

# 节流孔特性对抑制气浮工作台 自激振动的效果研究

里见忠笃  
(东京电机大学)

章亚男  
(上海大学精密机械工程系 上海 201800)

**摘要** 以前期研究工作为基础,分析了气浮式工作台由于微小自激振动的产生,而引起其定位精度劣化的内在原因。提出了通过减小节流孔孔径,改变节流孔结构形式等方法来抑制工作台自激振动的技术方案,并对其进行了理论计算和实验验证,结果表明采用这种方法可以取得良好的效果。

**关键词** 气浮导轨 自激振动 小孔节流 气腔

## 1 引言

X-Y 气浮工作台是轻载精密仪器和设备的新型线性传动导向装置,由于其高精度、低摩擦性能,在大规模集成电路制造、微机械加工、生物体精细结构解剖、二维精密测试等场合有着广泛的应用前景。随着微细加工和检测精度的提高,对它的定位精度要求相应提出了更高的要求。

由于作为气浮工作台承载介质的气体具有可压缩性,容易引起微小的自激振动,导致导向和定位精度的降低。如何采取措施减少振动,提高气浮工作台的工作精度成为国际上机械传动领域中研究的热点难点问题。

前期制作的气浮式工作台,其移动台面的四个角的上下面内为圆形空气支撑面,空气从直径为 0.6mm 的节流孔中喷出,使 X-Y 移动台面完全由高压空气提供的浮力支撑起来,与固定底座没有直接的物理接触。移动台面的  $x$  轴和  $y$  轴也采用气浮导轨,因而工作台有移动基本上没有摩擦阻力。然而由于作为气浮导轨承载介质的气体具有可压缩性,使工作台移动台面有微小的自激振动产生,从而引起该工作台的定位精度不能令人满意。

气浮式工作台产生自激振动的原因很复杂,影响因素有压力源压力、节流孔孔径、气腔直径和深度、气膜厚度等<sup>[1]</sup>,其中节流孔孔径、和节流孔结构形式(有无气腔)是其主要因素,因此本研究从减小节流孔孔径和改变节流孔结构形式两方面入手,对气浮式工作台自激振动的抑制进行理论分析和实验验证。

## 2 流量系数的理论计算和压差实验测定

空气等压缩性流体在高速通过节流孔时会产生缩流现象,因此,必须考虑空气通过节流孔时的流量系数。在本研究中,设定节流孔的直径为 0.3mm。

### 2.1 基准节流孔的流量系数

图 1 所示为节流孔径为 0.6mm 时,通过节流孔的体积流量  $Q$  与气膜厚度  $h$  的关系图,该流量特性曲线是用经日本通产省工业技术院检定的容积型流量计进行测定的。

根据节流孔节流领域的理论,压缩流体在单位时间内通过节流孔的质量流量  $Q_w$  为<sup>[2]</sup>:

$$Q_w = C_f \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_0^2 \sqrt{2g \cdot \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P_s}{\gamma_s} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_s} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]} \quad (1)$$

式中:  $r_0$  为节流孔半径,  $K$  为绝热指数,  $\rho_s$  为压力源部空气密度,  $\rho$  为节流孔前后的空气密度平均值,  $P_0$  为节流孔后的空气压力,  $g$  为重力加速度,  $P_s$  为压力源压,  $\gamma_s$  为压力  $P_s$  时空气的比重,其中质量流量与体积分量的关系为:

$$Q_w = Q \cdot \rho_s \quad (2)$$

根据公式(1), (2)计算出节流孔径为 0.6mm 时的流量系数,利用最小二乘法原理,得到流量系数与压力差 ( $P = P_s - P_0$ ) 之间的函数表达式:

$$C_{f\Phi 0.6} = 0.0018P^2 - 0.0486P + 0.7209 \quad (3)$$

这样利用公式(3)可以得到节流孔径为 0.6mm 时任一压力差下的流量系数。图 2 为流量系数与压力差的关系图。

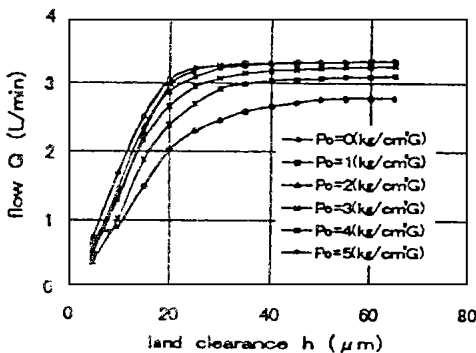


Fig. 1 Flow characteristics of orifice ( $\Phi 0.6\text{mm}$ )

