

# 关于间隙选配系统测量误差的研究

甘念 刘同燎 胡利军

(黄石东贝电器股份有限公司, 435000)

**摘要:** 本文论述了气动测量系统的误差分析方法, 以装配车间气缸座缸孔选配内径测头实测为例, 对标准件误差、零位漂移误差、测头和测量装置误差进行了深入的探讨。

**关键词:** 气动测量 间隙选配 放大倍率 误差分析

## Research on measuring error of the clearance matching system

Gan nian, Liu tong liao, Hu li jun

(Huangshi Donper Electrical Appliance Co., Ltd., 435000)

**Abstract:** This article discusses the analysis method for the error of pneumatic measurement system, take as an example, the measured value of the clearance of the cylinder hole of cylinder block and the piston in the assembly workshop, the error of the standard parts, zero drift error, nonlinear error were discussed deeply.

**Keywords:** pneumatic measuring, clearance matching, magnification, error analysis

### 1 引言

随着全球气候变暖, 制冷行业飞速发展, 对压缩机的性能要求越来越高, 低碳、环保、能耗低、重量轻、体积小、高效率已成为压缩机行业的目标。压缩机行业如何提高各零件配合精度, 消除测量系统带来的误差, 保证测量系统的准确性及一致性, 对提高压缩机性能具有重大而深远的意义。

---

第一作者简介: 甘念 (1980.9~), 女, 本科, 毕业于武汉大学, 现任东贝电器股份公司工艺工装研究院工程师, 从事检具设计工作。

## 2 气动测量的误差组成

气动测量方法的总误差由量仪本体的误差、测头和测量装置的误差、测量环境误差、人员操作误差组成。

2.1 量仪的误差包含如下几项：气源压力波动引起的示值变化 $\Delta_{压}$ ；示值非线性误差 $\Delta_{示}$ ；回程误差 $\Delta_{回}$ ；重复误差 $\Delta_{重}$ ；零位漂移误差 $\Delta_{漂}$ ；

2.2 测头或测量装置的误差随各种不同的测头或测量装置而不同，主要包含：标准件误差、相对位置误差、测头间隙选择不当引起的非线性误差、气动测头附加阻力损失引起的误差。

2.3 测量环境对气动测量的影响，主要是温度和湿度的影响。温度变化引起测头和工件的变形，湿度会引起油类的附着和金属表面的生锈等，从而给测量带来误差。

## 3 主要误差来源及分析

### 3.1 测头和测量装置的误差分析

以缸孔选配的内径测头为例，详细分析气动测量装置的误差来源。校对规及测头参数如下表：

	标称值	实测值
内径校对规	$\phi 27.7795$	$\phi 27.7809$
	$\phi 27.7900$	$\phi 27.7917$
测头直径	$\phi 27.767$	
校对规厚度	30	
喷嘴直径	$\phi 2^{+0.01}_0$	

#### 3.1.1 标准件误差

气动测量属于相对测量，气动测量的精度主要决定到标准件的误差，气动测量所用的标准件一般为两件。标准件的误差为检定该标准件的仪器的极限误差。

校对规的极限误差为：

$$\Delta_{\text{标}} = \pm \left( 0.5 + \frac{D}{300} + \frac{h}{100} \right) \text{um}$$

式中 D——被测孔径值 (mm)

h——被测截面与尺刻度平面间的距离 (mm)

### 3.1.2 相对位置误差

利用对向两喷嘴原理设计的气动测头，如果没有相对于工件的定位结构，则都有相对位置误差。

气动测头位置误差的定义

一个缸孔内径气动测头和一个与之相配的校对规处于校对状态，当两者的相对位置改变时，在气动量仪上指示校对规尺寸的示值变差即为此内径气动测头的位置误差（校对规或工件本身的形状误差不计入）。

