

摄动法研究硬盘磁头滑块动态飞行特性

杨廷毅, 白雪

(山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049)

摘 要: 硬盘工作时, 磁头滑块飞行在磁盘上方, 其动态飞行特性对硬盘工作性能有重要影响。该文利用摄动法推导了磁头滑块的气膜刚度和阻尼摄动方程, 且通过有限体积法进行求解, 获得了初始摄动条件下的气膜刚度和阻尼矩阵。结合磁头滑块动力学方程, 研究了扰动速度、扰动俯仰角和扰动侧倾角对磁头滑块动态飞行特性的影响。研究表明: ① 扰动速度会导致磁头滑块向磁盘表面作竖直方向的移动, 增加了与磁盘接触碰撞的风险; ② 扰动俯仰角或侧倾角的增加都会导致磁头滑块振动幅度的增加, 但扰动俯仰角更容易引起磁头滑块的振动。

关键词: 磁头滑块; 硬盘; 摄动法; 飞行特性; 气膜润滑方程

中图分类号: TH123 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.08.0665

STUDY ON DYNAMICAL FLYING CHARACTERISTICS OF SLIDER IN HARD DISK DRIVES BY PERTURBATION METHOD

YANG Ting-yi, BAI Xue

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In an operational hard disk drive (HDD), a slider is flying over a rotational disk and the dynamical flying characteristics of the slider have important effects on the performance of the HDD. By using the perturbation method, the perturbation equations for the gas film stiffness and gas film damping of the slider are derived, and the perturbation equations are numerically solved by the finite volume method (FVM). The gas film stiffness matrix and gas film damping matrix are obtained with an initial perturbation condition. Based on the dynamical equation of the slider, the effects of disturbance velocities, disturbance pitch angles and disturbance roll angles on the dynamical flying characteristics of the slider, are studied. The study results show that the perturbation velocities can cause the slider to move toward the disk, which increases the collision risk of the slider with the disk. The increases of disturbance pitch angles and disturbance roll angles will increase the vibration amplitudes of the flying parameters for the slider, and the disturbance angles are more likely to cause the vibration of the slider.

Key words: slider; hard disk drive; perturbation method; flying characteristic; gas film lubrication equation

硬盘受到外界振动冲击、磁盘表面的不平整以及磁盘表面存在污染颗粒, 都会导致飞行在高速旋转磁盘上方的磁头滑块的振动, 这样的振动会影响硬盘的工作性能, 严重时会导致磁头滑块与磁盘碰撞, 从而损坏硬盘。因此, 国内外的学者对这一问

题进行了大量研究。通过设计一个轴向振动测试装置和高速摄像机, Allen 和 Bogy^[1]研究了振动对硬盘基座、悬臂和磁头滑块的影响, 并建立了相应的有限元分析模型。通过建立硬盘有限元模型和线性振动测试仪, Murthy 等^[2]研究了硬盘非工作状态和

收稿日期: 2017-08-30; 修改日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505262)

通讯作者: 杨廷毅(1980—), 男, 贵州人, 讲师, 博士, 硕导, 从事纳米间隙气膜润滑理论、计算方法研究(E-mail: tingyiyang@126.com).

作者简介: 白雪(1982—), 女, 山东人, 讲师, 博士, 从事纳米间隙润滑、数值计算方法、先进制造技术理论和工艺研究(E-mail: xuebai2014@sdu.edu.cn).

工作状态下磁头/磁盘界面的振动特性,并把实验研究结果和有限元模型计算结果进行了比较。Jang 和 Seo^[3]建立了一个包括磁头滑块、悬臂、电极、音圈电极、基座、主轴电机的硬盘有限元模型,研究了磁头滑块、磁盘和悬臂的振动,并通过实验进行了测量和验证。通过用多体动力学方法, Liu 等^[4]研究了硬盘遭受外界冲击振动时磁头滑块最小飞行高度随时间的变化情况。shi 等^[5]建立了两个非线性的磁头滑块气膜润滑模型,并通过修正的 Newmark 方法求解非线性动力学方程,研究了硬盘磁头滑块超低飞高动力特性。通过 Ansys 软件和建立 Seagate 公司硬盘有限元模型, Luo 等^[6]研究了冲击脉冲宽度对磁头/磁盘界面冲击响应的影响。

为了提高硬盘的磁记录密度,人们正在考虑利用离散磁道的磁盘(Discrete Track Media, DTM)或者比特图案化磁盘(Bit-Patterned Media, BPM)取代传统的光滑磁盘,这就使得原本光滑的磁盘变得不平整^[7-10]。Hanchi 等^[11]通过激光多普勒振动仪对两种不同磁头滑块飞行在 DTM 磁盘表面的振动进行了测量,指出 DTM 磁盘降低了磁头滑块的飞行稳定性。Li 和 Bogy^[12]研究了 BPM 磁盘比特图案面积和高度对磁头滑块振动频率的影响,并指出气膜刚度随着比特图案高度增加而减小。Dai 等^[13-14]通过直接模拟蒙特卡洛法模拟了飞行在 BPM 磁盘上方的磁头滑块的气膜力,结果显示:气膜力随着 BMP 沟槽深的增加而减小。Fukui 等^[15]通过分子气膜润滑方程和范德华方程研究了飞行在 DTM 磁盘和 BPM 磁盘上方的磁头滑块静态和动态飞行特性,研究结果显示沟槽对磁头滑块飞行特性产生重要影响。另外,污染颗粒也可能进入硬盘内部,吸附到磁盘表面或磁头滑块表面。Cui 等^[16]通过考虑滑移边界条件的修正 Reynolds 方程和 4 阶 Runge-Kutta 法,研究了污染颗粒在磁头/磁盘界面的运动规律。姚华平^[17]研究了磁头滑块飞越障碍物时最小飞行高度、俯仰角随时间的变化规律,指出障碍物尺寸越大,磁头滑块的波动范围就越大。此外,磁盘表面粗糙度也会对磁头滑块的飞行特性产生影响^[18-19]。Song 等^[20]利用横向塞曼激光器作为外差光源,并结合高速相位测量技术测量了磁头滑块的飞行高度,其精度可以达到 0.1 nm。王希超^[21]研究了硬盘在纳米飞行高度时磁头滑块表面的压力分布,提出了考虑气体稀薄效应和范德华力作用的气膜动力学特性分析方法。

