

# Effects of Materials and Geometric Dimensions on the Flying Characteristics of a Slider in Gas-Filled Hard Disk Drives

Tingyi Yang, Xue Bai\*, Huilin Wang, Yuanyong Liu

School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong

Email: \*xuebai2014@sdut.edu.cn

Received: Jul. 21<sup>st</sup>, 2017; accepted: Aug. 7<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 14<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

With increasing of the magnetic recording density in hard disk drives (HDDs), the flying height of the slider is less than 10 nm. When a HDD is subjected to external shock loadings, the flying parameters of the slider, including the minimum flying height, the pitch angle, the roll angle, will change over time. By solving the gas film lubrication equation in the head/disk interface and establishing a structural finite element model of a HDD system, effects of HDD cover materials, suspension materials, disk materials, suspension thickness, disk thickness, on the flying characteristics of the slider are studied in this paper. The results show that the disk materials and thicknesses have a less effect on the flying parameters of the slider, the effects of suspension materials and thicknesses on the flying characteristics of the slider are obvious. The flying parameters of the slider are changed least for a HDD with an ABS plastic cover among the studied different materials.

## Keywords

Gas-Filled Hard Disk Drive, Slider, Gas Lubrication Equation, Flying Characteristics

---

# 材料和几何尺寸对充气硬盘磁头滑块飞行特性的影响

杨廷毅, 白雪\*, 王辉林, 刘原勇

山东理工大学, 机械工程学院, 山东 淄博

Email: \*xuebai2014@sdut.edu.cn

收稿日期: 2017年7月21日; 录用日期: 2017年8月7日; 发布日期: 2017年8月14日

## 摘要

随着硬盘磁记录密度增加,磁头滑块的飞行高度已经小于10纳米,当硬盘遭受外界冲击载荷时,磁头滑块飞行特性参数(最小飞行高度 $h_m$ 、俯仰角 $\alpha$ 和侧倾角 $\beta$ )会随时间发生变化。通过求解磁头/磁盘界面气膜润滑方程和建立硬盘结构系统有限元模型,本文研究了硬盘外壳材料、悬臂材料、磁盘材料、悬臂厚度、磁盘厚度对磁头滑块飞行特性的影响。研究结果发现:磁盘材料和厚度对磁头滑块飞行特性参数影响较小,悬臂材料和厚度对磁头滑块飞行特性参数影响最大;对于各种不同材料,当硬盘外壳材料为ABS塑料时,磁头滑块飞行特性参数的变化幅度相对最小。

## 关键词

充气硬盘,磁头滑块,润滑方程,飞行特性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着硬盘磁记录密度增加,磁头滑块的飞行高度不断减小,如今已经小于10纳米[1]。硬盘在工作过程中,如果受到外界冲击和振动,就会导致磁头滑块与磁盘碰撞,影响硬盘的工作性能,严重时损坏磁道,造成无法挽回的数据损失。为了提高硬盘的抗冲击能力,减小磁头滑块与磁盘接触碰撞几率,需要研究构件材料和几何尺寸对硬盘遭受冲击载荷下响应特性的影响[2]。目前,国内外研究人员对该问题进行了实验和数值模拟研究。Shi等[3]研究了磁头滑块径向位置、倾向角、磁盘转速对磁头滑块的静态和动态特性的影响,并指出当磁头滑块从内径移动到外径时,最大接触力、倾斜角、俯仰角和最大气膜压力均增加,增加幅度随着磁头滑块飞行高度降低而加强。通过建立硬盘的有限元模型和利用激光多普勒测振仪(Laser Doppler Vibrometer, LDV)实验测量,Feliss等[4]研究了硬盘失效前能承受的最大冲击载荷,并分析了悬臂不同位置的最大位移。魏浩东等[5][6]为了研究微型硬盘驱动器在受到外界冲击激励时的动态特性,建立了磁头/盘界面磁头悬臂与支承件接触面系统的力学模型,对施加不同冲击持续时间和加速度幅值的半正弦冲击的系统响应进行了仿真,探讨了在不同激励下磁头滑块的冲击响应、以及激励对气膜承载力变化的影响。Bhargava和Bogy[7]提出了一种研究磁头滑块-悬臂-磁盘系统冲击响应特性的方法,即:首先通过Ansys建立悬臂-磁盘的结构有限元计算模型,然后通过编写程序求解磁头滑块的气膜承载力;最后,实现了悬臂-磁盘有限元模型与磁头滑块承载力计算模型顺序求解过程。从这些研究可以看出:人们主要关注外界载荷对硬盘冲击响应的影响,却较少研究构件材料和几何尺寸对硬盘磁头滑块飞行特性的影响。

另一方面,为了减小磁头滑块与磁盘之间的间隙,提高硬盘磁记录密度,人们考虑向硬盘填充低密度气体。同时,充气硬盘还具有降低寻道误差、减少能量损耗等优点[8]。基于气膜润滑方程,Zhou等[9]研究了气体物理特性对磁头滑块飞行高度和气膜承载力的影响,并指出了硬盘内部填充气体的选择标准。通过Ansys/CFX,Kil等[10]研究了填充氦气/空气时硬盘内部流场分布特性,并指出氦气会导致较小的磁头滑块振动。对于充气条件下,构件的材料和几何尺寸对硬盘冲击响应特性的影响,还未进行深入研究。

