

59-68

磁头浮动块动态浮动特性分析

傅仙罗

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

杨少波

(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

TP333-350

A

摘 要 本文通过采用有限差分法求解修正的非定常的雷诺方程,并采用四阶龙格-库塔法求解飞行磁头的动力学方程组,分别计算了常规的 T-F 浮动块和带减压槽的 T-F 浮动块飞越盘面各种障碍物时的动态响应特性,并将两者进行了对比分析,讨论了其动态性能的优劣.计算结果与文献给出的实验结果相符合较好.

关键词 浮动块,时域,动态特性.

磁头
浮动特性
动态响应

ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AIR-LUBRICATED SLIDER BEARINGS

Fu Xianluo

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Yang Shaobo

(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, a factored implicit finite difference scheme is used to solve the modified Reynolds lubrication equation, which describes the isothermal compressible fluid flow within the slider bearings region, and fourth order Runge-Kutta method is used to solve the equations of motion, which describe the slider bearings' dynamic characteristics. Using these numerical models, the theoretical response of conventional T-F slider and T-F slider with negative pressure slot due to some kinds of steps and grooves in hard disk surface are obtained, and their dynamics flying characteristics are analyzed and compared. Excellent correlation is observed between calculated results and experiment results in literatures.

Keywords Slider, time domain, dynamical characteristics.

本文 1991 年 10 月 26 日收到.傅仙罗,副研究员,从事气体润滑理论方面的研究工作.杨少波,助理研究员,从事计算机信息存储方面的研究工作.

1 引 言

众所周知,磁盘存储技术的面密度的提高不仅取决于磁盘介质和制造工艺等方面的改进,更依赖于磁头在盘面上的飞行特性.头盘间隙越小,磁盘面记录的信息越多,这就对磁头浮动系统的结构及其静、动态特性提出了更高的要求.一方面希望头盘间隙较小以提高记录密度;另一方面则又要求磁头飞行在整个磁盘工作区域内能保持此恒定的间隙或变化在允许范围内,以提高磁头的抗干扰能力和获得较稳定的信号幅度.

对磁头浮动块进行动态响应特性分析可以了解它在工作时的稳定性和跟随性.通常人们是从频域和时域两方面着手对浮动块进行动态特性分析的,以前由于磁盘自身的振动幅度相比于磁头飞行高度来说较小,研究的重点大多基于频域理论.随着磁记录技术的发展,头盘间隙降至亚微米,磁盘本身的振动不可忽视,对飞行磁头动态特性的分析逐渐转移到在时域理论方面对磁头瞬态响应过程的研究.其研究方法通常是采用在磁盘面上设置障碍或者使磁盘具有某种特殊形式的激励,通过实验手段或理论计算得到磁头对这些激励的瞬态响应过程,然后对磁头的稳定性进行分析评价.时域法的直观性等优点使得它越来越为人们所接受.

笔者在对磁头浮动块静态特性理论分析的基础上^[1],采用时域理论继续对人们较感兴趣的动态特性进行分析.本文通过采用有限差分法求解修正的非定常雷诺方程,并采用四阶龙格-库塔法求解飞行磁头的动力学方程组,分别计算了常规的 T-F 浮动块(简称为常规滑块)和带减压槽的 T-F 浮动块(简称为带槽滑块)飞越盘面各种类型障碍物的动态响应,并将两者进行对比分析,讨论了其动态性能的优劣.计算结果与文献[2]给出的实验结果符合得较好.

2 计算公式

对于浮动高度为亚微米级的浮动块,其两条导轨下面的非定常气膜压强分布的计算,必须考虑分子平均自由程效应,因为此时的头盘间隙很小,分子平均自由程的大小已与气膜厚度的量级相近,连续介质的假设已不再成立,滑流效应显著增大,这样描述润滑特性的经典雷诺方程必须加以修正.

