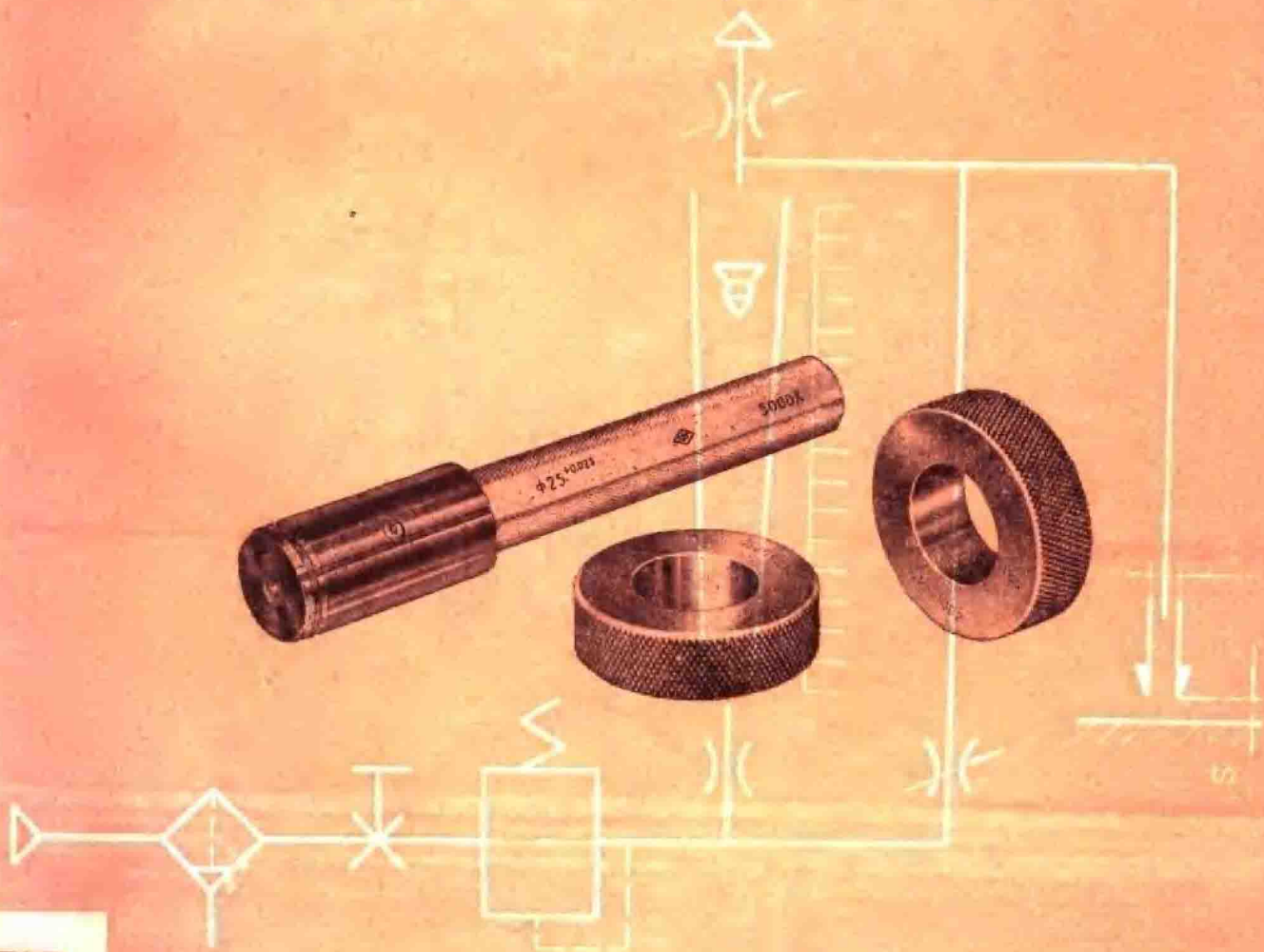


# 浮标式气动量仪 测量装置的设计



H863

中原量仪厂技术情报组

# 毛主席语录

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

坚持政治挂帅，加强党的领导，大搞群众运动，实行两参一改三结合，大搞技术革新和技术革命。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

中国应当对于人类有较大的贡献。

# 目 录

<b>第一章 浮标式气动量仪本体</b> .....	1
第一节 浮标式气动量仪的工作原理.....	1
第二节 气动量仪本体的主要性能指标.....	4
<b>第二章 长度—流量变换的静特性</b> .....	10
第一节 喷嘴挡板机构的静特性.....	10
第二节 节流孔型长度—流量变换的静特性.....	17
<b>第三章 各种变换器及组合变换器的参数选择原则</b> .....	21
第一节 喷嘴挡板机构的参数选择原则.....	21
第二节 阀式变换器的参数选择原则.....	27
<b>第四章 长度尺寸的气动测量</b> .....	31
第一节 高度和深度的气动测量.....	31
第二节 厚度和槽宽的气动测量.....	35
第三节 孔径的气动测量.....	40
第四节 外径的气动测量.....	51
第五节 大公差长度尺寸的气动测量.....	58
<b>第五章 表面形状和位置误差的气动测量</b> .....	61
第一节 表面形状误差的气动测量.....	61
第二节 表面位置误差的气动测量.....	73
<b>第六章 角度和其它量的气动测量</b> .....	115
第一节 角度的气动测量.....	115
第二节 其它量的气动测量.....	119
<b>第七章 气动测量的误差分析</b> .....	121
第一节 浮标式气动量仪本体的误差分析.....	121
第二节 气动测量装置的误差分析.....	124
第三节 测量条件造成的误差.....	136

# 第一章 浮标式气动量仪本体

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，而压力式气动量仪由于它易于发出信号，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。

