

LAB-150闭式平面气浮导轨的设计及性能实验

梁万兆 邓玉新

一、前言

精密机械现在主要采用三种导轨：滑动导轨、滚动导轨及静压导轨。滑动和滚动导轨，由于受摩擦磨损、温度、介质等影响，使其运动速度、精度不能太高，寿命也有一定限度，在低速时又会出现“爬行”现象。因此，很难实现高精度快速微动进给运动。液体静压导轨，虽然产生的摩擦力很小，运动平稳无爬行，但是，由于它的工作介质是液体油，需要回收，对工作环境有污染，油温又很难控制，结构比较复杂，不宜产生高速直线运动。

使用空气静压导轨，是获得超精密直线运动的最佳新技术之一。特别是在快速微细加工技术和测试技术中，更显示出它的独特优点。由于导轨间的工作介质是一层很薄的气膜，工件台处于漂浮状态，不仅消除了摩擦磨损，长期使用精度不变，而且由于其导向性好，能满足精密定位精度，重复精度，快速微动无爬行等要求。总之，气浮导轨具有直线运动精度高，摩擦力小不磨损，运动平稳无爬行，寿命长无噪音，温升小没有热变形，气体勿需回收无污染等优点。当然，气浮导轨也具有承载能力小和刚度低，零件加工精度要求高，空气必须严格净化和清洁存贮等弱点。近年来，在提高导轨刚度和承载力方面，有了很多研究，并且进一步得到了较高的刚度和承载能力，从而使气浮导轨得到更广泛的应用。

二、空气静压导轨的型式

目前，国内外高精度气浮导轨，其直线运动精度已达 $0.1\mu\text{m}/100\text{mm}$ 以内，有的单坐标导轨已达毫微米级。其结构有平面型、V型、圆柱型或相互结合的混合形式。也有开式或闭式之分，气垫导轨或非气垫导轨数种形式。选择其中那一种形式，要根据导轨或工作台所负担的载荷、移动速度及精度，使用环境和工作条件来决定。

按照导轨的结构，可分为下列四种主要形式（见图1）。

1. 闭式平面导轨

如图1(a)所示。这种型式的导轨精度最高，刚度和载荷容量也很大。由于喷嘴开在工作台内腔，特别适用于行程较大的精密机床或高精度测试设备的长导轨面。导轨间隙可用研磨办法来保证。例如日本用来加工多角镜的精密机床所使用的气浮导轨，其精度目前是世界上最高的，其精度数据见表1

2. 闭式圆导轨

如图1(b)所示。结构简单，容易设计，零部件精度和间隙可靠精加工和精密装配来保证。由于工作台移动，导轨（导杆）长了会发生挠曲变形，所以不能用于长的导轨面，适用

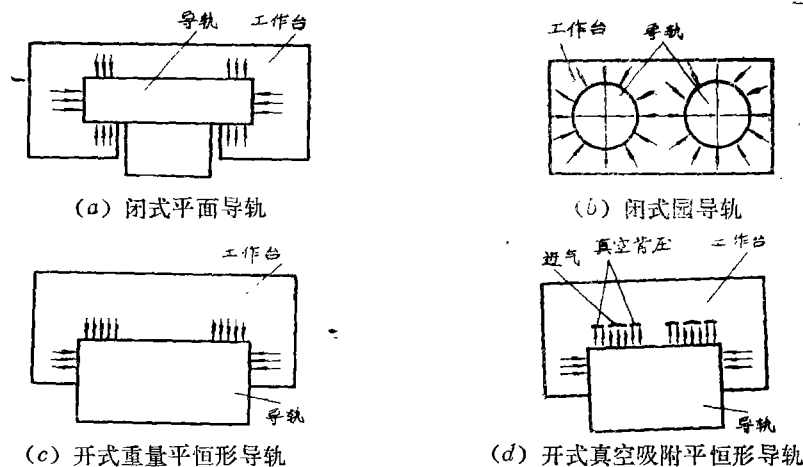


图 1

表 1 直线运动空气轴承 LA 型

工作台面积 (mm × mm)	300 × 300	
工作台行程 (mm)	300	
工作台直线运动精度 (μm/mm)	水平面内	0.032/300
	垂直面内	0.017/300
方位角 (sec/mm)	0.09/300	
俯仰角 (sec/mm)	0.15/300	
工作台导轨刚度 (kg/μm)	上下方向	25
工作台允许载荷 (kg)		150
供气压力 (kg/cm ²)	5	

于高精度、高稳定性的短行程工作台。

3. 开式重量平衡形导轨

如图1(c)所示。这是气垫导轨。工作台的重量(包括负荷)和空气静压支承成为平衡的形式,但是,一般设计的结果其承载能力都要大于工作台本身和承载的重量。这种形式的导轨结构简单,零件与部件容易加工,表面光洁度和精度都容易达到。其缺点是刚度和承载力较低,精度不如闭式的。一般适用于负荷不大的长工作台。常用的结构见图2。