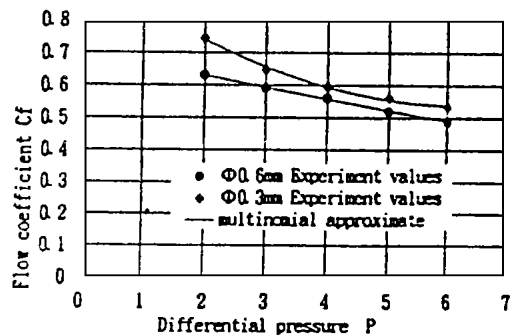


Fig. 2 Relations between flow coefficient and differential pressure

### 2.2 $\Phi 0.3\text{mm}$ 节流孔的流量系数

利用 2.1 节中  $\Phi 0.6\text{mm}$  节流孔的流量系数,计算本研究中的上下圆形空气承载导轨部

Φ0.3mm 节流孔径的流量系数。图 3 示出了为计算流量系数所需的压力差实验测定装置。

其中, 节流孔 1 的直径为 0.6mm, 节流孔 2 的直径为 0.3mm,  $P_s$  为压力源压力,  $P_0$  为节流孔 1 后的压力, 同时也是节流孔 2 的源压,  $P_a$  为节流孔 2 后的压力(等于大气压)。向该装置提供一定的高压空气时, 分别读取  $P_s$  和  $P_0$  值, 利用  $P_s$  与  $P_0$  的压力差和公式(3)得到节流孔径为 Φ0.6mm 时的流量系数, 利用公式(1)计算此时的质量

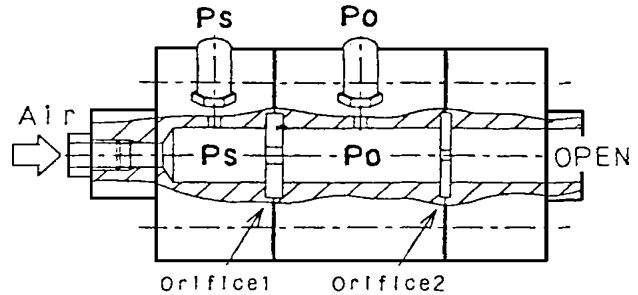


Fig 3 Experimental device

流量  $Q_w$ , 用该  $Q_w$  及公式(2)计算节流孔径为 Φ0.3mm 时的流量系数。

通过该实验, 得到一组节流孔径的流量系数与压力差的实验数据, 利用 2.1 节的方法求得流量系数与压力差的函数关系(参见图 2):

$$C_{f\Phi 0.3} = 0.015P^2 - 0.1691P + 1.0225 \quad (4)$$

### 3 圆形空气承载导轨部的设计计算

#### 3.1 最佳气膜厚度与最大静刚性

圆形空气承载导轨部节流孔流入的空气质量为  $Q_w$ , 流出的空气质量  $Q_w$  为:

$$Q_w = \frac{C_2 \pi h^3}{6\mu} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \frac{P_0^{n+1} - 1}{\ln(R_2/R_1)} \quad (5)$$

式中:  $n$  为体积压缩指数,  $\mu$  为空气粘性系数,  $R_2$  为圆形空气气垫半径,  $R_1$  为气腔半径,  $C_2$  为气体常数。

平衡时  $Q_w = Q_w$ , 这时可求得气膜厚度以及与之相对应节流孔后的压力  $P_0$ 。本研究中,  $R_2 = 10\text{mm}$ ,  $R_1 = 2\text{mm}$ ,  $P_s = 7\text{kgf/cm}^2$ 。

承载能力  $W$ , 可以将气垫内的压力分布与大气压之差在整个气垫范围内进行积分求出。式(6)即为单压方式下载重  $W$  的计算公式:

$$W = \pi R_1^2 (P_0 - P_a) + 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r \left\{ \left[ \frac{6\mu Q_w}{C_2 \pi h^3} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \ln \frac{R_2}{r} + 1 \right]^{\frac{n}{n+1}} - P_a \right\} dr \quad (6)$$

当节流孔无气腔时, 这时按  $R_1 = r_0$  进行计算。

静刚性即载重对气膜厚度变化率  $dW/dh$ , 当采用差压方式时, 其载重  $W = W_1 - W_2$ , 此时最大静刚性为单压方式的两倍, 结果见图 4。最大静刚性时的气膜厚度即为最佳气膜厚度。