## 第一节 浮标式气动量仪的工作原理

### 一、浮标式气动量仪的气路原理图

图 1-1 所示是浮标式气动量仪的气路原理图。

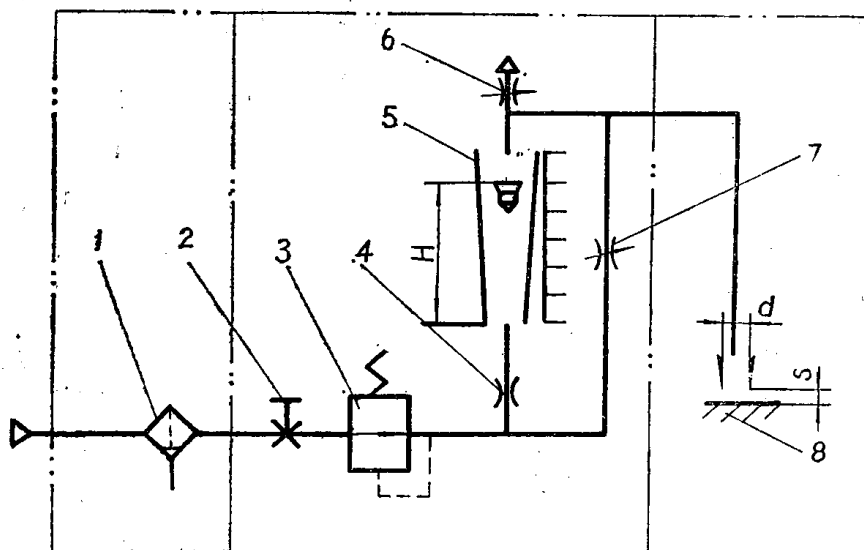


图 1-1 浮标式气动量仪气路原理图

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—锥度玻璃管及浮标； 6—零位调整螺钉； 7—倍率调整螺钉； 8—测量装置

在结构上，图中从 2 至 7 各零附件组成一个整体，叫做“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 8 部分自成一体，叫测量装置或称测量头（图 1-1 所示的测量装置为喷嘴挡板机构）。测量装置和“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头两部分所构成。

一般来说，量仪本体部是相对固定不变的，而测量头部分在结构、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量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头相连接，因而可以测量各种不同工件的各种各样的参数。

从本质上来说，测量头是一种变换器，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量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，气动测量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，我们确定测量头为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量头的不同变换特性，不但零位能调整。其放大倍率也能较大幅度地调整。

## 二、锥度玻璃管—浮标的工作原理

锥度玻璃管和浮标组成流量计，它是气动量仪本体的核心。锥度玻璃管内腔是圆锥形的，在管内有一个重量很小的浮标(图1-2)。量仪处于工作状态时，玻璃管的大端在上，小端在下，垂直放置。当具有恒定压力  $P_a$  流量为  $Q_1$  的空气从下端流入玻璃管内腔，把浮标托起并平衡在某一位置  $A$  时，空气从浮标和玻璃管之间的间隙流过，在浮标上面的压力便降为  $P_0$ 。

设浮标的重量为  $W$ ，最大面积为  $f$  时，

$$P_a - P_0 = \frac{W}{f} \quad (1-1)$$

设在位置  $A$  时玻璃管内腔的截面积为  $F$ ，则：

$$Q_1 = c(F-f)s\sqrt{2(P_a - P_0)g/\gamma_a} \quad (1-2)$$

将式(1-1)代入得：

$$Q_1 = c(F-f)s\sqrt{2g\frac{W}{f\gamma_a}}$$

式中：  $c$  —— 流量系数；

$s$  —— 空气的膨胀系数；

$\gamma_a$  —— 空气密度(单位体积的重量)。

令

$$K_1 = cs\sqrt{2g\frac{W}{f\gamma_a}}$$

则：

$$Q_1 = K_1(F-f) \quad (1-3)$$

$$dQ_1 = K_1 dF \quad (1-4)$$

设玻璃管的内径为  $D$ ，则：

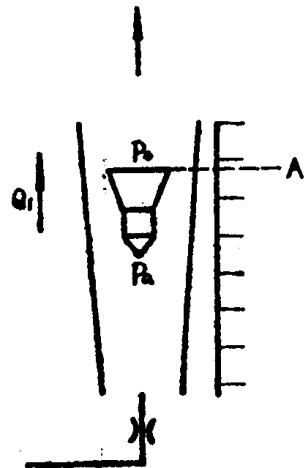


图 1-2 锥度玻璃管和浮标示意图

$$F = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$dF = 2 \cdot \frac{\pi D}{4} \cdot dD = \frac{\pi D}{2} dD$$

代入式(1-4)后得:

$$dQ_1 = K_1 \frac{\pi D}{2} dD$$

如果玻璃管内孔的锥度为:

$$K = \frac{dD}{dH}$$

则:

$$dQ_1 = K_1 \frac{\pi D}{2} k \cdot dH$$

$$dH = \frac{dQ_1}{K_1 k \frac{\pi D}{2}} \quad (1-5)$$

式(1-5)就是通过玻璃管的流量  $Q_1$  的增量  $dQ_1$  与浮标的高度  $H$  的增量  $dH$  的函数式。 $\frac{dH}{dQ_1}$  即锥度玻璃管浮标系统的倍率。

$$\frac{dH}{dQ_1} = \frac{1}{K_1 k \frac{\pi D}{2}}$$

所以锥度玻璃管系统的倍率与玻璃管的锥度  $k$  成反比, 与常数  $K_1$  也成反比, 亦即与  $\sqrt{\frac{W}{f}}$  成反比。此外,  $\frac{dH}{dQ_1}$  之值与  $D$  有关, 因为  $D$  是个变量, 所以  $\frac{dH}{dQ_1}$  也是变量。为了使  $\frac{dH}{dQ_1}$  成为常量(这是获得线性刻度的条件), 实际上锥度玻璃管的内壁母线是设计成二次曲线的。

### 三、倍率调整和零位调整的工作原理

浮标式气动量仪是靠与锥度玻璃管相并连的可调节流孔来实现倍率调整的。现说明其原理(图1-3)。

设流过玻璃管的流量为  $Q_1$ , 流过可调节流孔的流量为  $Q_2$ , 由零位调整螺钉处流入大气的流量为  $Q_3$ , 通过玻璃管而流到测量头的流量为  $Q_4$ , 流到测量头的总流量为:

$$Q = Q_2 + Q_4$$

$$\therefore Q_1 = Q_3 + Q_4$$

$$\therefore Q = Q_2 + Q_1 - Q_3$$

设  $Q_2 = kQ_1$ , 代入得:

$$Q = (1+k)Q_1 - Q_3 \quad (1-6)$$

$$Q_1 = \frac{Q + Q_3}{1+k} \quad (1-7)$$

当  $Q_3$  是常数时,

$$\frac{dQ_1}{dQ} = \frac{1}{1+k} \quad (1-8)$$

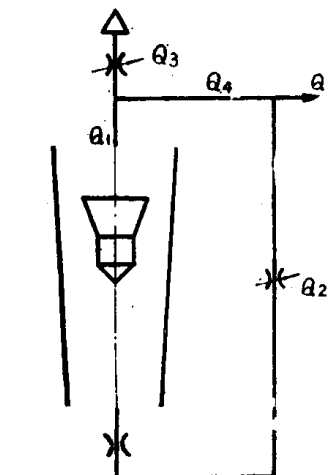


图 1-3 倍率调整和零位调整原理图

式(1-8)说明当改变倍率螺钉节流孔的开度  $k$  时, 就可以改变仪器的综合倍率。另外, 还说明当改变由零位螺钉处流入大气的流量  $Q_2$  时, 不改变测量头处的流量  $Q$  就可以使通过玻璃管的流量  $Q_1$  改变, 这样就起了零位调整的作用。因为  $Q_2$  与  $dQ_1/dQ$  无关, 所以零位调整与仪器的倍率基本上是没有关系的。

## 第二节 气动量仪本体的主要性能指标

在气动量仪本体的性能及指标中, 与测量头设计关系最大的有本体的最高倍率  $K_{\max}$ 、最大测量间隙  $S_{\max G}$  和测量范围  $Y_G$  等三项。

### 一、最高倍率 $K_{\max}$

最高倍率的定义: 作为气动测量装置的平行喷嘴挡板机构的间隙从 0.03 毫米开始变化  $\Delta S$  ( $\Delta S$  为 0.01 毫米或 0.005 毫米) 时, 能获得的仪器的最高综合倍率, 叫最高倍率。

最高倍率可以由下法求得: 把气动量仪本体与喷嘴孔径为 2 毫米的单喷嘴测量头相连接, 并把测量头装夹在微动台架的支臂上, 然后将本体的倍率螺钉闭死, 调整测量头喷嘴处的间隙为 0.04 毫米 (10000 倍量仪时调为 0.035 毫米), 并用零位调整螺钉 (必要时也可以用倍率螺钉) 将浮标调到刻度尺的最上刻度位置, 再调整喷嘴处的间隙到 0.03 毫米, 这时浮标的下降距离为  $H$  (毫米), 则最高倍率为:

$$K_{\max} = H/0.01 \quad (2000 \text{ 倍和 } 5000 \text{ 倍量仪})$$

或

$$K_{\max} = H/0.005 \quad (10000 \text{ 倍或 } 10000 \text{ 倍以上量仪})$$

QFP 型浮标式气动量仪本体的最高倍率如表 1-1 所示。

表 1-1

型 号	公 称 倍 率	最 高 倍 率
QFP-2	2000 倍	4500 倍
QFP-5	5000 倍	10000 倍
QFP-10	10000 倍	16000 倍

气动量仪本体的最高倍率实际反映了锥度玻璃管浮标系统的倍率以及倍率螺钉可能的密闭程度。因为最高倍率对气动量仪的综合倍率影响甚大, 所以是一个很重要的技术指标。

现在分析气动量仪的综合倍率  $K_{\text{综}}$ 。

$$K_{\text{综}} = \frac{dH}{dQ_1} \cdot \frac{dQ_1}{dQ} \cdot \frac{dQ}{dS} \quad (1-9)$$

也就是说, 仪器的综合倍率是由三个因素决定的。 $dH/dQ_1$  是锥度玻璃管浮标系统的固有倍率, 也可以近似地看成是气动量仪本体的最高倍率;  $dQ_1/dQ$  是并联回路中倍率调整环节, 一般是小于 1 的;  $dQ/dS$  为测量头的变换倍率, 由测量头的变换方式和其本身的参数所决定。

$dH/dQ_1$  和  $dQ_1/dQ$  在前面已经作了分析，但仍然很难用计算式确切地算出各项数值的大小。我们可以由气动量仪本体的最高倍率  $K_{\max}$  的值大致地知道各项的概数。

根据最高倍率的定义， $dQ_1/dQ=1$ （即倍率螺钉近于闭死的情况）。

$$K_{\max} = \frac{dH}{dQ_1} \cdot 1 \cdot \frac{dQ}{dS}$$

而当气动量仪在公称倍率时，

$$K_{\text{公}} = \frac{dH}{dQ_1} \cdot \frac{dQ_1}{dQ} \cdot \frac{dQ}{dS}$$

所以这时候倍率调整环节的调整系数为：

$$\frac{dQ_1}{dQ} = \frac{K_{\text{公}}}{K_{\max}}$$

由表 1-1 的数值可知：

公称倍率为 2000 倍时， $\frac{dQ_1}{dQ} = \frac{2000}{4500} = 0.44$

公称倍率为 5000 倍时， $\frac{dQ_1}{dQ} = \frac{5000}{10000} = 0.50$

公称倍率为 10000 倍时， $\frac{dQ_1}{dQ} = \frac{10000}{16000} = 0.63$

因为  $\frac{dQ_1}{dQ} = \frac{1}{1+k}$ ，所以当公称倍率为 2000 倍时， $k=1.25$ ；当公称倍率为 5000 倍时， $k=1$ ；当公称倍率为 10000 倍时， $k=0.6$ 。

一般情况下，我们总是希望仪器在公称倍率下工作，而当喷嘴孔径为 2 毫米时，通过倍率螺钉分流处的流量与通过玻璃管的流量之比  $k$  的数值为 0.6~1.25，这样就给了减小测量头的变换倍率 ( $dQ/dS$ ) 而仍然能保证仪器的公称倍率的可能性。 $k$  值愈大，测量头变换倍率减小的范围也愈大，而  $k$  值的大小是随着本体的最高倍率的增大而增大的。

## 二、最大测量间隙 $S_{\max G}$

气动量仪的最大测量间隙  $S_{\max G}$  是指当测量头为 2 毫米喷嘴孔径的平行喷嘴挡板机构时，能保持仪器的公称倍率  $K_{\text{公}}$  的可能的最大间隙值，而其指示范围同仪器刻度尺上、下基准点范围。

在设计气动量仪锥度玻璃管时，考虑到避开测量头变换曲线的非线性部分等因素，设定倍率螺钉和零位螺钉闭死，浮标处于刻度尺的最下刻度时的流量为 2 毫米孔径的喷嘴，其间隙为 0.03 毫米时的流量。因此在最高倍率的情况下，浮标处于上基准点时的流量为  $\phi 2$  喷嘴，其间隙为  $S_1 = 0.03 + \frac{H_1}{K_{\max}}$  时的流量（图 1-4）。