综上所述,磁头滑块动态飞行特性会受到硬盘外界冲击振动、磁盘表面平整度、障碍物等影响,研究这些因素对磁头滑块动态飞行特性的影响,对硬盘工作稳定性有重要意义。通过给磁头滑块设置扰动速度、扰动俯仰角和扰动侧倾角,本文对磁头滑块的动态飞行特性展开研究。

1 气膜摄动方程推导及其数值求解

1.1 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,在考虑气体稀薄效应情况下,磁头滑块与磁盘之间的气膜润滑方程为^[22-23]:

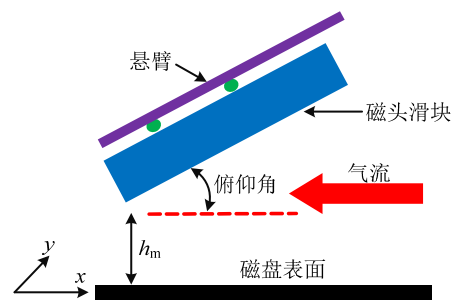


图 1 磁头滑块/磁盘界面

Fig.1 Interface of the slider and the disk in a hard disk drive

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial X} \left(Q \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda_x PH \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(Q \frac{\partial P}{\partial Y} - \Lambda_y PH \right) = \\ \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} \\ Q = C_1 PH^3 + C_2 H^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $P = p / p_a$ 为无量纲压力, p_a / Pa 为周围环境压力。 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_m / m 为磁头滑块尾部与磁盘之间的最小距离。 $\Lambda_x = 6\mu U l / p_a h_m^2$ 为气膜数, $\mu / (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)$ 为气体的运动粘度, U / m 为磁盘转速在 X 方向的分量, l / m 为磁头滑块长度; $Q = Q_p(D, \alpha) / Q_{\text{con}}(D)$ 为流量因子, 其中 Q_p 和 $Q_{\text{con}} = D / 6$ 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)。对于不同修正 Reynolds 方程的模型, Q_p 的表达式不一样, 本文选取具有表达式简单、计算效率高特点的线性流率模型^[22], 其表达式为:

$$Q_p = a + bD \quad (2)$$

式中, a 和 b 为常数, 其值根据表 1 选取。

表 1 常系数 a 和 b
Table 1 Constant coefficients a and b in Eqn.(2)

D	a	b
$0.01 \leq D < 0.031$	-26.6588	3.2739
$0.031 \leq D < 0.076$	-7.6631	2.6975
$0.076 \leq D < 0.165$	-3.2197	2.3675
$0.165 \leq D < 0.368$	-1.0449	2.0252
$0.368 \leq D < 0.687$	-0.3097	1.7553
$0.687 \leq D < 1.306$	-0.0068	1.5474
$1.306 \leq D < 4.18$	0.1148	1.3777
$4.18 \leq D < 21.5$	0.1615	1.1599
$21.5 \leq D \leq 100$	0.1663	1.0578

1.2 气膜刚度摄动方程的推导

令气膜稳态状态下的膜厚和压力分别为 H_0 、 P_0 ，在外界的干扰下，扰动膜厚和压力分别为 H_p 、 P_p 。因此，总的膜厚和压力分别为：

$$\begin{cases} H = H_0 + \varepsilon H_p \\ P = P_0 + \varepsilon P_p \end{cases} \quad (3)$$

磁头滑块有 3 个自由度：平行于 Z 轴方向的上下运动，通过磁头滑块重心(X_0, Y_0)绕 Y 轴的转动和通过磁头滑块重心(X_0, Y_0)绕 X 轴的转动。气膜扰动厚度可以表示为 3 个方向扰动的线性组合：

$$H_p = Z_p + \alpha_p(X - X_0) + \beta_p(Y - Y_0) \quad (4)$$

把式(3)代入式(1)，得：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left(Q' \frac{\partial(P_0 + \varepsilon P_p)}{\partial X} - \Lambda_x(P_0 + \varepsilon P_p)(H_0 + \varepsilon H_p) \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial Y} \left(Q' \frac{\partial(P_0 + \varepsilon P_p)}{\partial Y} - \Lambda_y(P_0 + \varepsilon P_p)(H_0 + \varepsilon H_p) \right) = \\ & \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} \end{aligned} \quad (5)$$

其中：

$$\begin{aligned} Q' = & C_1 H_0^2 (P_0 + \varepsilon P_p)(H_0 + \varepsilon H_p) + \\ & C_2 H_0 (H_0 + \varepsilon H_p) \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)中没有考虑时间项的扰动，因为在稳态条件下，该项的扰动为 0。结合式(6)，对式(5)进行化解和整理，得到微量 ε 的 1 阶项：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left((C_1 P_0 H_0^3 + C_2 H_0^2) \frac{\partial P_p}{\partial X} + (C_1 P_p H_0^3 + C_1 P_0 H_0^2 H_p + \right. \\ & \left. C_2 H_0 H_p) \frac{\partial P_0}{\partial X} - \Lambda_x (P_0 H_p + P_p H_0) \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial Y} \left((C_1 P_0 H_0^3 + C_2 H_0^2) \frac{\partial P_p}{\partial Y} + (C_1 P_p H_0^3 + C_1 P_0 H_0^2 H_p + \right. \end{aligned}$$

$$\left. C_2 H_0 H_p) \frac{\partial P_0}{\partial Y} - \Lambda_y (P_0 H_p + P_p H_0) \right) = 0 \quad (7)$$

式中： P_0 、 H_0 分别为稳态下的压力与膜厚； H_p 为气膜扰动厚度，可以给定一个扰动参数，通过式(4)计算出来。因此，式(7)中只有一个未知参数 P_p ，即气膜扰动压力。对式(7)重新整理，得到一个关于 P_p 的二维偏微分方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left(A_0 \frac{\partial P_p}{\partial X} + B_{x0} P_p + C_{x0} H_p \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial Y} \left(A_0 \frac{\partial P_p}{\partial Y} + B_{y0} P_p + C_{y0} H_p \right) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中， A_0 、 B_{x0} 、 C_{x0} 、 B_{y0} 与 C_{y0} 稳态条件下的 P_0 和 H_0 有关，它们的表达式为：

$$A_0 = C_1 P_0 H_0^3 + C_2 H_0^2 \quad (9)$$

$$B_{x0} = C_1 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial X} - \Lambda_x H_0 \quad (10)$$

$$C_{x0} = (C_1 P_0 H_0^2 + C_2 H_0) \frac{\partial P_0}{\partial X} - \Lambda_x P_0 \quad (11)$$

$$B_{y0} = C_1 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial Y} - \Lambda_y H_0 \quad (12)$$

$$C_{y0} = (C_1 P_0 H_0^2 + C_2 H_0) \frac{\partial P_0}{\partial Y} - \Lambda_y P_0 \quad (13)$$