本文首先通过有限体积法求解磁头滑块与磁盘之间的气膜润滑方程，获得作用于磁头滑块与磁盘之间的气膜承载力。然后，利用 Ansys/LS-Dyna 建立硬盘系统的有限元模型，该模型包括了硬盘外壳、悬臂、磁头滑块、磁盘、电机等结构。在模拟过程中，求解气膜润滑方程获得的气膜承载力，将其施加到硬盘系统有限元模型对应的磁头滑块/磁盘界面，而硬盘遭受冲击后导致磁头滑块飞行参数变化，该参数要重新传递给求解气膜润滑方程的程序，获得下一阶段磁头滑块的气膜承载力。最后，通过该计算方法，研究了硬盘外壳材料、悬臂材料、磁盘材料、悬臂厚度、磁盘厚度对磁头滑块飞行特性的影响。

## 2. 纳米间隙气膜润滑方程

如图 1 所示，硬盘工作时，磁头滑块飞行在磁盘上方，并通过附着点与悬臂连接在一起，其中，磁头滑块尾部与磁盘之间的间隙为最小飞行高度，用  $h_m$  表示。磁头滑块最小飞行高度小于 10 纳米，磁头滑块与磁盘之间的气膜润滑方程需要考虑“气体稀薄效应”的影响。基于 FK-Boltzmann 模型[11] [12]，Shi 和 Yang [13]推导出一个数学表达式相对简单的模型，即线性流率(Linearized Flow Rate, LFR)模型，其表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} \left( \left( C_1 + \frac{C_2}{PH} \right) PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda_x PH \right) + \\ \frac{\partial}{\partial Y} \left( \left( C_1 + \frac{C_2}{PH} \right) PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} - \Lambda_y PH \right) = \sigma \frac{\partial}{\partial t} (PH) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $P = p/p_a$  为无量纲压力， $p$ 、 $p_a$  分别为磁头滑块表面压力和周围环境压力，单位为 Pa。 $X$  和  $Y$  分别为磁头滑块长和宽方向的无量纲坐标， $H = h/h_m$  为磁头滑块与磁盘之间无量纲距离( $h$  为磁头滑块表面到磁盘之间距离，单位：nm)。 $\Lambda_x = 6\mu Ul/p_a h_m^2$  为气膜数， $\sigma = 12\mu\omega l^2/p_a h_m^2$  为挤压数。 $\mu$  为气体的运动粘度(单位： $\mu\text{Ns/m}^2$ )， $U$  为磁盘转速在  $X$  方向的分量， $l$  为磁头滑块长度(单位：mm)。 $Q = Q_p(D, \alpha)/Q_{con}(D)$  为流量因子，其中  $Q_p$  和  $Q_{con} = D/6$  分别为 Poisson 流和连续流因子， $D = ph\sqrt{2RT}/\mu$  ( $R$  为气体常数， $T$  为特征温度)。 $C_1$  和  $C_2$  是与  $D$  的取值有关的系数，如表 1 所示。

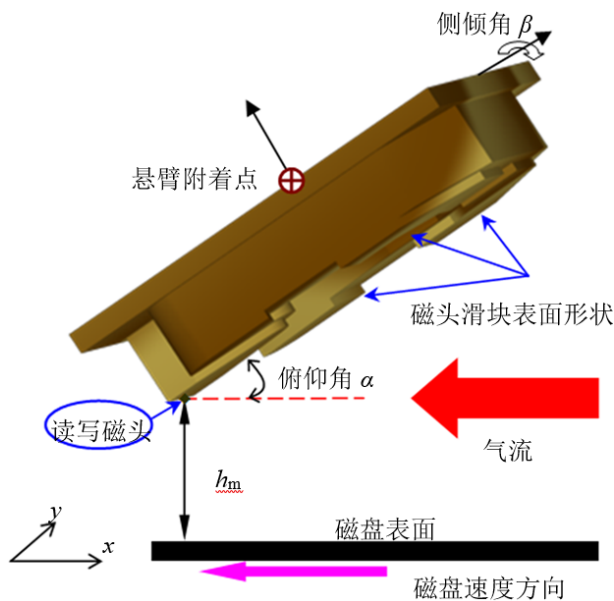


Figure 1. Head disk interface  
图 1. 磁头滑块/磁盘界面

方程(1)是一个复杂的二阶偏微分方程,需要通过数值方法求解,本文采用有限体积法对方程进行离散,通过网格自适应技术生成数值网格和多重网格法进行加速求解[14][15]。

### 3. 硬盘结构有限元模型

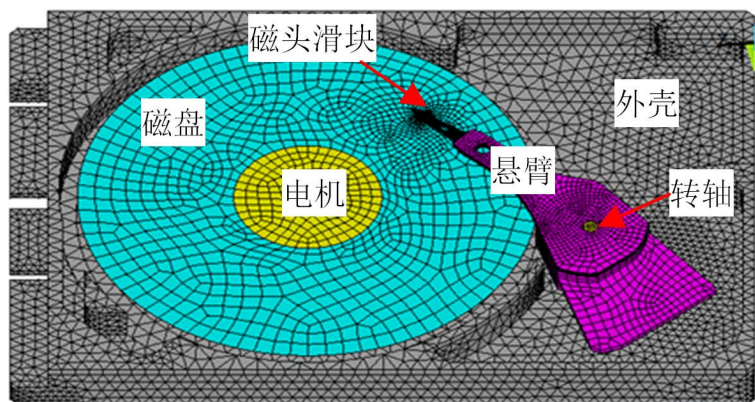
硬盘的几何结构主要包括外壳、磁盘、悬臂、磁头滑块、驱动电机、转轴等,工作中的硬盘遭受外界冲击振动时,冲击载荷作用到外壳上。不同于其他硬盘结构的简化模型[16][17][18],本文建立了一个包含硬盘外壳、磁盘、悬臂、转轴、磁头滑块、驱动电机的有限元模型(如图2所示),该有限元模型在Ansys/LS-Dyna中建立。

