

闭式双排节流孔矩形气浮导轨的计算方法(二)

陶家生

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 闭式双排节流孔矩形气浮导轨是气浮导轨中最常见的结构, 本文推导了它的计算方法, 从而为该导轨的设计找到了一条有效、快捷的途径。

关键词: 气浮导轨; 高压区系数; 承载能力; 刚度

1 单、双排节流孔气浮导轨的区别与联系

单排节流孔止推板结构形式恰如图1中宽度的一半, 这样气体从小孔中流出后就沿宽度方向向两侧流向大气, 而双排节流孔结构形式则只能向单方向流向大气, 于是在 B_1 宽度内即形成一高压区, 因此两者的区别在于:

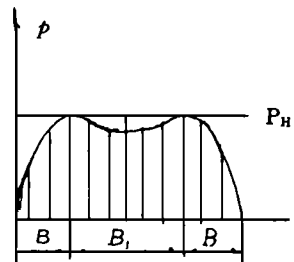
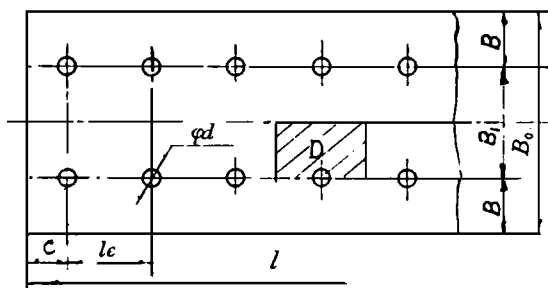


Fig. 1 Thrust plate of double row orifices structural style

Pressure field structure in wide direction

- 1) 高压区的有无;
- 2) 气流从节流孔流出后的单、双向流动。

这两种形式的联系在于,单排孔时气体沿止推板双向排入大气,双排孔时这两排孔向两个方向流动的B区域的作用则恰相当于单排孔结构时一块止推板的作用,只是它们的气体质量流量相差一半。至于气体流动模式、压气分布形式将完全相同。所以双排孔止推板在两个B区域的承载能力和刚度的计算将与单排孔时的完全类似,只需再考虑到高压区部分的作用即是双排节流孔时的情况。

因此,可以借鉴开式单排节流孔时气浮导轨的计算方法求得闭式双排节流孔形式气浮导轨的计算公式。

2 闭式双排节流孔矩形气浮导轨的承载计算

在双排孔形式下的气体质量平衡方程为^[1]

$$P(P_0 - P) = K_1(P^2 - 1)^2 \quad (1)$$

其中

$$K_1 = T \left(\frac{lc h^3 \gamma_a}{2 \times 7.16 D^2 B \eta} \right)^2 \quad (2)$$

P : 节流孔后压力与环境压力 P_a 的比

T : 气体绝对温度

h : 导轨单面间隙

γ_a : 供气温度下大气比重

D : 节流孔直径

η : 空气粘度

P_0 : 供气压力与环境压力的比

如第一节的分析可以得出单个止推板(即开式导轨)的承载能力为:

$$W = \left[\frac{4}{3} BN lc \frac{P^3 - 1}{P^2 + 1} + f_g B_1 l P - l(2B + B_1) \right] \cdot P_a \quad (3)$$

P_a : 环境压力

N : 单排节流孔个数

f_g : 高压区压力系数

对于闭式导轨如图2, P_1 、 P_2 为节流孔后压力与大气压力的比, B 为节流孔至导轨边缘的宽度, B_1 为两排节流孔之间的距离。

其承载能力为

$$Q = \frac{4}{3} BN lc P_a \left(\frac{P_1^3 - 1}{P_1^2 - 1} - \frac{P_2^3 - 1}{P_2^2 - 1} \right) + f_g B_1 l (P_1 - P_2) \cdot P_a \quad (4)$$