1.3 气膜阻尼摄动方程的推导

设气膜速度扰动 $\dot{H}$ 为：

$$\dot{H} = \varepsilon [\dot{Z}_p + \dot{\alpha}_p(X - X_0) + \dot{\beta}_p(Y - Y_0)] \quad (14)$$

式中： $\dot{Z}_p$ 为平行于 Z 轴方向的速度； $\dot{\alpha}_p$ 、 $\dot{\beta}_p$ 分别为角加速度。气膜的扰动为一瞬间，因此，气膜厚度没有发生变化，只引起气膜压力的变化，有：

$$\begin{cases} H = H_0 \\ P = P_0 + \varepsilon P_p \end{cases} \quad (15)$$

把式(14)和式(15)代入式(1)，得：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left(Q'' \frac{\partial(P_0 + \varepsilon P_p)}{\partial X} - \Lambda_x (P_0 + \varepsilon P_p) H_0 \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial Y} \left(Q'' \frac{\partial(P_0 + \varepsilon P_p)}{\partial Y} - \Lambda_y (P_0 + \varepsilon P_p) H_0 \right) = \\ & \sigma \frac{\partial(P_0 + \varepsilon P_p) H}{\partial T} \end{aligned} \quad (16)$$

其中：

$$Q'' = C_1 H_0^3 (P_0 + \varepsilon P_p) + C_2 H_0^2 \quad (17)$$

对式(16)进行化解和整理，得到微量 ε 的 1 阶项：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} \left[(C_1 P_0 H_0^3 + C_2 H_0^2) \frac{\partial P_p}{\partial X} + C_1 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial X} P_p - \right. \\ \left. \Lambda_x H_0 P_p \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(C_1 P_0 H_0^3 + C_2 H_0^2) \frac{\partial P_p}{\partial Y} + \right. \\ \left. C_1 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial Y} P_p - \Lambda_y H_0 P_p \right] = \sigma P_p u_p \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)重新整理, 得到一个关于 P_p 的二维偏微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(A_0 \frac{\partial P_p}{\partial X} + B_{x0} P_p \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(A_0 \frac{\partial P_p}{\partial Y} + B_{y0} P_p \right) = \sigma P_p u_p \quad (19)$$

其中, A_0 、 B_{x0} 和 B_{y0} 的表达式分别如式(9)、式(10)和式(12)所示。

1.4 气膜扰动方程的数值求解

式(8)和式(19)都为 2 阶偏微分方程, 需要通过数值方法进行求解, 本文采用有限体积法^[24-25]。为了方便, 气膜刚度扰动方程式(8)和气膜阻尼扰动式(19)可以统一写成如下形式:

$$\frac{\partial F_x}{\partial X} + \frac{\partial F_y}{\partial Y} = a_2 \sigma P_p u_p \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} F_x = A_0 \frac{\partial P_p}{\partial X} - B_{x0} P_p + a_1 C_{x0} H_p \\ F_y = A_0 \frac{\partial P_p}{\partial Y} - B_{y0} P_p + a_1 C_{y0} H_p \end{cases} \quad (21)$$

当 $a_1=1$ 、 $a_2=0$ 时, 式(20)就变成式(8); 当 $a_1=0$ 、 $a_2=1$ 时, 式(20)就变成式(19)。在图 2 所示的控制体积内, 对式(20)进行离散, 得:

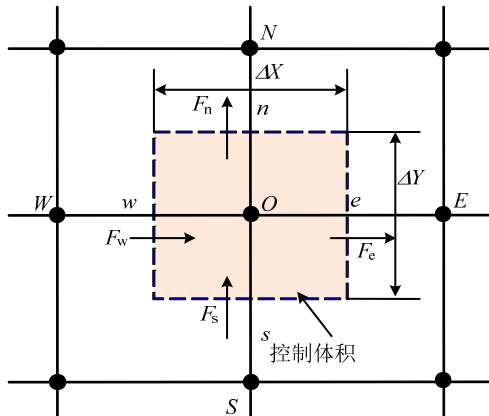


图 2 有限体积法

Fig.2 Illustration of the control volume

$$F_e - F_w + F_n - F_s = a_2 \sigma P_p u_p \Delta X \Delta Y \quad (22)$$

在控制体积边界 w 上, 有:

$$F_w = A_0^w \Delta Y \frac{P_p^O - P_p^W}{(\delta X)^w} + B_{x0}^w \Delta Y \frac{P_p^O + P_p^W}{2} + a_1 C_{x0}^w \Delta Y H_p^w \quad (23)$$

其中: P_p^O 、 P_p^W 分别表示在点 O 和点 W 处的扰动压力; H_p^w 表示在点 w 处的气膜扰动厚度; 而 A_0^w 、 B_{x0}^w 、 C_{x0}^w 表示在点 w 所对应的系数值。式(23)可以进一步写成:

$$F_w = \left(\frac{A_0^w \Delta Y}{(\delta X)^w} + \frac{B_{x0}^w \Delta Y}{2} \right) P_p^O - \left(\frac{A_0^w \Delta Y}{(\delta X)^w} - \frac{B_{x0}^w \Delta Y}{2} \right) P_p^W + a_1 C_{x0}^w \Delta Y H_p^w \quad (24)$$

同理, 在控制体积边界 e 、 s 和 n 上, 可以得出:

$$\begin{cases} F_e = \left(-\frac{A_0^e \Delta Y}{(\delta X)^e} + \frac{B_{x0}^e \Delta Y}{2} \right) P_p^O + \left(\frac{A_0^e \Delta Y}{(\delta X)^e} + \frac{B_{x0}^e \Delta Y}{2} \right) P_p^E + a_1 C_{x0}^e \Delta Y H_p^e \\ F_s = \left(\frac{A_0^s \Delta X}{(\delta Y)^s} + \frac{B_{y0}^s \Delta X}{2} \right) P_p^O - \left(\frac{A_0^s \Delta X}{(\delta Y)^s} - \frac{B_{y0}^s \Delta X}{2} \right) P_p^S + a_1 C_{y0}^s \Delta X H_p^s \\ F_n = \left(-\frac{A_0^n \Delta X}{(\delta Y)^n} + \frac{B_{y0}^n \Delta X}{2} \right) P_p^O + \left(\frac{A_0^n \Delta X}{(\delta Y)^n} + \frac{B_{y0}^n \Delta X}{2} \right) P_p^N + a_1 C_{y0}^n \Delta X H_p^n \end{cases} \quad (25)$$

