

硬盘加载/卸载过程的动力学仿真及参数优化

魏浩东, 敖宏瑞, 姜洪源

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨, hongrui_ao@hit.edu.cn)

摘 要: 为研究硬盘驱动器斜坡加载/卸载过程中, 磁头/盘界面及磁头悬臂/支承件接触面的摩擦学及动力学特性, 建立系统运动微分方程, 提出基于 PDE 的超薄气体润滑气膜力求解方法, 并对卸载过程中的浮动块/悬臂及斜坡/提升臂的接触特性进行仿真, 分析提升臂刚度和提升臂/斜坡的接触刚度对作用面接触变形、接触力及浮动块动态特性的影响, 以及斜坡过渡圆角对运动稳定性的影响. 结果表明: 基于 PDE 的气膜力求解方法具有足够的求解精度; 提升臂刚度、接触面刚度及斜坡过渡圆角是影响硬盘加载/卸载过程磁头滑动块稳定性的主要因素. 研究结果为硬盘磁头/盘界面的改进和 L/UL 技术的进一步应用提供了依据.

关键词: 加载/卸载; 硬盘驱动器; 接触特性; 空气轴承力

中图分类号: O343.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0074-05

Simulation of load/unload process and parameter optimization for a hard disk drive

WEI Hao-dong, AO Hong-rui, JIANG Hong-yuan

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, hongrui_ao@hit.edu.cn)

Abstract: The tribological and dynamic characteristics of the head/disk and lift-tab/ramp interfaces during load/unload (L/UL) process for hard disk drives were modeled. The equation of motion for the L/UL system was proposed, in which the air bearing force at the ultra-thin film lubrication was solved by using a PDE-based method. The contacts between the slider and suspension, as well as the lift-tab/ramp interface, were simulated to analyze the effect of the stiffness of lift-tab, the stiffness at the lift-tab/ramp interface, and the ramp angle on the stability of the suspension slider. It is indicated that PDE-based method has enough accuracy for the description of the air bearing force. The stability of the slider is determined by the suspension stiffness, contact stiffness at the interfaces and the ramp angle. These results are beneficial to improvement of the slider/disk interface and further application of L/UL technology.

Key words: load/unload (L/UL) technology; hard disk drive; contact property; air bearing force

为了增加硬盘驱动器盘片存储密度, 需要提高盘片转速, 并降低磁头飞行高度. 由于磁头浮动块 (slider) 在很低的飞行高度下与磁盘做相对运动, 且磁盘表面具有一定的粗糙度, 因而在磁头浮动块和磁盘之间容易产生间断的接触. 目前, 磁头的最小飞行高度已经达到 5 nm 以下, 这使得磁头

与磁盘之间发生直接接触或碰撞的机率大大增加^[1]. 在硬盘驱动器中采用的斜坡加载/卸载 (Ramp Load/Unload, 以下简称为 L/UL) 技术, 从机械结构上避免了非工作状态下的磁头与盘片的直接接触 (或撞击), 大幅度提升了硬盘在非工作状态 (non-operational) 下的抗冲击能力^[2].

目前, 国内外学者对硬盘驱动器中磁头/盘界面动力学特性进行了大量的试验^[3-5] 和仿真^[6-10] 研究, 结果表明, 适当的斜坡加载可以提高磁头浮动块的稳定性和磁头/盘界面的抗冲击性能. 但是在目前 L/UL 技术研究中, 由于不同硬

收稿日期: 2009-09-29.

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师资助项目 (HITQJNS. 2008. 009).

作者简介: 魏浩东 (1978—), 男, 博士研究生;
姜洪源 (1960—), 男, 教授, 博士生导师.