气动测头位置误差分析

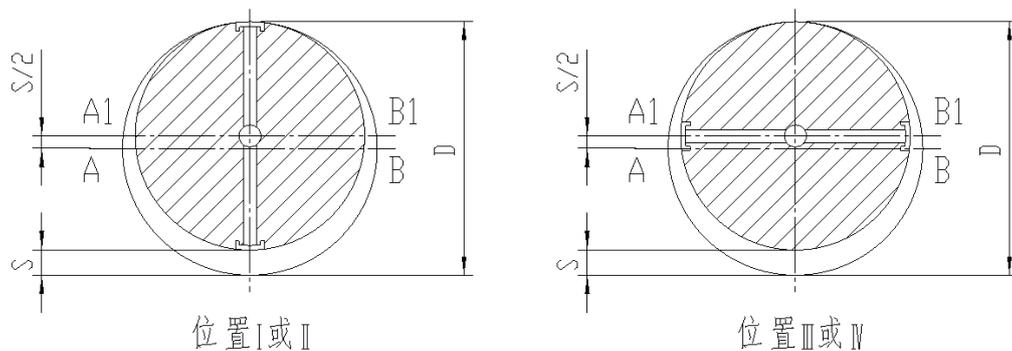
形成气动测头位置误差的原因主要有：缸孔测头与校对规之间的间隙；测头加工工艺误差；测头喷嘴下沉量不适当。

#### (1) 测头与校对规之间的间隙引起的位置误差

缸孔测头与校对规之间存在着间隙 S，则有可能产生 X-Y 向位置误差和 K 向位置误差。因为均由间隙 S 所产生，所以标为  $\Delta_{\text{XYS}}$  和  $\Delta_{\text{XS}}$ 。

如图 1 所示，外圆代表校对规，与其相切的内圆为测头外圆。当测头与校对规处于位置 I 或 II 时，测量的数值为校对规的直径 D；而当它们的相对位置处于位置 III 或 IV 时，测得的数值是校对规的弦长  $A_1B_1$ ，因此在 X-Y 向产生位置误差  $\Delta_{\text{XYS}}$ 。图中， $AB=D$ 。

$$\Delta_{\text{XYS}} = AB - A_1B_1$$



图

在图 1 右图的位置Ⅲ或Ⅳ中，根据直角三角形中比例线段定理得：

$$\left(\frac{S}{2}\right)^2 = \left(AB - \frac{\Delta_{XYS}}{2}\right) - \frac{\Delta_{XYS}}{2} = D - \frac{\Delta_{XYS}}{2} - \left(\frac{\Delta_{XYS}}{2}\right)^2$$

因  $\left(\frac{\Delta_{XYS}}{2}\right)^2$  很小，可以忽略不计，所以

$$\left(\frac{S}{2}\right)^2 = D - \frac{\Delta_{XYS}}{2}$$

$$\text{即：} \Delta_{XYS} = \frac{S^2}{2D}$$

实例中：S=27.7809-27.767=0.0139

$$\text{则：} \Delta_{XYS} = \frac{0.0139^2}{2 \times 27.7809} = 0.0000035$$

同样，当测头与校对规处于图 2 所示的位置时，测头测得的数值也不是校对规的直径 AB 而是线段 AB<sub>1</sub>，因而产生 K 向位置误差  $\Delta_{KS}$ 。

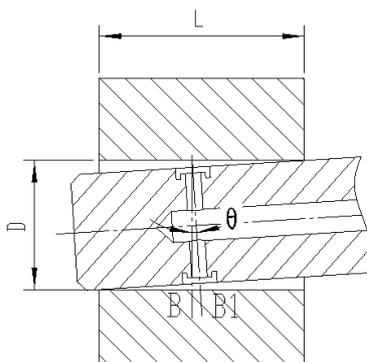


图 2

设校对规的宽度为 L

$$\Delta_{KS} = AB_1 - AB = \frac{D}{\cos\theta} - D = D \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta}$$

取  $\cos\theta$  的幂级数  $\cos\theta = 1 - \frac{\theta^2}{2} + \frac{\theta^4}{4} - \dots$ ，略去分母中的两次项，则

$$\Delta_{KS} \approx D \frac{\theta^2}{2}$$

因  $\theta \approx \frac{S}{L}$

故  $\Delta_{KS} \approx \frac{DS^2}{2L^2}$

实例中：D=27.7809      S=0.0139      L=30

$$\text{则：} \Delta_{KS} = \frac{27.7809 \times 0.0139^2}{2 \times 30^2} = 0.000003$$

(2) 测头加工工艺误差引起的位置误差

一般内径气动测头主要参数为外径  $D_1$  和喷嘴孔径  $d$ 。主要的工艺误差有外径  $D_1$  的公差，两喷嘴孔径  $d$  的不一致性，两喷嘴孔轴线对测头外圆中心的偏心，喷嘴孔轴线对测头轴线的垂直度误差等。

