

轻负荷磁头的气动特性

傅仙罗 王春海

(中国科学院力学研究所)

GASDYNAMIC CHARACTERISTICS OF LIGHTLY LOADED MAGNETIC RECORDING HEADS

Fu Xianluo and Wang Chunhai

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract The numerical solution to the steady state compressible Reynolds equation under slip-flow conditions is presented. Finite difference techniques and a numerical procedure, using Newton-Raphson iteration method to the non-linear finite difference equations, are described. The pressure distribution on the flying head slider, and the curves of flying height versus disk velocity, load versus minimum flying height and minimum flying height versus productive error are presented.

摘要 本文采用数值方法求解修正雷诺方程, 给出轻负荷、小间隙浮动块的气膜压强分布, 飞升曲线以及浮动块几何尺寸、负荷、重心位置的误差对磁头气动特性的影响等结果。

一、引言

磁盘技术综合了磁学、光学、气动力学、电子学和精密加工、半导体技术等各个领域内的新理论、新技术。特别是1973年问世的IBM 3340温切斯特磁盘, 取消盘组以换取高的面记录密度和高的可靠性。温切斯特技术的核心是将盘组、取数臂和小车集装成数据盘件; 将轻负荷磁头在盘面上接触起停。磁盘启动后, 磁头象飞行器一样在磁盘上经滑动后以极小的间隙浮起。这样的磁头通常采用两轨式和三轨式轻负荷磁头, 其加载力通常在 $5g \sim 10g$ 范围内。采用多轨式磁头, 目的在于增强磁头飞行的稳定性, 提高磁头相对于盘片轴向摆动的跟随性。采用轻负荷磁头, 旨在实现磁头在磁盘上起停自如, 也就是增加飞升曲线在低速段的斜率。从磁记录系统研究发展的过程看, 磁盘技术主要是在保证系统的可靠性的基础上尽量提高面记录密度, 即提高位密度和磁道密度。从经典的磁记录理论可知

本文1985年5月20日收到。

$$D^{-1} \propto [(a+h)^2 + (0.5g)^2]^{1/2}$$

式中, D 为位密度, a 为磁通翻转宽度, h 为浮动块浮动高度, g 为前间隙长度。从上式可见, 尽可能地减小 h 是提高位密度的关键措施之一。IBM 3340 的磁头浮动高度为 $0.51 \mu\text{m}$, IBM 3350 的为 $0.38 \mu\text{m}$, (日) 4320 的为 $0.36 \mu\text{m}$ 。

窄轨式磁头浮动块实质上是由两个润滑平面组成的动压气浮短滑块轴承。对于这种形状的无限长轴承, 在不考虑气体可压缩性的前提下, 已有精确的解析解^[1], 但对于上述前提下的短轴承, 也得依靠数值方法求解雷诺方程。对于温切斯特浮动块, 不但是短轴承, 而且必须考虑润滑气体的可压缩性。由于浮动高度在 $1 \mu\text{m}$ 以下, 还必须考虑分子平均自由程对润滑过程的影响。因此, 在浮动块气动特性计算方面增加了相当的难度。当分子平均自由程 λ 和浮动高度 h 之比 K_n (努森数) 大于 0.1 时, 滑流使得润滑气膜的高压区之后形成相对低压区, 这就导致润滑面上的压强分布、压力中心、承载能力以及动态稳定性与用雷诺方程解得的结果有很大差异, 必须用修正雷诺方程求解。

二、数值解法

在气体润滑理论中, 通常假设润滑气体是连续介质。但这种假设只适用于 K_n 数极小的情况。对于温切斯特磁头浮动块, 浮动高度很小, K_n 之值已不可忽视, 润滑现象的分析必须考虑到滑流。因此, 描述润滑现象的雷诺方程必须加以修正。修正雷诺方程和相应的边界条件为^[2]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} (1 + 6\lambda/h) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial y} (1 + 6\lambda/h) \right] \\ = 6\mu U \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) \end{aligned} \quad (1)$$

$$p|_{\text{边界}} = p_a \quad (2)$$

引入无量纲参数:

$$\begin{cases} X = x/l, Y = y/l, P = p/p_a \\ H = h/h_0, \Lambda = 6\mu U l / p_a h_0^2, C = 6\lambda/h_0 \end{cases} \quad (3)$$

得无量纲化修正雷诺方程和相应的边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial X} \left[(PH^3 + CH^2) \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(PH^3 + CH^2) \frac{\partial P}{\partial Y} \right] = \Lambda \frac{\partial}{\partial X} (PH) \\ P|_{\text{边界}} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

