩系数来表示:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (2-5)$$

式中  $\kappa$ ——压缩系数(Pa);

$V$ ——体积( $m^3$ );

$dV$ ——体积增量( $m^3$ );

$dp$ ——压力增量(Pa)。

有时也可用弹性系数  $E_0$  来衡量压缩性。弹性系数是压缩系数的倒数, 即

$$E_0 = -V \frac{dp}{dV} \quad (2-6)$$

式中符号意义同上,  $E_0$  的单位为 Pa。

在标准大气压下, 气体的弹性系数  $E_0 = 0.0981$  MPa, 而一般水的弹性系数约为 1912.95 MPa。由此可见, 气体的压缩性约为水的 19500 倍。气体在发生压缩和膨胀时密度和重度也要随之改变。计算时必须加以注意。

但气体处于压力和强度变化很小的场合时, 气体的压缩量和膨胀量很小, 因此重度就可以认为是一个常数。同时当流动气体的流速远小于音速(340m/s)时气体的重度变化也很小。如气体的流速为 50m/s 时, 密度只变化 1%。这时, 我们可以将气体看成为不可压缩的。

#### (4) 粘性

气体是极易流动的。在外力作用下, 气体便会沿外力作用方向流动。在流动过程中气体相邻各层次之间要产生相对运动, 这就会在气体内部产生内摩擦切应力来阻碍这种相对运动。这种特性称为气体的粘性。

切应力  $\tau$  可以表达成下式:

$$\tau_{xz} = \mu \frac{dv_x}{dz} \quad (2-7)$$

式中  $\frac{dv_x}{dz}$ ——垂直于流动方向的速度梯度;

$\mu$ ——[动力]粘度。

粘度  $\mu$  愈大, 产生的对抗气体运动的切应力  $\tau_{xz}$  愈大, 气体的粘性就愈大, 其单位为 Pa·s。

粘度与密度之比值称为运动粘度, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-8)$$

式中  $\nu$ ——运动粘度( $m^2/s$ )。

空气的粘度  $\mu$  受压力变化的影响极小, 但随温度的增加而增大, 粘度  $\mu$  与温度  $t$  的关系如下:

$$\mu = 0.01702(1 + 0.00329t + 0.0000017t^2) \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (2-9)$$

不同温度下空气的粘度值列于表 2-4。

#### (5) 理想气体与实际气体

气体的粘性与其它流体相比是比较小的, 但还是具有粘性的。为了研究计算的方便, 我们忽略掉气体的粘性的影响, 认为完全不存在粘性, 这样气体称为理想气体。而具有粘性的



表 2-4 不同温度下空气的粘度

温 度 (°C)	-20	0	10	20	30	40	50
$\mu$ (Pa·s)	$1.623 \times 10^{-2}$	$1.736 \times 10^{-2}$	$1.793 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$	$1.97 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-2}$
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$11.42 \times 10^{-6}$	$13.15 \times 10^{-6}$	$14.23 \times 10^{-6}$	$15.04 \times 10^{-6}$	$16.32 \times 10^{-6}$	$17.28 \times 10^{-6}$	$18.45 \times 10^{-6}$

真正的气体，称为实际气体。

一般来说利用理想气体进行研究和计算，其结果与实际气体的差异是很小的。但是在某些情况下，如气体流过狭缝、小孔时，就必须考虑粘性的影响，而把它作为实际气体来研究。

### 3. 湿空气的性质

自然界的空气中都是含有一定数量的水蒸气的，所以一般地说都是湿空气。表示气体中水蒸气含量的程度称为湿度。

湿度有如下几种表示方法。

#### (1) 水蒸气分压

气体中含有的水蒸气分压力，与其它气体的存在没有关系，所以可以用来表示湿度的大小。

水蒸气分压  $e$  的单位按我国法定计量单位为 Pa，以前一般为 mmHg 和 mbar。

#### (2) 绝对湿度

单位体积中含有的水蒸气的质量，称为湿空气的绝对湿度。一般常用每立方米中含有的水蒸气的克数来表示，即用 g/m<sup>3</sup> 来表示。

绝对湿度值 (g/m<sup>3</sup>) 与水蒸气分压值 (mmHg) 是基本相等的，所以常用水蒸气分压值来代替绝对湿度值。

#### (3) 相对湿度

单位体积的气体中所含的水蒸气的质量  $D$  与同一温度下单位体积中的饱和水蒸气的质量  $D_m$  之比称为该温度下的相对湿度  $H$ ，用百分比表示，即

$$H = \frac{D}{D_m} \times 100\% \quad (2-10)$$

因为  $D/D_m$  与同温度下气体中的水蒸气分压  $e$  和同温度下饱和水蒸气压力  $e_s$  之比  $e/e_s$  是相等的，所以式(2-10)也可以用下式表示：

$$H = \frac{e}{e_s} \times 100\% \quad (2-11)$$

相对湿度比绝对湿度用得更为普遍，如果仅说湿度的话，一般就是指的相对湿度。一般湿空气的相对湿度在 0~1 之间变化。通常情况下，空气的相对湿度在 (60~70)% 范围内，人感到比较舒适。

相对湿度  $H$  与绝对湿度  $D$  的关系如下：

$$D = \frac{H}{100} \frac{140.6 e_s}{1 + 0.00367 t} \quad (2-12)$$

式中  $t$ ——温度(°C)；