

计算机磁头/磁盘超薄气膜润滑压强的算子分裂算法

吴建康, 陈海霞

(华中科技大学 力学系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 以任意拉森数的超薄气体润滑方程为基础, 采用算子分裂法和非结构三角网格的有限元法计算 Ω 型磁头的空气轴承气垫面 (ABS) 气膜压强分布、气浮力和纵倾力矩; 在分析比较流量系数的各种算法的基础上, 确定采用多项式拟合数据库计算流量系数。计算结果表明: 采用算子分裂法可以有效克服在高轴承数时的数值不稳定性, 消除数值振荡; 在小轴承数时, 气浮力随轴承数增加而增大, 当轴承数增大到某一数值后, 气浮力趋近某一稳定值, 此时气膜压强分布与磁头造型基本一致; 气膜的纵倾力矩在轴承数的某一临界值附近出现最大值。

关键词: 空气轴承气垫面 (ABS); 超薄气体润滑; 算子分裂法; 有限元法

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2003)05-0402-04

计算机磁头与磁盘的间隙随磁盘存储密度的提高而减小, 目前已达 15 nm 以下。在这种情况下, 超薄气膜润滑成为决定计算机稳定性的关键因素之一; 与此相适应, 超薄空气膜的浮力和稳定性研究成为计算机硬件关键技术, 特别是磁头优化设计技术的重要基础之一。而研究超薄气膜的压强分布规律和磁头受力特性是进行磁头优化设计的重要手段。

磁头超薄气膜的拉森数 [K_n 数——分子平均自由程 λ 同气膜厚度 h 的比值 ($K_n = \lambda/h$)] 可达 0.1 左右的量级, 此时流体连续假设不再成立, 需要修正气膜间隙的气体流量。Burgdorfer 等^[1~3] 分别给出了 K_n 小于 3 时适用的流量系数。Fukui 等^[4,5] 推导了任意拉森数 K_n 的广义气体润滑方程, 采用变分法预先求解出一系列流量系数, 并将其组成数据库。Hsing-Sen 等^[6] 采用解析法, Devendra 等^[7~11] 采用数值法分别研究了气膜的动力特性。本文作者采用有限元与算子分裂法^[12] 研究 Ω 型磁头超薄气膜的压强分布、气浮力和纵倾力矩变化特性。

1 超薄气体润滑方程和边界条件

Fukui 等^[4] 推导的适合于任意拉森数 K_n 的无量纲气体润滑方程形式为:

$$\bar{\nabla} \cdot (Q \bar{p} \bar{h}^3 \bar{\nabla} \bar{p}) = Z_n \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{\alpha}} \right) \quad (1)$$

方程中的无量纲变量定义如下: $\bar{p} = p/p_a$ (p_a 为环境

大气压); $\bar{h} = h/h_0$ (h_0 为气膜特征厚度); $\bar{x} = x/l$, $\bar{y} = y/l$ (l 为磁头特征长度); 无量纲轴承数 $Z_n = 6\mu U l / p_a h_0^2$, μ 为气体粘性系数, U 为磁盘相对于磁头的运动速度; $\bar{t} = \frac{tp_a h_0^2}{12\mu \omega l^2}$; ω 为特征转速, Q 为无量纲流量系数, 表示气体稀化对气膜流量的修正。为了书写方便, 省略无量纲变量的“-”记号, 以下方程均为无量纲方程。磁头周围为大气压, 作为气体润滑区的本质边界条件。

2 流量系数

对于超薄气体润滑问题, 有必要进行气膜流量修正。流量系数是拉森数和表面驻留系数的函数 [可表示为 $Q = Q(K_n, \alpha)$]。在一般文献中, 常采用反拉森数 D , 其定义如下:

$$D = \sqrt{\pi / (2K_n)} = D_0 \bar{p} \bar{h}, \quad D_0 = p_a h_0 / (\mu \sqrt{2RT_0})$$

