

225-230

179

轻负荷磁头的动态特性

傅仙罗 孙征

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

TP334.3

摘要 本文采用有限差分法求解非定常修正 Reynolds 方程, 采用四阶 Runge-Kutta 法求解磁头滑块的动力学方程组, 分别计算出磁头滑块受到冲击或飞越各种障碍物时的动态响应, 较全面地反映了磁头滑块的动态时域特性。

关键词 Reynolds 方程, Runge-Kutta 法, 动态特性, 磁头滑块。

引言

随着计算机技术的日益发展及其应用的普及, 作为计算机主要外部存储设备的磁盘机, 其容量、存取速度和可靠性也取得了长足的进步, 这与对磁头及磁盘所做的研究是分不开的。本文参考有关文献, 在对磁头滑块进行了多年理论研究的基础上, 采用有限差分法编出可计算磁头滑块飞越各种障碍物或受到冲击时的动态响应程序, 目的是为了研究分析磁盘表面可能有的凹凸对磁头滑块动态性能的影响。

一、数学模型

1. 磁头滑块动力学方程组及初始条件

图1是磁头滑块位形示意图。其中, h_0 表示磁头滑块处于稳态时的最小气膜厚度, z 表示滑块质心相对于稳态位置的位移, α 表示滑块的俯仰角, β 表示滑块滚翻角 (α, β 均以图示方向为正), F_0 表示在点 x_0 处施加的外力, x_m, y_m 表示质心位置。在本文中, 滑块质心与几何中心是重合的。

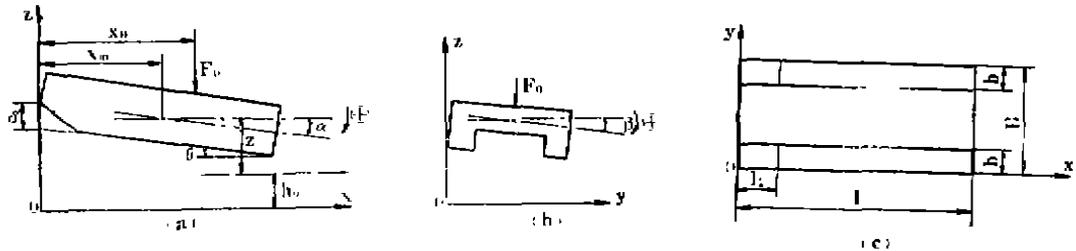


图1 磁头滑块位形

Fig.1 Configuration of a magnetic head slider

由于支持磁头滑块的悬臂的刚度远远小于气膜的刚度系数^[4], 因此可以忽略不计。

本文于1992年6月5日收到, 1993年1月12日收到修改稿。

根据质心运动定律, 得到磁头滑块的动力学方程组

$$\begin{cases} M \frac{d^2 z}{dt^2} = -F_v + \iint (p - p_a) dx dy \\ I_\alpha \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = F_v(x_0 - x_m) - \iint (p - p_a)(x - x_m) dx dy \\ I_\beta \frac{d^2 \beta}{dt^2} = -\iint (p - p_a)(y_m - y) dx dy \end{cases} \quad (1)$$

其中 M 是磁头滑块的质量, I_α, I_β 是转动惯量, p_a 为环境压强。设障碍物即将进入磁头滑块润滑区域的时刻为 $t=0$, 初始条件如下

$$\begin{cases} z(0) = z_t(0) = 0 \\ \alpha(0) = \alpha_t(0) = 0 \\ \beta(0) = \beta_t(0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中下标 t 表示对时间的导数。

2. 气膜润滑方程及边界条件

气膜润滑方程(一阶修正 Reynolds 方程)形式如下^[1]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[(ph^3 + 6\lambda_a p_a h^2) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(ph^3 + 6\lambda_a p_a h^2) \frac{\partial p}{\partial y} \right] \\ & = 6\mu U \frac{\partial(ph)}{\partial x} + 6\mu V \frac{\partial(ph)}{\partial y} + 12 \frac{\partial(ph)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

边界条件

$$p|_{\text{边界}} = p_a \quad (4)$$

其中, p 是气膜压强, h 是气膜厚度, λ_a 为一大气压下的空气分子平均自由程, μ 是空气的动力粘性系数, U, V 分别为沿 x, y 方向的磁头滑块与磁盘的相对速度。