亚微米级厚度的气膜流场中,其压强分布由如下的修正雷诺方程决定:

$$\begin{aligned} \text{Grad}(h^3 \rho \text{Grad} \rho) + 6\lambda_0 \rho_0 \text{Grad}(h^2 \text{Grad} \rho) \\ = 6\mu V \cdot \text{Grad}(\rho h) + 12\mu \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

边界条件为:

$$\rho|_{\text{边界}} = \rho_0$$

其中: ρ 是气膜压强, h 是气膜厚度, ρ_0 为环境压强, λ_0 为一个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, V 为磁盘运动速度矢量.

图1表示浮动块动力学模型,图中 H_0 表示静态最小气膜厚度, z 表示浮动块尾缘相对于静态位置的位移, α 表示相对于静态位置的俯仰角, β 表示相对于静态位置的滚翻角(α, β 均以图示方向为正). (图1见下页)

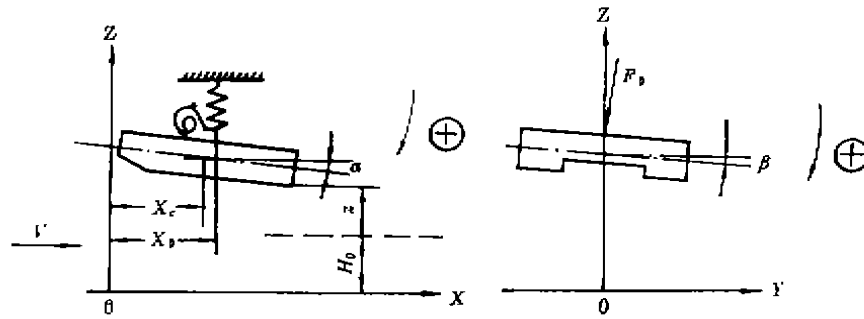


图1 浮动块物理模型

描述此模型的动力学运动方程组为:

$$\begin{cases} M \frac{d^2 z}{dt^2} = -F_0 + \iint (p-1) dx dy \\ I_\alpha \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -F_0(x_i - x_m) - \iint (p-1)(x - x_m) dx dy \\ I_\beta \frac{d^2 \beta}{dt^2} = -\iint (p-1) y dx dy \end{cases} \quad (2)$$

其中 M 是浮动块的质量, I_α 和 I_β 分别是其转动惯量, F_0 是加载力, 它通过簧片悬臂施加在 X_c 处, 同时由于簧片悬臂的弹性系数不大, 微米级的位移所产生的弹簧弹性力非常小, 故也可忽略. 并设障碍物即将进入浮动块导轨区域的时刻为 $t=0$, 则有如下的初始条件, 其中下标 t 表示对时间 t 的导数.

$$\begin{cases} z(0) = z_t(0) = 0 \\ \alpha(0) = \alpha_t(0) = 0 \\ \beta(0) = \beta_t(0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

3 计算方法

方程(1)为不定常的非线性的二阶二维偏微分方程. 笔者采用有限差分法离散此方程, 离散后的线性方程组用交替方向隐式求解法求解, 其过程请参见文献[1]. 方程组(2)是二阶的常微分方程组, 为求解方便, 将其转化为一阶.

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = z_1 \\ \frac{dz_1}{dt} = (-F_0 + \iint (p-1) dx dy) / M \\ \frac{d\alpha}{dt} = \alpha_1 \\ \frac{d\alpha_1}{dt} = (F_0(x_i - x_m) - \iint (p-1)(x - x_m) dx dy) / I_\alpha \\ \frac{d\beta}{dt} = \beta_1 \\ \frac{d\beta_1}{dt} = -\iint (p-1) y dx dy / I_\beta \\ z(0) = z_1(0) = 0, \alpha(0) = \alpha_1(0) = 0, \beta(0) = \beta_1(0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

分别采用 ADI 法和四阶龙格-库塔法对方程(1)和方程组(4)进行数值计算,计算过程如图2所示:

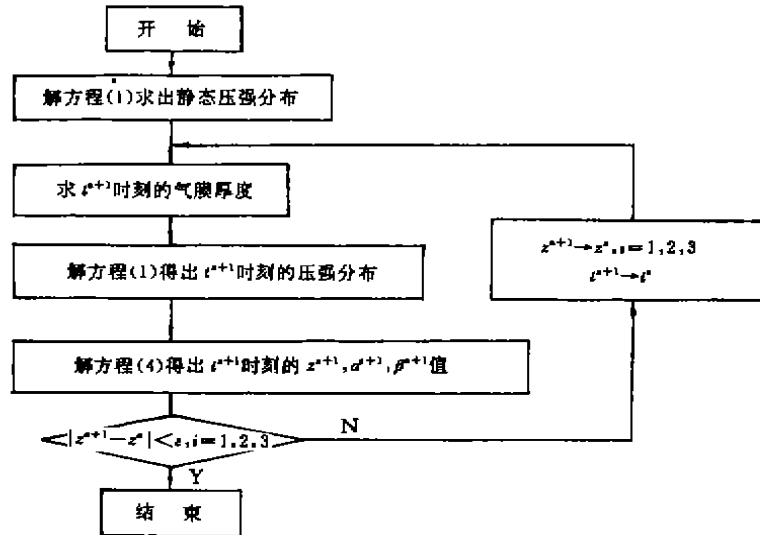


图 2

4 磁头浮动块的结构和参数

为便于与文献[2]所给出的实验曲线相对照来验证本文计算结果的正确性,常规滑块仍采用文献[2]中给出的几何尺寸.在常规滑块的两条导轨面上各挖了一减压槽,即为带槽滑块(见图3).两种滑块的几何尺寸相同,其参数见表1.

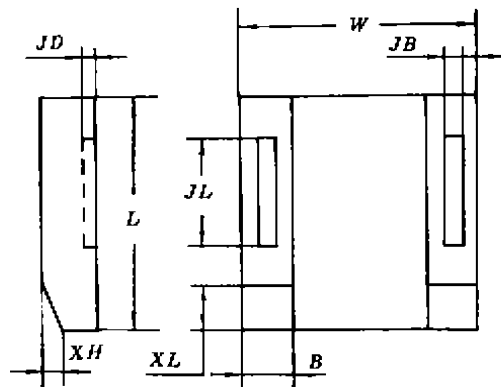


图 3 浮动块结构

表 1

	带槽滑块	常规滑块
长度 L	4.03 mm	4.03 mm
宽度 W	3.2 mm	3.2 mm
斜面长度 XL	0.39 mm	0.39 mm
斜面高度 XH	5.542 μ m	5.542 μ m
导轨宽度 B	0.66 mm	0.66 mm
减压槽长度 JL	2.0 mm	
减压槽宽度 JB	0.36 mm	
减压槽深度 JD	0.5 μ m	
加载位置 X_0	2.05 mm	2.05 mm
质心坐标 X_c	2.02 mm	2.02 mm
加载力 F_0	15 g	15 g
浮动块质量 M	0.04 g	0.04 g
转动惯量 I_a	5.41×10^{-11} kgm	5.41×10^{-11} kgm
转动惯量 I_β	3.41×10^{-11} kgm	3.41×10^{-11} kgm

5 计算结果

由于盘面上的信息是通过浮动块尾缘处的线圈进行读写的,故通常关心的磁头静、动态飞行参数主要是磁头尾缘处的浮动间隙(最小飞行高度);本文中之所以选取磁头最小飞行高度而不象通常那样将磁头质心的飞行高度作为分析的对象,不仅仅因为最小飞行高度是人们最关心的磁头飞行姿态参数,更因为它是一个比较敏感的量,它不仅依赖于磁头质心的运动,而且依赖于其俯仰角的变化,因此,只有在对磁头的浮力及浮力矩均做出较为准确的计算时,才能获得较为精确的最小飞行高度变化曲线。

图4所示为两种滑块尾缘处的飞行高度、俯仰角分别与盘面线速度之间的关系曲线,此图说明在相同条件下,带槽滑块较常规滑块飞行得更低,如果采用此种滑块可获得更高的盘面记录密度;对常规滑块飞行高度的数值计算结果与文献[2]给出的实验结果相符合得较好,其误差在文献[2]中给出的实验误差范围之内。