把式(24)和式(25)代入式(22), 整理后, 可得:

$$a^O P_p^O = a^E P_p^E + a^W P_p^W + a^N P_p^N + a^S P_p^S + b \quad (26)$$

其中:

$$a^E = \frac{A_0^e \Delta Y}{(\delta X)^e} \max(0, 1 - 0.5 \text{abs}(P_e)) + \max(B_{x0}^e \Delta Y, 0) \quad (27)$$

$$a^W = \frac{A_0^w \Delta Y}{(\delta X)^w} \max(0, 1 - 0.5 \text{abs}(P_w)) + \max(-B_{x0}^w \Delta Y, 0) \quad (28)$$

$$a^N = \frac{A_0^n \Delta X}{(\delta Y)^n} \max(0, 1 - 0.5 \text{abs}(P_n)) + \max(B_{y0}^n \Delta X, 0) \quad (29)$$

$$a^S = \frac{A_0^s \Delta X}{(\delta Y)^s} \max(0, 1 - 0.5 \text{abs}(P_s)) +$$

$$\max(-B_{y0}^s \Delta X, 0) \quad (30)$$

$$a^0 = a^E + a^W + a^N + a^S + \max(0, -B_{x0}^e \Delta Y + B_{x0}^w \Delta Y - B_{y0}^n \Delta X + B_{y0}^s \Delta X) \quad (31)$$

$$b = \max(0, B_{x0}^e \Delta Y - B_{x0}^w \Delta Y + B_{y0}^n \Delta X - B_{y0}^s \Delta X) P_p^0 + a_2 (C_{x0}^e \Delta Y H_p^e - C_{x0}^w \Delta Y H_p^w + C_{y0}^n \Delta X H_p^n - C_{y0}^s \Delta X H_p^s) \quad (32)$$

$$\begin{cases} P_w = B_{x0}^w / (A_0^w / (\delta X)^w) \\ P_e = B_{x0}^e / (A_0^e / (\delta X)^e) \\ P_s = B_{y0}^s / (A_0^s / (\delta Y)^s) \\ P_n = B_{y0}^n / (A_0^n / (\delta Y)^n) \end{cases} \quad (33)$$

在以上各式中, $\text{abs}()$ 表示求绝对值, $\max()$ 表示求最大值。式(26)中, 系数 a^0 、 a^E 、 a^W 、 a^N 、 a^S 和 b 是压力 P_p 的函数, 离散方程式(26)是非线性的, 本文通过 Gauss-Seidel 进行求解。在计算过程中, 式(4)中初始扰动项 $Z_p = 0.5 \text{ nm}$, $\alpha_p = 10 \times 10^{-6} \text{ rad}$, $\beta_p = 5 \times 10^{-6} \text{ rad}$; 式(14)中, 初始扰动项 $\dot{Z}_p = 5 \text{ mm/s}$, $\dot{\alpha}_p = 10 \text{ rad/s}$, $\dot{\beta}_p = 10 \text{ rad/s}$ 。磁头滑块表面几何形状如图(1)所示, 具体几何参数和飞行参数参考文献[21]。经过计算, 得到该磁头滑块的刚度矩阵和阻尼矩阵分别为式(34)和式(35):

$$\mathbf{K}_{\text{ABS}} = \begin{bmatrix} 5.9 \times 10^6 & -4.6 \times 10^2 & 7.0 \times 10^1 \\ -4.6 \times 10^2 & 1.3 \times 10^{-1} & 2.0 \times 10^{-2} \\ 7.0 \times 10^1 & 2.0 \times 10^{-2} & 1.9 \times 10^{-1} \end{bmatrix} \quad (\text{N, m, rad}) \quad (34)$$

$$\mathbf{C}_{\text{ABS}} = \begin{bmatrix} 4.1 \times 10^{-3} & 5.5 \times 10^{-8} & 2.9 \times 10^{-8} \\ 5.5 \times 10^{-8} & 6.8 \times 10^{-8} & 4.4 \times 10^{-8} \\ 2.9 \times 10^{-8} & 4.4 \times 10^{-8} & 4.7 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (\text{N, m, rad, s}) \quad (35)$$

2 磁头滑块动力学方程

硬盘工作时, 磁头滑块飞行过程中有 3 个自由度, 分别为上下方向的运动(H)、左右方向翻转运动(α)和前后方向的翻转运动(β), 如图 3 所示。磁头滑块飞行过程中, 受到悬臂的支撑力和磁头滑块与磁盘之间气膜力, 并在这两个力的共同作用下达到动态平衡。为了简化计算过程, 悬臂对磁头滑块的支撑力等效成作用到磁头滑块上的刚度($\mathbf{K}_s$)和阻尼($\mathbf{C}_s$)所产生的力。同样, 通过前面的摄动理论, 作用到磁头滑块上的气膜力, 也可以等效为气膜刚度

($\mathbf{K}_{\text{ABS}}$)和阻尼($\mathbf{C}_{\text{ABS}}$)刚度所产生的力。因此, 磁头滑块动力学方程的矩阵形式为:

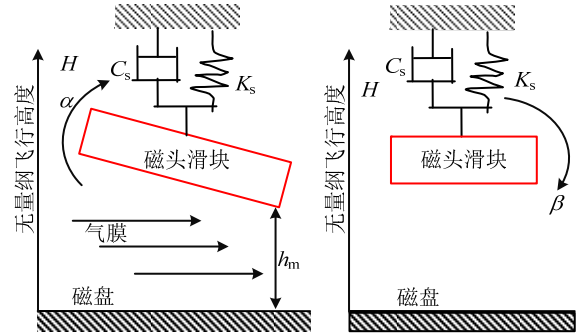


图 3 磁头滑块三自由度模型

Fig.3 The 3 DOF model of the slider

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (36)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为广义质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为广义阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为广义刚度矩阵; $\mathbf{x}$ 为广义位移向量; $\mathbf{f}$ 为外界载荷相量。其中, $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\text{ABS}} - \mathbf{K}_s$, $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{\text{ABS}} - \mathbf{C}_s$, $\mathbf{K}_{\text{ABS}}$ 和 $\mathbf{C}_{\text{ABS}}$ 的表达式如式(34)和式(35)所示, 通过摄动方法求解获得。对于矩阵 $\mathbf{K}_s$ 、 $\mathbf{C}_s$ 和 $\mathbf{M}$, 请参考文献[17]。 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{f}$ 的一般表达式为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & & \\ & m_{22} & \\ & & m_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}.$$