盘驱动器的 ramp 结构有所不同,加载及卸载的过程也相当复杂,尚无法采用通用的方法来进行研究;另外,在工作状态和非工作状态下的硬盘磁头/盘界面动力学特性受多种因素的影响,所以对硬盘加载和卸载过程中的相关构件进行动力学仿真和参数优化的研究是非常必要的。

本文考虑磁头/盘界面之间的空气轴承力作用,对磁头悬臂与盘片及斜坡元件的相互作用进行建模,建立运动微分方程,同时考虑 2 个接触面之间不同性质的相互作用,对磁头浮动块及磁头悬臂的动力学和摩擦学特性进行仿真研究与分析,为提高硬盘磁头/盘界面的抗冲击性能提供依据。

1 L/UL 机制中接触面的力学建模

1.1 L/UL 机制

硬盘驱动器一般主要由机械部件和控制电路组成,其中机械部分是硬盘读写的核心部件,硬盘驱动器由主轴电机、磁盘片、磁头浮动块、悬臂、提升臂 (lift - tab)、驱动器臂和驱动器等组成,如图 1 所示。

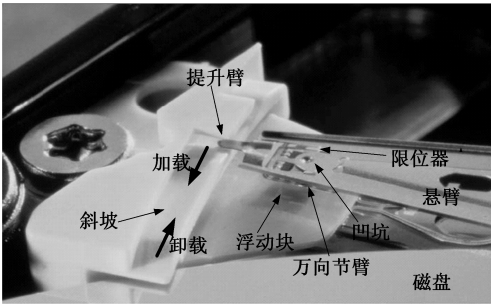


图 1 斜坡 L/UL 机制相关构件

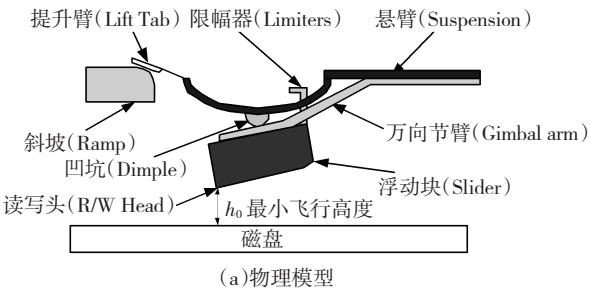
在加载过程中,磁头悬臂上的提升臂从斜坡的凹槽内沿斜坡工作表面带动磁头浮动块沿着盘片径向接近磁盘片,同时随着磁盘片与浮动块之间的间隙以及盘片的转速发生变化而产生空气轴承力,使浮动块在提升臂与斜坡分离后悬浮在到旋转的磁盘上方,直至达到工作转速及飞行高度,完成一次加载过程。当卸载时,悬臂向磁盘外径方向移动与斜坡接触,然后沿斜坡工作表面移动,此时空气轴承发生一系列的变化,最终提升臂停靠在斜坡的凹槽上,完成一次卸载过程。

1.2 L/UL 系统数学模型

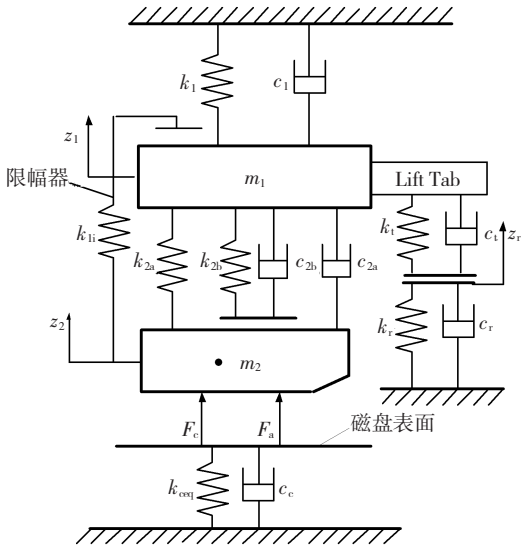
为了研究 L/UL 过程对磁头和悬臂运动的影响,并对相关参数进行优化,需要研究相关的摩擦学及动力学问题,包括悬臂组件与斜坡的作用 (斜坡元件与提升臂之间的接触力和摩擦力)、悬臂组件与磁盘的相互作用 (空气轴承力和浮动块