通过求解方程(1)获得的气膜承载力,需要施加到磁头滑块与磁盘界面(图1所示),本文通过把磁头滑块的压力分布等效成节点力施加到磁头滑块与磁盘对应位置。磁头滑块与磁盘有可能在外界冲击载荷下发生接触碰撞,所以在磁头滑块与磁盘界面进行了接触定义设置。对驱动电机进行了简化,与磁盘、硬盘外壳之间通过耦合方式连接起来。根据硬盘系统的结构特点、Ansys单元库的类型以及相关文献的查阅,悬臂和磁盘选用Shell 163单元,其余部分选用Solid 164。硬盘系统总的节点数为30,241,单元数为52,065,其中Shell单元数为3818、Solid单元数为48,247。

**Table 1.** Coefficients for different  $D$  in the LFR model

**表 1.** LFR 模型中不同  $D$  值对应的系数

$D$	$C_1$	$C_2$
$0.01 \leq D < 0.031$	-159.9527	$19.64363/D_0$
$0.031 \leq D < 0.076$	-45.97878	$16.18521/D_0$
$0.076 \leq D < 0.165$	-19.31806	$14.20477/D_0$
$0.165 \leq D < 0.368$	-6.26909	$12.15143/D_0$
$0.368 \leq D < 0.687$	-1.85821	$10.53179/D_0$
$0.687 \leq D < 1.306$	-0.04096	$9.28421/D_0$
$1.306 \leq D < 4.18$	0.68849	$8.26618/D_0$
$4.18 \leq D < 21.5$	0.96904	$6.95964/D_0$
$21.5 \leq D \leq 100$	0.99786	$6.34676/D_0$



**Figure 2.** Structural finite element model of a hard disk drive

**图 2.** 硬盘结构有限元模型

## 4. 计算过程

当硬盘外壳受到外界冲击与振动时,磁头滑块的飞行特性参数(即最小飞行高度( $h_m$ )、俯仰角( $\alpha$ )和侧倾角( $\beta$ ))会随时间发生改变,从而改变磁头滑块与磁盘之间的气膜承载力( $P$ )。从前面的叙述可以知道,气膜承载力需要求解方程(1)获得,具体的实施过程中,是通过 Matlab 编写程序求解的;而硬盘结构的有限元模型,是在 Ansys/LS-Dyna 中建立的。所以,需要在求解方程(1)的 Matlab 程序与模拟硬盘冲击振动有限元模型之间相互调用并传递数据(飞行特性参数和气膜承载力),具体的计算过程如下:

- ① 设置硬盘稳定工作条件,例如最小飞行高度  $h_m^0$ 、俯仰角  $\alpha^0$  和侧倾角  $\beta^0$ ; 设置初始计算时间  $t^0$ 、计算结束时间  $t_{out}$  和计算时间步长  $\Delta t$ ;
- ② 利用 Matlab 程序,根据方程(1)计算出硬盘稳定工作条件下的气膜承载力  $P^0$ ;
- ③ 把硬盘稳定工作条件下对应的气膜承载力  $P^0$ ,施加到磁头滑块与磁盘的界面(如图 1 所示);
- ④ 施加外界冲击载荷到硬盘外壳上(有限元模型如图 2 所示),利用 Ansys/LS-Dyna 开始计算;
- ⑤ 当计算时间达到  $t = t^0 + \Delta t$  时,计算出新的磁头滑块飞行参数( $h_m$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ ),且保存在硬盘上;计算结束并退出 Ansys/LS-Dyna;
- ⑥ 令  $t^i = t$ ; 利用 Matlab 程序从硬盘上读取飞行参数( $h_m$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ ),然后求解方程(1),获得新的气膜承载力  $P$ ;
- ⑦ 利用 Ansys/LS-Dyna 重启动功能,修改磁头滑块与磁盘之间的气膜承载力,然后,基于上一步的计算结果,开始新的计算;
- ⑧ 当计算时间达到  $t = t^i + \Delta t$  时,计算磁头滑块飞行参数( $h_m$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ ),且保存在硬盘上;判断  $t > t_{out}$ ,如果“是”跳到步骤(9),否则,跳到步骤(6);
- ⑨ 计算结束时间达到,结束计算。

通过以上计算过程,实现了求解磁头滑块/磁盘界面气膜承载力与求解硬盘结构冲击响应之间的耦合计算,该方法由于包含了硬盘系统有限元模型和动态求解气膜承载力,所以具有较高精度。

## 5. 计算结果与讨论

影响硬盘工作稳定性最重要的部分是磁头滑块与磁盘界面的振动,即磁头滑块随时间变化的飞行特性,动态飞行参数主要包括最小飞行高度、俯仰角和侧倾角,如图 1 所示。本文主要研究硬盘外壳、悬臂和磁盘材料、以及磁盘与悬臂厚度对磁头滑块飞行特性的影响。外界冲击载荷施加到硬盘外壳四个对角位置(如图 3 所示),振幅为 20 g (g 为重力加速度),脉宽为 0.4 ms。填充气体为氦气和空气混合气体,其中氦气占混合气体体积的 70%,气体运动粘度  $\mu = 20.68 \mu\text{Ns}/\text{m}^2$ ,气体分子平均自由程为 139.1 nm,该参数会影响到表 1 中  $D$  的取值。磁盘的转速为 10,000 转/分钟。