- 1) 外径  $D_1$  公差的大小除影响测头的倍率外，还影响测头与校对规之间的间隙。
- 2) 两喷嘴孔径不一致引起 X-X 向位置误差  $\Delta_{xd}$

设喷嘴孔径的直径及其公差为  $d^{+\Delta d}$ ，则可能出现的两喷嘴孔径最大的不一致性为  $\Delta d$ 。现设喷嘴 1 的直径为  $d$ ，喷嘴 2 的直径为  $d+\Delta d$ 。当测头与校对规的相对位置处于位置 I 时，空气从喷嘴 1 和喷嘴 2 流出的流量为

$$Q_I = K\pi (d+\Delta d) (S+a) + K\pi da$$

式中  $S$ ——测头与校对规之间的间隙

$a$ ——喷嘴孔的下沉量

$K$ ——空气流量系数

当测头与校对规的相对位置处于位置 II 时，空气从喷嘴 1 和 2 流出的流量为

$$Q_{II} = K\pi d (S+a) + K\pi (d+\Delta d) a$$

测头在位置 I 和位置 II 时的流量差为

$$Q_{I-II} = Q_I - Q_{II} = K\pi \Delta d s$$

由位置 I 和位置 II 时的流量差  $Q_{I-II}$  所引起的位置误差  $\Delta_{xd}$  为相当于喷嘴孔径为  $d$ 、流量为  $Q_{I-II}$  时的相当间隙。于是

$$Q_{I-II} = K\pi d \Delta_{xd}$$

即

$$\Delta_{xd} = \frac{Q_{I-II}}{K\pi d} = \frac{K\pi \Delta d s}{K\pi d} = \frac{\Delta d}{d} S$$

实例中：喷嘴公差  $\Delta d = 0.01$

则：
$$\Delta_{xd} = \frac{0.01}{2} \times 0.0139 = 0.00007$$

- 3) 两喷嘴孔轴线对测头外圆  $D_1$  的偏心  $\Delta_p$  引起的 Y-Y 向位置误差  $\Delta_{yp}$  和 X-Y 向位置误差  $\Delta_{xyp}$ 。

实际上一个测头的两个喷嘴孔往往不同轴，如图 3 所示。取两喷嘴中心线与导向外圆面母线交点的连线作为喷嘴孔的轴线。

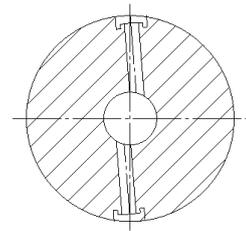


图 3

喷嘴孔轴线与测头外圆的偏心 $\Delta_p$ 在图4位置时,喷嘴测量的弦长不一致,其差值即Y-Y向位置误差 $\Delta_{yp}$ 。

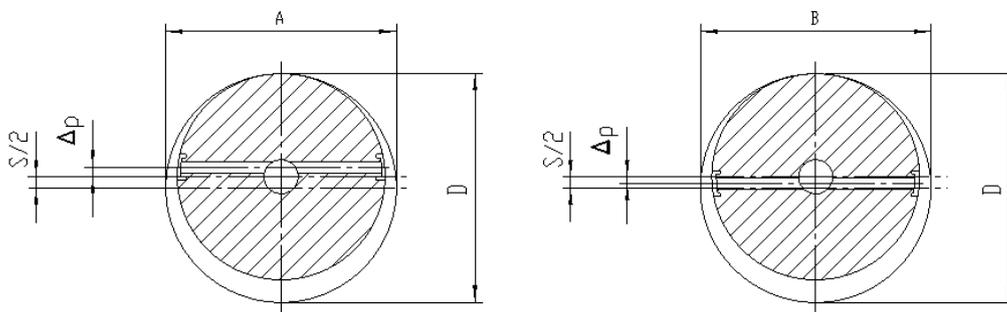


图4

在图4左边位置时,喷嘴孔轴线对于校对规中心的偏心量为  $\frac{S}{2} + \Delta_p$

在图4右边位置时,喷嘴孔轴线对于校对规中心的偏心量为  $\frac{S}{2} - \Delta_p$

代入式 $\Delta_{xys} = S^2/2D$ ,即可得出弦长与直径的差值,从而求出图4中A与B及其差值,此差值为Y-Y向误差 $\Delta_{yp}$ ,即

