

浮标式气动量仪 测量装置设计

刘玉初 编著

机械工业出版社

0.2

本书介绍了浮标式气动量仪的工作原理、性能指标，分析了长度-流量变换的静特性；详细阐述了长度、角度及表面形状和位置误差气动测量装置的测量原理、结构形式、参数选择原则和设计要点，以及定标方法和标准件的设计；还介绍了气动测量的误差分析方法。

本书供量具设计人员使用，也可供计量检验人员和有关高等院校师生参考。

浮标式气动量仪测量装置设计

刘玉初 编著

*

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 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{1}{2}$ · 字数 184 千字

1981 年 6 月北京第一版 · 1981 年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,300 · 定价 0.88 元

*

统一书号：15033·4782

目 录

概述	1
第一章 浮标式气动量仪	4
第一节 浮标式气动量仪的工作原理	4
一、锥度玻璃管-浮标系统的工作原理	5
二、调整工作原理	13
1. 倍率调整原理	13
2. 零位调整原理	15
第二节 气动量仪本体的主要性能指标	16
一、最高倍率 K_{max}	16
二、最大测量间隙 S_{maxG}	18
三、示值范围 Y_G	21
四、主要精度指标	22
第二章 长度-流量变换的静特性	24
第一节 喷嘴挡板机构的静特性	24
一、平行喷嘴挡板机构的静特性	24
1. 圆喷嘴	25
2. 矩形喷嘴	27
二、不平行喷嘴挡板机构的静特性	28
三、不等曲率喷嘴挡板机构的静特性	29
1. 圆喷嘴	29
2. 矩形喷嘴	32
四、喷嘴挡板机构的压力分布	35
1. 单个喷嘴的压力分布	35
2. 整体喷嘴的压力分布	36
第二节 节流孔型长度-流量变换的静特性	37
一、小孔及环孔的流量特性	37

IV

二、锥阀的长度-流量变换特性	38
三、球阀的长度-流量变换特性	40
第三章 各种变换器的参数选择原则	42
第一节 喷嘴挡板机构的参数选择原则	42
一、单向喷嘴参数选择原则	43
(一) 单向单喷嘴参数选择原则	43
1. 平行喷嘴挡板机构	43
2. 不平行喷嘴挡板机构	45
3. 不等曲率喷嘴挡板机构	45
(二) 单向多喷嘴参数选择原则	46
二、对向喷嘴参数选择原则	47
1. 平行喷嘴挡板机构	47
2. 不等曲率喷嘴挡板机构	48
三、三向喷嘴参数选择原则	49
四、十字四喷嘴参数选择原则	51
第二节 阀式变换器的参数选择原则	52
一、小孔流量法	52
二、环孔流量法	54
三、锥阀参数选择原则	56
四、球阀参数选择原则	57
第三节 气动测头的附加阻力损失	58
一、阻力损失的概念	58
二、气动测头附加阻力损失的计算	59
三、气动测头附加阻力损失对气动测量的影响	62
四、气动测头附加阻力损失对量仪示值误差和连接管 管径的影响	67
第四章 长度尺寸的气动测量	68
第一节 高度和深度的气动测量	68
一、非接触式高度气动测头	68

二、接触式高度气动测头	70
三、非接触式深度气动测头	72
四、接触式深度气动测头	73
1. 球喷嘴接触式深度气动测头	73
2. 滑动杆接触式深度气动测头	74
第二节 厚度和槽宽的气动测量	75
一、非接触式厚度气动测头	75
二、非接触式槽宽气动测头	78
三、接触式厚度(槽宽)气动测头	81
第三节 内径的气动测量	83
一、小孔和环孔流量法	83
二、非接触式内径气动测头	84
1. 气动放大器及小喷嘴内径气动测头	84
2. 一般内径气动测头	89
3. 大内径气动测头	92
4. 深孔内径气动测头	93
5. 平均内径气动测头	95
6. 矩形喷嘴内径气动测头	96
三、接触式内径气动测头	96
1. 片簧杠杆式内径气动测头	97
2. 球喷嘴式内径气动测头	98
四、内径气动测量的定标	99
五、气动内径测头的设计要点	99
第四节 外径的气动测量	110
一、对向喷嘴非接触式外径气动测头	110
(一) 环形外径气动测头	110
(二) 卡规式外径气动测头	113
(三) 定标及标准件	116
二、接触式外径气动测量装置	117
三、环孔流量法	117