#### 3.2 安定区域

当节流孔后的压力  $P_0$ 、气膜厚度  $h$  相对于平衡点的  $P_0$  和  $h$  有微小变化时, 引起  $Q_w$  和  $Q_w$  的变动, 从而使圆形承载导轨部存在流入及流出的空气质量差, 同时气膜空气质量  $M$  也发生变化, 这时, 将发生自激振动。不产生自激振动的 Routh 安定条件<sup>[1]</sup>为:

$$\frac{\alpha + \beta}{\theta} > \frac{q}{s} \tag{7}$$

式中:

$$\alpha = - \frac{dQ_w}{dP_0}$$

$$\beta = \frac{\partial Q_w}{\partial P_0}$$

$$\theta = \frac{\partial Q_w}{\partial h}$$

$$q = \frac{\partial M}{\partial P_0}$$

$$s = \frac{\partial M}{\partial h}$$

其中

$$M = \pi R_1^2 (h + h_0) C_2 P_0^{\frac{1}{n}} + 2\pi h C_2 \frac{R_2}{R_1} r \left[ \frac{P_0^{\frac{n+1}{n}} - 1}{\ln(R_1/R_2)} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{r}\right) + 1 \right]^{\frac{1}{n+1}} dr$$

满足安定条件的气腔深度  $h$  的范围示于图 5。

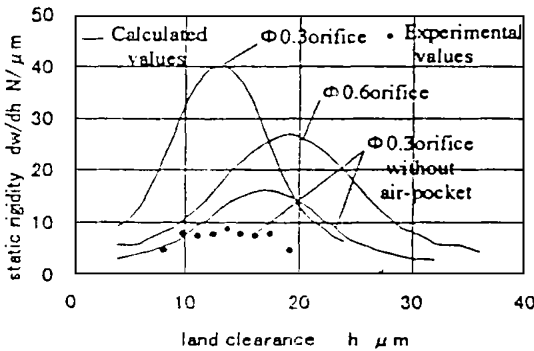


Fig 4 Relations between static rigidity and land clearance

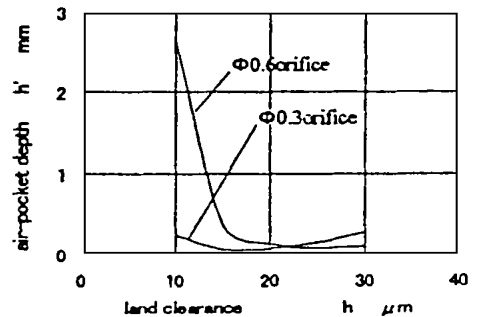


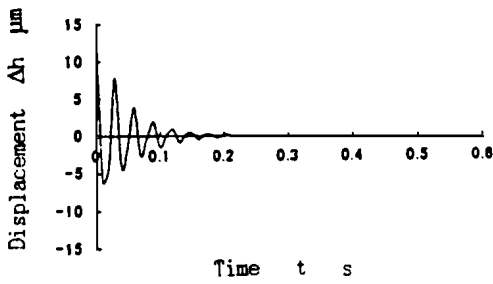
Fig 5 Relations between air-pocket depth and land clearance in the critical condition for self-excited vibration

### 4 振动衰减特性

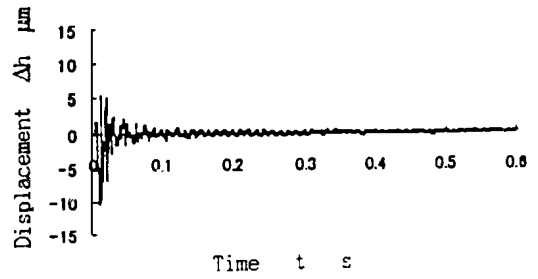
由于  $P_0$  和  $h$  的微小变化, 使得  $x - y$  工作台的移动台面在  $z$  方向上相对于平衡点亦有一微小变动量  $\Delta h$  (它是时间的函数), 其振动衰减方程<sup>[3]</sup>为:

$$\Delta h = [A_0 e^{a_0 t} + 2e^{bt} (D \cos cct + E \sin ct) \Delta h_0] \tag{8}$$