考虑到方程(4)在数值求解时, 压强 P 容易失稳, 另外, 由于浮动块润滑面存在的斜率间断线会引起承载能力计算的不准确性, 将变化较大的压强 P 变换成为变化较缓慢的参数 Q 的计算:

$$Q = (PH)^2 \quad (5)$$

修正雷诺方程的离散格式采用五点差分格式。离散方法采用积分离散法, 即先在外四点连线区域内积分方程, 然后应用高斯定理。这样避免了用微分离散法的有限差分来近似 Q 和 H 的一、二阶导数在处理斜率间断时的不足。离散后的非线性代数方程组和边界条件为

$$\begin{aligned}
& a_{ij}^{(x)}(Q_{ij} - Q_{i-1,j}) + b_{ij}^{(x)}(Q_{ij} + Q_{i-1,j}) + c_{ij}^{(x)}(Q_{ij} - Q_{i-1,j})(Q_{ij} + Q_{i-1,j})^{-1/2} \\
& + d_{ij}^{(x)}(Q_{ij} + Q_{i+1,j})^{1/2} - a_{i+1,i}^{(x)}(Q_{i+1,j} - Q_{ij}) - b_{i+1,i}^{(x)}(Q_{i+1,j} + Q_{ij}) \\
& - c_{i+1,i}^{(x)}(Q_{i+1,j} - Q_{ij})(Q_{i+1,j} + Q_{ij})^{-1/2} - d_{i+1,i}^{(x)}(Q_{i+1,j} + Q_{ij})^{1/2} \\
& + a_{ij}^{(y)}(Q_{ij} - Q_{ij-1}) + b_{ij}^{(y)}(Q_{ij} + Q_{ij-1}) + c_{ij}^{(y)}(Q_{ij} - Q_{ij-1})(Q_{ij} + Q_{ij-1})^{-1/2} \\
& + d_{ij}^{(y)}(Q_{ij} + Q_{ij-1})^{1/2} - a_{i+1,i}^{(y)}(Q_{ij+1} - Q_{ij}) - b_{i+1,i}^{(y)}(Q_{ij+1} + Q_{ij}) \\
& - c_{i+1,i}^{(y)}(Q_{ij+1} - Q_{ij})(Q_{ij+1} + Q_{ij})^{-1/2} - d_{i+1,i}^{(y)}(Q_{ij+1} + Q_{ij})^{1/2} = 0 \\
& \quad i = 2, 3, \dots, N-1; j = 2, 3, \dots, M
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{cases} Q_{1j} = H_{1j}^2, & Q_{Nj} = H_{Nj}^2, & j = 1, 2, \dots, M \\ Q_{i1} = H_{i1}^2, & Q_{iM+1} = Q_{iM-1}, & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \tag{7}$$

其中的系数见文献[3]的附录。

对于非线性方程组(6),采用 Newton-Raphson 方法将其线性化。这种线性化方法的实质就是泰勒展开。

所得的线性化方程组用迭代法求解。这就出现迭代初值的选择问题。对于任意一种飞行状态,可以设法找到某一种已知状态或大致已知的状态,然后以此状态为起点,通过一系列中间状态,最后达到所要计算的状态。以已知状态为基础来计算新状态时,可将已知状态视为各参数的多元函数,并作泰勒展开。这样可以将线性化程序同时用作选取迭代初值的程序,使计算程序大大缩短。

线性方程组的求解方法,采用文献[3]介绍的方法,这样可缩短计算时间,节省内存。

在迭代过程中,线性方程组的系数矩阵会出现病态,对此采用正交化和单位化方法。为了减少计算工作量,没有使用正交判据,而是通过试算,凭经验确定每推进几步作一次正交化和单位化处理。

等步长区域剖分容易使解失稳。我们根据气膜参数变化设计了变步长区域自动剖分程序。

单轨的承载能力和压力中心可根据求得的压强分布按下列公式确定:

$$\begin{aligned} W &= 2 \iint_S (P - 1) ds \\ \bar{X} &= 2W^{-1} \iint_S (P - 1) x ds \end{aligned}$$