$$\Delta_{yp} = \frac{4S\Delta_p}{D}$$

如果 $\Delta_p$ 为0.05mm,则计算出的位置误差

$$\Delta_{yp} = \frac{4 \times 0.0139 \times 0.05}{D27.7809} = 0.0001$$

4) 喷嘴孔轴线对测头外圆轴线的垂直度误差 $\Delta_z$ 引起K向位置误差 $\Delta_{kz}$

当测头与校对处于位置V时,如图5所示,喷嘴测量值并不是校对规的直径D,而是比D大的斜线 $AB_1$ 。同样,在位置VI时,喷嘴测量的也不是校对规的直径,而是另一斜线 $AB_2$ 。由于在这种位置时,喷嘴轴线与校对规的径向截面的夹角不相等,所以两斜线 $AB_1$ 和 $AB_2$ 的长度也不相等,因而产生K向位置误差 $\Delta_{kz}$ 。

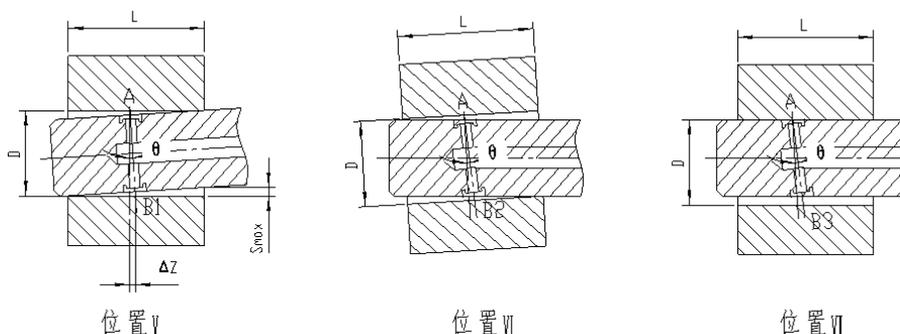


图5

在位置 V 时，由测头与校对规之间的最大间隙  $S_{\max}$  引起的最大斜角近似为  $\frac{S_{\max}}{L}$ ，由垂直度误差  $\Delta_z$  引起的斜角近似为  $\frac{\Delta_z}{D}$ 。因此，喷嘴孔轴线与校对规径向截面最大夹角近似为

$$\theta_V \approx \frac{S_{\max}}{L} + \frac{\Delta_z}{D}$$

$$AB_1 = \frac{D}{\cos \theta_V}$$

同理，K 向位置误差  $\Delta_{KZ} = \frac{DS^2_{\max}}{2L^2} + \frac{\Delta_z S_{\max}}{L}$

如果  $\Delta_z = 0.05\text{mm}$ ，则计算出的 K 向位置误差

$$\Delta_{KZ} = \frac{27.7809 \times 0.0247^2}{2 \times 30^2} + \frac{0.0247 \times 0.05}{30} = 0.00005$$

### (3) 测头喷嘴下沉量 a 取得不适当造成的相对位置误差

内径气动测头是根据喷嘴挡板机构的特性，把被测件内孔的尺寸变化转换成空气流量的变化。当喷嘴挡板之间的间隙较小时，由于空气的粘性，曲线具有明显的非线性。如果测头喷嘴端面的下沉量取得不适当，就有可能使测头的某一个喷嘴在非线性段工作，从而造成测头的位置误差。