VI

第五节 大公差的气动测量	119
一、分段测量法	121
二、机械杠杆接触式气动测头	121
三、锥阀接触式气动测头	122
四、接力式喷嘴挡板气动测头	123
第五章 表面形状和位置误差的气动测量	125
第一节 表面形状误差的气动测量	125
一、不直度的气动测量	125
(一) 轴心线不直度的气动测量	125
1. 轴心线不直度误差的定义	125
2. 孔轴心线不直度气动测头	125
3. 圆柱体轴心线不直度气动测量装置	133
(二) 圆柱体母线和平面上直线不直度的气动测量	136
1. 圆柱体母线和平面上直线不直度误差的定义	136
2. 圆柱体母线和平面上直线不直度气动测量装置	136
二、不平度的气动测量	139
(一) 不平度误差的定义	139
(二) 不平度的气动测量装置	139
三、不圆度的气动测量	140
(一) 不圆度误差的定义	140
(二) 棱圆度气动测头	140
1. 轴向气动测头	140
2. 正三棱圆度气动测头	140
3. 正五棱圆度气动测头	142
四、椭圆度的气动测量	142
(一) 椭圆度误差的定义	142
(二) 椭圆度的气动测量	142
五、不柱度的气动测量	143

(一) 不柱度误差的定义	143
(二) 不柱度的气动测量	143
第二节 表面位置误差的气动测量	145
一、不平行度的气动测量	145
(一) 平面对平面不平行度的气动测量	145
1. 平面对平面不平行度误差的定义	145
2. 平面对平面不平行度的气动测量	145
(二) 轴心线对平面不平行度的气动测量	148
1. 轴心线对平面不平行度误差的定义	148
2. 轴心线对平面不平行度气动测量装置	149
(三) 轴心线对轴心线不平行度的气动测量	154
1. 轴心线对轴心线不平行度误差的定义	154
2. 轴心线对轴心线不平行度气动测量装置	154
二、不垂直度的气动测量	164
(一) 平面对平面不垂直度的气动测量	164
1. 平面对平面不垂直度误差的定义	164
2. 平面对平面不垂直度气动测量装置	164
(二) 直线对平面不垂直度的气动测量	168
1. 直线对平面不垂直度误差的定义	168
2. 轴心线对平面不垂直度气动测头	168
(三) 平面对直线不垂直度的气动测量	173
1. 平面对直线不垂直度误差的定义	173
2. 平面对轴心线不垂直度气动测量装置	173
(四) 轴心线对轴心线不垂直度的气动测量	175
1. 轴心线对轴心线不垂直度误差的定义	175
2. 轴心线对轴心线不垂直度气动测量装置	176
三、不同轴度的气动测量	177
(一) 不同轴度误差的定义	178
(二) 两个及两个以上孔不同轴度气动测头	178