设时间步长为 Δt , 用差分法在时域内离散方程式(36), 有:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(n) = [\mathbf{x}(n) - \mathbf{x}(n-1)] / \Delta t \\ \ddot{\mathbf{x}}(n) = [\mathbf{x}(n) - 2\mathbf{x}(n-1) + \mathbf{x}(n-2)] / \Delta t^2 \end{cases} \quad (37)$$

把式(37)代入式(36), 化简得:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ x_3(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \end{bmatrix} \quad (38)$$

给出平衡时的初始值 $\mathbf{x}_0$ 和扰动值 $\mathbf{x}_1$, 就可以对式(38)进行求解了。在计算过程中, x_1 、 x_2 和 x_3 分别表示磁头滑块飞行参数 H 、 α 和 β 。

n 表示迭代次数。其中:

$$a_{11} = \frac{m_{11}}{\Delta t^2} + \frac{c_{11}}{\Delta t} + k_{11}, \quad a_{12} = \frac{c_{12}}{\Delta t} + k_{12},$$

$$a_{13} = \frac{c_{13}}{\Delta t} + k_{13}, \quad a_{21} = \frac{c_{21}}{\Delta t} + k_{21},$$

$$\begin{aligned}
a_{22} &= \frac{m_{22}}{\Delta t^2} + \frac{c_{22}}{\Delta t} + k_{22}, \quad a_{23} = \frac{c_{23}}{\Delta t} + k_{23}, \\
a_{31} &= \frac{c_{31}}{\Delta t} + k_{31}, \quad a_{32} = \frac{c_{32}}{\Delta t} + k_{32}, \\
a_{33} &= \frac{m_{33}}{\Delta t^2} + \frac{c_{33}}{\Delta t} + k_{33}, \\
f'_1 &= f_1 + \left(\frac{2m_{11}}{\Delta t^2} + \frac{c_{11}}{\Delta t} \right) x_1(n-1) + \frac{c_{12}}{\Delta t} x_2(n-1) + \\
&\quad \frac{c_{13}}{\Delta t} x_3(n-1) - \frac{m_{11}}{\Delta t^2} x_1(n-2), \\
f'_2 &= f_2 + \frac{c_{21}}{\Delta t} x_1(n-1) + \left(\frac{2m_{22}}{\Delta t^2} + \frac{c_{22}}{\Delta t} \right) x_2(n-1) + \\
&\quad \frac{c_{23}}{\Delta t} x_3(n-1) - \frac{m_{22}}{\Delta t^2} x_2(n-2), \\
f'_3 &= f_3 + \frac{c_{31}}{\Delta t} x_1(n-1) + \frac{c_{32}}{\Delta t} x_2(n-1) + \\
&\quad \left(\frac{2m_{33}}{\Delta t^2} + \frac{c_{33}}{\Delta t} \right) x_3(n-1) - \frac{m_{33}}{\Delta t^2} x_3(n-2).
\end{aligned}$$

3 结果与讨论

3.1 计算结果有效性验证

计算结果是否正确,需要进行验证,本文采取具体思路为:作用到磁头滑块表面的气膜压力直接通过求解方程式(1)获得,结合磁头滑块动力学方程,就可以研究磁头滑块受到扰动情况下的动态飞行特性^[17]。该方法优点是磁头滑块与磁盘之间的承载力直接通过求解气膜润滑方程获得,计算准确。

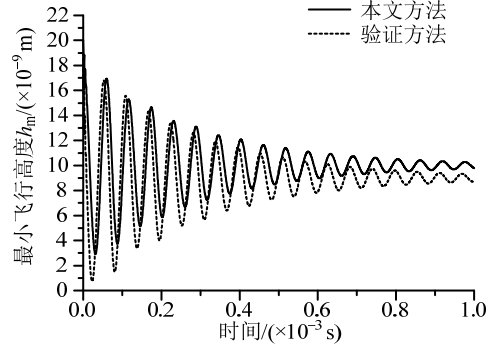
图 4 给出了在初始扰动条件($\dot{Z}_p = 5 \text{ mm/s}$, $\alpha_p = 10 \times 10^{-6} \text{ rad}$, $\beta_p = 10 \times 10^{-6} \text{ rad}$)下,通过本文方法和验证方法,所获得的磁头滑块飞行参数随时间变化关系曲线。其中,飞行高度为磁头滑块尾部的最小飞行高度 h_m , 单位为 m; 俯仰角 α 和侧倾角 β 单位均为 rad。横轴坐标为时间,单位为 s。从图 4 可以看出,通过两种方法所获得的飞行参数曲线,在整个计算时间内,能够较好地吻合。

表 2 给出了另外 3 种初始扰动(即算例 1、算例 2 和算例 3)情况下,两种计算方法对应的飞行参数最大相对误差,最大相对误差的计算表达式为:

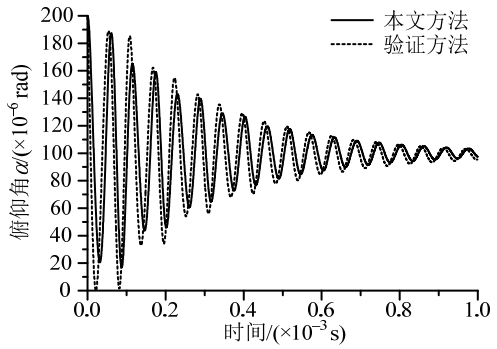
$$\max \left[\frac{x_i^1(t) - x_i^2(t)}{x_i^1(t)} \cdot 100 \right] \quad (39)$$