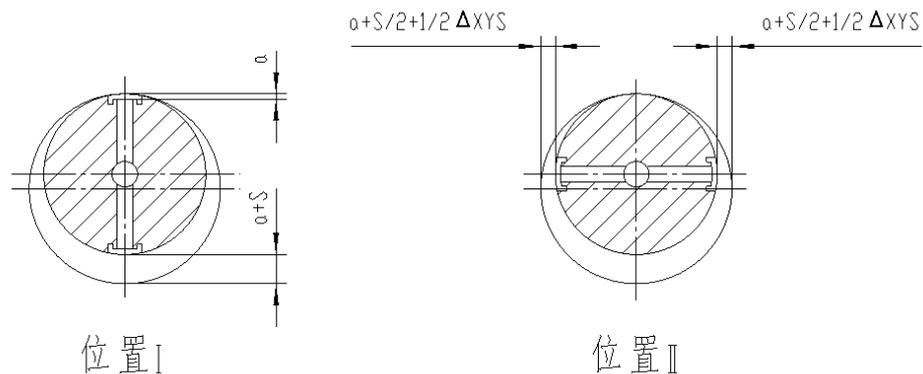


图 6

如图 5 所示，当测头与校对规处于位置 I 时，喷嘴 1 处的间隙为  $a$ ，喷嘴 2 处的间隙为  $a+S$ ，而当测头与校对规处于位置 II 时，喷嘴 1 与喷嘴 2 处的间隙都等于  $a + \frac{S}{2} + \frac{1}{2} \Delta_{XYS}$ 。 $\Delta_{XYS}$  为二次微量，可忽略不计，所以其间隙值都为  $a + \frac{S}{2}$ 。如果  $a$  值取得不当，致使在位置 I 时喷嘴 1 在非线性段工作，而喷嘴 2 处间隙较大则在线性段工作  $dm_j$  在位置 II 时，因为间隙比较大，所以喷嘴 1 和 2 都在线性段工作。在这种情况下，即使在位置 I 和 II 时，喷嘴 1 和 2 处的总间隙相等，都为  $S+2a$ ，

但在这两种位置分别从喷嘴 1 和 2 流出的空气总流量并不相等,这样就引起了 X-Y 向位置误差 $\Delta_{XYa}$ 。

### 3.1.3 测头间隙选择不当引起的非线性误差

气动测头的总间隙应与量仪的特性相适应。应根据测头的测量范围(如测量内径时的内径公差)正确选择间隙范围,使得整个测量范围都处于曲线的线性段,以保证最小的非线性误差。如图 6 中,  $P_x-S$  曲线的两端即  $S < S_1$  和  $S > S_2$  时曲线呈明显非线性,所以测量间隙应选择在  $S_1$ 、 $S_2$  之间才能保证最小的非线性误差。当测量间隙较大时,应该根据  $P_x-S$  曲线确定的范围。非线性误差的计算一般可根据  $P_x-S$  曲线先求出非线性最大压力差,然后除以曲线的平均斜率求得非线性示值的最大值。