与盘片接触力)、悬臂内部组件之间的相互作用 (凹坑 (dimple) 与浮动块的接触以及浮动块与限幅器 (limiter) 之间的接触)。

考虑到以上各部件的相互作用,结合悬臂与浮动块组件的结构特点,令悬臂的水平速度 v 为一恒定值,将图 1 所示 L/UL 相关构件进行简化,如图 2(a) 所示。将该悬臂组件分为悬臂、万向节臂/浮动块和提升臂 3 个部分,设悬臂和万向节臂/浮动块的质量分别为 m_1 和 m_2 ,将提升臂考虑为一个无质量的弯曲弹簧。将凹坑与浮动块的接触、浮动块与限幅器之间的接触和凹坑与浮动块分离时万向节臂的变形分别进行简化,并考虑各构件的初始位置及其在 L/UL 过程中的位置变化,得到如图 2(b) 所示的力学模型。



(a)物理模型



(b)力学模型

图 2 斜坡 L/UL 系统动力学模型

对图 2(b) 所示的力学模型进行分析,可以得到动力学系统的运动微分方程,其中斜坡与提升臂分开时的方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -k_1 z_1 - c_1 \dot{z}_1 - k_{2a}(z_1 - z_2) - c_{2a}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + F_{li} + F_{2b}; \\ m_2 \ddot{z}_2 = k_{2a}(z_1 - z_2) + c_{2a}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + F_c + F_a - F_{li} - F_{2b}. \end{cases} \quad (1)$$

斜坡与提升臂接触时的运动微分方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -k_1 z_1 - c_1 \dot{z}_1 - k_{2a}(z_1 - z_2) - c_{2a}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + F_{li} + F_r + F_{2b}; \\ m_2 \ddot{z}_2 = k_{2a}(z_1 - z_2) + c_{2a}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + F_c + F_a - F_{li} - F_{2b}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_1 为悬臂的等效集中质量; m_2 为浮动块与万向节臂的等效质量; k_1 为悬臂的等效刚度; k_{2a} 为万向节臂的等效刚度; c_1 为悬臂的等效阻尼; c_{2a} 为万向节传动臂的等效阻尼; F_a 为空气轴承力; F_c 为浮动块与磁盘之间的接触力; z_1 和 z_2 分别为 m_1 和 m_2 的高度; F_r 为斜坡与提升臂之间接触力; F_{li} 为限幅器工作时的作用力; F_{2b} 为浮动块与凹坑之间的接触作用力。

1.3 相关构件接触作用分析

在加载和卸载过程中, 由于凹坑与浮动块、悬臂的限位器、L/UL 提升臂的接触条件产生变化, 所以悬臂具有 4 种状态。1) 是硬盘在正常工作时, 由于空气轴承的作用, 凹坑与浮动块接触; 2) 在 L/UL 过程中, 由于正压空气轴承力的作用, 凹坑与浮动块接触; 3) 在 L/UL 过程中, 由于空气轴承负压的吸引效应, 凹坑与浮动块分离; 4) 在 L/UL 过程中, 限位器工作, 防止凹坑与浮动块分离过大, 限位器的接触压力为

$$F_{li} = -k_{li}(z_1 - z_2 - h_{li}). \quad (3)$$

式中: k_{li} 为悬臂与限幅器的接触刚度; h_{li} 为稳态工作时悬臂与限位器之间的距离。

磁盘与浮动块的接触力为:

$$F_c = \begin{cases} -k_{ceq}(z_2 + h_0)^{3/2} - c_c \dot{z}_2, & z_2 < -h_0; \\ 0, & z_2 \geq -h_0. \end{cases} \quad (4)$$