其中, $i=1,2,3$, 对应 h_m 、 α 和 β ; 上标 1 和 2, 对应的是验证方法和本文方法得到的飞行参数。

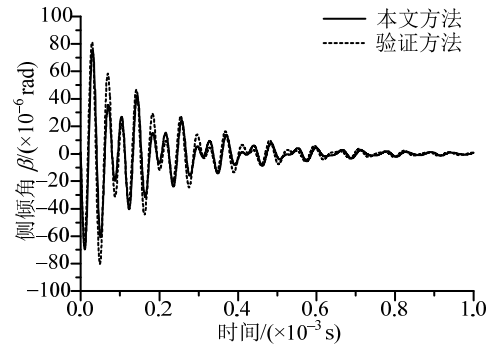
从表 2 可以发现,最小飞行高度的最大相对误差较大,分别为 4.5%、3.6%和 4.2%,而侧倾角和



(a) 最小飞行高度 h_m



(b) 俯仰角 α



(c) 侧倾角 β

图 4 两种方法磁头滑块动态飞行特性曲线的比较

Fig.4 Comparisons of the dynamical flying characteristics of the slider for the two methods

俯仰角的最大相对误差较小,处于 2%~4%之间。同时,表 2 也给出了两种方法在计算每个算例过程中所消耗的时间,本文方法对应 3 种算例的计算时间分别为 8.2 s、7.9 s 和 7.3 s,而验证方法对应 3 种算例的计算时间分别为 21470 s、20369 s 和 21387 s。验证方法对应的计算时间大大多于本文方法的计算时间,是因为在每一个时间步,都需要求解气膜润滑方程式(1)一次。

因此,本文的研究方法虽然引入了一定的误差,但却大大地减小了计算时间,很好地提高了分析磁头滑块动态飞行特性的效率。

表 2 不同算例两种方法相对误差和计算时间的比较

Table 2 Comparisons of relative errors and computational time for different cases between the two methods

算例 1: $\dot{Z}_p = 5 \text{ mm/s}$, $\alpha_p = 0$, $\beta_p = 0$					算例 2: $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 10 \times 10^{-6} \text{ rad}$, $\beta_p = 0$					算例 3: $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 0$, $\beta_p = 10 \times 10^{-6} \text{ rad}$				
计算时间/s		最大相对误差/(%)			计算时间/s		最大相对误差/(%)			计算时间/s		最大相对误差/(%)		
本文方法	验证方法	h_m	α	β	本文方法	验证方法	h_m	α	β	本文方法	验证方法	h_m	α	β
8.2	21470	4.5	2.4	3.7	7.9	20369	3.6	3.1	2.2	7.3	21387	4.2	2.3	3.4

注: h_m 为最小飞行高度; α 为俯仰角; β 为倾斜角。

3.2 扰动速度对磁头滑块动态飞行特性的影响

磁盘表面的不平整、磁盘表面存在污染物、以及硬盘受到外界冲击振动时,都会给高速飞行的磁头滑块带来干扰,使得磁头滑块的飞行参数发生瞬间变化,引起磁头滑块的动态振动。为了研究磁头滑块的动态振动特性,分别设置各种扰动参数(即扰动速度参数 $\dot{Z}_p$ 、扰动俯仰角参数 α_p 和扰动侧倾角参数 β_p),从而分析各种扰动参数对磁头滑块的动态飞行特性的影响。在这部分研究中,假设 $\alpha_p = 0$, $\beta_p = 0$ 情况下,扰动速度 $\dot{Z}_p$ 分别为 1 mm/s 、 10 mm/s 和 20 mm/s 时,磁头滑块的动态飞行特性(如图 5 所示)。

从图 5 可以发现,随着振动时间的增加,最小飞行高度、俯仰角和侧倾角的振动幅度都不断减小,并逐渐趋向平衡。在图 5(a)中,随着扰动速度的增加,最小飞行高度曲线逐渐向下移动,这意味着磁头滑块随着扰动速度的增加,逐渐向磁盘表面靠近。在图 5(b)和图 5(c)中,不同的速度扰动,对

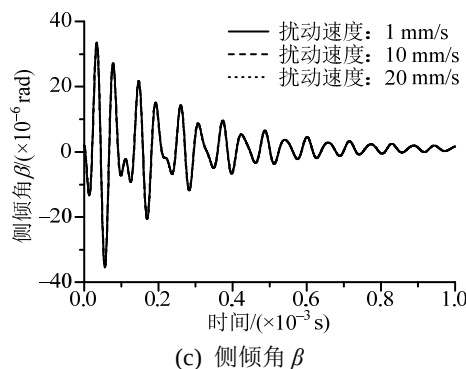
(c) 侧倾角 β

图 5 扰动速度对磁头滑块动态飞行特性的影响

Fig.5 Effects of disturbance velocities on the dynamical flying characteristics of the slider

俯仰角曲线(图 5(b)所示)和侧倾角曲线(图 5(c)所示)几乎没有发生影响。

综合以上分析,可以得出结论:随着扰动速度的增加,磁头滑块的俯仰角和侧倾角几乎不发生变化,最小飞行高度却逐渐减小。这意味着,扰动速度变化会导致磁头滑块向磁盘表面作竖直方向的平行移动,增加了磁头滑块与磁盘接触碰撞的风险。

3.3 扰动俯仰角对磁头滑块动态飞行特性的影响

在这一部分研究中,扰动条件分为 3 种情况:

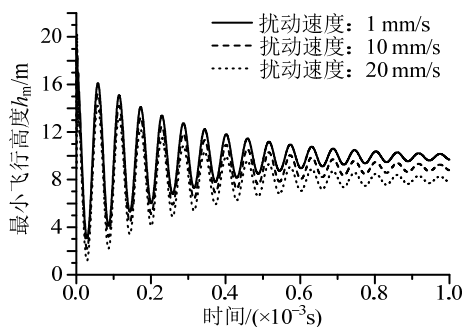
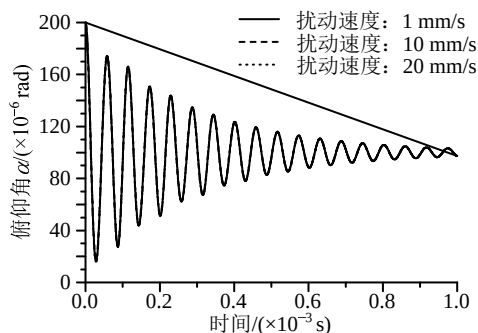
- ① $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 1 \text{ rad}$ 和 $\beta_p = 0$;
 - ② $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 3 \text{ rad}$ 和 $\beta_p = 0$;
 - ③ $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 6 \text{ rad}$ 和 $\beta_p = 0$ 。
- 图 6 给出了这 3 种扰动条件下磁头滑块的动态飞行特性曲线。