当气膜厚度与 x 轴的平行线具有对称性时, 滚翻角 $\beta=0$, 我们只需计算滑块区域的一半就行了, 这时的边界条件为

$$\begin{cases} p|_{\text{out}} = p_a \\ \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{\text{axis}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

二、计算方法

方程(3)是二阶非线性偏微分方程, 并且与方程组(1)耦合, 要想得到 z, α, β 的解析解是不可能的, 只有通过数值方法来求得它们的近似解。

令 $D = ph$, 将 D 代入方程(3)可以得到

$$12\mu D = F_x + G_y \quad (6)$$

将 D^{n+1}, D^n 分别在 t^n, t^{n+1} 时刻作 Taylor 展开

$$D^{n+1} = D^n + D_t^n \Delta t + D_{tt}^n \frac{1}{2} (\Delta t)^2 + o(\Delta t^3) \quad (7)$$

$$D^n = D^{n-1} - D_t^{n-1} \Delta t + D_{tt}^{n-1} \frac{1}{2} (\Delta t)^2 + o(\Delta t^3) \quad (8)$$

将(7)式与(8)式相减并化简, 得到

$$D^{*+1} = D^* + \frac{1}{2}\Delta t(D_i^{*+1} + D_i^*) + o(\Delta t^2) \quad (9)$$

将(6)式代入(9)式可得到

$$[1 - L_1(x)][1 - L_1(y)]\Delta D^* = \phi^* \quad (10)$$

其中 $L_1(x)$ 、 $L_1(y)$ 分别是关于 x 、 y 的线性算子, $\Delta D^* = D^{*+1} - D^*$, F_x 、 G_x 是关于 x 、 y 的函数, 详细推导过程见文献[3]。

分别采用 ADI 有限差分法和四阶 Runge-Kutta 法对方程(10)、(1)联合求解。

三、结果及其分析

首先, 给出计算所需要的滑块几何参数

滑块全长: $l = 4.064 \times 10^{-3} \text{ m}$

斜坡长: $l_1 = 3.82 \times 10^{-4} \text{ m}$

滑块全宽: $B = 3.202 \times 10^{-3} \text{ m}$

滑轨宽: $b = 6.868 \times 10^{-4} \text{ m}$

斜坡高: $\delta = 5.542 \times 10^{-9} \text{ m}$

外力: $F_0 = 9.5 \times 10^{-3} \text{ kgf}$

外力作用点: $x_0 = 2.170 \times 10^{-3} \text{ m}$

质量: $M = 7.207 \times 10^{-9} \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

转动惯量: $I_x = 1.457 \times 10^{-11} \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$

$I_y = 7.562 \times 10^{-12} \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$

质心位置: $x_n = 2.142 \times 10^{-3} \text{ m}$, $y_n = 1.601 \times 10^{-3} \text{ m}$

图 2 表示当磁头滑块与障碍物处于不同的相对位置时(左右对称, $\beta = 0$, 以下同)滑轨上的压强分布状况。障碍物为长 $w = 1 \text{ mm}$, 高 $h = 0.3 \mu\text{m}$ 的矩形块。图中右上角的斜线代表该时刻 α 角的示意位置, 图形底部的矩形代表那一时刻障碍物所处的位置。图