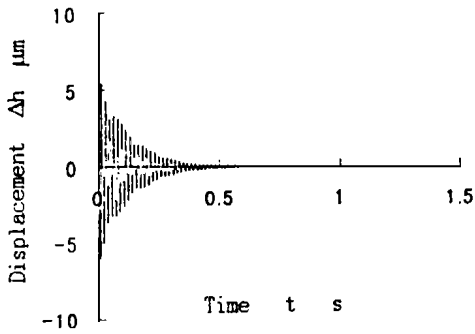
式中:  $\Delta h_0$  为  $t = 0$  时的变动量,  $A_0, a_0, b, C, D, E$  为满足 Routh 条件时和各项系数。



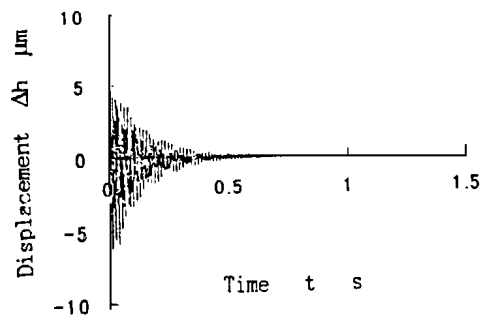
(a) Calculated vibration wave without air-pocket (φ0.3mm)



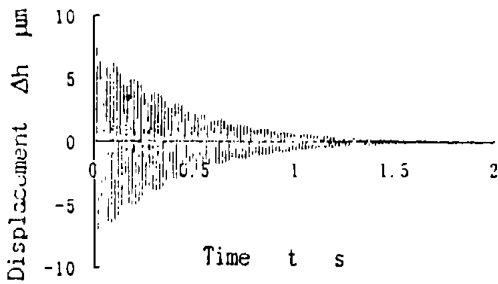
(b) Experimental vibration waves without air-pocket (φ0.3mm)



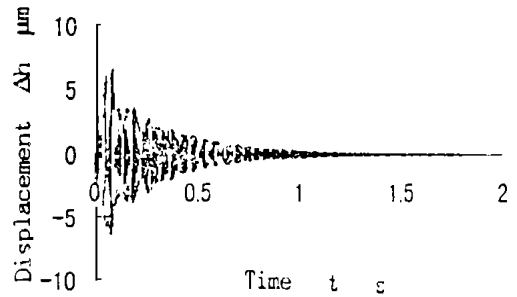
(c) Calculated vibration wave with air-pocket (φ0.3mm)



(d) Experimental vibration waves with air-pocket (φ0.3mm)



(e) Calculated vibration wave with air-pocket (φ0.6mm)



(f) Experimental vibration waves with air-pocket (φ0.6mm)

Fig 6 Vibration waves in the stable region

图 6 所示为基于理论计算和经实验测定的安定区域衰减特性。

## 5 结 论

- (1) 随着节流孔径的增大, 其静刚性变小;
- (2) 在相同的节流孔径情况下, 有气腔的节流孔其静刚性比没有气腔的静刚性大;
- (3) 在节流孔径没有气腔的情况下, 其衰减特性比有气腔的衰减特性好;
- (4) 节流孔径增大, 衰减特性变差。

### 参 考 文 献

- 1 里见忠笃 空气静压案内に関する研究—各种要因が自励振動の発生に及ぼす影响, 精密机械, 1983, (9): 49
- 2 里见忠笃 空气或静压案内研究—静刚性および安定性に関する理论与实验 精密机械, 1981, (10): 47
- 3 里见忠笃 空气式静压案内に関する研究—电磁力制御による振動減衰性の改善と自励振動防止 精密机械, 1985, (12): 51

## The Effect of Orifice Characteristics on Reducing Self-excited Vibration of Aerostatic x-y Stage

SA TOM I Tadaatsu

(Tokyo Denki University)

ZHAN G Ya-Nan

(Dept. of Precision Mechanical Engineering of Shanghai University, Shanghai 201800)

### Abstract

Based on the previous work, this paper analyses the reason for small self-excited vibration of the aerostatic x-y stage, which reduce the positioning accuracy. The technical scheme of controlling self-excited vibration of x-y stage is proposed by reducing the orifice diameter and changing its structure. After theoretical calculation and experimental validation, the above method can achieve a good effect on reduction of self-excited vibration.

**Key words:** Aerostatic guiding system, Self-excited vibration, Orifice, Air-pocker

里见忠笃 男, 1938 年出生, 日本东京电机大学教授, 上海大学顾问教授。主要从事精密机械方面的工作。