

# 自吸式气体支承的理论分析与实验研究\*

潘 晋 沈 钊 徐丰仁

(清华大学精仪系)

周昌恩

(烟台大学机械系)

**摘要** 采用等参有限元伽辽金法计算自吸式气体支承的性能,同时在单片机控制气体静压支承实验装置上进行实验研究。从而为支承的设计提供了理论基础。

## 一、引 言

气体支承采用粘度较小的气体作为润滑剂,因而具有摩擦阻力小、运动速度快、精度高、无爬行等特点。而且,气体可由支承排入大气,不污染环境和光电器件,不必采用专门的密封装置,适用于大规模集成电路中的工艺条件,所以在电子束曝光机、图形发生器、光刻机、铬版机等光学精密机械中得到了广泛的应用。

精密工作台是电子束曝光机等设备的重要部件,采用气体支承可以获得非常小且几乎一致的静、动摩擦系数,从而增加了工作台的灵敏度。同时,气膜具有均化误差的作用,可以提高工作台的运动精度。自吸式气体支承是近年来逐步应用到精密工作台系统中的一种新型支承元件。本文从理论分析和实验研究两方面深入研究这种气体支承的性能,从而促进气体支承在精密工作台系统中的应用。

### 符号说明

$h$ ——气膜厚度 (m);  $P$ ——气体压力 (Pa);  $\mu$ ——动力粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $R$ ——气体常数 ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ );  $T_0$ ——工作温度 (K);  $\rho$ ——气体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\Phi$ ——插值函数;  $C_0$ ——节流孔流量系数;  $A_0$ ——节流面积 ( $\text{m}^2$ );  $S_p$ ——真空泵抽速 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $P_s$ ——供气压力 (Pa);  $P_e$ ——环境压力 (Pa);  $P_c$ ——真空腔压力 (Pa);  $P_o$ ——节流孔出口压力 (Pa);  $P_i$ ——真空泵入口压力 (Pa);  $r_1$ ——轴承外半径 (m);  $r_2$ ——内孔半径 (m);  $r$ ——节流孔半径 (m);  $r_0$ ——节流孔分布圆半径 (m);  $d_0$ ——真空管直径 (m);  $l_0$ ——真空管长 (m);  $W'$ ——拉力 (N);  $W$ ——承载力 (N);  $W_c$ ——真空腔作用力 (N);  $W_e$ ——环境大气作用力 (N);  $W_p$ ——气膜支反力 (N);  $W_i$ ——预载荷 (N);  $K_s$ ——刚度 ( $\text{N}/\mu\text{m}$ );  $K$ ——供气孔数;  $\theta$ ——极坐标中的极角 ( $^\circ$ );  $r$ ——极半径 (m);  $Q_r$ ——径向质量流量 ( $\text{kg}/\text{s}$ );  $Q_\theta$ ——周向质量流量 ( $\text{kg}/\text{s}$ );  $K_L$ ——抗拉刚度 ( $\text{N}/\mu\text{m}$ );  $x, y$ ——空间变量 (m);  $F$ ——压力分布函数 ( $F = P^2$ );  $V_0$ ——节流孔气体流速 (m/s);  $Q_m$ ——节流孔质量流量 ( $\text{kg}/\text{s}$ );  $Q_2$ ——间隙流量 ( $\text{kg}/\text{s}$ );  $K_{ij}$ ——有限元方程刚度矩阵系数;  $Q_j$ ——有限元方程载荷矩阵系数。

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题。

## 二、理论分析

自吸式气体支承的结构简图如图 1 所示, 与普通气体支承相比, 其主要特点是在支承间隙内同时存在正压(浮力)和负压(吸力)。

供气压力产生的正压使止推面浮起, 真空区负压产生吸力, 前者使气膜厚度增加, 后者则使气膜厚度减小, 当两者匹配时, 形成一个稳定的状态。由于真空的吸附作用, 使这种支承具有双向刚度, 配上  $x$ 、 $y$  两向驱动可用单层结构, 实现二维运动, 即开式结构具有闭式特点, 大大提高了工作台的工艺性能。