从图 6 可以看出,对于不同扰动俯仰角,随着时间的增加,磁头滑块飞行参数的振动幅度逐渐减小,最终趋向平衡。随着扰动俯仰角的增加,磁头滑块飞行参数的振动幅度都有所增加。需要注意的是:虽然竖直方向和侧倾角方向的扰动都为 0,但扰动俯仰角却引起了最小飞行高度和侧倾角的振动,这说明了磁头滑块的俯仰角与最小飞行高度和侧倾角具有耦合关系。

3.4 扰动侧倾角对磁头滑块动态飞行特性的影响

在这一部分研究中,扰动条件分为 3 种情况:

- ① $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 0$ 和 $\beta_p = 1 \text{ rad}$;
 - ② $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 0$ 和 $\beta_p = 10 \text{ rad}$;
 - ③ $\dot{Z}_p = 0$, $\alpha_p = 0$ 和 $\beta_p = 20 \text{ rad}$ 。
- 图 7 给出了这三种扰动条件下磁头滑块的动态飞行特性曲线。

(a) 最小飞行高度 h_m (b) 俯仰角 α

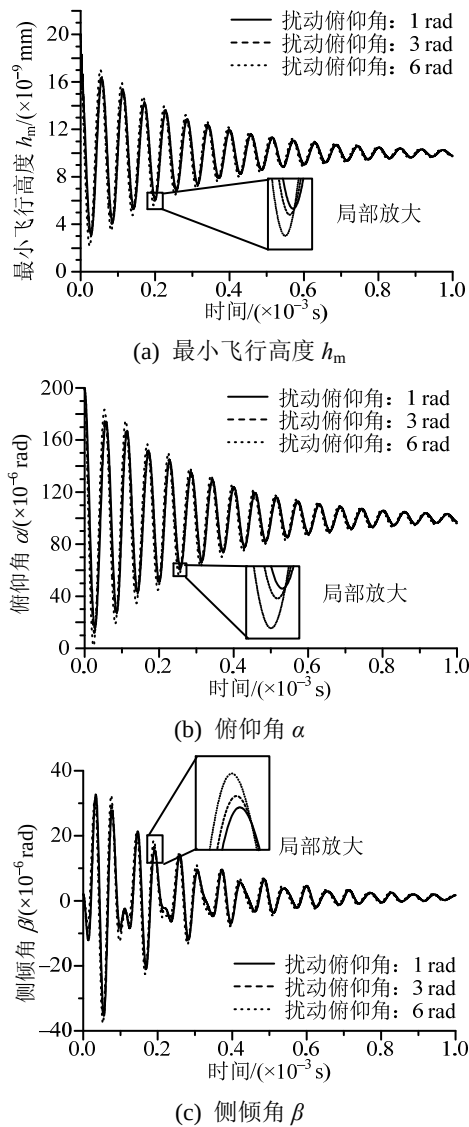


图6 扰动俯仰角对磁头滑块动态飞行特性的影响
Fig.6 Effects of disturbance pitch angles on the dynamical flying characteristics of the slider

从图7可以看出,对于不同扰动侧倾角,随着时间的增加,磁头滑块飞行参数的振动幅度逐渐减小,最终趋向平衡。随着扰动侧倾角的增加,磁头滑块飞行参数的振动幅度都有所增加,且侧倾角振动幅度增加最大。与俯仰角类似,扰动侧倾角也引起了最小飞行高度和俯仰角的振动,说明了侧倾角与最小飞行高度、俯仰角具有耦合关系。

在图6(a)中,当扰动俯仰角 $\alpha_p=6$ rad 时,最小飞行高度最小值约为 2×10^{-9} m; 在图7(a)中,当扰动侧倾角 $\beta_p=20$ rad 时,最小飞行高度最小值也约为 2×10^{-9} m。也就是说,这两种扰动条件(扰动俯仰角 $\alpha_p=6$ rad 和扰动侧倾角 $\beta_p=20$ rad)都使得磁头滑块在振动过程中与磁盘之间的最小距离约为 2×10^{-9} m,但俯仰角需要的扰动值只有侧倾角扰动

值的0.3倍,这说明了俯仰角的扰动比侧倾角的扰动更能引起磁头滑块的振动。

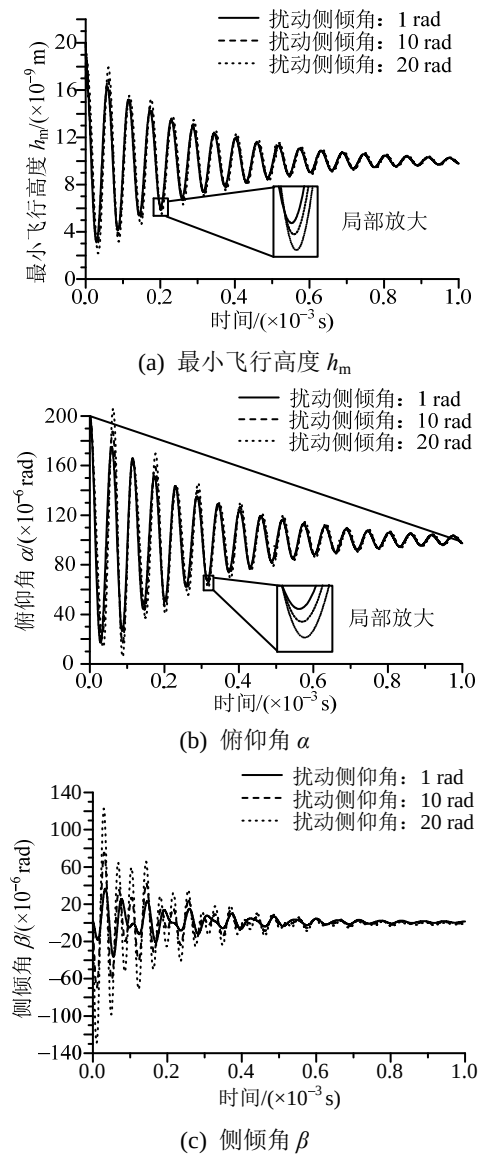


图7 扰动侧倾角对磁头滑块飞行特性的影响
Fig.7 Effects of disturbance roll angles on the dynamical flying characteristics of the slider