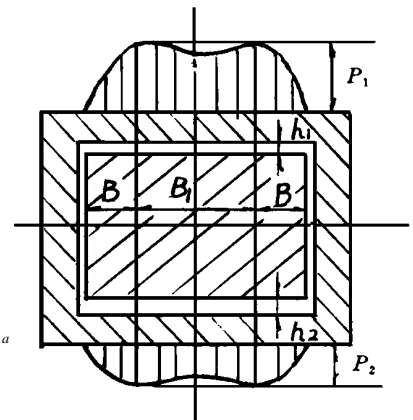


Fig 2 Pressure field structure of close double row orifices slidew ays

3 闭式双排节流孔矩形气浮导轨的刚度计算

(1) 对于单个止推板即开式双排节流孔矩形气浮导轨在纯正压力下的刚度计算。

(3) 式对 h 求偏导数得

$$K_s = \frac{\partial W}{\partial h} = \frac{8BNLc(P^5 - 3P^3 + 2P^2) + 6f_w B_1 l P (P^2 - 1)^2}{h[P^2 + K_1(3P^4 - 2P^2 - 1)]} K_1 P_a \quad (5)$$

(2) 对闭式双排节流孔矩形气浮导轨在纯正压力下的刚度计算。

(4) 式对 h 求偏导数得

$$K_c = \frac{\partial Q}{\partial h} = 2 \frac{\partial W}{\partial h} = \frac{16NB_1Lc(P^5 - 3P^3 + 2P^2) + 12f_w B_1 l P (P^2 - 1)^2}{h[P^2 + K_1(3P^4 - 2P^2 - 1)]} \cdot K_1 P_a \quad (6)$$

(3) 对于闭式双排节流孔矩形气浮导轨的角刚度计算

闭式导轨同时承担正压力及倾覆力矩(即复合载荷)的能力为^[11]

$$Q_{\text{当}} = \frac{6}{l} M + Q \quad (7)$$

M : 外载倾覆力矩

Q : 外载正压力

在导轨的分布压力与间隙成线性关系的前提下, 导轨的承载原理如图3^[11], 导轨承担的力矩为

$$M = \frac{l}{3} \int_0^l (q_1'' - q_2'') dx$$

q_1'' : 对应导轨间隙 h_1 处的分布压力

q_2'' : 含义类同 q_1''

那么, 设导轨倾斜时小端间隙为 h_s , 两端间隙差为 Δh , 则

$$q_1'' = \frac{W(h_s)}{l}, \quad q_2'' = \frac{W(h_s + \Delta h)}{l}$$

$$M = \frac{l^2}{6} \left[\frac{W(h_s) - W(h_s + \Delta h)}{l} \right]$$

此间隙差对应的角度设为 α , 则

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta h}{l}\right)$$

$$d\alpha = d\left(\arctan \frac{\Delta h}{l}\right) = \frac{1}{l} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta h}{l}\right)^2} \cdot d\Delta h = \frac{1}{l} d\Delta h \quad (l \gg \Delta h)$$

当 α 很小时(即 $\alpha \rightarrow 0$) 有

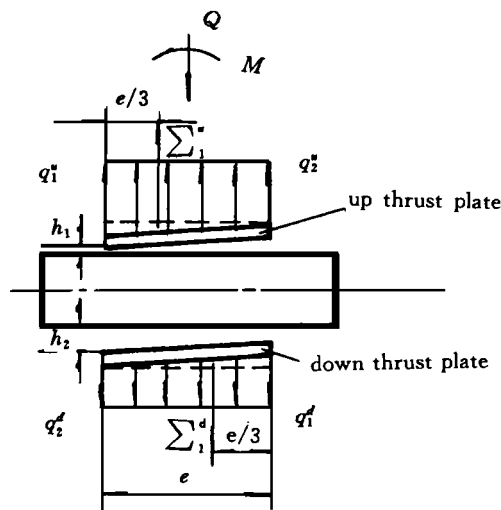


Fig 3 Slideways loading principle figure under complex load

$$\alpha = \frac{\Delta h}{l}$$

角刚度为(当 α 很小时)

$$K_\alpha = \frac{M}{\alpha} = \frac{l^2}{6} \left[\frac{W(h_s) - W(h_s + \Delta h)}{l} \right] / \left(\frac{\Delta h}{l} \right) = \frac{l^2}{6} \cdot \frac{W(h_s) - W(h_s + \Delta h)}{\Delta h}$$