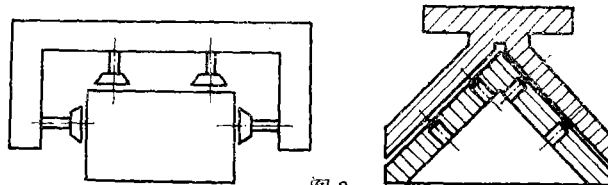


图 2

气垫的形式,一般分有长方形、矩形、V形和典型的圆盘形止推轴承。采用何种结构形式的气垫最佳,主要根据使用情况和条件来定。一般承载力较大,行程超过 300mm 的均采用长方形或矩形气垫。如意大利 DEA 公司所生产的 TOTA-0102 型三座标测长机,采用的就是长方形空气静压止推轴承。典型的圆盘形气垫,适用于高速、微动、短行程的工作台。总之,两种结构形式的气垫,均具有直进性高,轴承及微沟容易加工,安装方便及精度容易保证等优点,这两种气垫做为直进轴承是特别优秀的。此外,还有采用多孔质材料做为气垫的,

石墨气垫块用环氧树脂粘结到导轨面上。

4. 开式真空吸附平恒形导轨

如图 1(d) 所示。这也是气垫导轨。由于从真空泵得到的真空背压力也叫真空吸附力恰与支承方向相反，严格控制二者之间的匹配，可以精确限制浮起量。用此办法，可以减小轴承气膜间隙，甚至可以减小到 $1\mu\text{m}$ ，从而大大提高了轴承的刚度。此类轴承特别适用于大刚度，快速微动双座标精密工件台。例如，美国电子掩膜公司1979年出产的MM250CC形图形发生器的单层双座标工件台所使用的轴承就是此类轴承。其工件台示意图见图 3。

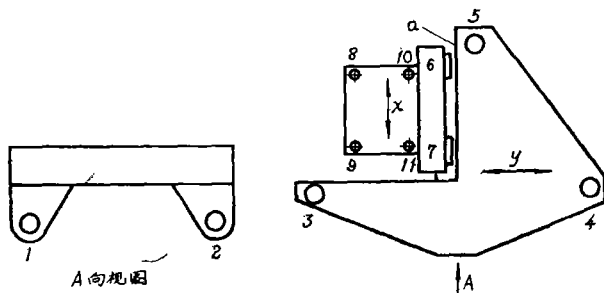


图 3

图中 1、2 是 y 工件台侧面导向定位轴承，3、4、5 是 y 台承载用空气静压止推轴承。通气后，3、4、5 使 y 台浮起，1、2 轴承沿着大理石基座侧面导向移动。6、7 是 x 工件台导向定位静压止推轴承，8、9、10、11 是 x 台承载用空气静压止推轴承。通气后，8、9、10、11 使 x 台浮起，依靠 6、7 轴承，沿着 y 台 a 面方向移动。所使用的全部轴承都是典型的圆盘止推轴承，除了有空气支承系统外，还配有真空吸附系统，起到真空背压作用，吹、吸相匹配，从而得到所需要的间隙。

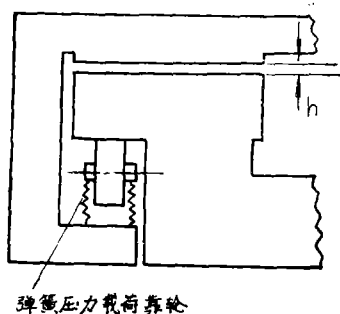


图 4

通过减小间隙达到提高刚度的目的还有一些其他办法，如德国的高精度数控镗铣床采用带预紧装置的空气静压导轨，其结构原理图见图 4。

运动构件在宽的支承面上厚约 $h = 10$ 微米的压缩空气气膜上滑动。空气静压导轨通过靠轮预紧装置预加载荷，产生的预紧力改变间隙力的大小，因而在气膜厚度极小的情况下，可使导轨具有较大的刚度。

三、LAB-150 闭式平面气浮导轨的设计

关于气浮导轨的设计计算方法，在有关资料中有不少介绍，比较了一些方法的繁简和精确程度，对于有效行程为 150mm 的 LAB 形闭式平面气浮导轨按文献^{[1],[2]}介绍，分别按单排孔带沟槽联接式（见图 5）和双排孔带沟槽联接式（见图 6）的修正积分法进行计算和设计。

由于导轨移动速度较慢，工作间隙中的气流流向及流速相对于静态时状态变化不大，故假定气体沿间隙厚度上粘度不变，且为等温及以层流的状态在宽为 B 的范围内，成直线和平行的向支承两外侧溢出。见计算简图 7。压力沿导轨宽度 $2B$ 的分布图 8。