### 5.1. 材料的影响

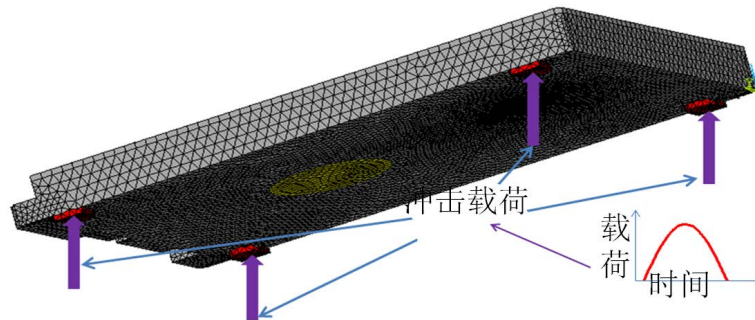
从市场上购买的硬盘,外壳的材料主要有工程塑料、金属等,悬臂的材料主要有铝、铜等金属及其合金,而磁盘材料主要有玻璃、铝合金等。在研究过程中,选用的材料如表 2 所示。

图 4 给出了硬盘外壳材料分别为铜、ABS 塑料和铝时,硬盘外壳遭受同一外界冲击载荷情况下磁头滑块的飞行特性。从图中可以看出,当硬盘外壳材料为 ABS 塑料时,磁头滑块的最小飞行高度、俯仰角和侧倾角的振动幅度是最小的;当硬盘外壳材料为铜时,磁头滑块的最小飞行高度、俯仰角和侧倾角的振动幅度最大,但是这些飞行参数的衰减速度要快于硬盘外壳材料为铝时对应的飞行参数。

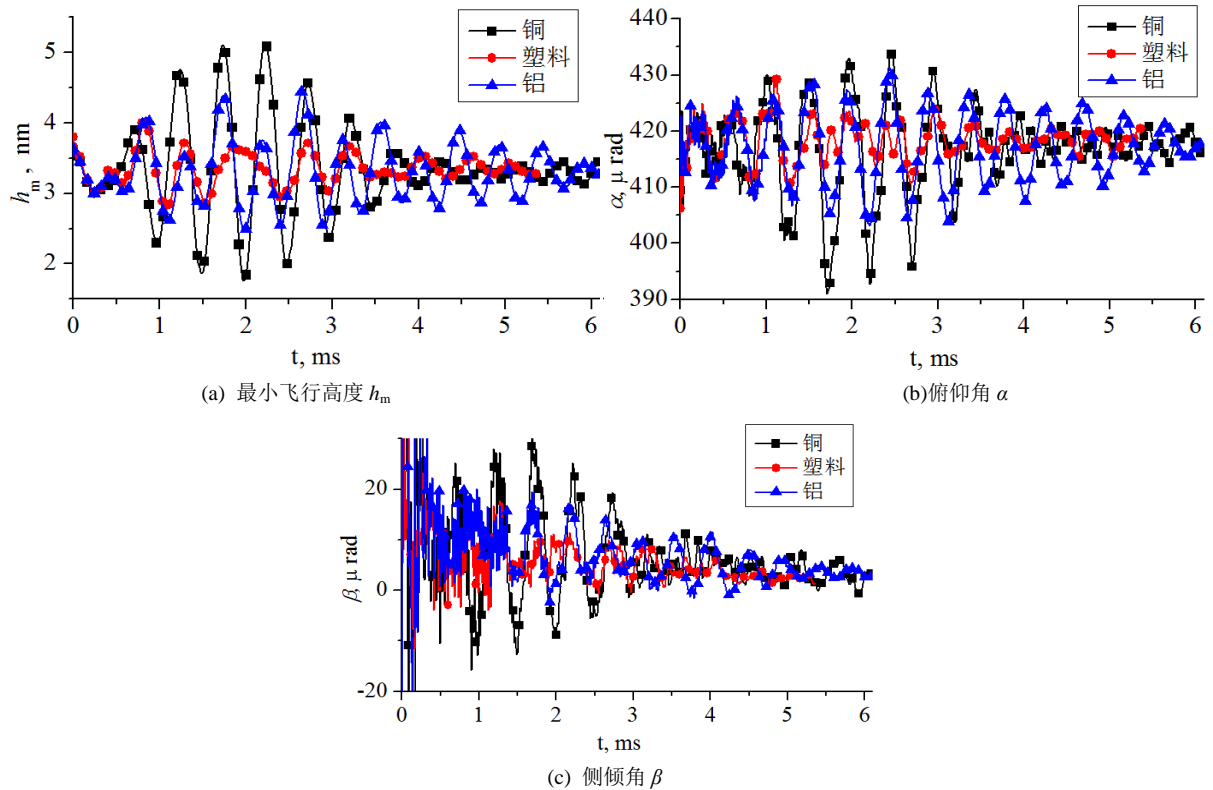
图 5 给出了悬臂材料分别为铜、铝和不锈钢时,硬盘外壳遭受同一外界冲击载荷情况下磁头滑块的飞行特性。从图 4 中可以看出,对于不同的悬臂材料,磁头滑块的最小飞行高度和俯仰角的振动幅度变

**Table 2.** Materials of HDD covers, suspensions and disks  
**表 2.** 计算中硬盘外壳、悬臂和磁盘的材料

名称	材料	弹性模量GPa	泊松比	密度(kg/mm <sup>3</sup> )
外壳	ABS塑料	2.1	0.394	$1.1 \times 10^{-6}$
	铝	73.1	0.33	$2.7 \times 10^{-6}$
	铜	88	0.29	$8.1 \times 10^{-6}$
	不锈钢	200	0.28	$7.6 \times 10^{-6}$
悬臂	铝	73.1	0.33	$2.7 \times 10^{-6}$
	铜	88	0.29	$8.1 \times 10^{-6}$
磁盘	玻璃	55	0.25	$2.5 \times 10^{-6}$
	铝合金	70	0.33	$2.8 \times 10^{-6}$