4 结论

基于磁头滑块与磁盘之间气膜润滑方程,本文利用摄动理论推导了磁头滑块气膜刚度和阻尼摄动方程,并通过有限体积法进行求解,得到了具有初始扰动条件下的气膜刚度和阻尼矩阵。利用气膜刚度矩阵和阻尼矩阵,通过数值方法求解了磁头滑块动力学方程,并把计算结果与其他方法进行了比较。研究了扰动速度、扰动俯仰角和扰动侧倾角对磁头滑块飞行特性的影响,得出以下结论:

(1) 随着扰动速度的增加,磁头滑块的俯仰角和侧倾角不会发生变化,最小飞行高度却逐渐减

小。这意味着,扰动速度会导致磁头滑块向磁盘表面作竖直方向的平行移动,增加了磁头滑块与磁盘接触碰撞的风险。

(2) 扰动俯仰角和扰动侧倾角的增加都会导致磁头滑块飞行参数振动幅度的增加,但是扰动俯仰角更容易引起磁头滑块的振动。同时,单独的扰动俯仰角和单独的扰动侧倾角,都会引起磁头滑块所有3个飞行参数的振动,这说明俯仰角和侧倾角与另外两个飞行参数具有耦合关系。

(3) 相对于验证方法,本文研究磁头滑块动态飞行特性的方法具有更高的计算效率。

参考文献:

- [1] Allen A M, Bogy D B. Effects of shock on the head-disk interface [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(5): 3717—3719.
- [2] Murthy A N, Feliss B, Gillis D, et al. Experimental and numerical investigation of shock response in 3.5 and 2.5 in. form factor hard disk drives [J]. Microsystem Technologies, 2006, 12(12): 1109—1116.
- [3] Jang G H, Seo C H. Finite-element shock analysis of an operating hard disk drive considering the flexibility of a spinning disk-pindle, a head-suspension-actuator, and a supporting structure [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(9): 3738—3743.
- [4] Liu M J, Yap F F, Harmoko H. Shock response analysis of hard disk drive using flexible multibody dynamics formulation [J]. Microsystem Technologies, 2007, 13(8/9/10): 1039—1045.
- [5] Shi B J, Li H Q, Shu D W, et al. Nonlinear air-bearing slider modeling for hard disk drives with ultra-low flying heights [J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2009, 25(10): 1041—1054.
- [6] Luo J, Shu D W, Shi B J, et al. Pulse width effect on the shock response of the hard disk drive [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 34(8): 1342—1349.
- [7] Dai X, Zhang J, Shen S, et al. Study of formation and development of lubricant bridge in head-disk interface using molecular dynamic method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(3): 1—4.
- [8] McDaniel T W. Application of updated Landau-Lifshitz-Bloch equations to heat-assisted magnetic recording [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(2): 1—11.
- [9] Obukhov Y, Jubert P O, Bedau D, et al. 2-D decoding algorithms and recording techniques for bit patterned media feasibility demonstrations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(2): 1—9.
- [10] Albrecht T R, Arora H, Ayanoor-Vitikate V, et al. Bit-patterned magnetic recording: theory, media fabrication, and recording performance [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(5): 1—42.
- [11] Hanchi J, Sonda P, Crone R. Dynamic fly performance of air bearing sliders on patterned media [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 47(1): 46—50.
- [12] Li L, Bogy D B. Air bearing dynamic stability on bit patterned media disks [J]. Microsystem Technologies, 2013, 19(9/10): 1401—1406.
- [13] Dai X, Li H, Shen S, et al. Numerical simulation of bearing force over bit-patterned media using 3-D DSMC method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1—4.
- [14] Dai X, Li H, Shen S, et al. Study of perfluoropolyether lubricant consumption and recovery in heat assisted magnetic recording using molecular dynamics simulation method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(3): 1—6.
- [15] Fukui S, Sato A, Matsuoka H. Static and dynamic flying characteristics of a slider on bit-patterned media (dynamic responses based on frequency domain analysis) [J]. Microsystem Technologies, 2012, 18(9/10): 1633—1643.
- [16] Cui F, Li H, Shen S, et al. Simulation of air flow and particle trajectories in the head-disk interface [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(12): 1—5.
- [17] 姚华平. 超薄磁头/磁盘气膜动态润滑特性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
Yao Huaping. Study on the dynamic lubrication characteristics of the ultra thin gas film in hard disk drive [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [18] 史宝军, 季家东, 杨廷毅. 粗糙度模式对硬盘气膜承载特性的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 313—318.
Shi Baojun, Ji Jiadong, Yang Tingyi. Effects of surface roughness modes on load carrying characteristics of air bearing films in hard disk drives [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 313—318. (in Chinese)
- [19] 史宝军, 季家东, 杨廷毅. 表面粗糙度对硬盘超低飞高气膜静态特性的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 93—99.
Shi Baojun, Ji Jiadong, Yang Tingyi. Effects of surface roughness on static characteristics of air bearing films in hard disk drives with ultra-low flying heights [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 93—99. (in Chinese)
- [20] Song N H, Meng Y G, Lin J. Flying-height measurement with a symmetrical common-path heterodyne interferometry method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(3): 928—932.
- [21] 王希超. 涉及气体稀薄效应的磁头磁盘空气轴承动力学特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Wang Xichao. Analysis of air bearing dynamic characteristics involved the gas rarefaction effect [D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [22] Shi B J, Yang T Y. Simplified model of Reynolds equation with linearized flow rate for ultra-thin gas film lubrication in hard disk drives [J]. Microsystem Technologies, 2010, 16(10): 1727—1734.
- [23] 白雪, 史宝军, 贺磊, 等. 头/盘界面均匀化 Reynolds 方程及其高效数值求解[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 25—30, 50.
Bai Xue, Shi Baojun, He Lei, et al. Averaged Reynolds equation and its efficient numerical solution in the head/disk interface [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 25—30, 50. (in Chinese)
- [24] Yang T Y, Shi B J, Ge P Q, et al. Adaptive grid generation technique of sub-5 nm flying height air bearing slider with clearance discontinuities [J]. Microsystem Technologies, 2012, 18(12): 2017—2026.
- [25] 郭影, 姜忻良, 曹东波, 等. 一种渗流吸水诱发岩体强度弱化的有限体积数值计算方法[J]. 工程力学, 2018, 35(7): 139—149.
Guo Ying, Jiang Xinliang, Cao Dongbo, et al. A finite volume numerical simulation method for rock mass strength weakening by seepage water absorbing [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 139—149. (in Chinese)