由式(1-9)可知，当  $\frac{dQ_1}{dQ} = \frac{1}{1+k} = 1$  时，

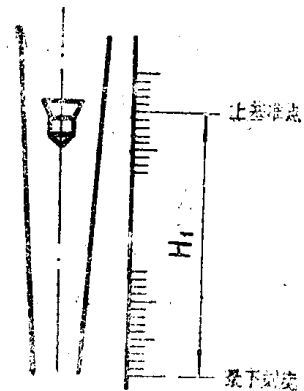


图 1-4



$$K_{\max} = \frac{dH}{dQ_1} \cdot 1 \cdot \frac{dQ}{dS}$$

当倍率  $K$  为公称倍率  $K_{\text{公}}$  时,

$$K_{\text{公}} = \frac{dH}{dQ_1} \cdot \frac{1}{1+k} \cdot \frac{dQ}{dS}$$

所以:

$$1+k = \frac{K_{\max}}{K_{\text{公}}}$$

因为气动量仪本体的最大测量间隙是在保持综合倍率为公称倍率时的最大间隙, 所以

$$S_{\max G} = (1+k)S_1 = \frac{K_{\max}}{K_{\text{公}}} S_1 = \frac{K_{\max}}{K_{\text{公}}} \left( 0.03 + \frac{H_1}{K_{\max}} \right) = 0.03 \frac{K_{\max}}{K_{\text{公}}} + \frac{H_1}{K_{\text{公}}} \quad (1-10)$$

从式(1-10)可以看出, 气动量仪的最大测量间隙  $S_{\max G}$  与本体的最高倍率、刻度尺的长度(即玻璃管的长度)有关。

本体的最大测量间隙是在测量头为 2 毫米孔径的喷嘴挡板机构的条件下规定的, 但在实际应用中测量头本身的变换倍率与  $\phi 2$  喷嘴的变换倍率不一定一样。下面我们分析测量头本身的变换倍率对本体最大测量间隙的影响。

从上面的式中可以看出, 本体的最大测量间隙是与本体的最高倍率  $K_{\max}$  以及允许通过玻璃管的最大流量的相当间隙  $S_1$  成正比的。很明显当测量头的变换倍率改变时, 本体的最高倍率也将改变。一般我们认为  $\phi 2$  孔径的平行喷嘴挡板机构是基准, 其变换倍率是最大的。所以其它测量头的变换倍率只允许比它小, 不允许大。以后我们还将证明  $\phi 2$  孔径的平行喷嘴挡板机构的变换倍率为  $2\pi$ 。

设测量头的变换倍率为  $x_1$ 。

当  $x_1 < 2\pi \frac{K_{\text{公}}}{K_{\max}}$  时, 很明显这时仪器达不到公称倍率, 因而是不能使用的。

当  $2\pi \frac{K_{\text{公}}}{K_{\max}} < x_1 < 2\pi$  时, 仪器的最高倍率将变小,  $K_{\max 1} = K_{\max} \cdot \frac{x_1}{2\pi}$ 。但这时因为允许通过玻璃管上基准点的流量是不变的, 测量头的变换倍率小了, 因此同样流量下的相当间隙  $S_1$  就变大了。

$$S_1 = 0.03 \times \frac{2\pi}{x_1} + \frac{H_1}{K_{\max 1}}$$

所以这时气动量仪的最大测量间隙为:

$$\begin{aligned} S_{\max G 1} &= \frac{K_{\max 1}}{K_{\text{公}}} S_1 = \frac{K_{\max} \frac{x_1}{2\pi}}{K_{\text{公}}} \left( 0.03 \times \frac{2\pi}{x_1} + \frac{H_1}{K_{\max} \frac{x_1}{2\pi}} \right) \\ &= \frac{K_{\max}}{K_{\text{公}}} \times 0.03 + \frac{H_1}{K_{\text{公}}} = S_{\max G} \end{aligned}$$

从上式可得: 当测量头的变换倍率变小, 但仍可以获得公称倍率时, 气动量仪本体的最大测量间隙是不变的。

QFP 型气动量仪的最大测量间隙值如表 1-2。

表 1-2

公 称 倍 率	最 大 测 量 间 隙 (毫 米)
2000 倍	$\geq 0.15$
5000 倍	$\geq 0.08$
10000 倍	$\geq 0.06$

### 三、测量范围 $Y_G$

气动量仪的测量范围与公称倍率有关。 $QFP$ 型气动量仪的刻度范围和推荐的测量范围见表1-3。在表1-3中还列出了允许测量范围，一般我们希望按推荐值使用，但在有些可以不很注重线性的情况下，也可以应用允许范围。以后我们将算出各种测量头的测量范围值  $Y_j$ ，按表1-3之测量范围选择仪器本体的公称倍率。

表 1-3

单位：毫米

公 称 倍 率	刻 度 范 围		推 荐 测 量 范 围	允 许 测 量 范 围
	全 范 围	基 准 点 内		
2000 倍	0.09	0.07	0.07~0.03	0.03~0.09
5000 倍	0.035	0.025	0.03~0.01	0.01~0.035
10000 倍	0.018	0.014	小于0.01	小于 0.014

### 四、主要精度指标

$QFP$ 型浮标式气动量仪的主要精度指标见表1-4。

表 1-4

单位：毫米

公称倍率	2000倍	5000 倍	10000 倍
基准点内示值误差	0.0012	0.0008	0.0004
全范围内示值误差	0.002	0.0015	0.0008
示值变差	$\leq 0.001$	$\leq 0.0005$	$\leq 0.0002$
示值稳定性	$\leq 0.001$	$\leq 0.0005$	$\leq 0.0002$
气源压力波动引起的示值误差	$\leq 0.001$	$\leq 0.0005$	$\leq 0.0003$

气动量仪的示值误差（包括基准点内示值误差和全范围内示值误差）主要是由锥度玻璃管内腔的形状以及浮标的尺寸、重量决定的。从全范围示值误差来看，公称倍率为2000倍时为2.2%，5000倍和10000倍时约为4.4%，还是比较小的。示值变差（即多次测量的重复性）和示值稳定性（包括零漂和瞬时的浮标颤动）主要由稳压器的性能决定，压缩空气中