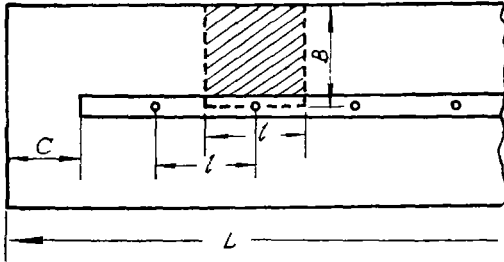


图 5

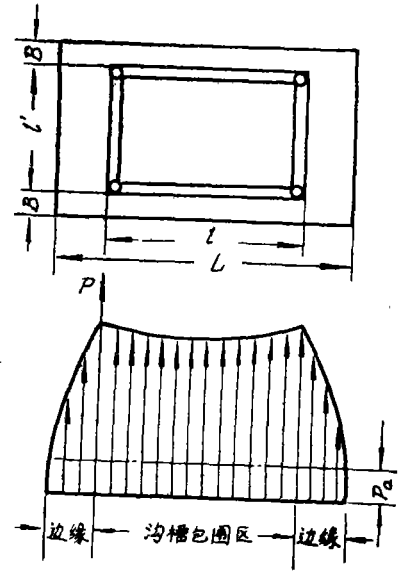


图 6

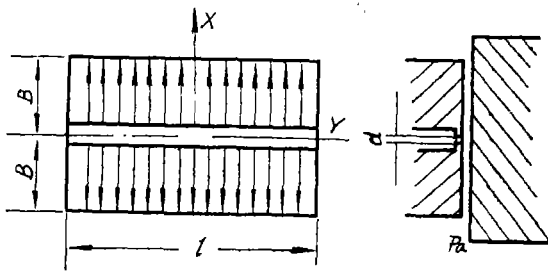


图 7

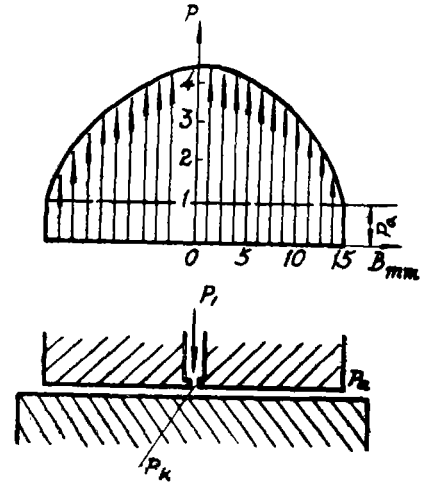


图 8

LAB-150 闭式平面气浮导轨见图 9 的设计步骤如下：LAB-150 闭式平面气浮导轨的主体截面示意图见图 10。主、副及导向导轨平面图及主要尺寸见图 11。

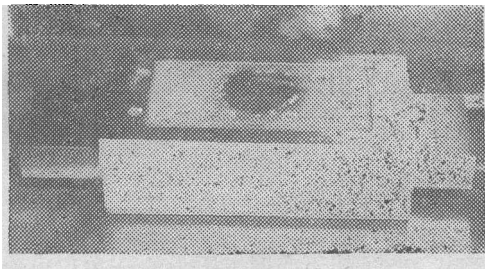


图 9

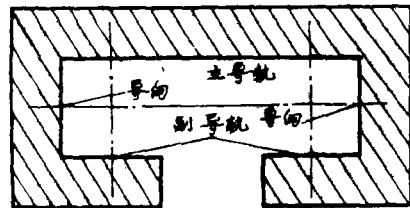


图 10

(1) 润滑气体种类：空气。

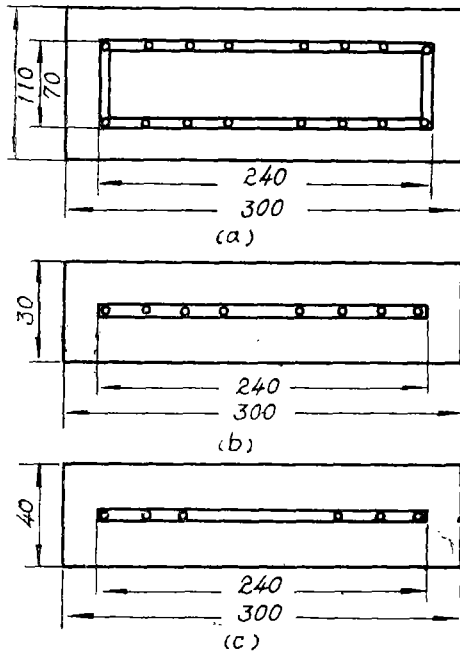


图 11

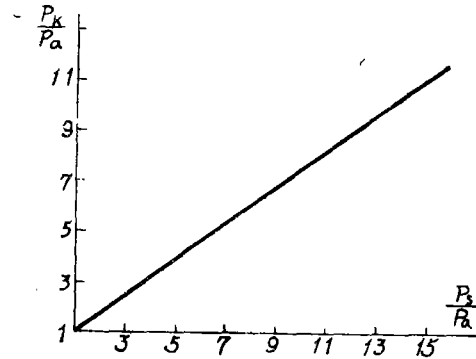


图 12

(2) 供气压力: $P_s = 2 \text{ kgf/cm}^2$

(3) 选取气兜压力 P_k 。

当 $P_s = 2 \text{ kgf/cm}^2$ 时, 由供气压力 P_s 与压力 P_k 的关系曲线 (见图12) 查得: $P_k = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$