其中: R 为气体常数, T_0 为特征温度, α 为表面气体驻留 ($0.7 \sim 1.0$)。反拉森数 D 随局部压强和气膜厚度变化。流量系数表达为 $Q = Q(D, \alpha)$ 。当 D 值较大时 (对应小拉森数), 由各种算法得到的流量系数一致; 当 D 值较小时 (对应大拉森数), 由不同算法所得到的流量系数存在较大差别。总体而言, 一阶的流量系数偏小^[11], 而二阶^[2] 和一阶半^[3] 的流量系数偏大。在 $0.01 < D < 100$ 的范围内, 基于数据库多项式插值^[5] 的流量系数同基于 Boltzmann 方程的流量系数相一

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10072022)。

收稿日期: 2002-11-15; 修回日期: 2003-01-10/联系人吴建康, email: wujkang@hust.edu.cn

作者简介: 吴建康, 男, 1946 年生, 博士, 教授, 博导, 目前主要从事润滑力学和计算流体力学研究。



致, 相关结果引用如下:

$$\begin{aligned}
 Q &= 1 + 6.0972/D + 6.3918/D^2 \\
 &\quad - 12.8124/D^3 \quad (5 < D), \\
 Q &= 0.83112 + 7.50522/D + 0.93918/D^2 \\
 &\quad - 0.05814/D^3 \quad (0.15 < D < 5), \\
 Q &= -13.37514 + 12.64038/D + 0.09918/D^2 \\
 &\quad - 0.0004164/D^3 \quad (0.01 < D < 0.15). \quad (2)
 \end{aligned}$$

3 超薄气体润滑方程的算子分裂法

方程(1)可以分解成对流方程(剪切流动)和压强扩散方程:

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = -Z_n \frac{\partial h}{\partial \alpha} \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = \frac{1}{2} \nabla \cdot (Qh^3 \nabla p^2) \quad (4)$$

第一步, 采用 Galerkin 有限元法求解式(3), 则:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial \alpha}, \varphi &= -Z_n \frac{\partial h}{\partial \alpha}, \varphi, \\
 \varphi(i=1, 2, \dots, N). \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中: 记号 $\int_{\Omega} f_1 f_2 dx dy$ 表示 2 个函数在整个计算区域的内积, 即 $f_1, f_2 = \int_{\Omega} f_1 \cdot f_2 dx dy$, $\varphi(1, 2, \dots, N)$ 是全域插值函数. 将对流方程的 Lax-Wendroff 格式在中心差分格式基础上附加一个扩散项, 以有效克服不稳定性和数值振荡. 根据这一原则, 对式(5)加以改进, 则:

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha}, \varphi = -Z_n \frac{\partial h}{\partial \alpha}, \varphi + \frac{\Delta t Z_n^2}{2} \frac{\partial^2 p h}{\partial \alpha^2}, \varphi \quad (6)$$

式(6)右边第二项是对反扩散误差的修正, 对该项进行分步积分和应用散度定理, 得到:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial \alpha}, \varphi &= -Z_n \frac{\partial h}{\partial \alpha}, \varphi - \frac{\Delta t Z_n^2}{2} \frac{\partial h}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \\
 &\quad + \frac{\Delta t Z_n^2}{2} \int_{\Omega} \frac{\partial h}{\partial \alpha} \cos \beta \varphi dx \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中: β 是边界外法线方向与 x 轴的交角. 在区域内部结点, 式(7)中的边界积分项为零; 在润滑区的边界上, 将压强的本质边界条件引入式(7), 并对时间导数进行差分近似, 则:

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = \frac{(ph)^{n+1} - (ph)^n}{\Delta t} \quad (8)$$

式中: 上标 $n+1$ 和 n 表示时间层次. 对式(7)右侧项采用显式算法, 在旧时层 n 上取值, 则可以将式(7)改写为:

$$\begin{aligned}
 (ph)^{n+1}, \varphi &= (ph)^n, \varphi - \Delta t Z_n \frac{\partial (ph)^n}{\partial \alpha}, \varphi \\
 &\quad - \frac{\Delta t^2 Z_n^2}{2} \frac{\partial (ph)^n}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \quad (9)
 \end{aligned}$$

求解方程(9), 得到中间解 $(ph)_0^{n+1}$; 将中间解作为初始条件求解方程(4), 应用 Galerkin 有限元法, 则:

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha}, \varphi = \frac{1}{2} \nabla \cdot (Qh^3 \nabla p^2), \varphi \quad (10)$$

采用同式(9)相同的步骤进行分步积分和时间差分近似, 则得到:

$$\begin{aligned}
 (ph)^{n+1}, \varphi &= (ph)^n, \varphi \\
 &\quad - \frac{\Delta t}{2} (Qh^3 \nabla p^2)_0^{n+1}, \nabla \varphi. \quad (11)
 \end{aligned}$$

式中: 下标“0”为中间解, 新时层的压强解可由式(10)得到. 重复以上步骤, 直到收敛.

4 气膜压强分布及气浮力和纵倾力矩

Ω 型磁头是目前应用最广泛的代表性磁头^[13], 其三维造型示意图如图 1 所示. 磁头的凸台向下面对转动的磁盘.

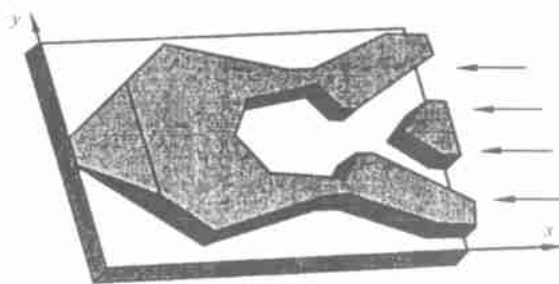


Fig 1 Sketch of Ω -type slider
图 1 Ω 型磁头三维造型图

由于磁头形状的对称性, 取上半部分气膜为计算区域. 将润滑区离散为 3 516 个三角形非结构有限元网格(如图 2 所示).

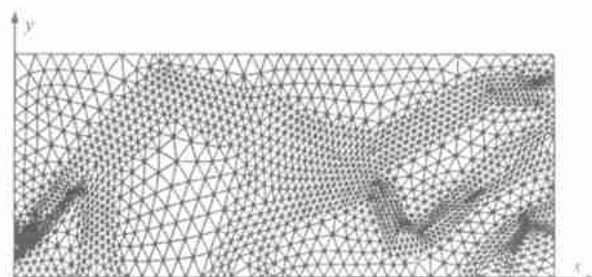


Fig 2 Unstructured finite element grids
图 2 非结构有限元网格图

图 3 示出了磁头/磁盘相对运动示意图. 取磁头典型参数为: 磁头长度 $l = 2 \text{ mm}$, 气膜特征厚度 $h_0 = 100 \text{ nm}$, 温度 $T_0 = 15$, 大气压 $p_a = 101.35 \text{ kPa}$. 气体参数为 $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\mu = 1.78 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,

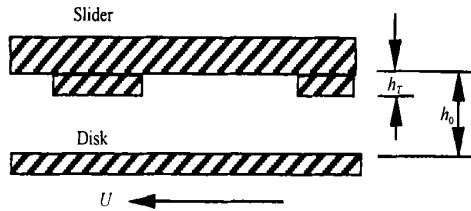


Fig 3 Sketch of relative motion of disk and slider
图 3 磁头/磁盘相对运动示意图

$D_0 = 1.365$; 磁盘转速 5400 r/min , 磁头位置半径 $r = 25 \text{ mm}$, 磁盘速度 $u = 14.13 \text{ m/s}$, 轴承数 $Z_n = 1514$, 磁头凸台高 h_r 分别为 $0.25h_0, 0.50h_0, 0.75h_0$
计算得到的磁头气体压强分布如图 4 所示 高速

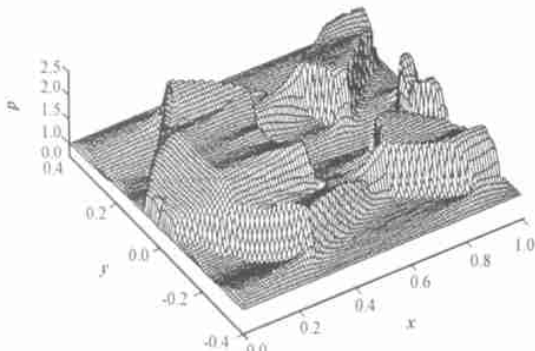


Fig 4 Distribution of gas pressure on slider ($h_r/h_0 = 0.5$)
图 4 磁头气膜压强分布 ($h_r/h_0 = 0.5$)