式中 k_{ceq} 为磁盘与浮动块之间的接触刚度。

浮动块与凹坑之间的接触作用力为:

$$F_{2b} = \begin{cases} k_{2b}(z_2 - z_1 - h_{d-s0}) + c_{2b}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1), & z_2 - z_1 - h_{d-s0} > 0; \\ 0, & z_2 - z_1 - h_{d-s0} \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_{2b} 为凹坑与浮动块接触的等效刚度; c_{2b} 为凹坑与浮动块接触的等效阻尼; h_{d-s0} 为凹坑与浮动块初始距离。

提升臂与斜坡之间的接触力为:

$$F_r = \begin{cases} k_r(h_r - z_r) + c_r(\dot{z}_r - v_r), & z_1 + h_{10} - h_r < 0; \\ 0, & z_1 + h_{10} - h_r \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_r 为提升臂与斜坡接触刚度; k_l 为提升臂的

弯曲刚度; h_{10} 为凹坑与提升臂之间的初始距离; $\dot{z}_r$ 为提升臂与斜坡的接触变形速度; z_r 为提升臂与斜坡的接触点高度, $z_r = h_r - k_l(z_1 + h_{10} - h_r)/(k_r - k_l)$; c_r 为提升臂与斜坡的接触阻尼; h_r 和 v_r 为在 L/UL 过程中某一时刻斜坡的高度和高度的变化速度。

2 运动微分方程的求解

2.1 微分方程中参数确定

本研究中, 用悬臂的有限元模型计算得出运动微分方程中的几个参数: k_1 、 m_1 、 k_{2a} 和 m_2 。浮动块与磁盘之间的接触力的计算是基于 Greenwood 和 Williamson 接触模型^[11]。将提升臂与斜坡之间的接触等效为 2 个椭圆体的接触模型; 将凹坑与浮动块之间的接触作用等效为球与平板的接触模型, 基于赫兹接触理论进行计算。计算可得: $k_1 = 21.4 \text{ N/m}$; $m_1 = 3.64 \times 10^{-6} \text{ kg}$, $k_{2a} = 1.4 \times 10^3 \text{ N/m}$, $m_2 = 1.74 \times 10^{-6} \text{ kg}$, $k_l = 412 \text{ N/m}$, $k_{ceq} = 1.93 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_r = 4.02 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_{li} = 4.12 \times 10^4 \text{ N/m}$, $k_{2b} = 5 \times 10^3 \text{ N/m}$ 。

2.2 空气轴承力的确定

当硬盘驱动器在加载和卸载过程中, 由于磁头/浮动块与磁盘片在磁盘面的法线方向上存在相对运动速度, 挤压效应对加载和卸载过程中悬臂的动力学特性具有一定的影响。使用 COMSOL 软件的 PDE 工具箱求解偏微分方程是基于有限元法, 使偏微分方程的求解极其简便^[12]。其基本对流-扩散方程如下:

$$d_a \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial x} \left(c \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial u}{\partial y} \left(c \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \beta_x \frac{\partial u}{\partial x} + \beta_y \frac{\partial u}{\partial y} = f. \quad (7)$$

气体润滑雷诺方程的变形形式为

$$\begin{aligned} \sigma H \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial X} \left(QH^3 p \frac{\partial p}{\partial X} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left(QH^3 p \frac{\partial p}{\partial Y} \right) + \\ \Lambda_x H \frac{\partial p}{\partial X} + \Lambda_y H \frac{\partial p}{\partial Y} = -\Lambda_x p \frac{\partial H}{\partial X} - \Lambda_y p \frac{\partial H}{\partial Y} - \sigma p \frac{\partial H}{\partial t}. \end{aligned} \quad (8)$$