(4) 计算承载能力

$$W_{\text{总}} = W_{\text{主导轨}} - W_{\text{副导轨}} \quad (\text{见图10})$$

由图 6 可知, 假定在沟槽所围成的长方形区域是一个恒压区, 其压力为 P_k , 则正个长方形气垫的承载能力为:

$$W_{\text{主导轨}} = W_{\text{中心}} + W_{\text{边横}} + W_{\text{边纵}} - FP。$$

式中: $W_{\text{中心}}$ —中心恒压区承载能力 kgf

$W_{\text{边横}}$ —横向边缘承载能力 kgf

$W_{\text{边纵}}$ —纵向边缘承载能力 kgf

对于 $W_{\text{中心}} = P_k A = 252 \text{ (kgf)}$ 见图11(a)

式中: A —沟槽包围的恒压区面积 cm^2

对沟槽包围区以外边缘的支承能力 ($W_{\text{边横}}$ 、 $W_{\text{边纵}}$) 由文献 [1],[2] 得到压力 P 沿导轨宽度 B 的变化公式为:

$$P^2 = P_k^2 + (P_0^2 - P_k^2) \frac{x}{B}$$

式中: x —导轨宽度 B 的座标变化 (cm) 由上式看出, 当间隙不变时, 压力的分布仅取决于压力的大小及导轨宽度。所以在沟槽区外的支承能力, 按面积对上式积分, 并减去外部大气压力负荷:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{边缘}} &= 2nl \int_0^B P dx - 2BLP_0 \\
 &= 2B \left[\frac{2(P_K^3 - P_0^3)}{3(P_K^2 - P_0^2)} \right] nl - FP_0
 \end{aligned}$$

式中 (见图 5):

n —喷嘴数 8 个

l —两个喷孔之间的距离 3cm

B —导轨宽度, 见图 11 cm

nl —沟槽长度 24cm

L —导轨长度 $L = nl + 2c$

$C = (0.8 \sim 1)B$

P_K —沟槽中的气体压力 kgf/cm²

P_0 —大气压力 1kgf/cm²

将数值代入, 则:

$$W_{\text{边横}} = 121.6(\text{kgf})$$

$$W_{\text{边纵}} = 53.16(\text{kgf})$$

$$F \cdot P_0 = 30 \times 11 \times 1 = 330(\text{kgf})$$

$\therefore W_{\text{主导轨}} = 252 + 121.6 + 53.16 - 330 = 96(\text{kgf})$ 同理, 如图 11(b) 所示, 由于是无沟槽包围区;

$$\begin{aligned}
 \therefore W_{\text{副导轨}} &= 2(W_{\text{中心}} + W_{\text{边横}} + W_{\text{边纵}} - FP_0) \\
 &= 2(0 + 91.2 + 11.4 - 90) \\
 &= 25.4(\text{kgf})
 \end{aligned}$$

则: $W_{\text{总}} = W_{\text{主}} - W_{\text{副}} = 70.8(\text{kgf})$

如图 11(c) 所示, 用同样方法算得导向导轨支承能力为:

$$W_{\text{导向}} = 16.8(\text{kgf})$$

两侧面限位导向力, 大小相等, 方向相反。

(5) 确定润滑特性的最佳几何参数 K 最佳由文献^[2]:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{最佳}} &= \frac{P_K}{\sqrt{3 \times p_K^8 - 10 \times p_K^4 + 8 p_K^2 - 1}} \\
 &= 0.34
 \end{aligned}$$

(6) 考虑到加工能力及条件, 取喷嘴直径 $d = 0.3\text{mm}$ 确定最佳间隙 h 。

由文献^{[1],[2]}, 按照经验公式, 当气体流经喷嘴时其重量流量应当与气体流经气膜间隙重量流量相平恒, 即:

$$0.76F \sqrt{\frac{(P_s - P_K)P_K}{T_0}} = (P_K^2 - P_0^2) \cdot \frac{lh^3}{12B\mu} \cdot v_0$$

经过一系列换算后, 得到气膜间隙 h 的计算公式:

$$h^3 = \frac{K}{T} \left(\frac{7.16d^2 B \mu}{lv_0} \right)^2$$

式中: K —润滑特性参数 $K = 0.34$

F —节流小孔面积 cm^2

P_s —供气压力 kgf/cm^2

T —绝对温度 $T = 293^\circ\text{K}$

μ —气体粘性系数 $\mu = 1.854 \times 10^{-10} \text{kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$