从上式可看到 $\frac{W(h_s) - W(h_s + \Delta h)}{\Delta h}$ 恰是开式导轨承受纯正压力时的刚度。

$$K_\alpha = \frac{l^2}{6} K_s \quad (8)$$

从(5)、(6)、(8)式可以看出,要求导轨的刚度关键在于求出导轨节流孔后的压力 P 。

4 节流孔后压力 P 的求解

从(1)、(2)两式可以看出,在导轨的 B 、 D 、 l_c 确定之后, P 将随导轨间隙 h 而改变。从(1)式可以看出对应于每个 h 值 P 将有四个根,首先须确定哪个根为所求,然后才能确定它的求法,为此将(1)式整理后并设

$$y = K_1(P^2 - 1)^2 - P(P_0 - P)$$

则

$$y_P = 4K_1P^3 - 4K_1P + 2P - P_0$$

$$y_{PP} = 12K_1P^2 - 4K_1 + 2$$

$$y_{PPP} = 24K_1P$$

令 $y_P = 0$, 则可解出两个根并设为 u_1 、 u_2

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{1}{6K_1}}, \quad u_2 = -\sqrt{\frac{1}{3} - \frac{1}{6K_1}}$$

当 $K_1 > \frac{1}{2}$ 时, y_P 的图像如图 4 所示。其与 P 轴的交点即 $(u_1, 0)$ 、 $(u_2, 0)$ 分别位于 y 轴的两侧, 在 $P = 0$ 处 $y_P = -4K_1 + 2$, 在 $K_1 > \frac{1}{2}$ 情况下不仅确定了 $y_P = 0$ 有两个根, 同时决定了在 $P = 0$ 处 $y < 0$ 于是图像即确定下来。

下面仅较详细说明 $P = 0$ 时的情形。

当 $P = u_1$ 时, $y_{PPP} = 24K_1P > 0$, 因此在 u_1 处 y_P 取得极小值。

当 $P = 0$ 时, $y_P = -P_0 < 0$, 因 P_0 为供气压力与环境压力的比大于 0, 所以 y_P 图像应交

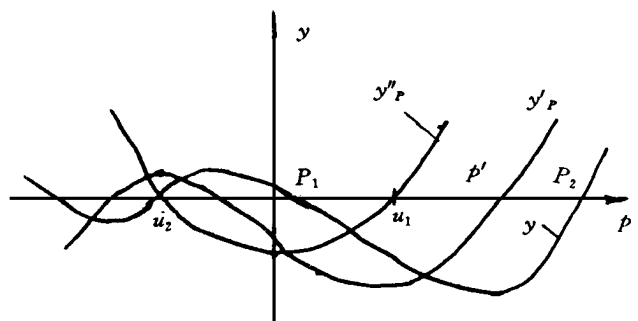


Fig 4 Distribution location plan of equation root

于 y 负半轴

当 $P = P_0$ 时, $y_p = 4K_1(P_0^2 - 1) + P_0$, 因为供气压力应大于大气压力即 P_0 应大于 1, 可知 $P = P_0$ 的极限情况下 $y_p > 0$, 因而 y_p 的图像也确定下来如图 4 所示,。它与 P 轴正半轴只有一个交点设为 P , 因 P 一定大于 u_1 , 所以可以从 y_p 图像看出在 P 处 $y_p > 0$, 所以在 P 处 y 取得极小值。又因为

$$P = 0 \text{ 时} \quad y_1 = K_1 > 0$$

$$P = 1 \text{ 时} \quad y = - (P_0 - 1) < 0$$

$$P = P_0 \text{ 时} \quad y = K_1(P^2 - 1)^2 > 0$$

此即说明 y 与 P 正半轴应该有两个交点, 设其分别为 P_1 、 P_2 , 因 $P = 1$ 时 $y < 0$, 所以 P_1 必小于 1, 因实际意义知节流孔后压力必不小于环境压力, 所以 P_1 不是所求。而 P_2 恰小于无量纲供气压力 P_0 而大于环境压力, 所以 P_2 必为所求之方程(1) 的根, 且在工程实际意义下是唯一的。这种唯一性是非常重要的, 它可以允许使用牛顿迭代法求解 P 值以代入(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)各式进而求得导轨的承载及刚度。

利用牛顿迭代公式可以求得迭代关系式

$$P_{i+1} = P_i - \frac{y}{y'} = P_i - \frac{K_1(P_i^2 - 1)^2 - P_i(P_0 - P_i)}{4K_1P_i^3 - 4K_1P_i + 2P_i - P_0} \quad (9)$$