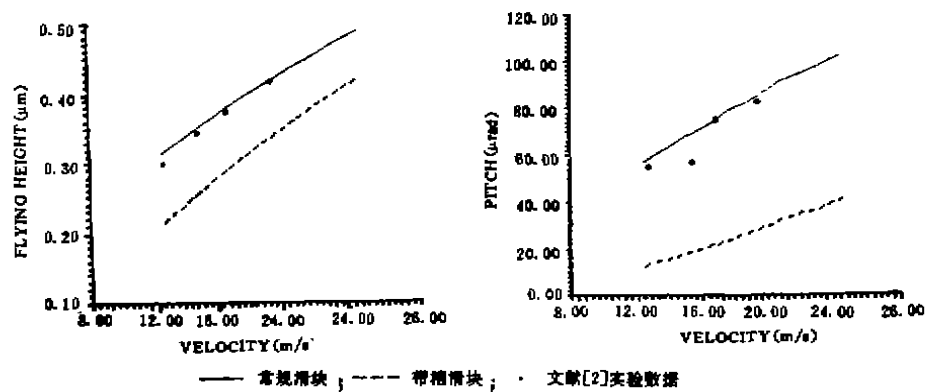


图 4 飞行高度、俯仰角与盘面线速度关系

图5所示为两种滑块飞越一高度为0.4 μ m,宽为2mm的矩形台阶障碍物时,其尾部的动态

飞行高度 z 和俯仰角 α 随时间的变化规律. 从图中可以看出当滑块飞越障碍物时, 它整体地迅速向上浮起, 并且前部抬起 ($\alpha > 0$), 表明滑块迅速向上爬升; 当障碍物处于滑块中部时, α 开始迅速减小, 但飞高变化不大, 这表明滑块向水平飞行姿态过渡; 当障碍物处于滑块的尾端位置时, 尾端抬高 ($\alpha < 0$), 飞高迅速下降, 滑块呈现俯冲姿态飞过障碍物; 当障碍物退出滑块区域以后, 滑块便以其固有频率做衰减振荡, 经过一段时间迅速恢复到稳定状态位置. 对常规滑块的计算结果与文献[2]中给出的实验结果相符得很好, 带槽滑块的 z, α 变化大于常规滑块, 稳定性劣于常规滑块.

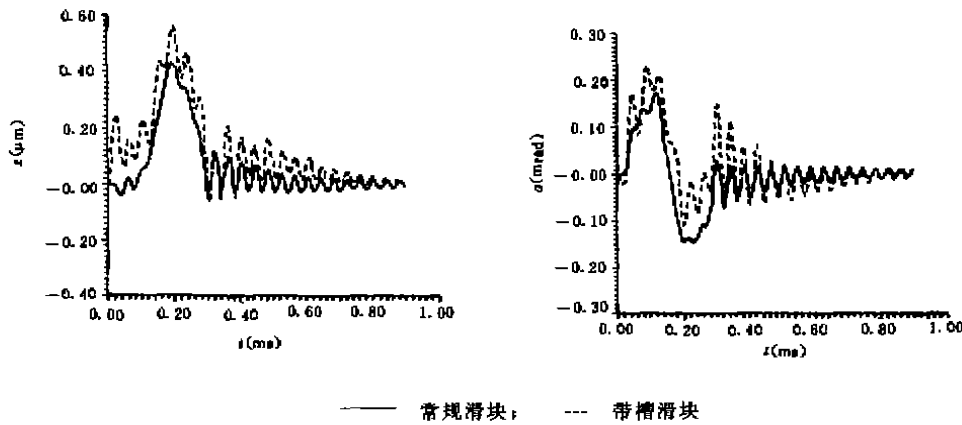


图 5 滑块飞越高为 $0.4\mu\text{m}$, 宽为 2mm 矩形台阶响应特性, $V=20.172\text{m/s}$

图6所示为带槽滑块在飞越障碍物过程中的某一时刻 ($T = 0.12\text{ms}$), 其润滑气膜三维压强分布图.