气流通过磁头间隙时, 气体在凸台面上被压缩, 压强增加, 在凸台底部膨胀, 压强减小. 气体压强大小分布与磁头凸台造型有关, 计算结果表明, 气压分布规律与凸台造型基本一致, 呈 Ω 形状. 凸台越高 (气膜越薄) 则气压越大, 气浮力和纵倾力矩 (以 $x = 0.5$ 为转

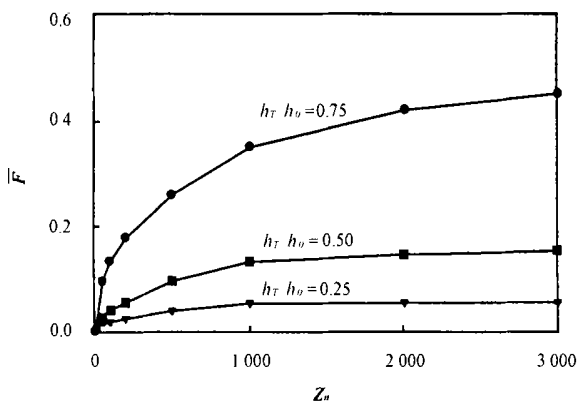


Fig 5 Variation of dimensionless gas lift with bearing number

图 5 无量纲气浮力随轴承数变化的关系曲线

轴) 越大. 图 (5 和 6) 示出了针对不同的轴承数的气体

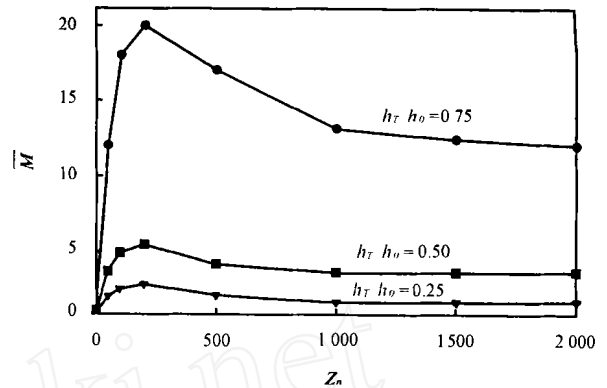


Fig 6 Variation of dimensionless pitch moment with bearing number

图 6 无量纲纵倾力矩随轴承数变化的关系曲线

浮力和纵倾力矩的计算结果, 其中无量纲气浮力和纵倾力矩分别定义为: $\bar{F} = F/P_a l^2$ 和 $\bar{M} = M/P_a l^3$. 可以看出, 在小轴承数时, 磁头气浮力随轴承数增大而迅速增加; 在大轴承数时, 气浮力变化缓慢, 并趋近某一稳定值. 此时剪切流动超过压强梯度流动, 气压分布与磁头凸台形状几乎相同. 磁头凸台形状在宽度 y 方向对称, 压强也对称, 因此不会产生横向转动力矩. 在长度 x 方向, 凸台形状不对称, 压强分布上、下游不对称, 因此磁头受到纵倾力矩作用. 计算结果表明, Ω 型磁头出现尾倾力矩. 当轴承数 Z_n 约为 200 时, 纵倾力矩出现最大值, 然后减小并逐渐趋于稳定. 在大轴承数时, 纵倾力矩变化不大.

