

文章编号: 1001-1455(2004)02-0122-05

硬盘驱动器冲击激励的头盘碰撞分析*

林大超^{1,2}, 施惠基², 曾德斌³, 白春华³, 张奇³

(1. 华北科技学院, 北京 101601;

2. 清华大学工程力学系, 北京 100084;

3. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081)

摘要: 根据 Winchester 型硬盘驱动器在冲击载荷作用下头盘碰撞的动力学方程, 利用数值模拟方法分析了在正弦半波激励条件下头盘系统的动力学响应过程。当头盘系统发生碰撞时, 冲击激励峰值加速度与作用时间的倒数之间具有近似线性关系。随激励强度和作用时间的变化, 硬盘驱动器具有性能退化、盘面局部损坏和头盘系统结构破坏三种失效形式。磁头浮动块与磁盘盘面发生多次碰撞, 碰撞位置可能在浮动块尾端, 也可能在浮动块的前端。硬盘驱动器冲击失效的理论分析结果得到了爆炸冲击环境条件下试验现象的验证。

关键词: 固体力学; 瞬态响应; 碰撞; 硬盘驱动器; 失效

中图分类号: O342; TP334

国标学科代码: 130·10

文献标志码: A

1 引言

硬盘驱动器头盘系统一旦发生碰撞, 就有可能导致破坏。早在 1980 年, T. Kita 等^[1]就曾用 AE (Acoustic Emission) 方法测试了磁头起飞过程中头盘之间存在的碰撞。随后, C. E. Yeack-Scraton^[2]用压电晶体试验技术证实了即使在满速运转条件下, 头盘之间也存在一定的碰撞。R. C. Benson 等^[3]曾在 1987 年针对磁头起飞过程中的头盘碰撞问题进行了数值分析, V. Ponnaganti 等^[4,5]先后对满速运转下的头盘碰撞作过一些理论分析, 祝天龙等^[6,7]也研究了微小浮动间隙时头盘碰撞的一些动力学特征。这些工作为硬盘驱动器的改进设计提供了一定的理论指导。然而, 他们并没有考虑到实际工作环境条件所带来的影响。

在冲击作用下, 盘片的损坏与磁头组件的运动密切相关。考虑到盘片与磁头组件各自的独立运动及其相互作用, 可以建立头盘系统冲击作用模型, 对碰撞的发生作出理论预测^[8]。为了适应环境影响研究的需要, S. Kumar 等^[9]提出了硬盘驱动器冲击失效的机理分析, T. Kouhei 等^[10]给出了接触起停小型硬盘驱动器头盘碰撞过程中的最大接触应力关系。徐光弘等^[11]曾就相关工作的现状提出了一个较为全面的评述, 明确了当前研究工作的研究方向。不过, 已经获得的研究结果主要在于解决硬盘驱动器的抗冲击性能, 很少涉及到失效与激励形式之间的关系。

在本文中, 以 Winchester 型硬盘驱动器为例, 针对冲击激励下头盘碰撞发生的条件和失效规律进行了研究, 为计算机在冲击环境条件的工作安全性与可靠性分析提供了一些理论基础。

2 头盘系统冲击响应的基本方程

依据硬盘驱动器的工作情况和结构特征, 在理论分析中可以将取数臂视为刚性结构, 由此得到 Winchester 型硬盘驱动器头盘系统的动力学简化模型^[8], 如图 1 所示。考虑到头盘系统关于盘面的几何对称性, 图中只给出了其对称部分。图中, m 为磁头浮动块的质量, x_c 、 y_c 和 z_c 分别为磁头浮动块质心在 x 、 y 和 z 三个方向上的坐标值, x_p 为加载弹簧的横坐标, F_0 为加载力。在气流的作用, 磁头浮动块

* 收稿日期: 2002-11-12; 修回日期: 2003-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(19972013); 爆炸灾害预防、控制国家重点实验室开放基金项目(KFJJ01-8)