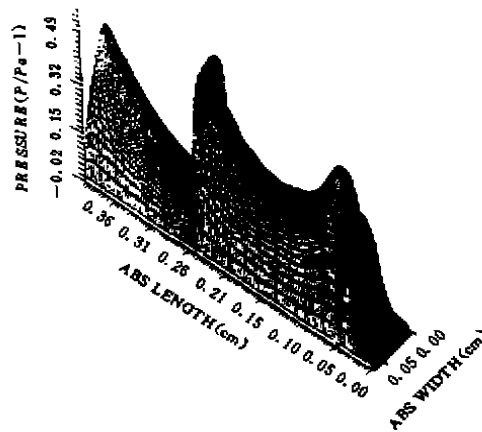


图 6 某一时刻带槽滑块气膜三维压强分布

图7所示为常规滑块分别在高速和低速两种情形下飞越高为 $0.4\mu\text{m}$, 宽为 2mm 的矩形台

阶时,其 z, α 分别与时间 t 的关系.它们均与文献[2]中给出的实验结果相符合得较好, z 和 α 的最大变化值与图5中的常规滑块相接近,表明常规滑块的动态响应特性对速度的变化不敏感,也即与磁头在盘面上所处的磁道位置关系不大.

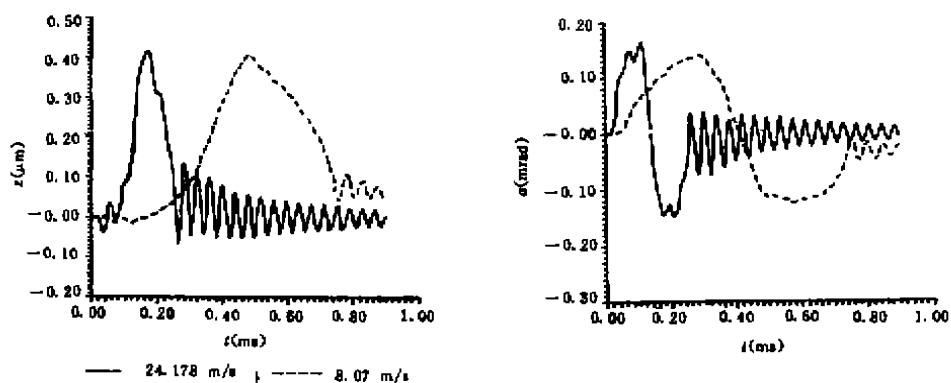


图7 常规滑块动态响应曲线,台阶高为 $0.4\mu\text{m}$,宽为 2mm

图8所示为常规滑块分别飞越宽度仍为 2mm 但高度为 $0.2\mu\text{m}$ 和 $0.4\mu\text{m}$ 两种矩形台阶时,其 z, α 与时间 t 的关系曲线,动态最大飞行高度均与台阶高度相接近,台阶越高,俯仰角变化则越大,滑块相应地抬起到某一高度.

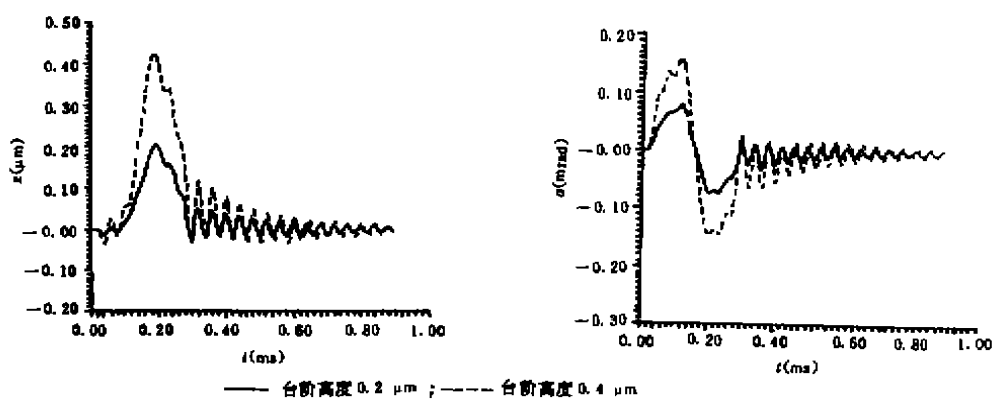


图8 常规滑块动态响应曲线,台阶宽度为 2mm , $V=20,172\text{m/s}$

图9所示为两种滑块在飞越高度为 $0.4\mu\text{m}$ 而宽度改为 4mm 的矩形台阶时,其 z, α 与时间 t

的关系曲线. 与图5相比, 两种滑块的动态最大飞行高度数值各自都很接近.