**Figure 3.** Positions of the impact load acting to HDD cover  
**图 3.** 作用到硬盘外壳上冲击载荷的位置



**Figure 4.** Cover materials effects on flying characteristics of the slider  
**图 4.** 外壳材料对磁头滑块飞行特性的影响

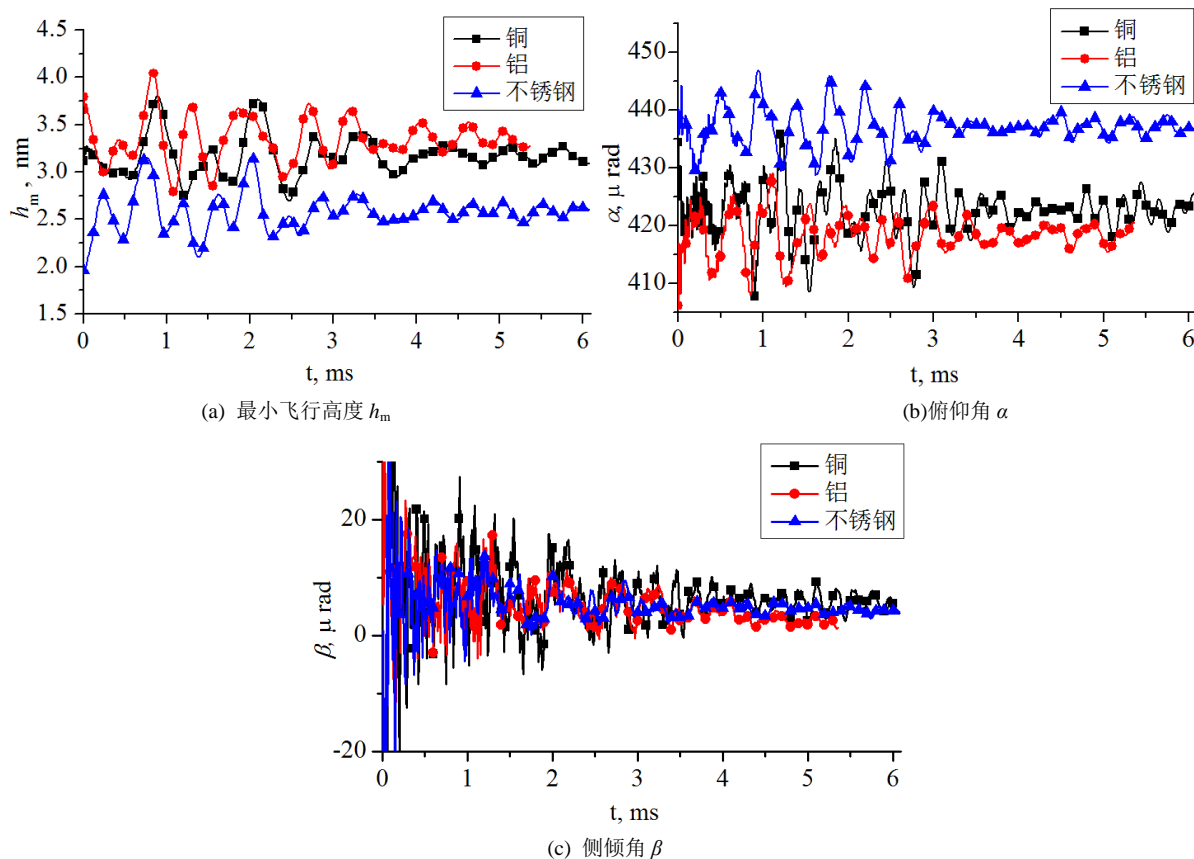


Figure 5. Suspension materials effects on flying characteristics of the slider

图 5. 悬臂材料对磁头滑块飞行特性的影响

化不大，但是振动曲线在纵坐标上发生了平移：① 对于最小飞行高度(图 5(a)所示)，从下往上的顺序分别为不锈钢、铜和铝对应的最小飞行高度曲线；② 对于俯仰角(图 5(b)所示)，从下往上的顺序分别为铝、铜和不锈钢的俯仰角曲线。当悬臂材料为铜时，磁头滑块侧倾角曲线振动幅度最大(如图 5(c)所示)。

图 6 给出了磁盘材料分别为玻璃、铝合金时，硬盘外壳遭受同一外界冲击载荷情况下磁头滑块的飞行特性。从图中可以看出，在 1.5 ms 之前，两种材料对应的磁头滑块最小飞行高度和俯仰角曲线几乎重合；1.5 ms 之后，铝合金材料对应的磁头滑块最小飞行高度振动幅度较大(图 6(a)所示)、两种材料对应的磁头滑块俯仰角振动幅度相差不大(图 6(b)所示)。对于侧倾角(图 6(c))，两种材料对应的磁头滑块侧倾角曲线振动幅度相当，但振动曲线发生了平移，从下往上顺序为铝合金和玻璃材料对应的侧倾角曲线。