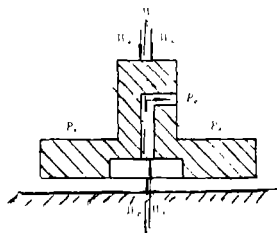


图 1 气体支承示意图

一般说来, 气体支承的数学描述是润滑力学中常用的基本方程式——雷诺(Reynolds)方程<sup>[1]</sup>。它表达了支承间隙内压力膜厚及润滑剂粘度和密度之间的基本关系。对于图 1 所示的自吸式气体支承而言, 在静态工况下, 有下式成立:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial F}{\partial y} \right) + q \delta_i = 0 \quad (1)$$

式中:  $F = P^2$ ,  $q = 24\mu RT_0 \rho V_0$

$$\delta_i = \begin{cases} 0 & \text{节流孔处} \\ 1 & \text{非节流孔处} \end{cases}$$

用等参元离散方程式(1), 并根据伽辽金法则可导出有限元方程<sup>[2]</sup>:

$$[K]_{m \times m} [F]_{m \times 1} = [Q]_{m \times 1} \quad (2)$$

$$\text{式中: } K_{ij} = \iint_{D^{(e)}} h^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \right) dx dy \quad (3)$$

$$Q_j = \begin{cases} 24\mu RT_0 \beta Q_m & \text{节点 } j \text{ 位于节流孔处} \\ 0 & \text{节点 } j \text{ 位于非节流孔处} \end{cases}$$

而  $\beta = 1.0$  或  $0.5$

$$Q_m = C_0 A_0 P_0 \psi / \sqrt{RT_0}$$

$$\psi = \begin{cases} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_0}{P_s} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_0}{P_s} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & 0.528 \leq \frac{P_0}{P_s} < 1 \\ \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} & \frac{P_0}{P_s} < 0.528 \end{cases} \quad (4)$$

采用迭代法求解(2), 可得气膜压力分布  $P(x, y)$ 。支承承载力  $W$  (图1) 由下式给出:

$$W = W_p + W_s - W_a - W_t \quad (5)$$

式中:  $W_p = \pi r_2^2 P_s$ ;  $W_s = \pi r_1^2 P_s$ ;

$$W_p = \iint_D P dx dy$$

而刚度  $K_A = \frac{dW}{dh}$  (6)

自吸式空气支承内腔接真空泵，气体流动近似看作粘性流动，可以导出：

$$P_s^2 = P_1^2 + Q_2^2 / C_k \quad (7)$$

式中： $Q_2 = P_s S_p / RT_0$ ； $C_k = \pi d_0^4 / 64 \mu l_0 RT_0$

(7) 式给出了  $P_s$  的计算公式，可见  $P_s$  与间隙流量  $Q_2$ ，真空泵压力  $P_1$ ，抽速  $S_p$  以及管道尺寸  $d_0$ 、 $l_0$  有关。求出  $P_s$  后，即可计算  $W$  和  $K_A$ 。

由于真空腔的吸附作用，自吸式空气支承不仅能承受压力，还可以承受向上的拉力（与  $W$  反向），这时力平衡方程为：

$$W' - W_i = W_a - W_p - W_p \quad (8)$$

上式左端表示支承拉力克服预载  $W_i$  后的余量。要提高抗拉能力，应当减小  $W$ 。（或减小  $P_s$ ，即增大真空度）。如前所述，减小  $P_s$  意味着增大  $S_p$ 、 $d_0$ ；减小  $l_0$ ，也就是说提高真空泵的抽速或采用短而粗的导管。改写 (8) 式：

$$W' - W_i' = W_i - W_p \quad (9)$$

式中  $W_i' = W_a - W$  称为等效预载。真空度越大 ( $P_s$  越小)， $W_i'$  越大。由此表明，真空吸附相当于增加一个没有惯性质量的预载荷，这揭示出这种新型支承的物理本质。

采用上述分析方法，根据对称性取  $\pi/K$  区域分析，计算自吸式自成节流空气支承的特性 (结构参数为： $K = 6$ ， $r_1 = 45\text{mm}$ ， $r_2 = 15\text{mm}$ ， $r_0 = 25\text{mm}$ ； $r_s = 0.25\text{mm}$ )。结果参见图 2 至图 6。从中可见：