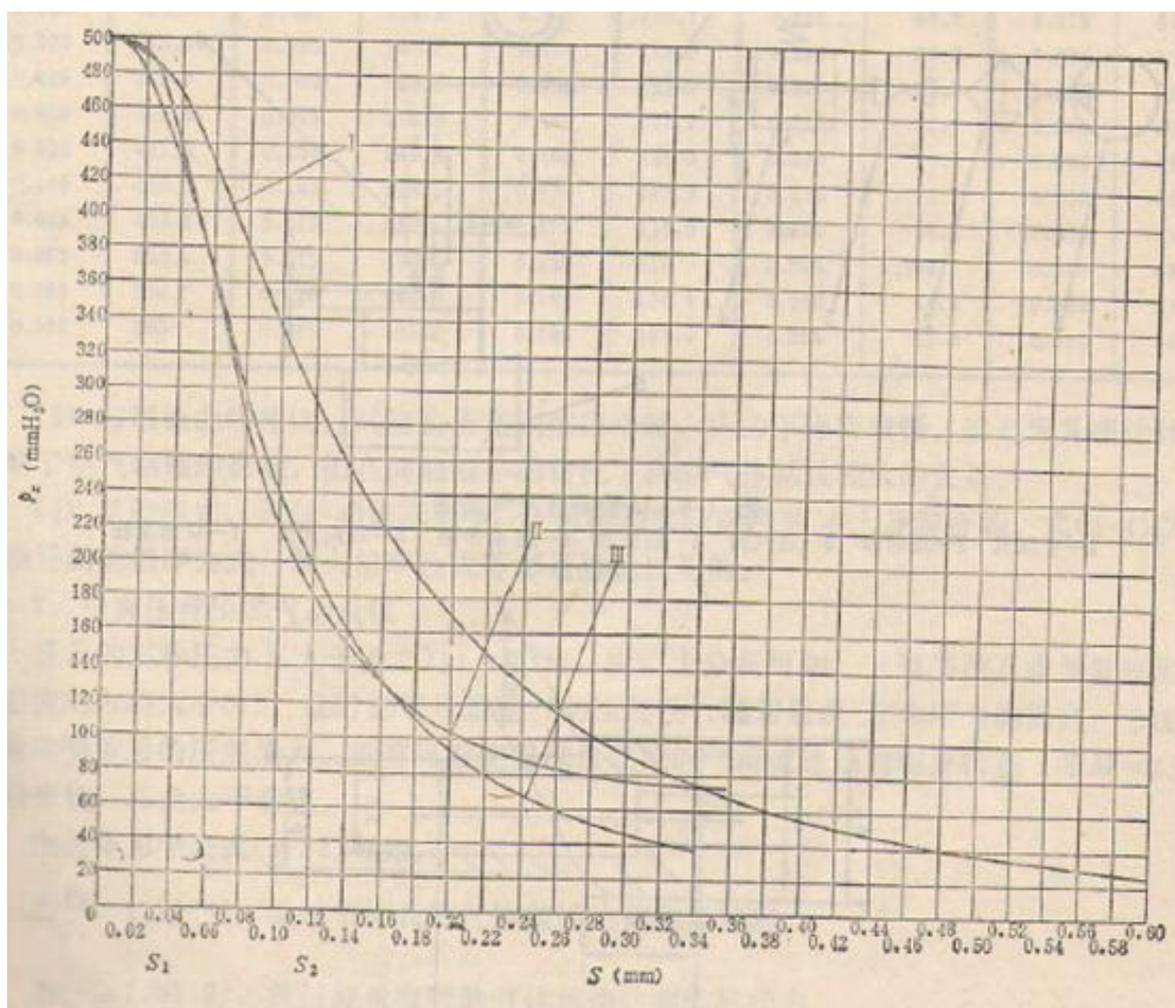


图 6  $P_x-S$  理论曲线与试验曲线

## 3.2 零位漂移误差

影响气动量仪零位漂移的因素很多，如稳压器的性能，空气中的油、水对机械传动部的影响，特别是量仪的零位调节阀和分辨率调节阀的可能的松动均会引起零位漂移。此外，使用环境的温度变化也是零位漂移的一个重要原因。零位漂移如在方向和数量上有一定规律时，可以找出原因（如受温度变化的影响）而予以防止。

## 3.3 测量环境引起的误差

### 3.3.1 工件与标准件的材料不同引起的误差

气动测量所用标准件的材料一般是合金钢，而被测件的材料则是多种多样的。气动测量一般是在常温下进行，很容易由于标准件和被测件的材料膨胀系数不同而产生测量误差。设标准件和被测件的温度是一致的，则温度误差 $\Delta_{温}$ 可以由下式表示：

$$\Delta_{温}=L(a_1-a_2)(t^\circ -20^\circ)$$

式中 L——被测件长度

$a_1$ ——标准件材料的线膨胀系数

$a_2$ ——被测件材料的线膨胀系数

t——测量时被测件和标准件的温度

温度误差属于系统误差。

### 3.3.2 测头热变形引起的误差

即使测头工件、标准件的材料相同，也会因各自的热容量的不同而产生不同的热变形量，从而引起测量误差。

### 3.3.3 由人手温度引起的被测工件尺寸的变化

当测量较小工件时，一般设计成座式测量装置，手持工件进行测量。由于人手的温度较高，将引起工件的急剧膨胀，因此在测量时应该戴上手套，以减少人手温度的影响。

## 4 结论与控制方案

上述分析了气动测量系统的主要误差来源，在实际工作中对误差来源规避，

以达到提高测量精度的目的。

#### 4.1 控制零位飘移误差：

保持气源稳定，压力电源满足量仪需求，定期校准，定期排泄管道中的杂质。

#### 4.2 控制测量环境引起的误差：

零件装配前，在保证工艺要求的前提下，结合材料膨胀系数，分别设定各种零件的恒温时间；对检测零件的操作工人，提出戴上手套操作的要求。

#### 4.3 控制测头和测量装置的误差：

- (1) 控制气动测头及校对规的直径尺寸，定期校准。
- (2) 入厂检测及定期校验测头，控制测头的位置变差，符合量仪技术要求。
- (3) 入厂检测及定期校验测头，控制测头的喷嘴下沉量，符合量仪技术要求。

#### **参考文献：**

- [1] 刘玉初 .气动量仪. 北京：机械工业出版社，1991
- [2] 国家机械委员会统编 . 量具与量仪 . 北京：机械工业出版社，1988
- [3] 《计量测试技术手册》编辑委员会 . 计量测试技术手册 . 北京：中国计量出版社，1995