Ⅶ

1. 以空气静压定心原理设计的孔不同轴度气动测头	178
2. 以对向喷嘴原理设计的孔不同轴度气动测头	183
3. 以一孔为基准测量另一孔的不同轴度气动测头	190
4. 以一孔母线作基准测量另一孔母线的不同轴度 气动测头	192
(三) 孔与外圆不同轴度气动测量装置	193
四、不对称度的气动测量	196
(一) 不对称度误差的定义	196
(二) 不对称度气动测量装置	196
1. 以基准对称中心线定位的不对称度气动测量装置	196
2. 不能以基准对称中心面定位的不对称度气动 测量装置	199
五、位移度的气动测量	201
(一) 直线(轴心线)位移度的气动测量	201
1. 直线(轴心线)位移度误差的定义	201
2. 孔心距气动测量装置	201
3. 孔面距气动测量装置	205
4. 垂直相交轴线偏离量气动测量装置	209
(二) 平面(对称中心面)位移度的气动测量	210
1. 平面位移度误差的定义	210
2. 槽面距气动测量装置	210
3. 槽间距气动测量装置	210
第六章 角度的气动测量	212
一、平面间角度气动测量装置	212
二、大锥体锥角气动测量装置	213
(一) 锥孔角度气动测头	213
(二) 锥体角度气动测量装置	216
三、小锥孔角度气动测头	217
第七章 气动测量的误差分析	219

第一节 量仪本体的误差分析	219
一、气源压力波动引起的误差	219
二、量仪示值的非线性误差	226
三、浮标的瞬时窜动误差	226
四、长时间不稳定性误差	226
第二节 气动测量装置的误差分析	227
一、标准件误差	227
二、气动测头位置误差	228
(一) 气动测头位置误差的定义及分类	228
(二) 气动测头位置误差产生的原因及计算	230
(三) 气动测头位置误差的消除方法	246
三、接触式气动测头的原理误差	249
(一) 原理误差值的计算	249
(二) 原理误差的性质和消除方法	257
四、流量法测量小孔孔径的非线性误差	257
第三节 测量条件误差	261
一、温度误差	261
二、读数误差	261

概 述

气动量仪是以空气作为介质，利用空气流动时的特性来实现机械量的测量的。气动量仪的种类很多，按工作原理可分为流量式和压力式两类。

流量式气动量仪，是把被测量的变化量转换成空气流量的变化量，然后通过玻璃管中的浮标进行指示，通常称作浮标式气动量仪。

压力式气动量仪，是把被测量的变化量转换成空气压力的变化量，然后用各种形式的压力计进行指示。根据压力指示方式的不同，可以分为液柱式和指针式两种。液柱式气动量仪又可分为水柱式和水银柱式两种。指针式气动量仪，一般是以弹性元件感受压力变化，然后通过齿轮副传递到指针进行指示。常用的弹性元件有薄膜、膜盒、波纹管、包登管等。

压力式气动量仪中，以单独气路中的压力值进行测量的称为背压式气动量仪。为了减少稳压器输出压力的波动即稳压误差对测量精度的影响，常常用两个气路组成复合气路，以两个气路的压力差进行测量。这种气动量仪称作差压式气动量仪。

气动量仪按工作压力的大小还可以分为低压式（0.2公斤/厘米²以下）、中压式（0.2~0.5公斤/厘米²）、高压式（0.5~1.5公斤/厘米²）和超高压式（1.5公斤/厘米²以上）等。

随着工业生产的发展，气动量仪的应用日益广泛。它具有下列特点：

1. 应用范围广泛

气动量仪配合各种气动传感器（即气动测头），可以测量长度量、角度量及表面形状和位置误差。气动测头结构简单，可以设计得很小（如喷嘴挡板机构），适用于小尺寸、内尺寸（如小孔和深孔）的测量。