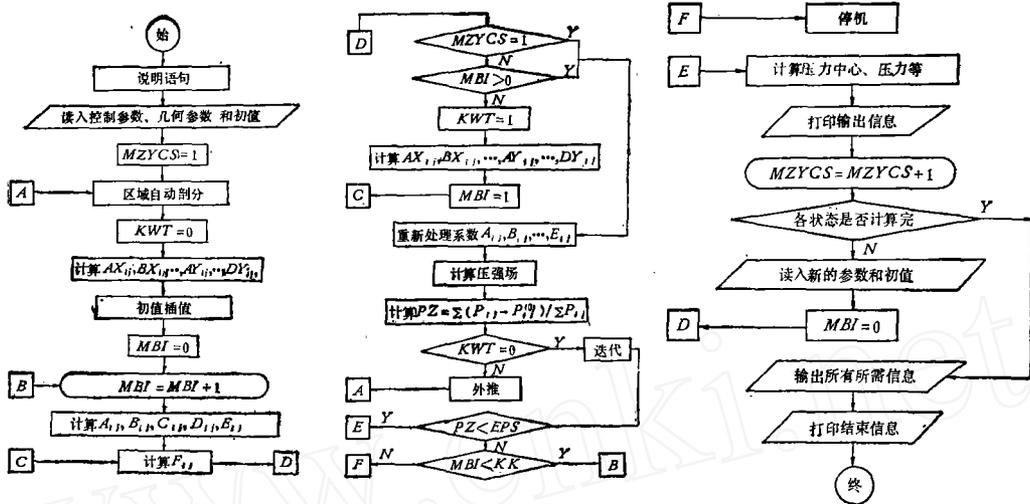
其中 S 是长度方向为对称轴的润滑面的一半。

采用上述种种处理方法,可以在大压缩数范围内保证解的收敛。本程序的主框图见下页。

三、计算结果

1. 静态工作点

选取的浮动块名义几何尺寸及气动参数列于表 1, 计算结果列于表 2。结果表明,在满足表 1 的条件下,浮动块的最小飞行高度为 $0.582 \mu\text{m}$, 姿态角为 0.00766° 。静态工作点的压强分布如图 1 所示。图中给出的结果是单轨半宽润滑面上的压强分布以及中心线上、与中心线平行和垂直的直线上的压强分布。从图 1 可以看出,在倾斜润滑面之后,由



于滑流的原因，尽管气膜厚度继续减小，压强却降低。从图 1 还可以推测，双轨式磁头有四个高压峰支撑着，有利于磁头的稳定飞行。

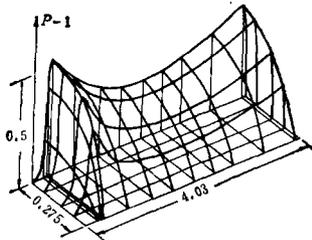


图 1 静态工作点的气膜压强分布

表 1 浮动块名义几何尺寸及气动参数

名义尺寸	滑块长度 l	4.03 mm
	滑块宽度 b	0.55 mm
	斜面长度 l_1	0.323 mm
	斜面高度 δ	6.0 μm
气动参数	线速度 U	37.7 m/s
	负荷 $2w$	9.5 g
	压力中心 \bar{x}	2.015 mm

表 2 浮动块气动参数的计算结果

负荷 $2w$	9.486g (相对误差小于 0.15%)
压力中心 \bar{x}	2.028mm (相对误差小于 0.1%)
飞行高度 h_0	0.582 μm
姿态角 φ	0.00766°

2. 飞升曲线

图 2 给出了浮动块的飞升曲线, 即润滑面斜率间断处的气膜厚度 h_1 、最小气膜厚度 h_0 与磁盘线速度 U 之间的变化关系。图中的曲线是在负荷的相对误差小于 0.3%、压力中心位置的相对误差小于 0.2% 的条件下计算出来的。图 3 给出了在 37.7m/s 的线速度下(里圈最高速度), 浮动块负荷与最小浮动高度之间的关系。