经反复迭代直至达到所要求的精度, 即获得了此 P 值。

5 设计实例

(1) 为圆柱度仪设计的导轨长 $l = 260 \text{ mm}$, $B = 39 \text{ mm}$, $B_1 = 81 \text{ mm}$, $l_c = 32 \text{ mm}$, 共两排节流孔, 单排节流孔个数 $N = 8$

将以上参数代入相应公式求得的计算结果及利用此导轨所作的开式导轨的实验结果如下表 1。

Tab 1

supp lyp rpressure	0. 2M Pa		0. 3M Pa		0. 4M Pa	
item	load (kg)	stiffness(N/ μm)	load (kg)	stiffness (N/ μm)	load (kg)	stiffness (N/ μm)
theoretical value	166. 7	10. 6	427. 8	24. 0	692. 5	38. 9
experimental value	171. 5	12	430. 5	23. 5	652. 5	32
relative error	2. 8%	13%	0. 6%	2%	5. 8%	17. 7%

可以求得其相对误差的平均值:

$$\text{承载误差} \quad (2. 8 + 0. 6 + 5. 8) \% / 3 = 3 \%$$

$$\text{刚度误差} \quad (13 + 2 + 17. 7) \% / 3 = 11 \%$$

从上例的实验结果可以看出, 承载的计算结果仅相差百分之几, 而刚度的误差为百分之十几, 这种精度对于工程计算来说已经够用了。

(2) 为汽车试验台设计的闭式双排孔矩形气浮导轨 $l = 200 \text{ mm}$, $B = 20 \text{ mm}$, $B_1 = 50 \text{ mm}$, $l_c = 32 \text{ mm}$, 单排孔个数 $N = 6$,

承载能力的理论计算及所作的实验结果见表2。

Tab 2

supply pressure (MPa)	theoretical value (N)	experimental value (N)	error (%)
0.3	1987	1965	1.1
0.4	2900	3060	5.5
0.5	3770	4380	16

由于此闭式轨是按0.3 MPa 供气压力设计的,所以在0.3 MPa 供气压力时,误差最小仅为1.1% 而越远离此供气压力误差越大。

正压力刚度的理论计算值及实验值见表3。

Tab 3

supply pressure (MPa)	theoretical value (N/ μm)	experimental value (N/ μm)	error (%)
0.2	133.7	80	40
0.3	303.3	292	3.7

从表中可以看出在0.3 MPa 的供气压力下,其刚度误差较小,而在0.2 MPa 的供气压力下,其刚度误差则较大。因此可以看出,闭式导轨的设计,一旦选定供气压力并选定间隙后,导轨的性能也就在很大程度上确定下来了,而不象开式导轨那样还具有很大的调整性,即可以改变供气压力。从工程设计的实际意义角度看,在闭式导轨的设计中,间隙偏小是有利的,一但需要把刚度加大时,可增加供气压力给予实现。

6 结 论

本文所述的闭式及开式矩形气浮导轨的设计计算方法,经过两个设计实例的验证,其刚度和承载的理论值与实验值的差值均为百分之十左右,这种计算精度已可以满足实际工程设计的需要,且这种设计方法使用起来各项物理意义分明晰,使用方便,各参数易于调整,设计计算简便、迅速。

参 考 文 献

- [1] 陶家生等 闭式矩形气浮导轨承受复合载荷的研究 光学 精密工程, 1993, 1(4): 15~ 21
- [2] 党根茂 气体润滑技术 南京: 东南大出版社, 1990

Method of Calculating Close Double Row Orifice Rectangular Aerostatic Slideways

Tao Jiasheng

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

Close double row orifice rectangular aerostatic slideways is a common structure in the aerostatic slideways. Calculating method of this kind of aerostatic slideways has been described in this article, then a more practical method of calculation is found.

Key words: Aerostatic slideways, High pressure area coefficient, Loading capacity, Stiffness

陶家生 男, 1964年9月生。1988年毕业于吉林工业大学机械工程系。从事气体润滑及光学精密机械领域的研究。现从事国家重点项目的研究工作, 已有两项成果填补国内空白。