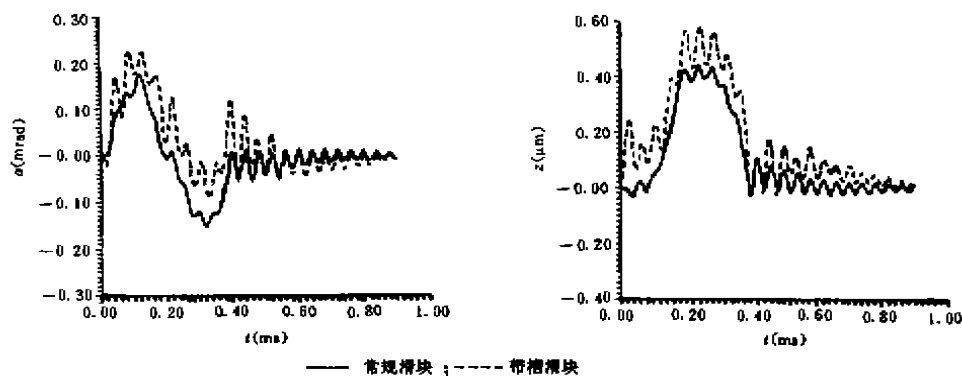


图9 两种滑块在速度为20.172m/s, 飞越高为0.4 μm , 宽为4mm 台阶响应特性

图10和图11所示分别为两种滑块飞越矩形凹坑和圆弧形凹坑时, 其 z, α 与时间 t 的变化情况. 两图均反映, 当滑块飞越凹坑时, 首先俯冲进入凹陷, 然后再抬头爬升飞出凹陷, 直至衰减稳定为止. 常规滑块飞越矩形凹坑下降的高度与凹坑的深度相接近, 而飞越圆弧凹坑时最大下跌的高度约为0.23 μm , 而俯仰角的最大偏移相对于磁头飞越宽为2mm 的矩形台阶来说要小一些(见图7). 因此, 磁头飞越凹坑要比飞越台阶显得稳定一些.