ν_a —空气比重 $\nu_a = 1.2034 \times 10^{-8} \text{kg}/\text{cm}^2$

将数值代入：

$$h^6_{\text{主导轨}} = 8 \times 10^{-18}$$

$$h_{\text{主导轨}} = 14.5(\mu\text{m})$$

同样算得：

$$h_{\text{副导轨}} = 12.8(\mu\text{m})$$

$$h_{\text{导向}} = 14.15(\mu\text{m})$$

(7) 计算流量

$$m_{\text{总}} = m_{\text{主导轨}} + m_{\text{副导轨}} + 2m_{\text{导向}}$$

$$m_{\text{主导轨}} = (P_K^2 - P_0^2) \cdot \frac{l k^3}{12 B \mu}$$
$$= 19.1 \text{cm}^3/\text{s}$$

由于 $n = 16$ 个

$$\therefore m_{\text{主导轨}} = 19.1 \times 16 = 304 \text{cm}^3/\text{s} = 1 \text{m}^3/\text{h}$$

同样 $m_{\text{副导轨}} = 1.08 \text{m}^3/\text{h}$

$$2m_{\text{导向}} = 0.82 \text{m}^3/\text{h}$$

$$\therefore m_{\text{总}} = 2.9 \text{m}^3/\text{h}$$

(8) 计算刚度

空气静压导轨的刚度决定于当间隙减少时压力 P_K 的增高。根据定义，刚度等于：

$$J = \frac{dP}{dh}$$

由文献^[2]，将 P 值代入，经过一系列计算后，得到刚度方程式并计算如下：

$$J = 8Bnl \cdot \frac{K_{\text{最佳}} \bar{P}_K (\bar{P}_K^4 - 3\bar{P}_K^2 + 2\bar{P}_K)}{h [\bar{P}_K^2 + K(3\bar{P}_K^4 - 2\bar{P}_K - 1)]}$$
$$= 3.22 \text{kgf}/\mu\text{m}$$

四、性能实验

1. 承载能力实验

承载能力是气浮导轨的一个重要参数。由上述计算可知，供气压力 P_s 不同，其承载能力亦不同。通过实验，证实了这一点。取不同的供气压力，测出了不同的极限承载能力。

所使用的实验设备：

(1) 铸铁压砂平板 $510 \times 820 \text{mm}$

(2) 砝码若干。

(3) 万用表一块

(4) 玻璃转子流量计。

加载方式见图13。其数据见表2。供气压力 P_s 与载荷的关系曲线见图14。

表2 节流孔直径 $d = 0.3\text{mm}$ 流量 $m_0 = 1\text{m}^3/\text{h}$

供气压力 $P_s(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	1	2	3	4	5
承载能力 $W(\text{kgf})$	40.75	56.82	68.3	77.65	83

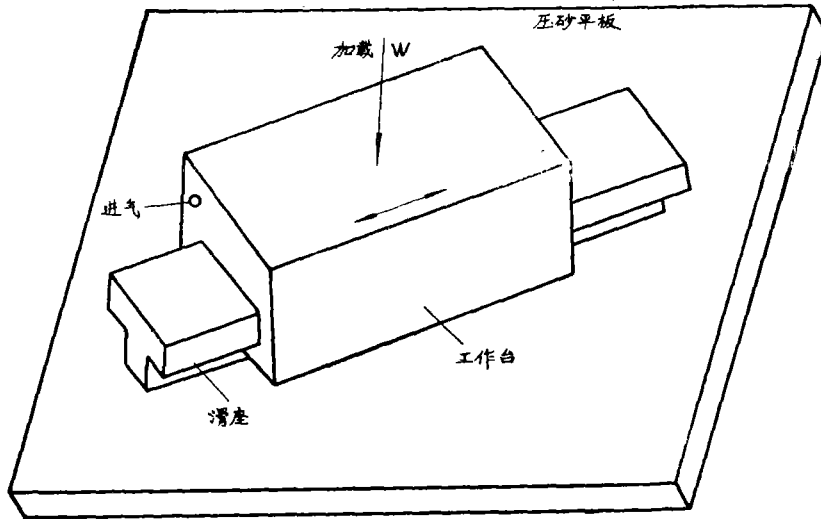


图 13

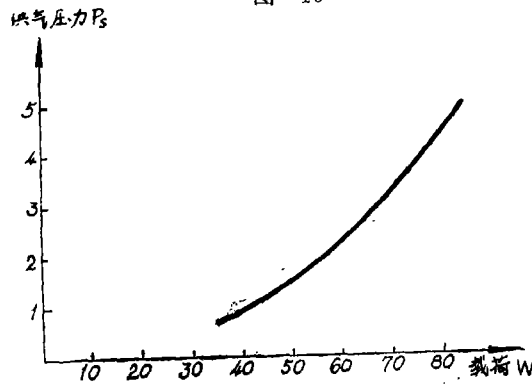


图 14

刻度值为 $0.1\text{m}^3/\text{h} \sim 1\text{m}^3/\text{h}$ 的流量计，串联在管路上，在测量的任意时刻都可以读取流量读数。万用表通过电阻挡，测量工件台与导轨间的电阻值。当电阻为 ∞ 时，工件台属于正常浮起，其他都属于接触或局部接触，即没有正常浮起。用此办法，可测得不同供气压力 P_s 相应的极限承载能力。