作者简介: 林大超(1964—), 男, 博士, 副教授。

块下部作用有流动空气产生的分布浮力 p 。

作为简化模型分析, 这里采用三个自由度来确定浮动块的姿态, 他们分别是头盘间隙 $h(x, y)$ 、俯仰角 α 和侧倾角 β 。设加载弹簧在三个自由度上的刚度系数为 k 、 k_α 和 k_β , 阻尼系数为 C_z 、 C_α 和 C_β , 磁头浮动块在 α 和 β 方向上的转动惯量为 I_α 和 I_β , 润滑导轨上的气流压强为 p , 在 z 方向(头盘间隙方向)上作用一冲击加速度 $a(t)$ 时, 得到如下动力学方程

$$\begin{cases} m\ddot{z} = \iint_{\Omega(m)} (p - p_a) dx dy + ma - kz - C_z \dot{z} \\ I_\alpha \ddot{\alpha} = \iint_{\Omega(m)} (p - p_a) (x - x_c) dx dy - k_\alpha \alpha - C_\alpha \dot{\alpha} \\ I_\beta \ddot{\beta} = \iint_{\Omega(m)} (p - p_a) (y - y_c) dx dy - k_\beta \beta - C_\beta \dot{\beta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_a 为作用冲击加速度为 $a(t)$ 时的压强。

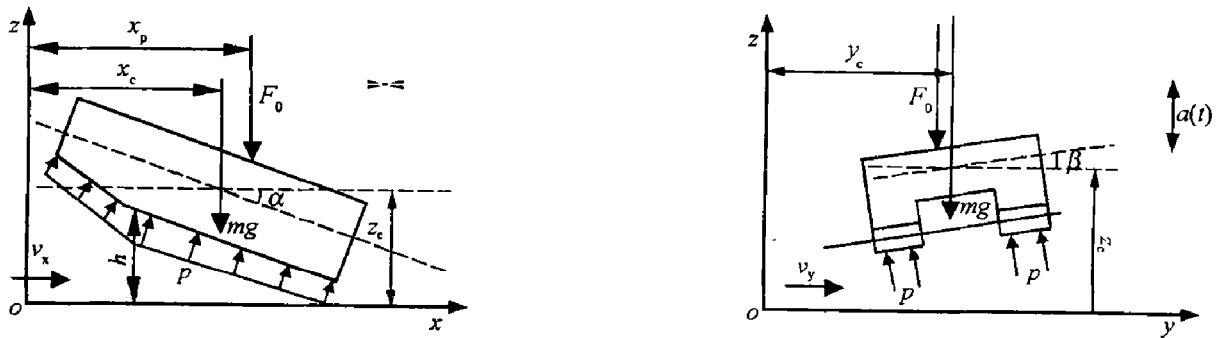


图 1 Winchester 型磁头浮动块的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of slider for Winchester type hard disk drive

当头盘发生碰撞时, 存在如下动力学关系^[6, 7]

$$\begin{cases} m\dot{z} \Big|_{t=\Delta t} - m\dot{z} \Big|_{t=0} = q \\ I_\alpha \dot{\alpha} \Big|_{t=\Delta t} - I_\alpha \dot{\alpha} \Big|_{t=0} = q (\mu_d d_\alpha \cos \alpha - d_\alpha \sin \alpha) \\ I_\beta \dot{\beta} \Big|_{t=\Delta t} - I_\beta \dot{\beta} \Big|_{t=0} = -q d_\beta \sin \beta \\ [z - (x_l - x_c) \alpha - (y_l - y_c) \beta] \Big|_{t=\Delta t} - \epsilon v_x - \beta v_y = \\ r \{ [z - (x_l - x_c) \alpha - (y_l - y_c) \beta] \Big|_{t=0} - \epsilon v_x - \beta v_y \} \end{cases} \quad (2)$$

式中: q 为头盘碰撞冲量; μ_d 为头盘摩擦系数; d_α 和 d_β 分别为浮动块质心到碰撞点的距离在 xoy 和 yoz 平面上的投影; x_l 和 y_l 为浮动块和盘片碰撞点的坐标; v_x 和 v_y 为通过头盘间隙的气流速度分量; r 为恢复系数; ϵ 为浮动块碰撞点处的斜率; 下脚标 $t = 0$ 表示碰撞前的状态值, $t = \Delta t$ 表示碰撞后的状态值。

通过头盘间隙的气流作用采用 S. Fukui 等^[12~13] 在 T. F. Gans^[14] 的基础上考虑二阶动量近似方法获得的 FK 广义润滑方程进行计算, 该方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h^3 \left(1 + \frac{6\lambda}{h} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho h^3 \left(1 + \frac{6\lambda}{h} \right) \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6\mu v_x \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 6\mu v_y \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} + 12\mu \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (3)$$