气动测量易于实现非接触测量，对于不允许划伤表面的零件及薄壁、软金属材料等易变形零件特别适用。

气动量仪对环境要求不高，不需要恒温条件，对振动不敏感，不怕冷却液、油污影响。气动量仪可用作远距离测量，可以同时进行多参数测量。所以易于实现主动测量和自动测量。

气动量仪还可以测量漏气量和可转换成长度量变化的其他一些量。

2. 测量精度高

气动量仪很容易获得 5000~10000 倍或更高的倍率。倍率高，刻度值小，测量精度高，指示清晰，读数方便。

气动量仪测量链短，产生误差的环节少。气动测量属于相对测量，可消除量仪本体制造误差所引起的部分系统误差。气动测量对操作者的技术要求低，个人误差小。

3. 结构简单，操作方便

在气动量仪中，浮标式气动量仪尚有下列特点：

（1）没有摩擦和磨损，使用寿命长；

（2）没有回程误差；

（3）示值稳定，反应灵敏；

（4）指示尺是立式的，管与管之间的距离较小，所以，在多管测量的场合或多参数测量时，读数直观、方便。

但是气动量仪需配备有一定压力的压缩空气气源，测量

时，需配备专用的气动测头，故一般常用于大批量生产和生产自动线中。此外，气动量仪的示值范围较小，反应速度比电动量仪稍低，不大适用于频率较高的测量。

气动量仪由量仪本体和测头或测量装置两部分构成。量仪本体包括空气过滤器（滤去压缩空气中含有的脏物、水和油份）、空气稳压器（将压力减压和稳定在 0.7 公斤/厘米²）、锥度玻璃管浮标系统（放大和指示）和倍率、零位调节四部分。气动测头将被测参数的变化转换成空气流量的变化，因此实质上它是一种转换器。气动测头一般分为非接触式和接触式两种。非接触式气动测头在测量时，测量面与被测工件表面不接触，它的设计原理是喷嘴挡板机构和小孔流量这两种转换器；接触式气动测头在测量时，测子必须与被测工件相接触，它的设计原理是喷嘴挡板机构、锥阀、球阀等转换器。

量仪本体和气动测头之间是用软管连接起来的。测量不同工件和不同的参数，可以用同一个量仪本体而更换相应的测头或测量装置。测头或测量装置介于量仪本体与被测工件之间，是一个十分重要的环节。能否测量各种不同工件和各种参数，将取决于能否设计、制造出合适的气动测头或气动测量装置。

气动测头或气动测量装置，既要满足气动量仪本体参数的要求，又必须满足被测工件的各种不同的特点与要求。

设计气动测头和气动测量装置，不仅要有度量学和量仪设计方面的知识，还需要对气动量仪本体的工作原理、性能，测头或测量装置的要求、设计原理，各种气动测头的参数选择原则、一般的结构以及气动测量的误差分析等有全面的了解。

第一章 浮标式气动量仪

第一节 浮标式气动量仪的工作原理

目前在工程中实际应用的气动量仪有浮标式（流量式）和压力式气动量仪两种。一般来说，浮标式气动量仪基本上被用作静态测量，压力式气动量仪由于易于发出信号，常被用作自动测量。首先我们对浮标式气动量仪本体作必要的简单介绍，因为对本体的了解是设计各种气动测量装置所必不可少的。