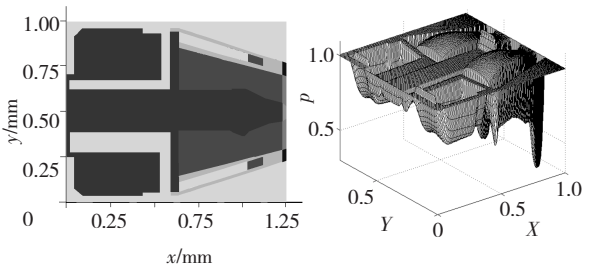
式中: X 、 Y 、 p 和 H 分别为量纲一的长度、宽度、压力和高度; Λ_x 为 x 向轴承数; Λ_y 为 y 向轴承数; σ 为挤压数; Q 为流量系数。

比较式(7)和式(8), 可以得到雷诺方程对应的标准偏微分方程的求解变量 u 、非线性系数 d_a 、 c 、 β_x 、 β_y 和 f 分别为 $u = p$, $d_a = \sigma H$, $c = QH^3 u$, $\beta_x = \Lambda_x H$, $\beta_y = \Lambda_y H$, $f = -\Lambda_x u \frac{\partial H}{\partial X} - \Lambda_y u \frac{\partial H}{\partial Y} - \sigma u \frac{\partial H}{\partial t}$ 。

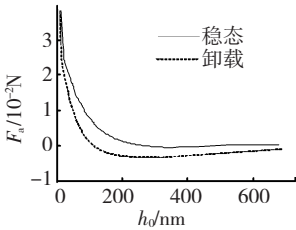
空气轴承量纲一的压力边界条件为 $u(0, Y) = 1$, $u(1, Y) = 1$, $u(X, 0) = 1$, $u(X, B/L) = 1$, 式中 L 和 B 分别为浮动块的长度和宽度。

使用上述计算方法, 对如图 3(a) 所示的负压轴承的空气轴承力进行计算, 得到该轴承在卸载时的气膜压力分布 ($h_0 = 100 \text{ nm}$) 和轴承力曲线, 见图 3(b) 和图 3(c)。

使用变步长 4-5 阶龙格-库塔 (Runge-Kutta) 算法来求解运动微分方程。联合式 (1) ~ 式 (6) 和图 3(c) 所示的在给定俯仰角和倾侧角下的空气轴承轴承力曲线, 可以获得浮动块和悬臂的速度和位移响应。



(a) 负压型浮动块表面形貌 (b) $h_0 = 100 \text{ nm}$ 时卸载的气膜压力分布



(c) 轴承力曲线

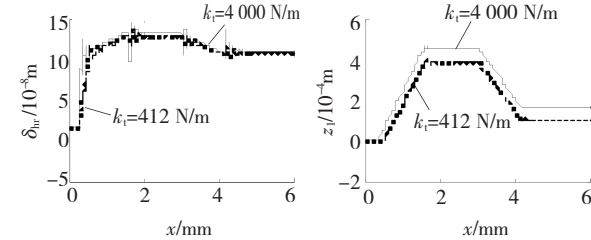
图 3 负压型轴承特性

2.3 其他参数假设

为了便于分析, 令空气轴承作用面的俯仰角和倾侧角均为定值; 同时, 由图 3(c) 可知, 在稳态和卸载条件下轴承力的大小与超薄气膜厚度 (即磁头的飞行高度) 的变化趋势基本一致。因此, 在本研究中不考虑空气轴承在 L/UL 过程中的挤压效应。实际上, 影响空气轴承气膜力的因素很多, 不仅包括空气薄膜的挤压效应、滑动块接触面形貌、磁头飞行的初始姿态、磁盘片的表面粗糙度, 还包括磁头浮动块与悬臂的结构及连接方式、悬臂支承轴承的结构及悬臂上各相邻构件之间的接触作用等。这些因素不可能在一个数学模型中得到一一体现。因此, 在本文中建立的数学模型中, 只考虑 L/UL 过程中相关构件的接触作用, 以及作用在浮动块上的气膜力等对磁头/浮动块动态特性的影响。关于超薄气膜在浮动块运动过程中的挤压效应, 将另文讨论。