式中: h 为气膜厚度; μ 为流体动力粘度; λ 为压力等于 p 时的空气分子平均自由程; v_x 和 v_y 为 x 与 y 方向上的速度分量。

3 数值计算方法

根据上述基本方程, 采用 Galerkin 方法和三角形单元离散条件, 可以建立有限元数值计算的基本公式。浮动块的动力学方程直接利用四级 Runge-Kutta 法进行数值计算。以润滑方程为基础的非线性迭

代方程组则应用 Newton-Raphson 方法进行求解。

给定磁头的初始飞行姿态, 首先求解润滑方程, 获得该姿态下润滑导轨的压力分布, 进一步求解作用于磁头上的合力和合力矩, 若它们不为零, 再利用磁头动力学方程计算与飞行姿态相关的参数, 并获得这些参数的变化量 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 ΔH , 叠加到初始姿态上。重复上述过程, 直到磁头上的合力 $\sum F$ 和合力矩 $\sum M$ 满足为 0 的条件。此时, 所得到的磁头飞行姿态参数确定了磁头的实际飞行姿态。

考虑到侧倾角对压强的影响, 飞行姿态参数的变化量 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 和 ΔH 满足如下关系

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2} \frac{\sum M_\alpha}{I_\alpha} \Delta T^2, \quad \Delta\beta = \frac{1}{2} \frac{\sum M_\beta}{I_\beta} \Delta T^2, \quad \Delta H = \frac{1}{2} \frac{\sum F}{m} \Delta T^2 - \frac{\Delta\alpha L}{2} - \frac{\Delta\beta B}{2} \quad (4)$$

为了加快飞行姿态计算的收敛速度, 在计算中视情况可以适当将式中与项 $(\Delta T)^2$ 相关的系数 $1/2$ 增大到 $1 \sim 2$ 之间。

冲击激励加速度满足如下函数关系

$$a(t) = A_0 \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

式中: A_0 为冲击激励的峰值加速度, f 为冲击激励的频率, $f = 1/(2T)$, T 为正弦半波冲击作用的时间长度。

4 头盘碰撞发生的条件

当冲击强度较大时, 磁头浮动块的动力学响应导致它与磁盘盘面发生接触, 并形成碰撞。在碰撞发生的临界点附近, 最小浮动间隙处的气膜厚度趋近于零, 气流受到阻隔, 作用在磁头浮动块上的压力剧增, 并呈现出不均匀分布特征。根据这一特征, 可以给出判定头盘系统发生碰撞的临界条件。

在方程(5)的正弦冲击激励下, 改变激励的峰值加速度 A_0 和频率参数 f , 通过计算可以得到头盘系统发生碰撞的临界条件, 如图 2 所示。从图中可以看出, 激励的峰值加速度 A_0 和频率参数 f (即作用时间的倒数) 具有近似的线性关系。对于给定的硬盘驱动器, 最小二乘法的线性拟合结果为

$$A_0 = 263 + 1.54f \quad \text{m/s}^2 \quad (6)$$

当冲击激励峰值和频率参数落在该直线的上方时, 头盘系统发生碰撞, 反之, 头盘系统不会发生碰撞。

当硬盘驱动器的结构参数改变时, 数值计算结果表明, 头盘系统发生碰撞的峰值加速度 A_0 和频率参数 f 满足与方程(6)相同的形式, 即

$$A_0 = a_0 + a_1 f \quad (7)$$

式中: a_0 和 a_1 均为硬盘驱动器结构所确定的常数。

5 硬盘驱动器的失效特征

磁头浮动块与磁盘盘面发生碰撞的位置不一定在尾端。当俯仰角小于零时, 碰撞发生在磁头浮动块的前端, 而且临近碰撞时俯仰角会发生突变。当冲击载荷的频率为 125 Hz, 峰值加速度为 500 m/s^2 时, 磁头浮动块俯仰角的时间历程如图 3 所示。从图中可以看出, 整个过程中共发生四次头盘碰撞。除第二次外, 其它三次均发生在磁头浮动块的前端。