图 1-1 所示是浮标式气动量仪的气路原理图。

在结构上，图中从 2 至 8 各零附件组成一个整体，叫做

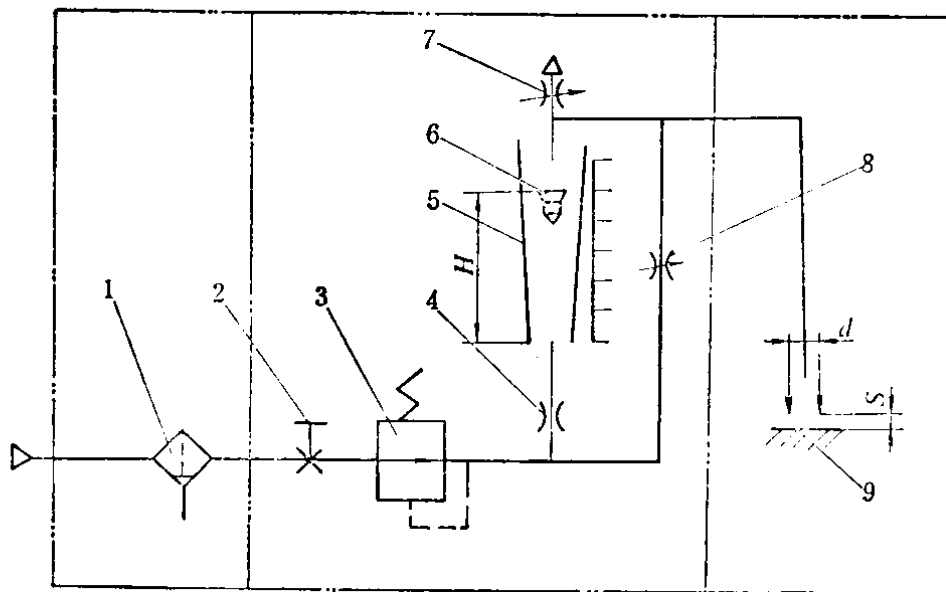


图1-1 浮标式气动量仪气路原理图

- 1—过滤器 2—手动开关 3—精密减压阀(或称稳压器) 4—固定节流孔
5—锥度玻璃管 6—浮标 7—零位调整阀 8—倍率调整阀 9—测量装置

气动量仪本体。过滤器 1 及其连接管作为量仪本体的附件，而第 9 部分自成一体，叫测头或由测头等组成测量装置（图 1-1 所示为喷嘴挡板机构）。测头和气动量仪本体之间是用软管连接起来的。为了叙述方便，我们把本体及其附件合起来称为气动量仪本体部，这样我们就可以认为气动量仪是由量仪本体部和气动测量装置两部分所构成。

一般来说，量仪本体部是相对固定不变的，而测量装置部分在结构、形式、尺寸等方面则随着被测工件参数的不同而各不相同。

气动量仪是一种专用性很强且适应性或称万能性也很强的一种量仪。说它专用性强是指一种测头只能量一种特定的工件参数；说它适应性强是指一台气动量仪本体可以和很多种气动测量装置相连接，因而可以测量各种工件的各种参数。

从本质上来说，测头是一种变换器，它把被测工件的参数变化变换成空气流量的变化，而气动量仪本体部是一个有一定范围的精密流量计。测量时，被测参数的变化经测头变换成流量的变化，然后经气动量仪本体放大和指示出来。

作为变换器，气动测头的变换方式不止喷嘴挡板机构一种。即使是喷嘴挡板机构，喷嘴的形状和大小也有区别。为了统一气动量仪本体的性能，我们确定测头为 2 毫米喷嘴孔径的平行喷嘴挡板机构作为本体的设计基准，并以此来规定气动量仪本体的各项性能指标。

气动量仪本体为了适应各种测头的不同变换特性，不但零位能调整，其放大倍率也能较大幅度地调整。

一、锥度玻璃管-浮标系统的工作原理

锥度玻璃管和浮标组成流量计，它是浮标式气动量仪本体的核心。锥度玻璃管垂直放置，大端在上，小端在下，在

管内有一个重量很小的浮标（图 1-2）。

具有恒定压力 p_1 流量为 Q_1 的压缩空气从锥度玻璃管的下端流入玻璃管内腔，通过浮标与玻璃管之间的间隙向上流出管外。由于间隙很小，起到节流的作用，引起流速增加而静压力减小，因此在浮标的上下形成了压差。在此差压的作用下，浮标被托起，同时浮标与管壁的间隙随之增大，流速减小，静压力增加。当浮标静止在某一位置时，浮标上面的静压力为 p_2 。此时由差压作用在浮标上的力刚好与浮标的重量相平衡。设浮标的重量为 W ，则