1. 在  $r_2 < r < r_0$  区域内，真空吸附对径向压力分布、周向流量影响较大，但在  $r_0 < r < r_1$  区域内作用较小。而周向压力和径向流量变化较小。

2. 真空吸附降低了支承的最大承载力，提高了最大刚度值，总流量略有增加，最佳间隙点变化不大。

3. 真空吸附的主要优点在于不改变支承的结构参数就可以改变系统的刚度分布

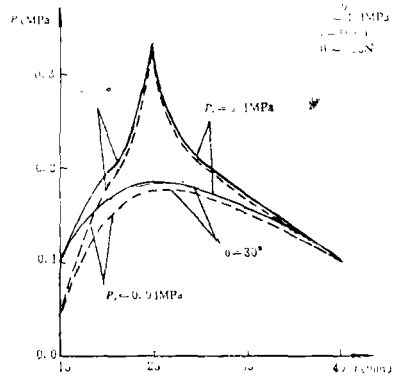


图 2 径向压力分布 ( $p_r$  变化)

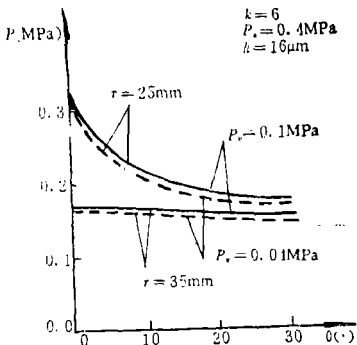


图 3 周向压力分布 ( $p_\theta$  变化)

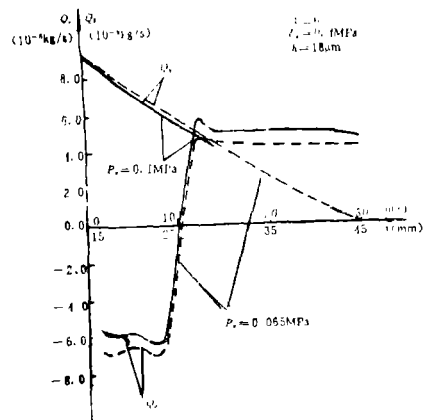


图 4 周向流量与径向流量 ( $p_r$  变化)

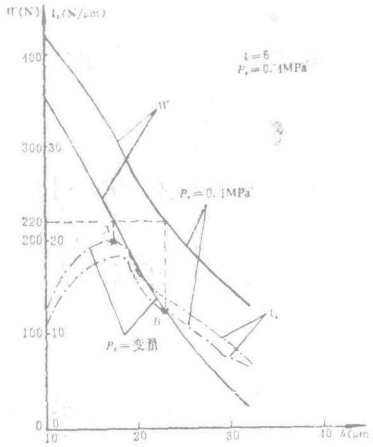


图5 承载力与刚度 ( $p_s$ 变化)

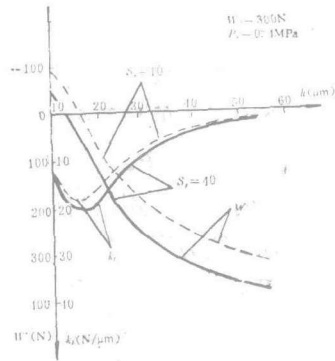


图6 抗拉刚度与拉力 ( $p_s$ 变化)

域。也就是说，可以在系统载荷不变时，对应的刚度提高许多。例如当  $W = 220\text{N}$  (参见图5) 无真空作用 (B点)  $K_s = 12.2\text{N}/\mu\text{m}$ ，有真空吸附时， $K_s = 19.6\text{N}/\mu\text{m}$  (A点)。