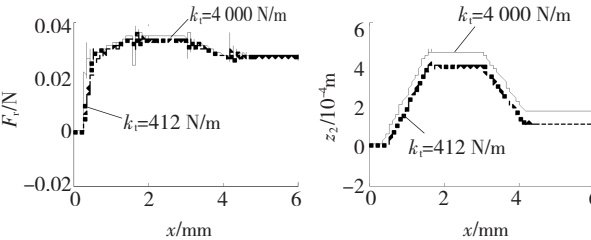
3 数值计算结果与讨论

使用 MATLAB 编制程序对运动微分方程 (1) 和 (2) 求解, 并对卸载过程的仿真结果进行分析。由图 4(a) ~ (d) 可以看出, 斜坡与提升臂的接触力、接触变形、悬臂位移、和浮动块位移在斜坡与提升臂的接触过程中随斜坡的高度增大而增大, 并且在斜坡高度倾角变化处, 接触力和接触变形突然增大, 出现强烈的振动。图 4(b) 和 (d) 结果表明, 增加提升臂弯曲刚度, 在相同的水平卸载位置上, 悬臂和滑动块的垂直位移 (z_1 和 z_2) 增大。并且卸载过程中提升臂与斜坡的接触力 F_r 和接触变形 δ_{hr} 也有所增加。



(a) 提升臂与斜坡的接触变形

(b) 悬臂的位移



(c) 提升臂与斜坡的接触力

(d) 浮动块的位移

图 4 提升臂刚度的影响

由图 5(a) 可以看出, 随着提升臂与斜坡之间接触刚度的增大, 接触变形在逐渐减小。由图 5(b) ~ 5(d) 可以看出, 接触力、悬臂位移和浮动块位移随提升臂-斜坡之间的接触刚度增大而略微增大, 即接触刚度对接触变形影响很大, 而对于接触力、悬臂位移和浮动块位移影响很小。

斜坡过渡圆角的大小也直接影响悬臂及浮动块的动力学特性。图 6(a) 所示为几种不同的斜坡过渡圆角。图 6(b) ~ (d) 给出了基于这几种不同的过渡圆角而进行仿真得到的结果。由图 6(c) 可知, 当斜坡的倾角变化处存在圆角时, 可以大幅度降低该处附近的接触压力, 减小该处接触压力的变动。由图 6(b) 和 (d) 可以看出, 随着斜坡倾角变化处圆角半径的增大, 在该处附近悬臂和浮动块的振动变小, 运动变得平滑, 有利于卸载过程平稳运行。这表明, 在斜坡倾角变化处进行适当的圆角优化, 可以提高卸载过