含有过多的水分和油分也有很大的影响。从表 1-4 可以看出浮标式气动量仪的示值变差和长时间特性是比较好的，这也是此种量仪的一个特点。气源压力允许在 3~7 公斤/厘米<sup>2</sup> 范围内波动，由此引起的示值变动完全取决于稳压器的性能。但也必须指出，浮标式气动量仪由于气源压力变化引起的示值变动与压力式气动量仪比较，还是较小的。

浮标式气动量仪由于本身没有可动部件，不存在摩擦损失，所以根本不存在回程误差，这是其它带有机械传动放大的量仪所没有的突出的优点。但是浮标式气动量仪浮标存在着瞬时颤动，影响这种颤动的因素很多，气路中非层流的节流、浮标的形状是其中主要的因素。

### 五、浮标式气动量仪的流量损耗

气动量仪是依靠压缩空气作介质进行测量的。具有足够压力和充分容量的压缩空气是气动测量必不可少的。在设计空气压缩机站和估算压缩空气的消耗量时，每一管浮标式气动量仪的流量损耗是核算气源总容量的依据之一。因此我们有必要计算每管气动量仪在工作状态下的最大流量损耗。

设量仪在工作状态时的温度为 20℃，湿度为“0”，测量头为  $d=2$  毫米孔径的喷嘴，其与挡板的最大间隙  $S_{\max}=0.2$  毫米。

按照压缩性流体流量的一般公式：

$$Q=c \cdot \varepsilon \cdot A \sqrt{2g(P_1-P_2)/\gamma_1} \textcircled{1}$$

当压缩空气通过气动量仪本体和测量头从喷嘴端面与挡板形成的间隙处逸入大气时， $P_1$  为浮标式量仪的工作压力  $P_c$ ； $P_2$  为大气压力（按表压力计算）， $P_2=0$ ；流出面积  $A=\pi dS$ ； $\gamma_1=\gamma_c$ ；由此得：

$$Q=c \cdot \varepsilon \pi d S \sqrt{2gP_c/\gamma_c} \quad (1-11)$$

式中  $c$  ——流量系数，取  $c=1$ ；

$g$  ——重力加速度；

$\gamma_c$  ——压力为  $P_c$  时的单位体积空气重量，即空气密度；

$\varepsilon$  ——空气的膨胀系数。

干燥空气的密度可以按下式计算：

$$\gamma_c=\gamma_n \cdot \frac{P_c}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_c} \cdot \frac{1}{K'} \textcircled{2} \quad (1-12)$$

式中  $\gamma_n$  ——标准状态时的空气密度，其值为 1.293 公斤/米<sup>3</sup>；

$P_n$  ——标准状态时的大气压力，其值为 10330 公斤/米<sup>2</sup>；

$P_c$  ——用绝对压力表示的浮标式气动量仪的工作压力，其值为 17561 公斤/米<sup>2</sup>；

$T_n$  ——标准状态时的绝对温度，其值为 273.2°K；

$T_c$  ——工作状态下的空气绝对温度，其值为 293.2°K；

$K'$  ——空气的压缩系数，约等于 1。

将以上各数值代入式(1-12)，得：

$$\gamma_c=2.04 \text{ 公斤/米}^3$$

空气的膨胀系数按下式计算：

① 公式摘自《流量测定并压力制御》(日本)小林梯一郎等著，第43页。

② 公式摘自《流量测定并压力制御》(日本)小林梯一郎等著，第76页。

$$\varepsilon = \frac{\zeta \mu_k}{c \sqrt{1 - \mu_k^2 m^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/K}}} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{P_2}{P_1}} \cdot \frac{K}{K-1} \left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/K} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(K+1)/K} \right]} \quad (1-13)$$

式中  $\zeta$ ——由于空气粘性影响的速度系数,  $\zeta \approx 1$ ;

$\mu_k$ ——压缩流体的缩流系数,  $\mu_k \approx 1$ ;

$m$ ——开口比  $= \frac{\pi d S}{\pi d^2} = \frac{4S}{d} = 0.4$ ;

$P_2$ ——用绝对压力表示的节流后的压力,  $P_2 \approx 10000$  公斤/米<sup>2</sup>;

$P_1$ ——用绝对压力表示的节流前的压力,  $P_1 \approx 17000$  公斤/米<sup>2</sup>;

$K$ ——绝热系数,  $K = 1.41$ 。

将以上各数值代入式(1-13), 得:

$$\varepsilon = 0.788$$

将以上所得各参数之值代入式(1-11), 可以求得每管浮标式气动量仪的流量损耗为:

$$Q = 0.0153 \text{ 米}^3/\text{分}$$

当测量头呈开放状态时, 流量损耗将大大增加, 约为  $Q_{\text{开}} = 0.056$  米<sup>3</sup>/分。在实际测量过程中, 测量头呈完全开放状态的情况是有的, 但长时间呈开放状态是不正常的, 因此仍然可以按照  $Q = 0.0153$  米<sup>3</sup>/分来考虑气动量仪的流量损耗量。

① 公式摘自《流量测定并压力制御》(日本)小林悌一郎等著, 第47页。

## 第二章 长度—流量变换的静特性

### 第一节 喷嘴挡板机构的静特性

#### 一、喷嘴挡板机构的形成

喷嘴挡板机构是气动测量和气动控制中最常见的一种长度-流量或长度-压力变换器，其构成如图 2-1 所示。

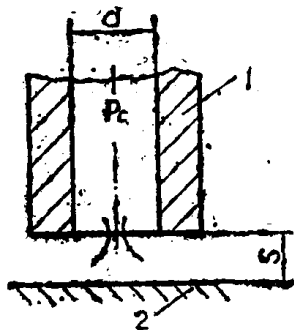


图 2-1 喷嘴挡板机构  
1—喷嘴； 2—挡板

喷嘴孔可以是一个圆孔，也可以是一个矩形孔。喷嘴端面与挡板可以是平行的，也可以是不平行的。当压力为  $P_c$  的压缩空气从喷嘴孔经喷嘴与挡板之间的间隙逸入大气时，其流量取决于喷嘴的形状、尺寸以及挡板的形状和间隙的大小。