## 5.2. 几何尺寸的影响

由于磁头滑块通过悬臂支撑，飞行在高速旋转的磁盘上方，影响磁头滑块飞行特性最直接的几何尺寸就是悬臂和磁盘的厚度。根据实验测量，磁盘厚度约为 1 mm，悬臂厚度约为 0.2 mm。本文选用磁盘厚度为 0.5 mm、1 mm 和 1.5 mm，悬臂厚度为 0.1 mm、0.2 mm 和 0.4 mm。图 7 和图 8 分别给出了不同磁盘厚度和悬臂厚度时，硬盘外壳遭受同一外界冲击载荷情况下磁头滑块最小飞行高度、俯仰角和侧倾角随时间的变化情况。从图 7(a)可以看出，在 1.2 ms 之前，对于不同的磁盘厚度，磁头滑块的最小飞行高度曲线几乎重合；1.2 ms 之后，磁盘厚度越小，振动幅度越大，但是相差不大，在约 3.5 ms 之后，三条曲线振动幅度趋于相同。从图 7(b)~(c)可以看出，磁盘厚度对磁头滑块俯仰角和侧倾角的影响不大，曲线振动幅度整体相当。

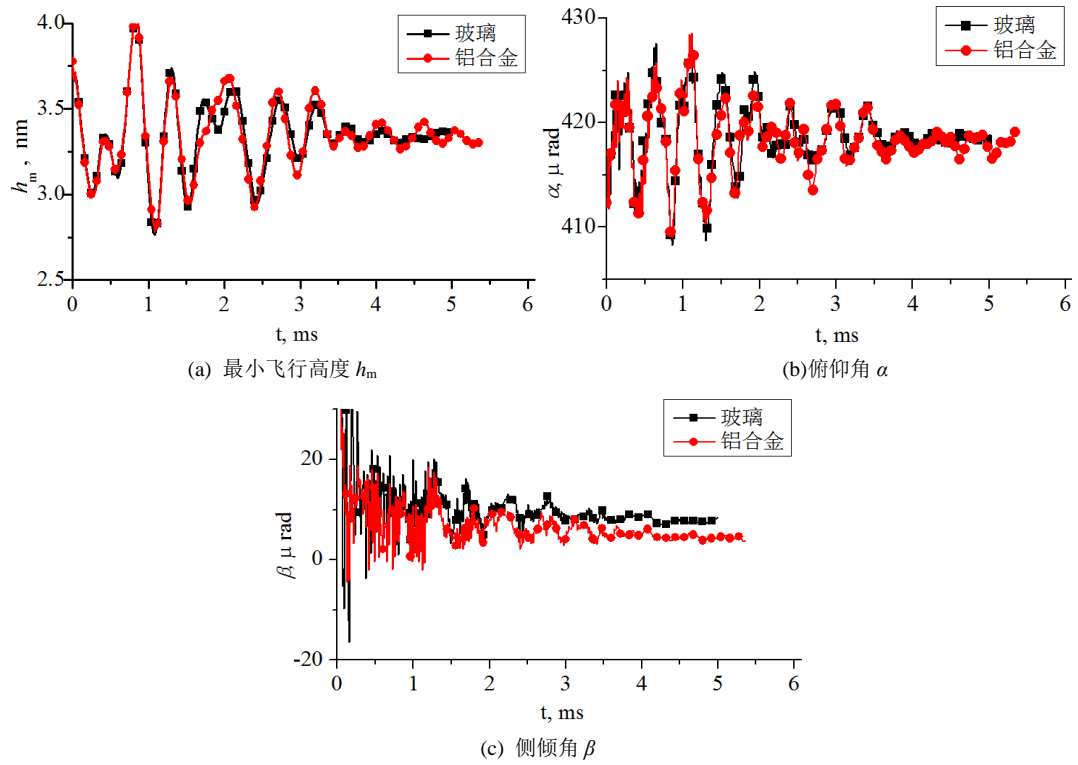


Figure 6. Disk materials effects on flying characteristics of the slider

图 6. 磁盘材料对磁头滑块飞行特性的影响

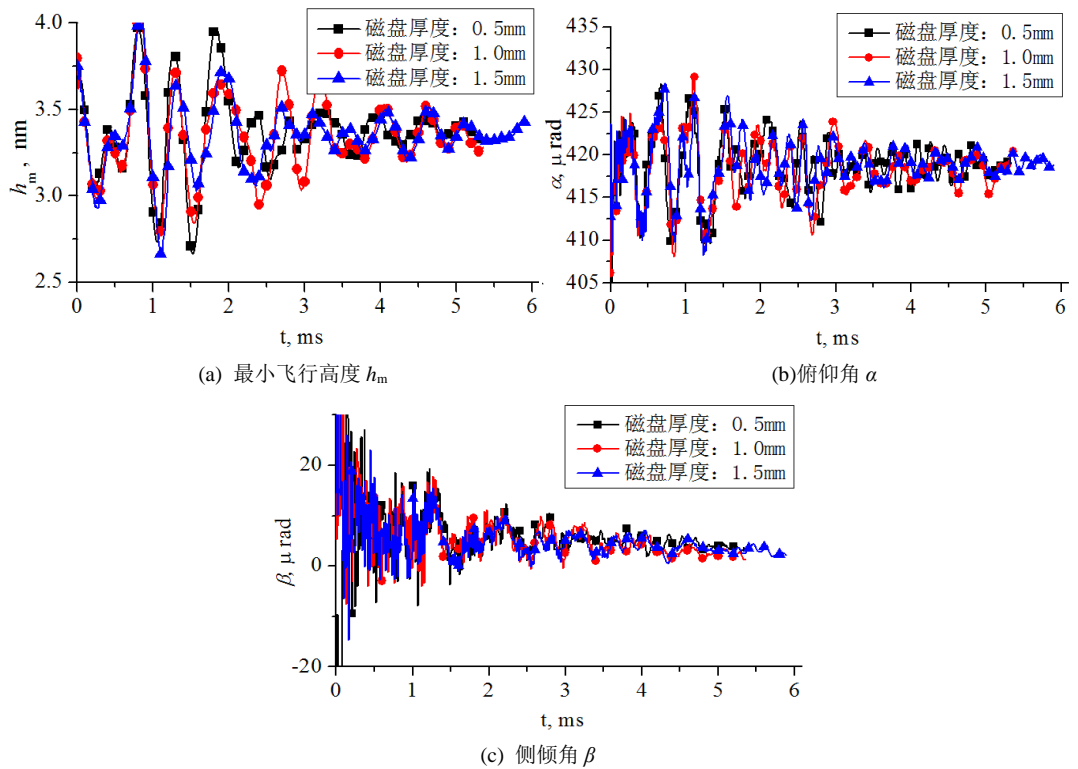