做此实验时，流量计小于导轨的流量，故流量计前的压力表读数虽然为某一定值（如， $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ ），但气体经过流量计和节流后，流入导轨间隙压力损失很大，故读数与理论计算相比偏低。如前所计算，当 $P_s = 2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 时，载荷应为 $W_{\text{总}} = 70.8\text{kg}$ ，但实测却为 56.82kg 。

2. 在一定条件下，载荷和气膜间隙的关系

对LAB-150闭式平面气浮导轨在工作中所承受的载荷，直接影响气膜间隙 h 的大小，而气膜间隙 h 的改变又影响导轨的运动精度，因此，我们力求选择一种最佳工作间隙，使导轨在工作过程中由于载荷的变化引起间隙 h 的变化最小，也就是刚度最大。

测量载荷与间隙的关系，所用实验装置及仪器如下：见表3。

表 3

名 称	规 格 型 号	数 量	精 度
铸铁压砂平板	510×820	1	平面度 $<6\mu\text{m}$
电感测微仪	DGB-4	1	$<1.2\mu\text{m}$
电感测头	DGC-6PG/A	1	$<0.7\mu\text{m}$
磁力表架		1	
万 用 表		1	
玻璃转子流量计		1	$0.1\text{m}^3/\text{h}\sim 1\text{m}^3/\text{h}$
砧 码		若干	

加载方式与图13相同，电感测头放在导轨底部。测得数据见表4。载荷与间隙关系曲线见图15。从上述实验可看出，当间隙 $h < 12\mu\text{m}$ 时，刚度比较好。由此，导轨间隙 $h = 12\sim 8\mu\text{m}$ 做为最佳工作间隙比较合适。

表 4 节流孔直径 $d = 0.3\text{mm}$ ，供压 $P_s = 4\text{kgf}/\text{cm}^2$ 时载荷与间隙的关系

总载荷 $W(\text{kgf})$	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54
载荷增加数 (kgf)		+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3
间隙 $h(\mu\text{m})$	20.5	18.2	16.7	14.9	14	12.8	11.8	10.7	9.9	9.3	8.7	8.2	7.7
间隙减少量 (μm)		-2.3	-1.5	-1.8	-0.9	-1.2	-1	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5

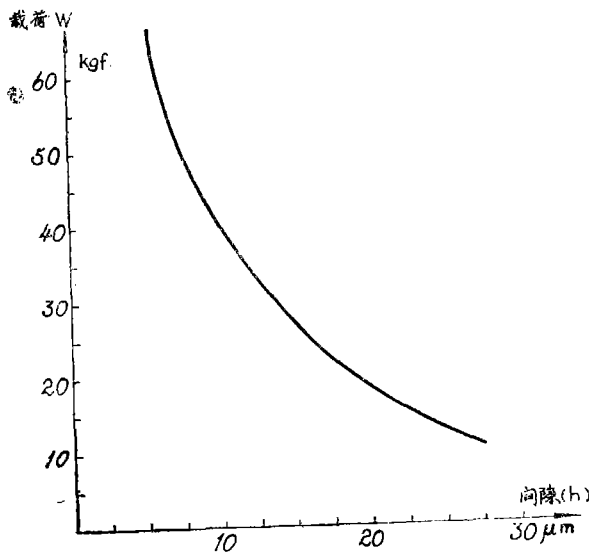


图 15

3. 刚度

由测得数据 (见表 3) 计算得平均刚度为:

$$J = \bar{J} = \frac{\sum J_i}{n} = 3.65 \text{ kgf}/\mu\text{m}$$

4. 在一定载荷下, 压力与间隙关系

为了探讨气浮导轨工作压力的变化是怎样影响气膜间隙, 从而得出比较合适的工作压力。做了在载荷一定时, 供气压力 P_s 与间隙 h 的关系实验。其实验装置如图 13。测得数据见表 5。供压与间隙关系见图 16。实验设备、仪器与前者相同。

表 5 在一定载荷下, 压力与间隙的关系

压力 P(kg)		1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
间隙 (μm)	$W = 18.5 \text{ kgf}$	43	47	50	52	55	55	56	56	56
	$W = 28.5 \text{ kgf}$	32	35	39	43	45	47	48	49	49.5
	$W = 33.5 \text{ kgf}$	26.5	33	36	39	42	45	46	46	47

从测得数据看出, 当载荷、孔径、流量一定时, 其供气压力 P_s 从 $1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 \sim 2.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 时, 间隙变化较大, 而当供压从 $3 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 逐渐变大时, 气膜间隙 h 变化较小, 因此, 导轨的工作压力选用 $3 \sim 5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 比较合适。