硬盘驱动器头盘系统发生碰撞时, 磁头无法正常完成数据读/写任务, 导致计算机非正常工作和死机现象。在爆炸冲击作用环境条件下, 对实施防护的某型号计算机工作稳定性和失效现象进行了实验。测试结果表明, 计算机的工作失效基本上是由硬盘驱动器所引起。当爆炸冲击作用强度较弱时, 对死机后的硬盘驱动器进行检测发现无磁道损坏发生, 计算机可以重新正常启动。它说明如果碰撞的强度比较微弱的话, 不会导致硬盘驱动器的结构破坏, 失效是暂时性的、且可以恢复。不过, 碰撞的发生可能会导致硬盘驱动器工作性能的退化, 从而降低其使用寿命。当爆炸冲击激励强度提高时, 硬盘驱动器的检测表明有磁道损坏现象发生。由于头盘碰撞比较剧烈, 引起磁盘盘面局部划伤。这时, 硬盘驱动器已经

不能正常工作,但是其数据可以在一定程度上予以恢复。当爆炸冲击作用强度进一步提高,头盘碰撞更为强烈,头盘系统将出现结构破坏,硬盘驱动器不仅不能正常工作,而且数据也无法恢复。由此可见,硬盘驱动器的强冲击失效表现为三种形式,即性能退化、盘面局部损坏和头盘系统结构破坏。爆炸冲击环境条件下的这些试验现象也证明了上述理论预测结果的正确性。

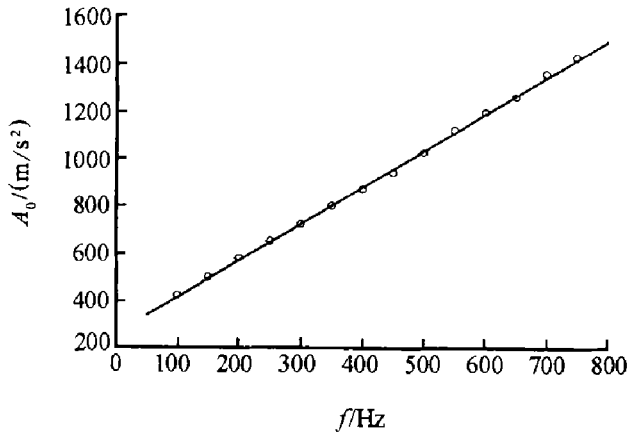


图 2 头盘发生碰撞的临界条件

Fig. 2 Critical condition of head disk collision

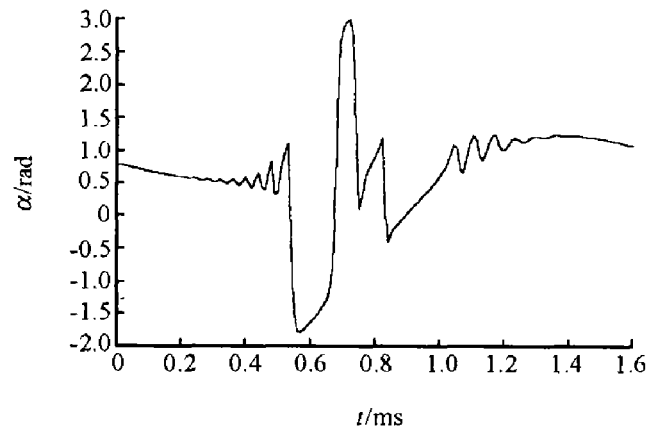


图 3 磁头浮动块俯仰角的时间历程

Fig. 3 Time history of magnetic tilt angle

6 结 论

根据 Winchester 型硬盘驱动器的基本结构和工作特点,建立了头盘系统在冲击载荷激励下磁头浮动块动力学响应的基本方程,并给出了数值求解方法的基本过程。

在磁头浮动块于磁盘盘面发生碰撞的临界条件下,正弦半波冲击激励峰值加速度和作用时间的倒数之间满足近似线性关系。硬盘驱动器随激励强度和频率特性的变化表现出性能退化、盘面局部损坏和头盘系统结构破坏三种失效形式。此外,磁头浮动块与磁盘盘面可能发生多次碰撞,碰撞的位置可能是浮动块尾端,也可能是浮动块的前端。

硬盘驱动器冲击失效的理论分析结果得到了环境试验条件下实验现象的验证。

参考文献:

- [1] Kata T, Kogure K, Mitsuya Y, et al. New method of detecting contact between floating head and disk[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1980, 16(5): 873—875.
- [2] Yeack-Scranton C E. Novel piezoelectric transducers to monitor head-disk interactions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1986, 22(5): 1011—1016.
- [3] Benson R C, Talke F E. Transition between sliding and flying of a magnetic recording slider[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1987, 23(5): 3441—3443.
- [4] Ponnaganti V, Kane T R, White J W. Dynamics of head-disk contact/impact in magnetic recording[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1987, 23(5): 3435—3437.
- [5] Ponnaganti V, Kane T R, White J W. Simulation of head-disk collision in magnetic recording[J]. Tribology Transactions, 1989, 32(2): 258—266.
- [6] 祝天龙,杨荫薄,周学仁. 磁盘机中头盘碰撞动力学研究[J]. 电子计算机外部设备, 1991, 15(1): 43—51.
ZHU Yao-long, YANG Ying-bo, ZHOU Xue-ren. Study of head/disk collision dynamics in hard disk drives[J]. External Equipment of Electronic Computer, 1991, 15(1): 43—51.
- [7] 祝天龙,杨荫薄,周学仁. 磁盘浮动特性研究:头盘碰撞动力学分析[J]. 电子计算机外部设备, 1993, 17(1): 10—14.
ZHU Yao-long, YANG Ying-bo, ZHOU Xue-ren. Study of magnetic head flying characteristics: Analysis of head/disk collision [J]. External Equipment of Electronic Computer, 1993, 17(1): 10—14.

- [8] 徐光弘,王宏民.硬盘驱动器抗冲击性能的分析与计算[J].电子计算机外部设备,1999,23(3):2—7.
XU Guang-hong, WANG Hong-min. Analysis and calculation of hard disk drive resistance to impact[J]. External Equipment of Electronic Computer, 1999, 23(3): 2—7.
- [9] Kumar S, Khanna V D, Sri-Jayantha M. A study of the head disk interface shock failure mechanism[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(6): 4155—4157.
- [10] Kouhei T, Yamada T, Kuroba Y, et al. A study of head-disk interface shock resistance[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 3006—3008.
- [11] 徐光弘,王宏民.小型硬盘驱动器头盘系统冲击特性研究综述[J].电子计算机外部设备,1998,22(3):61—63.
XU Guang-hong, WANG Hong-min. A review of resistance characteristics to impact for head-disk system of small hard disk drives[J]. External Equipment of Electronic Computer, 1998, 22(3): 61—63.
- [12] Fukui S, Kaneko R. Analysis of ultra-thin gas film lubrication based on the linearized Boltzmann equation (Influence of accommodation coefficient)[J]. International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, 1987, 30(268): 1660—1666.
- [13] Fukui S, Kaneko R. Experimental investigation of externally pressurized bearings under high Knudsen number condition[J]. Journal of Tribology of American Society of Mechanical Engineers, 1988, 110(1): 144—147.
- [14] Gans T F. Lubrication theory at arbitrary Knudsen number[J]. Journal of Tribology of American Society of Mechanical Engineers, 1985, 107(3): 431—433.

Analysis of head disk collision for hard disk drives under shock excitations

LIN Da-chao^{1,2 *}, SHI Hui-ji², ZENG De-bin³, BAI Chun-hua³, ZHANG Qi³

(1. North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. Department of Engineering mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Mechanics and Electronics Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The dynamical response of head disk system to a half sine pulse excitation is analyzed by means of numerical method according to the dynamical equations of head disk collision under the shock excitation for the Winchester type hard disk drive. When the head disk collision occurs, the peak acceleration of the shock pulse approximately follows a linear relationship with the inverse of the excitation duration. With the change of the excitation intensity and duration, the failure of a hard disk drive can be categorized into three modes, the performance degradation function failure, the local damage of disk surface and the structural damage of head disk system. The head disk collision can take place many times, whose locations may be at the trail of the slider or the front. The theoretical result agrees well with the experimental data.

Key words: solid mechanics; transient response; shock; hard disk drive; collision

* Corresponding author: LIN Da-chao

E-mail address: lindachao@tsinghua.org.cn

Telephone: 010-62795894