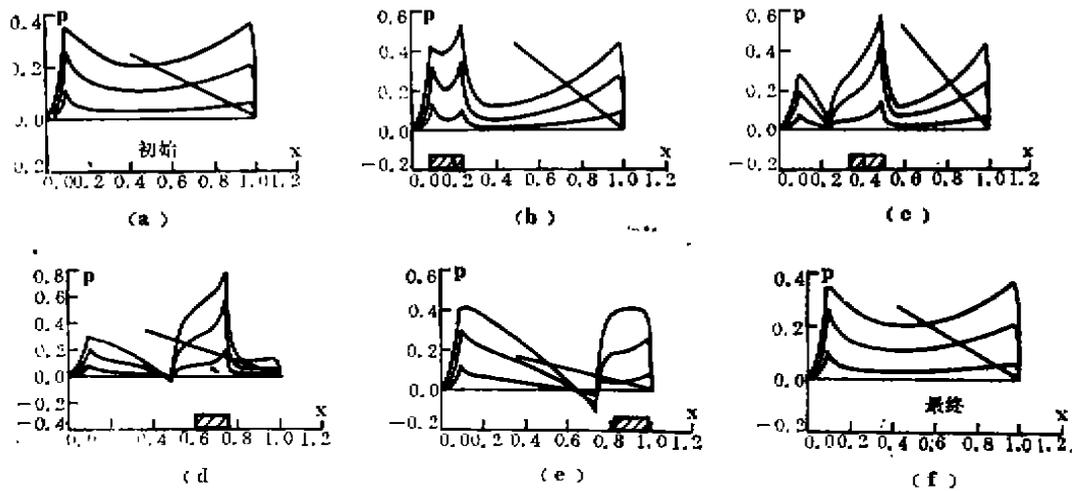


图 2 不同时刻的压强分布变化

Fig.2 Change in pressure distribution at different time

2(a)表示初始时刻滑轨上的压强分布状况。当障碍物刚进入磁头滑块润滑区域时, 滑块前部压强较稳态时有所增加(图2(b)), 这就使得滑块相对于其稳态位置有一正的俯仰

角 α ，此时滑块开始抬头爬升，以便能飞越障碍物；随着磁头滑块与障碍物的相对位置的不同，俯仰角也不断变化，见图 2(c)~(e)。当磁头滑块最终退出磁头滑块区域以后，滑块便以其固有频率作衰减振荡，直到恢复至稳态位置(图 2(f))。

图 3 表示磁头滑块飞越长 $w_s=1\text{mm}$ ，高 $h_s=0.3\mu\text{m}$ 的矩形障碍物时，其质心位移量 z 及俯仰角 α 随时间的变化曲线。从图可见，当磁头滑块飞越障碍物时，滑块整体迅速向上浮起，并且前部抬起($\alpha>0$)，这表明滑块向上爬升；当障碍物处于滑块中部时， α 减小， z 变化不大，这表明磁头滑块向水平姿态过渡；当障碍物处于滑块尾部位置时，尾部抬高($\alpha<0$)，质心高度 z 下降，磁头滑块以俯冲姿态飞过障碍物；当障碍物退出磁头滑块润滑区域后，滑块以其固有频率作衰减振荡，直至恢复到稳态位置。

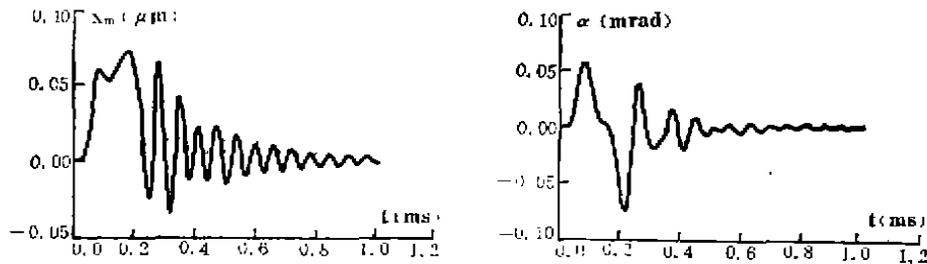


图 3 单个障碍物情况下,滑块的质心及俯仰角的位移
Fig.3 Center and pitch displacements of the slider due to one step

图 4 表示磁头滑块在 $t=0$ 时刻受一冲击， z 、 α 随时间 t 的变化曲线。在 $t=0$ 时刻受一冲击，相当于滑块在 $t=0$ 时刻有一初速度和初角速度。从图 4 的曲线可见，在 $t>0$ 的时间里， z 、 α 按指数规律衰减， $t\rightarrow\infty$ 时，滑块恢复到稳态位置。该图中的初速度为 5mm/s ，初角速度为 5rad/s 。