5. 直线运动精度测试

对导轨水平方向和垂直方向直线运动精度进行测试。测量装置见图 17。

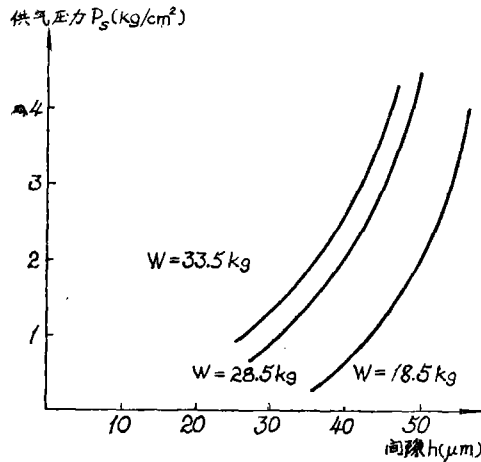


图 16

使用光电瞄准精度为 $0.1''$, 读数 $0.1''$ /格的 702 型光电自准直仪进行测量。测得数据见表 6 和表 7。测点数据用两点连线法进行数据处理, 并求出其均方根误差 σ 。

测量结果:

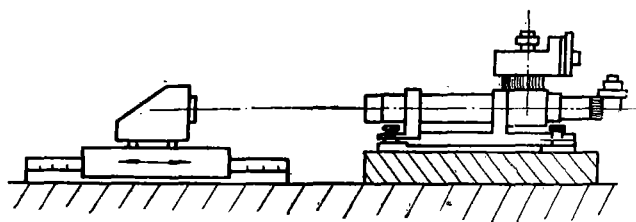


图 17

水平方向: $3\sigma = 0.18''$

$$\bar{x} \pm 3\sigma = 1.1 \pm 0.18 (\text{秒})$$

$$(0.82 \pm 0.13 \mu\text{m}/150\text{mm})$$

垂直方向: $3\sigma = 0.50''$

$$\bar{x} \pm 3\sigma = 0.89 \pm 0.5 (\text{秒})$$

$$(0.67 \pm 0.37 \mu\text{m}/150\text{mm})$$

几点结论:

(1) 用本文计算方法和公式设计的LAB-150 闭式平面气浮导轨比较实测及理论计算结果基本是一致的, 这说明了用假定中心为恒压区, 边缘用积分法的计算方法进行计算在工程实际设计中是可行的, 这是一种简易的办法。

(2) 导轨的极限承载能力随供气压力增加而增加, 刚度随供压增加而增大, 随着间隙的减小而增大。

(3) 流量随供压增加而增大, 随间隙减小而迅速减小。实际使用时, 供压与流量必须匹配。如果流量小, 气体经过节流后, 流入导轨间隙的压力要有损失, 实测读数(如承载力)偏低。

(4) 供压一定, 导轨浮起位置的变化随着外载的增加而减小; 外载一定, 浮起位置变化随供气压力增加而增加。

(5) 闭式平面气浮导轨是一种高精度的直线运动空气轴承, 如果设计合理, 工艺能保证加工精度, 其直线运动精度可达亚微米级或毫微米级。用它做为超微细加工、超精密切削加工或超精密测量的工件台装置是特别优秀的。

表 6 人工驱动水平面内运动的直线性

(第一组)

序号	测量位置 mm	测量读数(秒)			相对第 一点读数 a_i (秒)	累 积 值 $\sum_0^i a_i$ (秒)	平 均 值 $\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	修 正 值 $\frac{i}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	误 差 值 Δa_i (秒)	不 直 度 误 差 Δ (秒)
		正	反	平均						
0					0	0		0	0	
1	0~25	21.20	21.00	21.10	0	0	$\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$	0.725	-0.725	$\Delta = -1.17 = 1.17$
2	25~50	22.00	21.40	21.70	+0.6	+0.6	$= \frac{1}{6} \times$	1.45	-0.85	
3	50~75	21.20	21.80	21.50	+0.4	+1.00		(4.35)	2.17	
4	75~100	21.60	22.10	21.85	+0.75	+1.75	$= 0.725$		2.90	
5	100~125	22.00	22.60	22.30	+1.20	+2.95			3.62	
6	125~150	22.60	22.40	22.50	+1.40	+4.35		4.35	0	

(第二组)

序号	测量位置 mm	测量读数 (秒)			a_i (秒)	$\sum_0^i a_i$ (秒)	$\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	$\frac{i}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	Δa_i	Δ (秒)
		正	反	平均						
0					0	0		0	0	
1	0~25	20.60	20.60	20.60	0	0	$\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ $= \frac{1}{6} \times (5.45)$ $= 0.9$	+0.9	-0.9	$\Delta = 1.05$
2	25~50	21.50	21.20	21.35	+0.75	+0.75		+1.8	-1.05	
3	50~75	21.70	21.40	21.55	+0.95	+1.70		+2.7	-1.00	
4	75~100	21.70	21.70	21.70	+1.10	+2.80		+3.6	-0.8	
5	100~125	21.60	21.90	21.75	+1.15	+3.95		+4.5	-0.55	
6	125~150	22.00	22.20	22.10	+1.50	+5.45		+5.45	0	