4. 抗拉刚度和承载力的优劣与真空泵的抽速、真空腔容积有关，受真空泵抽速影响很大。 $S_s$ 增大，有利于提高支承抗拉强度。

### 三、实验研究

空气静压支承性能实验很重要是气膜中压力分布和气膜刚度的测量。专门研制的空气静压支承实验系统 (图7) 主要由三部分组成。第一部分为气路系统：包括空气压缩机1；精密气源2；流量计3；压力调节阀，精密压力表4—7；真空泵8和真空计9等，作用是供给导向空气轴颈轴承和被试空气支承压力可调的超净空气，并可对被试支承真空腔抽真空。第二部分为实验台，包括导向轴颈轴承10；加载装置11；对中钢珠12；联接轴13；被试支承14；测压平板15 (用作支承下表面) 及可调支承16； $x-y$ 滚珠丝杠工作台17、18以及基座19。第三部分是测量系统，由压力传感器22及应变仪25；电容式微位移传感器21及测微仪27；荷重传感器20与放大装置28；电感式直线位移传感器23、24及信号源26构成被测信号敏

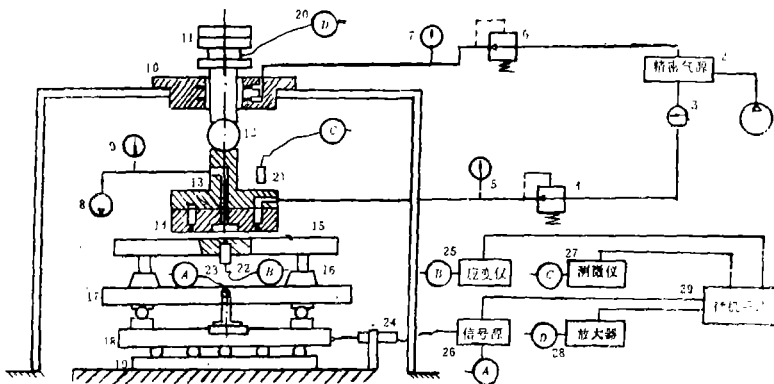


图7 空气静压支承实验系统

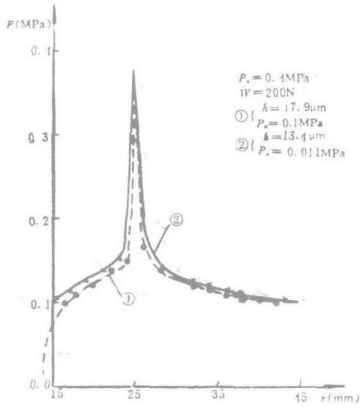


图8 压力分布实验值

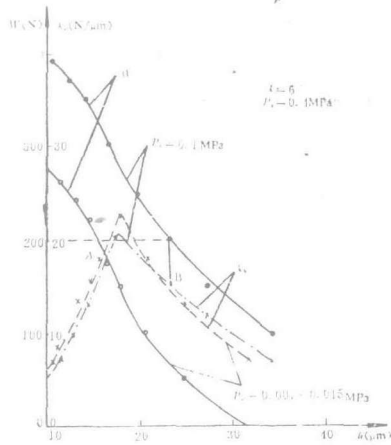


图9 承载力与刚度实验值 ( $p_0$ 变化)

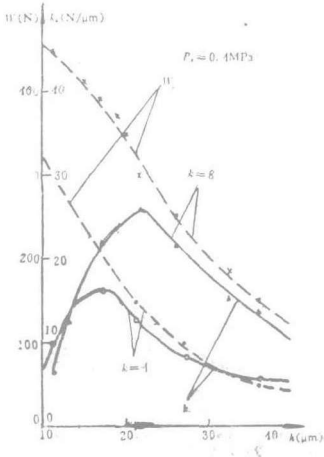


图10 承载力与刚度实验值 ( $K$ 变化)

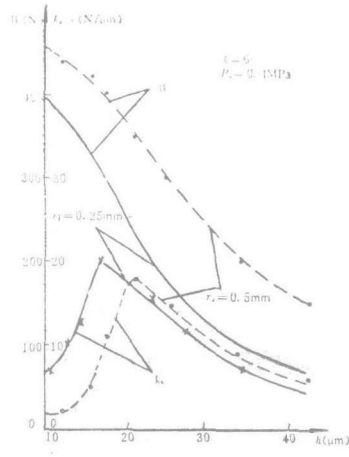


图11 承载力与刚度实验值 ( $r_0$ 变化)