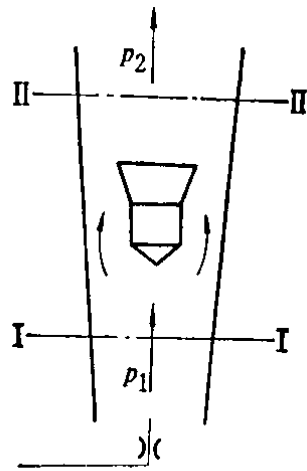


图1-2 锥度玻璃管-浮标
系统工作原理图

$$(p_1 - p_2) f = W \quad (1-1)$$

式中 f ——浮标上平面面积。

如图 1-2 所示，取浮标上下两截面 I-I 和 II-II，我们来推导 II-II 截面的空气流速。

设气体是理想气体，而且流经锥度玻璃管的流速比较小，因而可以不考虑气体的可压缩性。根据不可压缩流体的伯努利方程，并不考虑气体本身的重量，有：

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{v_2'^2}{2g} \quad (1-2)$$

式中 v_1 —— I-I 截面上的气体平均流速；

v_2' —— II-II 截面的气体流束的平均流速；

γ_1 —— I-I 截面上的空气重度；

γ_2 —— II-II 截面上的空气重度；

g ——重力加速度。

因为 II-II 截面的气体管状流束的面积与浮标上端面 和 玻璃管内壁形成的环形面积是相等的。所以，根据流体的连续性方程，流过截面 I-I 的空气流量与流过截面 II-II 的空气流量是相等的。即：

$$F_1 v_1 = (F_f - f) v'_2$$

$$\therefore v_1 = \frac{F_f - f}{F_1} v'_2 = m v'_2 \quad (1-3)$$

式中 F_f ——浮标上平面位置截面的锥度玻璃管内腔面积；

F_1 —— I-I 截面的玻璃管内腔面积；

m ——开口比， $m = \frac{F_f - f}{F_1}$ 。

将式 (1-3) 代入式 (1-2) 并考虑 γ_1 和 γ_2 相差极小，可以认为 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ ，则可得：

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{m^2 v_2'^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2'^2}{2g}$$

$$(1 - m^2) \frac{v_2'^2}{2g} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

$$\therefore v_2' = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}} \quad (1-4)$$

考虑到实际的气体是具有粘性的，所以通过 II-II 截面的气体流束的实际流速 v_2 ，将小于式 (1-4) 计算所得的流速 v_2' 。设：

$$\xi = \frac{v_2}{v_2'}$$

ξ 叫速度系数，则实际流速 v_2 为：

$$v_2 = \xi v_2' = \frac{\xi}{\sqrt{1 - m^2}} \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}}$$

流过 II-II 截面的空气流束的流量 $Q_1 = v_1 (F_f - f)$ 。

$$\therefore Q_1 = \frac{\xi}{\sqrt{1-m^2}} (F_f - f) \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}}$$

令流量系数 $c = \frac{\xi}{\sqrt{1-m^2}}$

则 $Q_1 = c (F_f - f) \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}}$

以式 (1-1) 代入上式得:

$$Q_1 = c (F_f - f) \sqrt{2g \frac{W}{f\gamma}} \quad (1-5)$$

式中 W ——浮标重量。

对某一量仪来说, 式 (1-5) 中的 g 、 W 、 f 和 γ 都可以看成是常数, 即流量 Q_1 只与 c 和 F 成函数关系。

流量系数 c 与浮标的形状和气体的雷诺数有关。若雷诺数在一定界限以上, 流量系数就与雷诺数无关了。根据转子流量计的资料[⊖], 以浮标的直径作为基准的雷诺数的界限约在 400 左右。而浮标式气动量仪中以浮标直径作为基础的雷诺数一般在 1500~2000 之间, 所以流量系数可以看成是一个常数。这样, 流量 Q_1 就只是截面积 F 的函数了。

玻璃管的内腔是圆锥形的。设其小端直径为 D_1 , 锥度为 K , 则距离玻璃管下端为 H 的截面的内腔面积为:

$$F = \frac{\pi}{4} (D_1 + KH)^2$$

代入式 (1-5) 得:

$$Q_1 = c \left[\frac{\pi}{4} (D_1 + KH)^2 - f \right] \sqrt{2g \frac{W}{f\gamma}} \quad (1-6)$$

⊖ 小林佛一郎等著《流量测定並自動制御》第166页, 発行社: 日口+社。