程的平稳性。

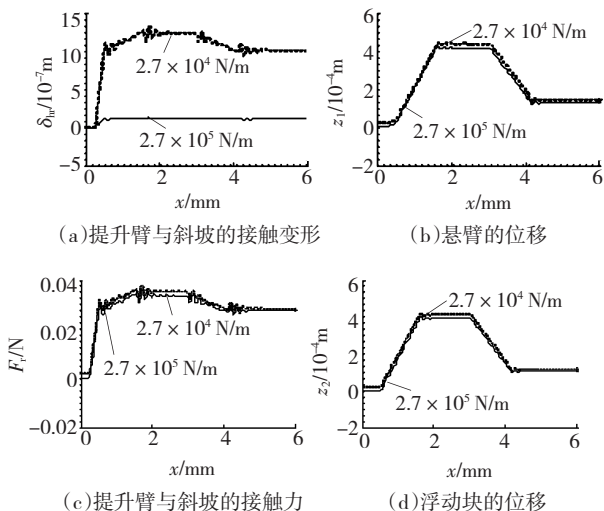


图5 斜坡与提升臂的接触刚度的影响

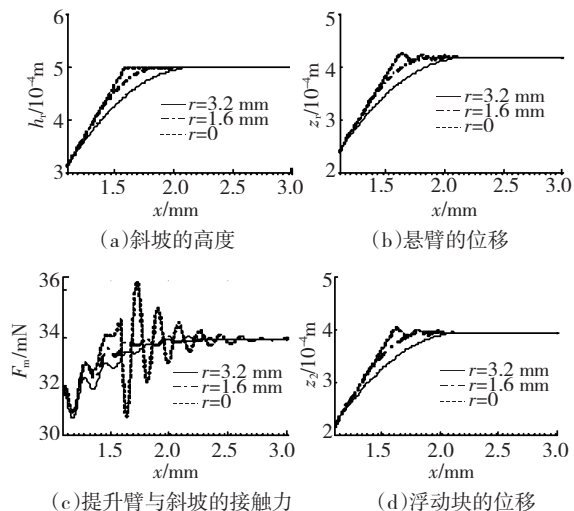


图6 斜坡圆角的影响

4 结 论

1) 斜坡与提升臂的接触力随斜坡的倾角增大而增大,并且在斜坡倾角变化处,接触力突然增大并出现较大的振动;卸载过程中,随着提升臂刚度逐渐增大,悬臂位移和浮动块位移逐渐增大,而提升臂与斜坡的接触力和接触变形逐渐减小。为了防止斜坡与提升臂之间产生较大的摩擦和磨损,需要对提升臂的刚度进行优化。

2) 在卸载过程中,提升臂与斜坡之间的接触刚度对作用面接触力、悬臂位移和浮动块位移影响较小,对接触变形影响很大。

3) 悬臂的动力学特性与斜坡倾角的大小直接相关。对斜坡过渡处的圆角进行优化,可以改变

接触区的接触应力,降低其振动幅值,提高 L/UL 过程的平稳性。

参考文献:

- [1] JIANHUA L, JUNGUO X, YUICHI A. Air bearing design to prevent reverse flow from the trailing[J]. Tribology Letters, 2009, 35(2): 113-120.
- [2] MURTHY A N, JAYSON E M, TALKE F E. Effect of non-operational shock on Inter-action between suspension lift-tab and load/unload ramp[C]//Proceedings of World Tribology Congress. Washington, D. C., USA: [s. n.], 2005: 12-16.
- [3] YAMADA T, BOGY D B. Load-unload slider dynamics in magnetic disk drives[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(6): 2742-2744.
- [4] SUK M, GILLIS E D. Effect of mechanical design of the suspension on dynamic loading process[J]. Microsystems Technology, 2005, 11(9): 846-850.
- [5] MA Y S, LIU B, WANG W J, et al. Slider-bump contact and flying height calibration[J]. Tribology Letters, 2006, 23(1): 83-91.
- [6] FU T C, BOGY D B. Readback signal decrease due to dynamic load head-disk contacts[J]. ASME Journal of Tribology, 1996, 118(4): 370-375.
- [7] HU Y, JONES P M, LI K. Air bearing dynamics of sub-ambient pressure sliders during dynamic unload[C]//Proceedings of ASME/STLE International Tribology Conference. Toronto, Canada: [s. n.], 1998: 25-28.
- [8] PENG J P. Theoretical prediction of ramp loading/unloading process in hard disk drives[J]. ASME Journal of Tribology, 1999, 121(7): 568-574.
- [9] ZENG Q H, BOGY D B. A simplified 4-DOF suspension model for dynamic load/unload simulation and its application[J]. ASME Journal of Tribology, 2000, 122(1): 274-279.
- [10] POLINA V K, PYUNG H. Loading velocity effect in the load/unload systems with multiple flying height states[J]. ASME Journal of Tribology, 2009, 131(1): 1-7.
- [11] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[C]//Proceedings of Royal Society Series A. London: [s. n.], 1966: 300-319.
- [12] 魏浩东, 敖宏瑞, 姜洪源. 磁头/盘界面超薄气体润滑雷诺方程的数值求解[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 33-37.

(编辑 杨 波)