感及放大转换部分，经转换后信号同时输入微机系统29计算处理。微机系统采用8031单片机为控制主体，由模—数转换，数据采集，数据计算，打印显示等功能块组成。可以输出压力分布、 $W-h$ 曲线等。该实验系统具有通用性强，效率高的特点。

图8至图12为部分实验结果。从中看出真空区压力、供气孔数、供气孔径、供气压力等参数的影响效果：

1. 真空区压力对节流比 ( $P_0/P_1$ ) 影响不大，主要在  $r_2 < r < r_0$  区域改变了压力分布；
2. 真空平衡提高了最大刚度，降低了承载力，效果是改变了系统刚度分布域，也就是说，若支承载荷不变（如200N），真空系统工作时刚度高（17.9N/μm），而没有真空作用时，则刚度低（14.8N/μm）（参见图9中A、B两点）；
3. 供气孔数增多能提高承载力，增大刚度；但需加大流量，这要受到空压机的限制；
4. 供气孔径减小使最大刚度上升，最佳间隙点减小，且承载力亦下降，其作用类似于真空平衡的作用。当然供气孔径过小，会产生加工困难并出现堵塞现象，这是应当避免的；
5. 增大供气压力有助于提高最大刚度和承载力，但增加功耗，当载荷一定时，若选取

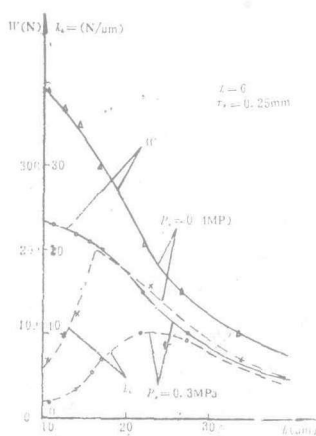


图12 承载力与刚度实验值 ( $p_1$ 变化)

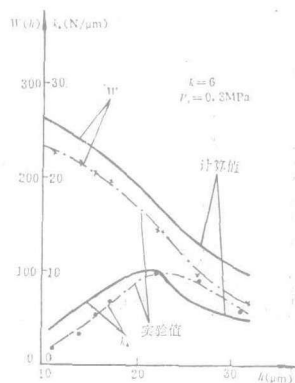


图13 计算值与实验值比较

适当的供气压力，使系统处于最大刚度点，这样，既可以满足刚度要求，又不至于增加功耗。

图13是一个试件承载力和刚度计算值与实验值的比较。承载力相差不大，实验值小于计算值。至于刚度，在最大刚度点前计算值大于实验值，过后实验值大于计算值。最大刚度点两者很接近。

## 四、结 束 语

为了有效地在精密机械中发挥空气支承的特长，提高其刚度是重要的。从本文的分析结果可见，真空吸附的作用类似于减小供气孔径。众所周知，减小供气孔径是改善空气支承刚度的有效手段之一，但受到小孔加工能力及堵塞现象的限制。而采用真空自吸平衡可以避免加工上的困难，达到减小间隙、提高刚度的目的。不仅如此，这种方法可以在轴承零件加工完成后，用来改变系统的刚度分布域，使系统在最佳刚度区工作。此外，小的运动质量有助于改善空气支承的静态稳定性，真空自吸提供了无质量预载方法，在这方面其也有其优势。

本文通过理论分析和实验研究，对自吸式空气支承这种新型精密零件的工作机理有了进一步的认识，为设计和应用这类支承打下了良好的基础。本文所采用的计算方法和实验手段，同样可用于分析研究其他类型的空气支承。

## 参 考 文 献

- [1] 十合晋一、韩焕臣译；《气体轴承—设计、制作与应用》，宇航出版社，1988年
- [2] 潘晋、徐丰仁、沈钊；机床与液压，1989年第6期

## Theoretical Study and Experimental Investigations on the Vacuum-Preloaded Gas Bearings

Pan Jin, Shen Zhao, Xu Fengren and Zhou Changen

### Abstract

In this paper a more convenient and effective method Galerkin Isoparametric Finite Element Method was developed to analyze the performances of vacuum-preloaded gas bearings. The experiment was done by means of a new-developed aerostatic bearing testing system which uses a single-chip computer as the controller. Thus the theoretical basis for bearing design was provided.