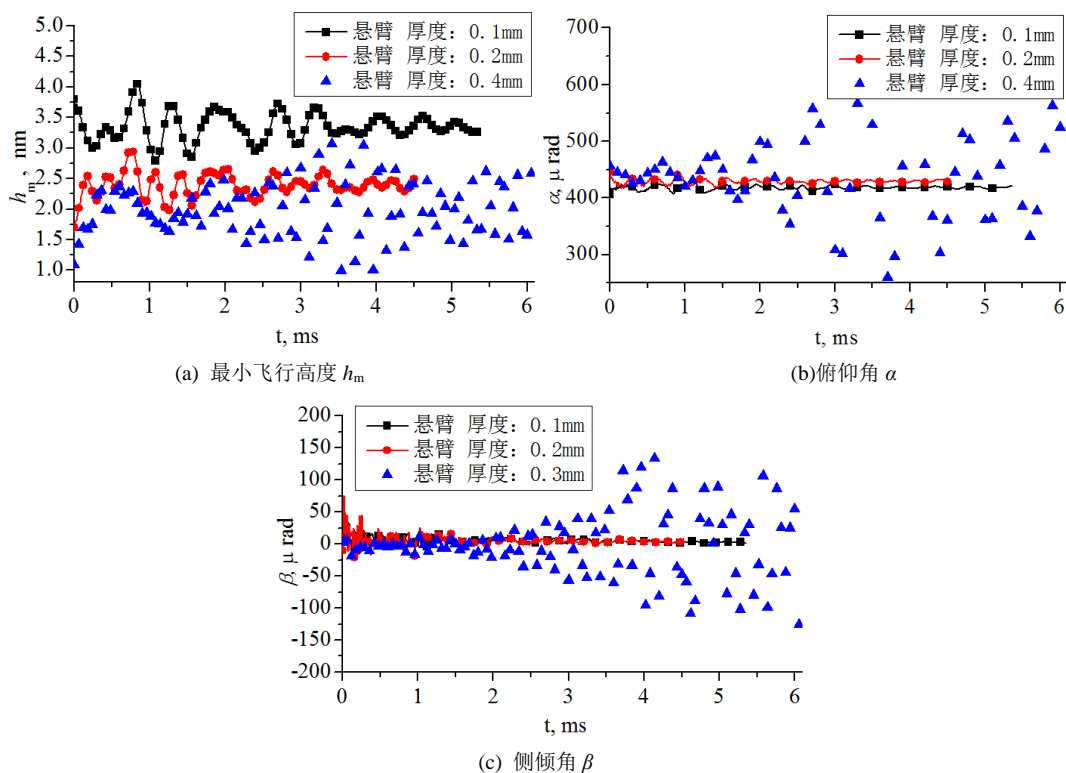


Figure 7. Disk thicknesses effects on flying characteristics of the slider

图 7. 磁盘厚度对磁头滑块飞行特性的影响





**Figure 8.** Suspension thicknesses effects on flying characteristics of the slider  
**图 8.** 悬臂厚度对磁头滑块飞行特性的影响

从图 8 可以看出，当悬臂厚度为 0.1 mm 和 0.2 mm 时，磁头滑块最小飞行高度、俯仰角和侧倾角的变化幅度不大；当悬臂厚度为 0.4 mm 时，磁头滑块最小飞行高度、俯仰角和侧倾角均出现了大范围的变化。厚度较大时(图 8 中 0.4 mm 情况)，悬臂柔性降低，从外壳传递过来的振动，更容易传导到磁头滑块上，从而导致了最小飞行高度、俯仰角和侧倾角均出现了大范围的振动。

## 6. 结论

本文研究充气硬盘在遭受外界冲击载荷时硬盘外壳材料、悬臂材料、磁盘材料、悬臂厚度、磁盘厚度对磁头滑块飞行特性的影响，即磁头滑块最小飞行高度、俯仰角和侧倾角随时间变化情况，得出以下结论：