(第三组)

序号	测量位置 mm	测量读数 (秒)			a_i (秒)	$\sum_0^i a_i$ (秒)	$\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	$\frac{i}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	Δa_i	Δ (秒)
		正	反	平均						
0					0	0		0	0	
1	0~25	0.00	0.08	0.40	0	0	$\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ $= \frac{1}{6} \times 3.45$ $= 0.575$	0.575	-0.575	$\Delta = 1.1$
2	25~50	0.70	0.09	0.80	0.4	0.4		1.15	-0.75	
3	50~75	0.60	1.10	0.85	0.45	0.85		1.725	-0.875	
4	75~100	1.00	0.50	0.75	0.35	1.20		2.30	-1.10	
5	100~125	1.50	1.50	1.50	1.1	2.30		2.875	-0.575	
6	125~150	1.60	1.50	1.55	1.15	3.45		3.45	0	

组号	x_i	$v_i = x_i - \bar{x}$	v_i^2	σ (秒)
1	1.17	+0.07	+0.0049	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{n-1}}$ $= 0.06$
2	1.05	-0.05	-0.0025	
3	1.1	0	0	
	$\bar{x} = 1.1$		$\sum V_i^2 = 0.0074$	

表 7 人工驱动垂直平面内运动的直线性

(第一组)

序号	测量位置 mm	测量读数 (秒)			相对第 一点读数 a_i (秒)	累 积 值 $\sum_0^i a_i$ (秒)	平 均 值 $\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	修 正 值 $\frac{i}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	误 差 值 Δa_i (秒)	不直度误 差 Δ (秒)
		正	反	平 均						
0					0	0	0	0	0	
1	0~25	28.80	29.10	28.95	0	0	$\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ $= \frac{1}{6} \times 0.9$ $= 0.15$	0.15	-0.15	$\Delta = 0.8$
2	25~50	29.70	29.10	29.40	+0.45	+0.45		0.30	+0.15	
3	50~75	29.50	29.30	29.40	+0.45	+0.90		0.45	+0.45	
4	75~100	29.50	29.10	29.30	+0.35	+1.25		0.60	+0.65	
5	100~125	29.40	28.50	28.95	0	+1.25		0.75	+0.50	
6	125~150	28.70	28.50	28.60	-0.35	+0.9		0.90	0	

(第二组)

序号	测量位置 mm	测量读数 (秒)			a_i (秒)	$\sum_0^i a_i$ (秒)	$\frac{1}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	$\frac{i}{n} \sum_0^n a_i$ (秒)	Δa_i (秒)	Δ (秒)
		正	反	平 均						
0					0	0	0	0		
1	0~25	29.30	29.40	29.35	0	0	$\frac{1}{6} \times (-2.0)$ $= -0.333$	-0.33	+0.33	$\Delta = 1.0$
2	25~50	29.40	29.50	29.45	+0.1	+0.10		-0.66	+0.76	
3	50~75	29.30	29.40	29.35	0	+0.10		-0.99	+1.09	
4	75~100	29.00	28.80	28.90	-0.45	-0.35		-1.32	+0.97	
5	100~125	28.40	28.40	28.40	-0.95	-1.30		-1.65	+0.35	
6	125~150	28.80	28.50	28.65	-0.70	-2.00		-2.00	0	

(第三组)

序号	测量位置 mm	测量读数 (秒)			a_i (秒)	$\sum_0^i a_i$ (秒)	$\frac{n}{i} \sum_0^n a_i$ (秒)	$\frac{n}{i} \sum_0^n a_i$ (秒)	Δa_i (秒)	Δ (秒)
		正	反	平 均						
0					0	0	0	0		
1	0~25	29.20	29.30	29.25	0	0	$\frac{1}{6} \times 1.65$ $= 0.275$	-0.275	+0.275	$\Delta = 0.8$
2	25~50	29.10	29.10	29.10	-0.15	-0.15		-0.55	+0.4	
3	50~75	29.20	29.20	29.20	-0.05	-0.20		-0.825	+0.625	
4	75~100	29.10	29.20	29.15	-0.10	-0.30		-1.10	+0.80	
5	100~125	28.50	28.60	28.55	-0.70	-1.00		-1.375	+0.375	
6	125~150	28.60	28.60	28.60	-0.65	-1.65		-1.65	0	

组 号	x_i	$V_i = x_i - \bar{x}$	V_i^2	σ
1	0.8	-0.09	0.0081	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{n-1}}$ $= 0.167$
2	1.09	+0.2	0.04	
3	0.8	-0.09	0.0081	
	$\bar{x} = 0.89$		$\sum V_i^2 = 0.0562$	

参 考 文 献

[1] 机床译丛, 1965, No 9

[2] J.W.Powell; 《空气静压轴承设计》, 国防工业出版社, 1978