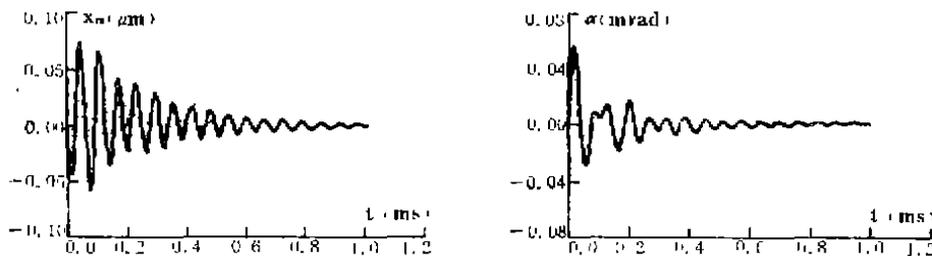


图 4 受到冲击后滑块的质心和俯仰角的位移
Fig.4 Center and pitch displacements of slider due to impulse

图 5 表示磁头滑块连续飞越四个障碍物时其质心位移量 z 及俯仰角 α 随时间的变化曲线。所谓连续飞越是指当滑块飞越前一个障碍物后在还没有恢复到稳态位置的情况下，再次飞越下一个障碍物。障碍物为长 $w_s=2\text{mm}$ ，高 $h_s=0.3\mu\text{m}$ 的矩形，两障碍物之间的时间间隔为 $1\times 10^{-4}\text{s}$ 。图中情况表明该磁头具有较好的跟随特性，可以适应盘面上连续出现的凸凹不同状况。当然，我们还可以得到滑块飞越其它类型的障碍物的曲线，因篇幅有限，故不在此一一介绍了。

在目前使用的磁盘机中，磁盘表面不可能是绝对平面，且在工作状态时，磁头滑块与磁盘表面的间隙为 $0.1\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ 之间，因而盘面上微小的起伏都将对磁头滑块的工

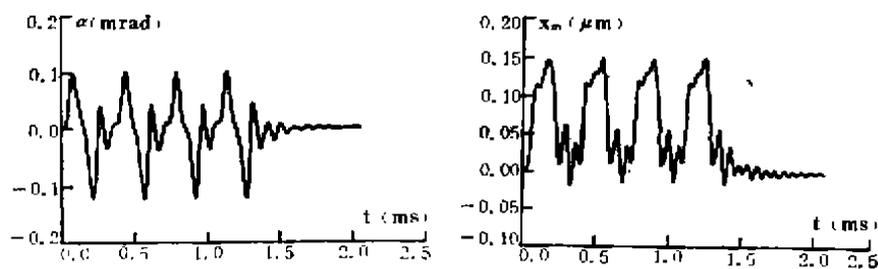


图 5 多个障碍物情况下滑块的质心及俯仰角的位移

Fig.5 Center and pitch displacements of slider due to several steps

作性能产生影响，所以对磁头滑块的动态飞行特性研究就很必要。本文的基本原理和方法用于工程实际中各种形状、尺寸的磁头滑块的动态特性研究，主要的计算结果与中国科学院计算所测得的实验数据相吻合。

参 考 文 献

- 1 Min D K, Bogy D B. Transaction of the ASME, *Journal of Tribology*, 1986, 108:584~588
- 2 Min D K, Bogy D B. Transaction of the ASME, *Journal of Tribology*, 1986, 108: 589~593
- 3 傅仙罗, 张红英. 轻负荷磁头气动力分析. 计算机学报, 1992, 6: 401~407
- 4 傅仙罗, 孙 征. 轻负荷磁头的动态频率响应. 应用力学学报, 1994, 11:1~17

Dynamic Characteristics of Light-Loaded Slider Bearing in Magnetic Recording Disk Files

Fu Xianluo Sun Zheng

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Abstract In this paper, the Alterating Direction Implicit (ADI) finite difference method is used to integrate the modified Reynolds lubrication equation, which describes the isothermal compressible fluid flow within the bearing region, and a fourth order Runge-Kutta method is used to solve the equations of motion, which describe the slider dynamics. Using this numerical model, the theoretical slider response due to some kinds of steps in disk surface is obtained. Excellent correlation is observed between theory and experiment. Results are presented to illustrate the effects of step size, step location, and step number on the dynamics performance of slider bearings.

Key words Reynolds equation, Runge-Kutta method, dynamic characteristics.