- 1) 硬盘外壳材料为 ABS 塑料时，磁头滑块飞行特性参数的变化幅度最小；
- 2) 对于不同的悬臂材料，磁头滑块的最小飞行高度和俯仰角的振动幅度变化不大，但是振动曲线在纵坐标上发生了平移。当悬臂材料为铜时，磁头滑块侧倾角曲线振动幅度最大；
- 3) 当磁盘材料为玻璃和铝合金时，磁头滑块最小飞行高度和俯仰角曲线在 1.5 ms 之前几乎完全重合，1.5 ms 之后，铝合金材料对应的磁头滑块最小飞行高度振动幅度较大、两种材料对应的磁头滑块俯仰角振动幅度相差不大；
- 4) 在 1.2 ms 之前，对于不同的磁盘厚度，磁头滑块的最小飞行高度曲线几乎重合；1.2 ms 之后，磁盘厚度越小，振动幅度越大，但是相差不大，在约 3.5 ms 之后，三条曲线振动幅度趋于相同。磁盘厚度对磁头滑块俯仰角和侧倾角的影响不大；
- 5) 悬臂厚度对磁头滑块飞行特性参数影响较大，当悬臂厚度为 0.4 mm 时，磁头滑块最小飞行高度、俯仰角和侧倾角均出现了大范围的振动。

## 基金项目

国家自然科学基金(51505262)资助、中国博士后科学基金(2016M592225)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] Marchon, B., Pitchford, T., Hsia, Y.T. and Gangopadhyay, S. (2013) The Head-Disk Interface Roadmap to an Areal Density of Tbit/in<sup>2</sup>. *Advances in Tribology*, **2013**, Article ID: 521086.
- [2] 杨书仪, 刘德顺, 赵继云. 基于 LS-DYNA 的移动硬盘跌落冲击耐碰撞性能分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31: 13-17.
- [3] Shi, B.J., Shu, D.W., Gu, B. and Lu, G.X. (2008) Static and Dynamic Analysis of Bearing Slider for Small form Factor Drives. *International Journal of Modern Physics B*, **22**, 1391-1396.
- [4] Feliss, B., Murthy, A.N. and Talke, F.E. (2007) Microdrive Operational and Non-Operational Shock and Vibration Testing. *Microsystem Technologies*, **13**, 1015-1021. <https://doi.org/10.1007/s00542-006-0308-7>
- [5] 魏浩东, 敖宏瑞, 姜洪源. 硬盘加载/卸载过程磁头悬臂接触面的动力学仿真[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 78-81.
- [6] 魏浩东, 敖宏瑞, 姜洪源, 皮亚东. 微型硬盘驱动器工作状态下的冲击特性仿真[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 88-92.
- [7] Bhargava, P. and Bogy, D.B. (2007) Numerical Simulation of Operational-Shock in Small form Factor Hard Disk Drives. *Journal of Tribology*, **129**, 153-160. <https://doi.org/10.1115/1.2345403>
- [8] Aruga, K., Suwa, M., Shimizu, K. and Watanabe, T. (2007) A Study on Positioning Error Caused by Flow Induced Vibration Using Helium-Filled Hard Disk Drives. *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, 3750-3755. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.902983>
- [9] Zhou, W., Liu, B., Yu, S., Hua, W. and Gonzaga, L. (2010) Effects of Gas Physical Properties on Flying Performance of Air Bearing Slider. *IEEE Transactions on Magnetics*, **46**, 1389-1392. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2039854>
- [10] Kil, S.W., Humphrey, J.A.C. and Haj-Hariri, H. (2012) Numerical Study of the Flow-Structure Interactions in an Air-or Helium-Filled Simulated Hard Disk Drive. *Microsystem Technologies*, **18**, 57-75. <https://doi.org/10.1007/s00542-011-1375-y>
- [11] Fukui, S. and Kaneko, R. (1988) Analysis of Flying Characteristics of Magnetic Heads With Ultra-Thin Spacing Based on the Boltzmann Equation. *IEEE Transactions on Magnetics*, **24**, 2751-2753. <https://doi.org/10.1109/20.92234>
- [12] Fukui, S. and Kaneko, R. (1990) A Database for Interpolation of Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems. *Journal of Tribology*, **112**, 78-83. <https://doi.org/10.1115/1.2920234>
- [13] Shi, B.J. and Yang, T.Y. (2010) Simplified Model of Reynolds Equation with Linearized Flow Rate for Ultra-Thin Gas Film Lubrication in Hard Disk Drives. *Microsystem Technologies*, **16**, 1727-1734. <https://doi.org/10.1007/s00542-010-1107-8>
- [14] 杨廷毅, 史宝军, 葛培琪, 白雪. 考虑磁头表面高度不连续性气膜润滑的数值模拟与有效算法[J]. 计算力学学报, 2013, 30(3): 376-380.
- [15] Yang, T.Y., Shi, B.J., Ge, P.Q. and Bai, X. (2012) Adaptive Grid Generation Technique of Sub-5nm Flying Height Air Bearing Slider with Clearance Discontinuities. *Microsystem Technologies*, **18**, 2017-2026. <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1536-7>
- [16] Shu, D.W., Shi, B.J., Meng, H., Yap, F.F., Jiang, D.Z., Ng, Q., Zambri, R., Lau, J.H.T. and Cheng, C.S. (2007) Shock Analysis of a Head Actuator Assembly Subjected to Half-Sine Acceleration Pulses. *International Journal of Impact Engineering*, **34**, 253-263.
- [17] Shi, B.J., Wang, S., Shu, D.W., Luo, J., Meng, H., Ng, Q.Y. and Zambri, R. (2006) Excitation Pulse Shape Effects in Drop Test Simulation of the Actuator Arm of a Hard Disk Drive. *Microsystem Technologies*, **12**, 299-305. <https://doi.org/10.1007/s00542-005-0063-1>
- [18] Zeng, Q.H. and Bogy, D.B. (2002) Numerical Simulation of Shock Response of Disk-Suspension-Slider Air Bearing Systems in Hard Disk Drives. *Microsystem Technologies*, **8**, 289-296. <https://doi.org/10.1007/s00542-002-0186-6>