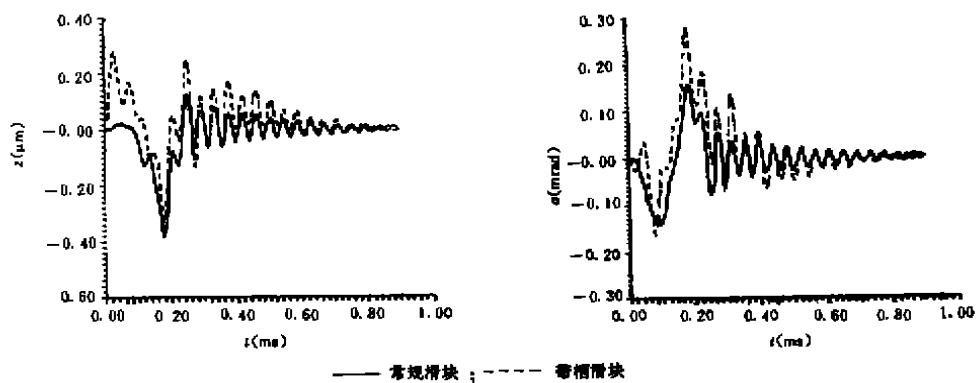


图10 两种滑块在速度为24.178m/s, 飞越深为0.4 μm , 宽为2mm 矩形凹坑响应特性

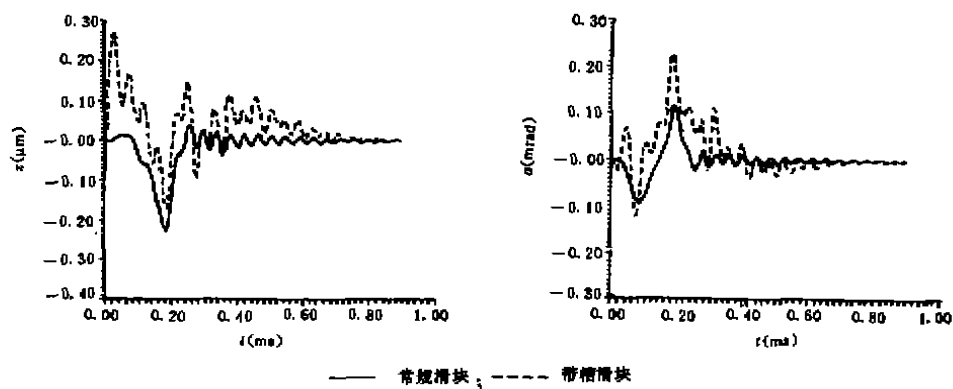


图 11 两种滑块在速度为 24.178m/s ,飞越深为 $0.3\mu\text{m}$,宽为 2mm 圆弧凹坑响应特性

图12所示为两种滑块分别连续飞越一矩形凸台、矩形凹坑、圆弧凸台和圆弧凹坑等四个障碍物时,其 z, α 随时间的变化规律.障碍物的宽度均为 2mm ,高度(或深度)均为 $0.3\mu\text{m}$.所谓连续飞越是指当滑块飞越前一个障碍物后,在还没有恢复到静态位置的情况下,再一次飞越下一个障碍物,两障碍物之间的时间间隔为 0.4ms .从图中可知,常规滑块较带槽滑块有较好的跟随特性,可以适应磁盘面上凹凸不平的状况.

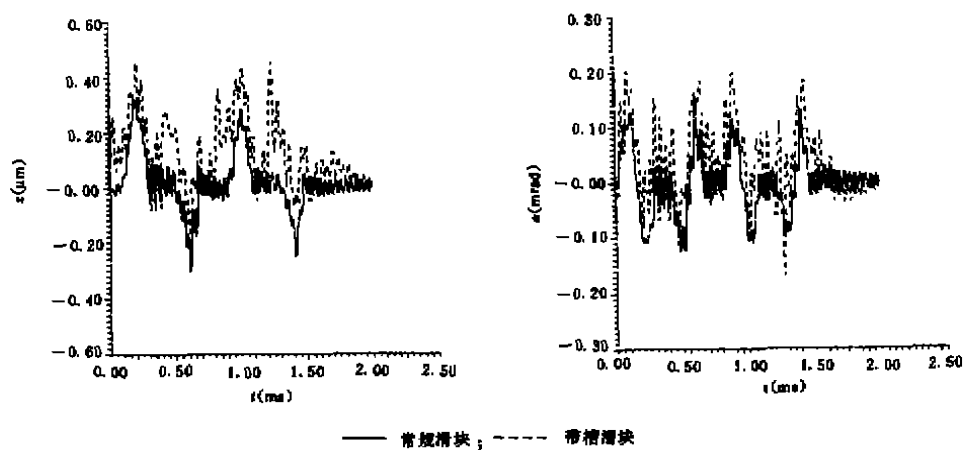


图 12 两种滑块连续飞越四种障碍物时的动态响应

6 结 论

对两种滑块在飞越各种类型的盘面障碍物时的动态响应特性的比较分析结果表明,虽然带槽滑块具有优于常规滑块的静态浮动特性,但其在飞越台阶或凹坑时,最小飞行高度和俯仰角的变化幅度均大于常规滑块,因而其动态浮动特性却降低了.因此,在研制新型的浮动块时,一定要对其静、动态特性进行全面的分析和评价,特别是要考虑其动态响应特性的优劣.

常规滑块飞越台阶时的最大飞行高度的变化约等于台阶的高度;飞越凹坑时的最大下跌幅度约低于凹坑的深度;常规滑块的动态特性对速度的变化并不敏感,也即并不随磁头工作位置的改变而发生明显的变化.

参 考 文 献

- [1] 傅仙罗,张红英.轻负荷磁头气动力分析.计算机学报,1992,15(4),401-407.
- [2] 张襄淮.硬盘驱动器磁头的浮动特性研究(博士学位论文).上海交通大学,1991.