#### 二、平行喷嘴挡板机构的静特性

平行喷嘴挡板机构是指喷嘴端面与挡板是平行的或近似平行的，也就是说，喷嘴端面和挡板的曲率半径是相同的或近似相等的。当然平行面可以是平面，也可以是曲面。下面我们以前述平行平面为例进行分析，其结论也适用于平行曲面。

如图 2-1 所示，压力为  $P_c$  的压缩空气通过喷嘴挡板流出时，由第一章分析可知，其流量与流出面积成正比，即：

$$Q = K_1 A \quad (2-1)$$

其中

$$K_1 = c \cdot s \sqrt{2gP_c / \gamma_c}$$

(一) 喷嘴为圆孔，其直径为  $d$  时，流出面积是以  $d$  为直径、 $S$  为高的圆柱体的侧面积。

$$A = \pi d \cdot S \quad (2-2)$$

代入式(2-1)，并令  $K_1 \pi = K$ ，得：

$$Q = K d \cdot S \quad (2-3)$$

从式(2-3)可以得出如下结论：

1. 从喷嘴挡板的间隙中流出的流量与间隙  $S$  成正比；
2.  $\frac{dQ}{dS} = Kd$ ，即变换器的变换倍率与喷嘴直径  $d$  成正比。

用直角坐标系表示式(2-3)如图 2-2。取不同的  $d$  值可以获得一直线族。但是实际上流量  $Q$  与间隙  $S$  的关系曲线不完全是这样的。图 2-3 是实际的  $Q-S$  曲线，此曲线有下列几个特点：

1. 曲线通过原点;
2. 当  $0 < S < S_0$  时, 由于空气粘性的影响, 流量  $Q$  与间隙  $S$  呈明显的非线性;
3. 当  $S_0 < S < S_1$  时,  $Q$  与  $S$  的关系是线性的, 直线的斜率与图 2-2 相同, 表达式也与式(2-3)相同;

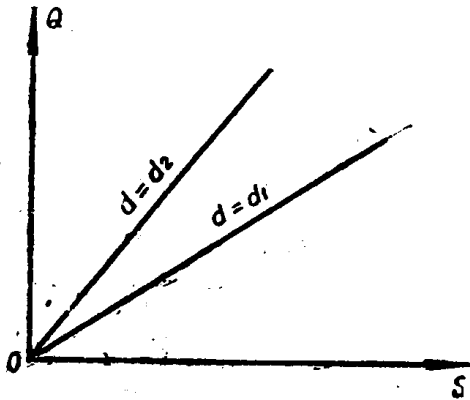


图 2-2 理论流量-间隙曲线

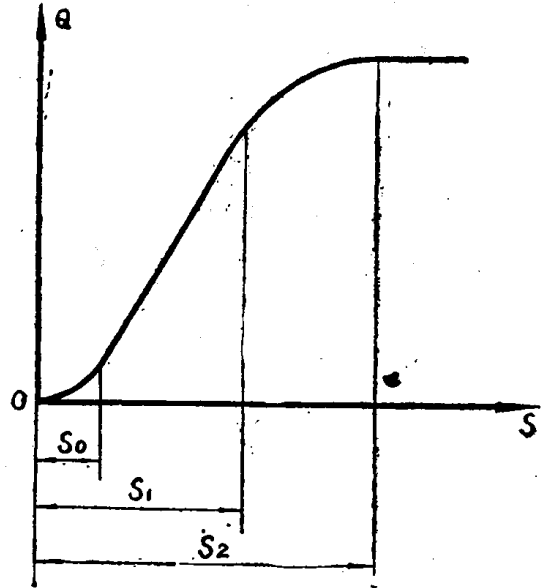


图 2-3 实际流量-间隙曲线

4. 当  $S > S_2$  时, 曲线为平行  $S$  轴的水平线, 即  $Q$  值已是一个与  $S$  无关的常数, 我们称  $S_2$  为喷嘴挡板的反映范围;

5.  $S_1 < S < S_2$  时, 为两直线的过渡曲线。

$S_0$  之值与喷嘴端面的环形面积成正比, 面积大时,  $S_0$  也大; 反之, 面积小时,  $S_0$  也小。

区间  $[S_0, S_1]$  的直线段是气动测量所需要的, 反映范围  $S_2$  之值我们也应知道。

从喷嘴挡板的间隙中流出的空气的流量, 只能小于或等于不存在挡板时从该喷嘴中流出的流量。当这两种情况下的流量相等时, 喷嘴挡板的间隙即喷嘴的反映范围  $S_2$ 。流量相等, 在其它条件不变的情况下, 也就是流出面积相等, 即:

$$\pi d \cdot S_2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\therefore S_2 = d/4 \quad (2-4)$$

按式(2-4)求出的  $S_2$  值是假设  $S_0 < S < S_2$  时,  $Q-S$  的关系是线性的情况下求得的。实际上在  $S_2$  和  $S_1$  之间存在着一过渡曲线, 因此可以断定, 实际的  $S_2$  值要比按式(2-4)计算的大。

(二) 喷嘴为矩形孔时 (图 2-4), 设孔的短边为  $a$ , 长边为  $b$ , 这时喷嘴的流出面积是一个由喷嘴边长与间隙形成的六面体的侧面积。

$$A = 2(a+b)S \quad (2-5)$$

实际的  $Q-S$  曲线与圆喷嘴的相似, 可以参照图 2-3, 但有下列几点不同:

1.  $S_0$  之值与圆喷嘴的不一定相同;

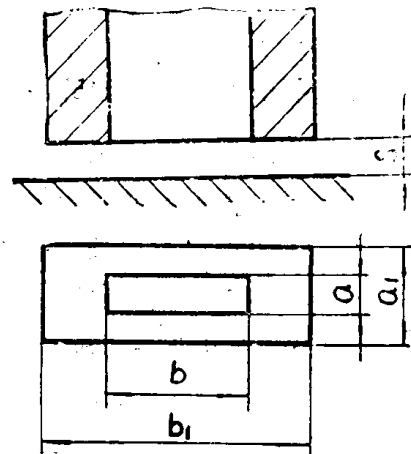


图 2-4 矩形孔喷嘴

2. 直线的斜率  $\frac{dQ}{dS} = K \cdot 2(a+b)$ ;