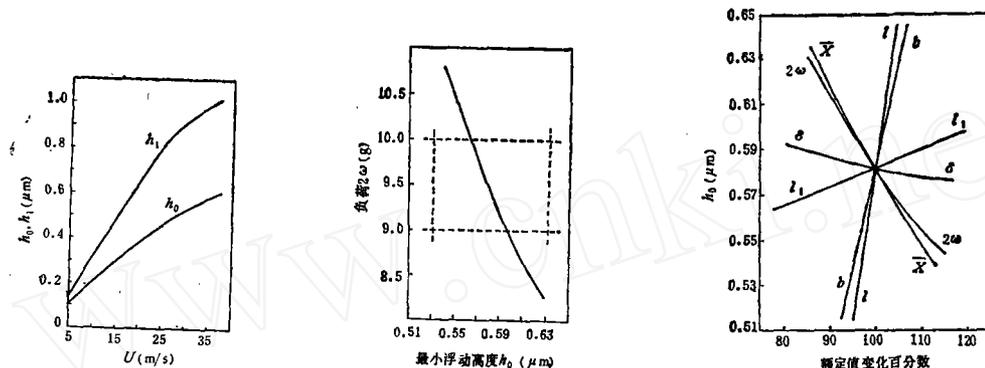


图 2 飞升曲线 图 3 负荷与最小浮动高度的关系 图 4 加工误差对气动特性的影响

3. 加工误差等因素对气动特性的影响

浮动块几何尺寸的加工误差以及承载能力、压力中心位置与最小浮动高度 h_0 的关系见图 4。从图中可以看出, 对 δ 和 l_1 的相对误差要求不高, 对 2ω 和 \bar{x} 的相对误差要求比较高, 要求最高的是 l 。由于 l 的值大, 所以对绝对加工误差要求不高。对于 b , 无论是绝对误差还是相对误差, 要求都比较高。

根据磁头的读写功能等方面的要求, 可先确定 h_0 ($=0.582\mu\text{m}$) 的允许变化范围, 比如说是 $0.05\mu\text{m}$, 然后再根据图 4 中的各条曲线确定表 1 中相应各参数值的允许变化范围(见表 3)。

表 3 浮动块规范

飞行高度 h_0	$0.582 \pm 0.05 \mu\text{m}$
滑块长度 l	$4.03 \pm 0.1 \text{ mm}$
滑块宽度 b	$0.55 \pm 0.02 \text{ mm}$
斜面长度 l_1	$0.323 \pm 0.05 \text{ mm}$
斜面高度 δ	$6.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$
负 荷 2ω	$9.5 \pm 0.5 \text{ g}$
压力中心 \bar{x}	$2.015 \pm 0.05 \text{ mm}$

4. 计算结果的比较

为了验证计算结果的可靠性, 我们以文献[4]、[5]中的磁头作为比较对象。

表 4 和表 5 给出了计算结果的比较。从表中可以看出, 两者是非常一致的。

表4 计算结果比较(1)

文献[4]浮动块规范		本文参数	
飞行高度 h_0	$0.36 \pm 0.04 \mu\text{m}$	选取的参数	$0.36 \mu\text{m}$
线速度 U	31.4 m/s		31.4 m/s
滑块长度 l	$4.6 \pm 0.1 \text{ mm}$		4.6 mm
滑块宽度 b	$0.37 \pm 0.01 \text{ mm}$		0.37 mm
斜面长度 l_1	$0.82 \pm 0.1 \text{ mm}$		0.82 mm
斜面高度 δ	$7.0 \pm 1.5 \mu\text{m}$		$7.0 \mu\text{m}$
负 荷 $2w$	$6.3 \pm 0.15 \text{ g}$	计算结果	6.35335 g (相对误差小于 0.85%)
压力中心 \bar{x}	$2.45 \pm 0.05 \text{ mm}$		2.44996 mm (相对误差小于 0.01%)

表5 计算结果比较(2)

文献[5]浮动块规范		本文参数	
飞行高度 h_0	$0.2 \pm 0.02 \mu\text{m}$	选取的参数	$0.2 \mu\text{m}$
线速度 U	40 m/s		40 m/s
滑块长度 l	$4.0 \pm 0.1 \text{ mm}$		4.0 mm
滑块宽度 b	$0.2 \pm 0.005 \text{ mm}$		0.2 mm
斜面长度 l_1	$0.7 \pm 0.1 \text{ mm}$		0.7 mm
斜面高度 δ	$4.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$		$4.0 \mu\text{m}$
负 荷 $2w$	$3.4 \pm 0.4 \text{ g}$	计算结果	3.42 g (相对误差小于 0.53%)
压力中心 \bar{x}	$2.1 \pm 0.1 \text{ mm}$		2.111 mm (相对误差小于 0.62%)

本工作得到林同骥、方光旦等同志的帮助,在此表示深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] W. A. Gross, Gas Film lubrication, John Wiley and Sons. Inc., New York, London, 1962.
- [2] A. Burgdorfer, The Influence of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearings, Journal of Basic Engineering, TRANS. ASME, Series D (1959), 81.
- [3] 傅仙罗、王春海, 浮动磁头气动力静态特性, 计算机学报, 8: 6(1985).
- [4] T. Nakanishi, K. Kogure and Y. Koshimoto Magnetic Recording Head for 800 Mega Pyte Disk Drive, Review of ECL, 28: 5(1980), 392.
- [5] Y. Mitsuya and K. Kogure, Design of the Flying Head in a Magnetic Disk File, Review of ECL, 25: 11 (1977), 1297.