5 结论

- a 采用算子分裂/有限元法求解气膜润滑方程, 可以有效克服在高轴承数时的数值不稳定性
- b 在轴承数增加到一定数值时, 气浮力趋于某一稳定值, 此时磁头气压分布同造型基本一致
- c 气膜的纵倾力矩在轴承数的某一临界值附近出现最大值

参考文献:

[1] Burgdorfer A. The influence of the molecular mean free path on the performance of hydrodynamic gas lubricated bearing [J]. ASME Journal Basic Engineering, 1959, 81 (1): 94-100
[2] Hsia Y T, Domoto G A. An experimental investigation of molecular rarefaction effects in gas lubricated bearing at ultra-low clearance [J]. ASME Journal of Tribology, 1983, 105 (1): 120-130
[3] Mitsuya Y. Modified Reynolds equation for ultra-thin film gas lubrication using 1.5-order slip-flow model and considering surface accommodation coefficient [J]. ASME Journal of

- Tribology, 1993, 115: 289-294
- [4] Fukui S, Kaneko R. Analysis of ultra-thin gas film lubrication based on linearized Boltzmann equation: First report——Derivation of a generalized lubrication equation including thermal creep flow [J]. ASME Journal of Tribology, 1988, 110: 253-261.
- [5] Fukui S. A Database for interpolation of Poiseuille flow rates for high Knudsen number lubrication problems [J]. ASME Journal of Tribology, 1990, 112: 78-83.
- [6] Hsing-Sen, Hsiao S. Ultra-thin liquid lubrication of magnetic head-rigid disk interface for near-contact recording: Part I A closed-form solution to the Reynolds equation [J]. ASME Journal of Tribology, 1996, 118: 388-401.
- [7] Devendra S Chhabra, Sanford A Bolasna, *et al*. Air bearing considerations for constant fly height applications [J]. IEEE Transaction of Magnetic, 1994, 30 (2): 417-423.
- [8] Masaaki Matsumoto, Yoshinori Takeuchi. Design and performance of novel air bearing slider [J]. IEEE Transaction of Magnetic, 1994, 30 (6): 4 158-4 160.
- [9] Kang Tae-Sik, Choi Dong-Hoon, Jeong Tae-Gun. Optimal design of HDD air-lubricated slider bearings for improving dynamic characteristics and operating performance [J]. ASME Journal of Tribology, 2001, 123: 541-547.
- [10] Ruiz O J, Bogy D B. A numerical simulation of the head-disk assembly in magnetic hard disk files: Part I. Component models [J]. ASME Journal of Tribology, 1990, 112: 593-602.
- [11] Ruiz O J, Bogy D B. A numerical simulation of the head-disk assembly in magnetic hard disk files: Part II. Solution of the coupled system [J]. ASME Journal of Tribology, 1990, 112: 603-613.
- [12] Wu Jiankang (吴建康), Li Anfeng (李安锋). Operator-splitting method to calculate the film pressure of liquid-lubricated herringbone grooved journal bearing (螺旋槽液体润滑轴承油膜压力的算子分裂法计算) [J]. Tribology (摩擦学报), 2000, 20 (5): 370-373.
- [13] Zeng Q H, Chen L S, and Bogy D B. A model analysis method for slider air bearing in hard disk drives [J]. IEEE Transaction of Magnetic, 1997, 33(5): 3 124-3 126.

Operator-Splitting Method to Calculate Pressure of Ultra-Thin Gas Film of Magnetic Head/Disk

WU Jian-kang, CHEN Hai-xia

(Mechanics Department, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Operator-splitting and finite element method with unstructured triangular grids were used to calculate the gas pressure distribution of the air bearing slider of a Ω -type magnetic head/disk, based on the gas lubrication equation with arbitrary Knudsen number. The gas lift and pitch moment were also calculated in the same manner. The polynomial fitted database was applied to calculate the flow rate coefficients, based on the comparison of the flow rate coefficients calculated with various algorithms. The numerical results indicated that at a high bearing number, the numerical stability was effectively increased and the spurious oscillations eliminated making use of the operator-splitting/finite element method. At a small bearing number, the gas lift rapidly increased with increasing bearing number and approached a stable value at a certain bearing number, while the gas pressure profile in this case was consistent with the slider geometry and the gas pitch moment reached a maximum around the critical bearing number.

Key words: air bearing slider (ABS); ultra-thin gas film lubrication; operator-splitting method; finite element method

Author: WU Jian-kang, male, born in 1946, Ph. D., Professor, email: wujkang@hust.edu.cn