3. 喷嘴的反映范围  $S_2 = \frac{ab}{2(a+b)}$ 。

从上列三点我们将矩形喷嘴与圆喷嘴作一对比。如果适当选取  $a$ 、 $b$  之值使得  $2(a+b) = \pi d$ ，也就是使矩形喷嘴各边长的和与圆喷嘴周长相等，这时矩形喷嘴的面积要比圆喷嘴面积小，即：

$$a \cdot b < \frac{\pi d^2}{4}$$

证明如下：边长为  $a$  和  $b$  的矩形，当边长之和为一常数时，其所包围的最大面积的条件是  $a = b$  的正方形，此时最大面积  $= ab = a^2$ （或  $b^2$ ），而相同周长的圆面积为：

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d \cdot d}{4} = \frac{2(a+b) \cdot \frac{2(a+b)}{\pi}}{4} = \frac{(a+b)^2}{\pi} = \frac{(2a)^2}{\pi} = \frac{4}{\pi} a^2$$

$$\therefore a^2 < \frac{4}{\pi} a^2$$

$$\therefore ab < \frac{\pi d^2}{4}$$

如将上式左端除以  $2(a+b)$ ，右端除以  $\pi d$ ，不等式仍然成立，即：

$$\frac{ab}{2(a+b)} < \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}$$

$$\therefore S_{2\text{矩}} < S_{2\text{圆}}$$

上式说明：当选择矩形喷嘴的  $a$ 、 $b$  值使其变换倍率（即  $Q-S$  曲线的直线的斜率）与圆喷嘴的相同时，矩形喷嘴的反映范围  $S_2$  要比圆喷嘴的小，而且  $a$  和  $b$  之差愈大， $S_2$  也小得愈多。

### 三、不平行喷嘴挡板的静特性

喷嘴端面与挡板不平行有两种情况：一种是喷嘴端面与挡板均为平面，但有一倾角；另一种是端面与挡板的曲率半径不一致。

（一）喷嘴端面与挡板都是平面但不平行

如图 2-5 所示，喷嘴端面与挡板的倾角为  $\theta$ ，喷嘴孔的中心线与挡板的交点到喷嘴端面的距离为  $S$ ，当  $\theta$  为一常数时，喷嘴挡板的流出面积是斜截圆柱体的侧面积（图 2-6），即：

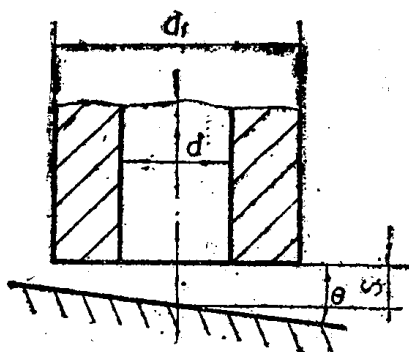


图 2-5 喷嘴端面与挡板成  $\theta$  角

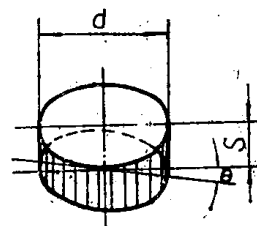


图 2-6 斜截圆柱体侧面积

$$A = \pi d \cdot S$$

当挡板相对于喷嘴端面平移 ( $\theta$  角不变) 时, 从喷嘴挡板处流出的流量  $Q$  和间隙  $S$  的关系与平行喷嘴挡板相同, 在线性段的函数式也为:

$$Q = K \cdot d \cdot S$$

但是由于倾角  $\theta$  的存在, 间隙  $S$  不可能等于零。设挡板与喷嘴的外圆相接触时的间隙为  $S_0$ ,  $S_0$  就是  $S$  的最小值。

$$S_0 = \frac{d_1}{2} \operatorname{tg} \theta = \frac{d_1}{2} \theta \quad (2-6)$$

当喷嘴为矩形喷嘴时, 上述分析同样适用, 但  $S_0$  之值按下式计算:

$$S_0 = \left( \frac{a_1}{2} \sim \frac{b_1}{2} \right) \operatorname{tg} \theta = \left( \frac{a_1}{2} \sim \frac{b_1}{2} \right) \cdot \theta \quad (2-7)$$

式中  $\frac{a_1}{2} \sim \frac{b_1}{2}$  的具体数值由挡板与矩形喷嘴倾斜的方向所决定。

当挡板相对于喷嘴轴线作转动时,  $\theta$  角是变数, 但  $\theta$  与  $S$  的函数关系不变。

## (二) 喷嘴端面与挡板曲率半径不同

在气动测量中, 尤其是在测量外径的时候, 经常出现的是喷嘴端面为平面, 而作为挡板的是一个圆柱面。下面按圆喷嘴和矩形喷嘴两种情况分析。

### 1. 圆喷嘴

如图2-7所示, 喷嘴孔为  $d$ , 喷嘴外圆为  $d_1$ , 端面是一平面, 挡板是一个半径为  $R$  的圆柱面。喷嘴与挡板的相对位置为喷嘴孔中心线相交于圆柱体的中心线, 并且圆柱体中心线平行于喷嘴端面, 设喷嘴端面到圆柱表面的最近距离为间隙  $S$ , 很明显当间隙  $S = 0$  时, 流量  $Q$  不等于零。所以流量  $Q$  与间隙  $S$  的函数关系为:

$$Q = K \cdot d \cdot S + Q_R \quad (2-8)$$

现在把喷嘴孔径为  $d$  的平行平面喷嘴挡板机构当其流量为  $Q_R$  时的间隙  $S_R$  称为曲面挡板机构的当量间隙。于是:

$$Q_R = K \cdot d \cdot S_R \quad (2-9)$$

所以

$$Q = Kd \cdot S + Kd \cdot S_R = Kd(S + S_R) \quad (2-10)$$

当量间隙  $S_R$  对设计外径气动测量头是一个重要的参数。要求得  $S_R$  先要求出当  $S = 0$  时曲面挡板的流出面积  $A_R$ 。如图2-8所示:

$$AB = OO' - OC = R - \sqrt{R^2 - BC^2} = R - \sqrt{R^2 - AO'^2}$$

由于挡板为圆柱体, 在不同截面则  $AO'$  为  $A'O''$ 。设喷嘴孔半径为  $r$ , 则:

$$A'O'' = OA' \sin \theta = r \sin \theta$$

∴

$$A'B' = R - \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \theta}$$

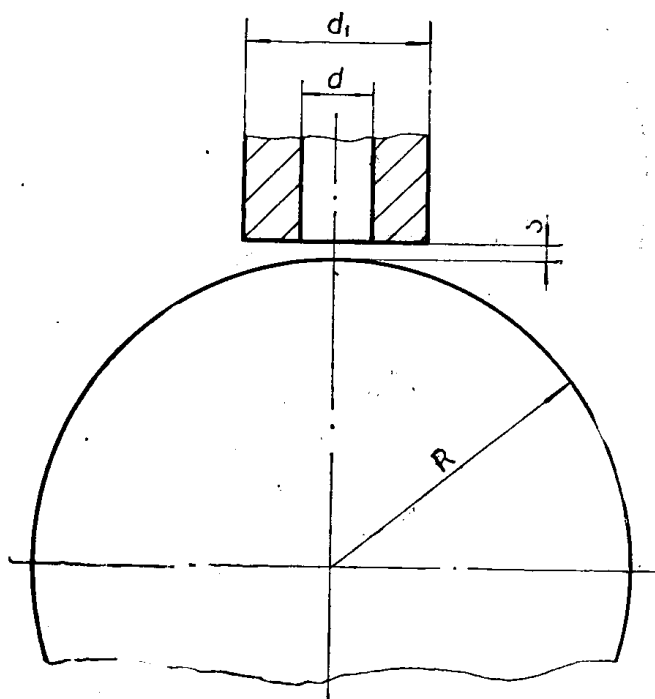


图 2-7



当  $S=0$  时, 曲面挡板的流出面积  $A_R$  为喷嘴圆周上任意一点  $A'$  到曲面挡板的距离  $A'B'$  与弦长  $rd\theta$  乘积在  $\theta$  从  $0 \sim 2\pi$  上的积分。

$$\begin{aligned} A_R &= \int_0^{2\pi} A'B' \cdot rd\theta = 4 \int_0^{\pi/2} A'B' rd\theta = 4 \int_0^{\pi/2} (R - \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \theta}) \cdot rd\theta \\ &= 4Rr \int_0^{\pi/2} d\theta - 4Rr \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \sin^2 \theta} d\theta \\ &= 2\pi Rr - 4Rr \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta d\theta - \frac{1}{8} \left(\frac{r}{R}\right)^4 \int_0^{\pi/2} \sin^4 \theta d\theta - \dots \right] \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r^3}{R} + \frac{3\pi}{32} \cdot \frac{r^5}{R^3} + \dots \end{aligned}$$

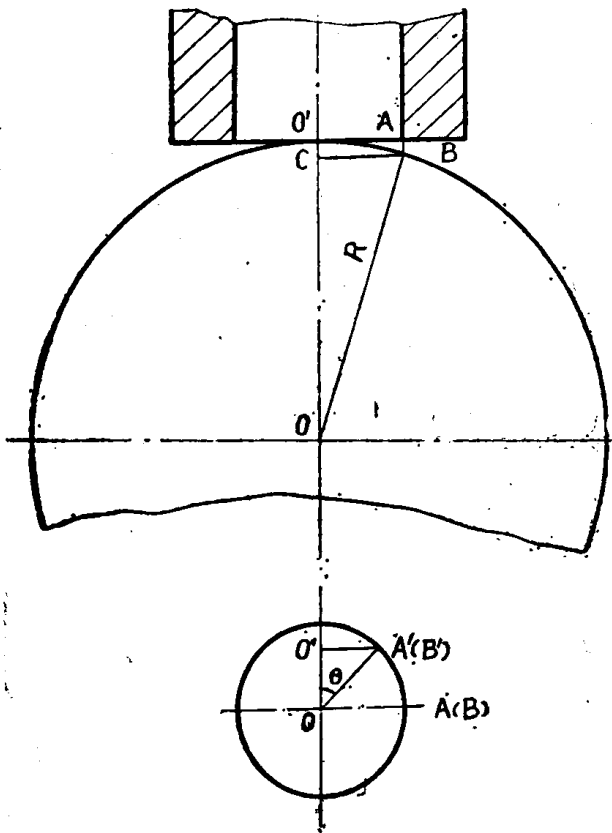


图 2-8

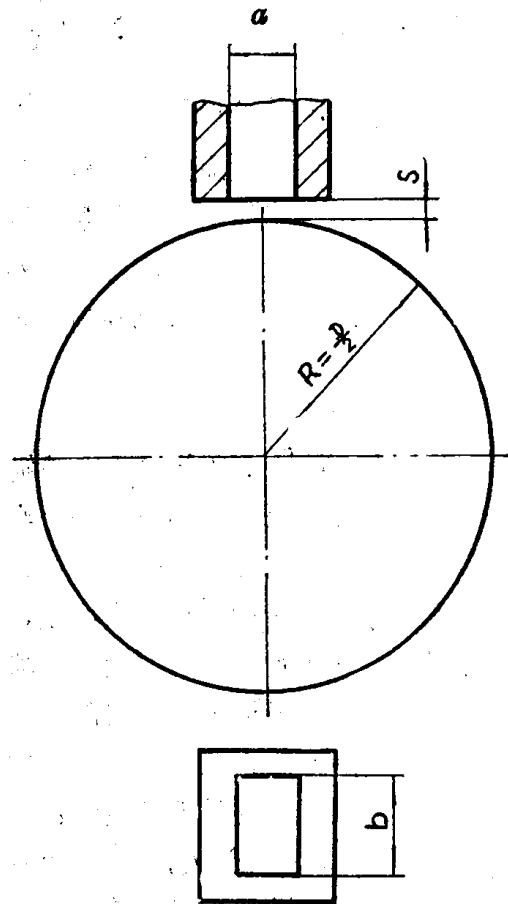


图 2-9

按照当量间隙的定义,  $S_R = \frac{A_R}{\pi d}$ , 所以:

$$S_R = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{r^3}{R} + \frac{3\pi}{32} \cdot \frac{r^5}{R^3} + \dots}{2\pi r} = \frac{r^2}{4R} + \frac{3r^4}{64R^3} + \dots$$

因为  $\frac{3r^4}{64R^3}$  以及以后的各项实际数值很小, 可以忽略不计, 所以:

$$S_R = \frac{r^2}{4R} = \frac{d^2}{8D} \quad (2-11)$$

由此可见, 曲面挡板的当量间隙与嘴喷直径的平方成正比, 与作为挡板的圆柱体直径成反比。