

DOI: 10.7652/xjtuxb201606017

比特图案化介质磁盘-磁头的气膜静态特性研究

杨利花, 徐郝亮, 虞烈

(西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究比特图案化介质磁盘(bit pattern media, BPM)对磁头静态性能的影响,采用有限元法和牛顿-拉普森迭代法,对不同 BPM 结构和几何尺寸对应的磁头静态特性进行了计算。研究表明,与光滑磁盘相比,在立方形 BPM 上飞行的浮动块上靠近读写磁头中心区域的表面压力分布呈现离散化特征。随 BPM 磁单元高度增加,浮动块的最小气膜厚度和气膜承载力逐渐减小,而最大气膜压力等性能的变化则与磁单元分布密切相关。与圆柱形 BPM 的对比发现,立方形 BPM 在较小的浮动块翻转角下具有较大的最大气膜压力、承载力和最小气膜厚度,其对应的浮动块具有比圆柱形 BPM 更好的静态性能,这对 BPM 的结构及几何参数的设计有重要意义。

关键词: 计算机磁盘;比特图案化介质;气体润滑;静态性能

中图分类号: TH117.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)06-0110-06

Study on Static Characteristics of Air Bearing Films over Bit Pattern Media in Hard Disk Drives

YANG Lihua, XU Haoliang, YU Lie

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A method that combines the finite element method and Newton-Raphson iterative method is applied to study the effects of bit pattern media (BPM) on the static characteristics of slider in the hard disk drive. The static characteristics of sliders with different structures and geometry dimensions of BPM such as pitch angle, roll angle, air bearing film thickness, pressure and load capacity are calculated. The numerical results show that the bit shape and its dimension parameters have significant effects on the static performances of the slider. Compared with the smooth disk, when the slider is flying over the bit pattern media, the pressure distribution in the central region which is close to its read/write head shows a discretization feature. The gas-film load capacity and minimum film thickness of the slider gradually decrease as the bit height increases, while the changes of other characteristics are closely related with the bit distribution. Moreover, a comparison with a cylindrical bit pattern media shows that the smaller roll angle may produce larger maximum film pressure, load capacity and minimum film thickness, and that the static characteristics of the slider flying over cuboidal bit pattern media are better than those over cylindrical bit pattern media. These results are of great significance for the design of structure and geometry parameters of bit pattern media.

Keywords: hard disk drive; bit pattern media; gas lubrication; static characteristics

收稿日期: 2015-11-16。 作者简介: 杨利花(1975—),女,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035706);国家自然科学基金资助项目(51575425)。

网络出版时间: 2016-04-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160415.1612.004.html>

硬盘驱动器作为计算机系统最重要的存储设备,对其存储密度、数据传输速率和读写可靠性要求越来越高。近年来逐渐采用热辅助磁记录磁盘(heat-assisted magnetic recording, HAMR)、离散磁道磁盘(discrete track recording, DTR)或比特图案化介质磁盘(bit pattern media, BPM)以提高磁盘的存储密度^[1-2]。HAMR 需要应用激光加热独立的磁单元以降低写数据过程中磁介质的矫顽力,机理更加复杂。离散磁道盘片 DTR 中,数据存储在径向彼此独立的单个磁道上,只能消除径向的过渡区噪声而无法避免盘片周向的过渡区噪声。图案化介质 BPM 中,有序排列的单个比特都是在周向和径向与相邻磁单元隔离的独立个体,消除了过渡区噪声对磁盘性能的影响,而且可以达到更小的单个比特尺寸从而提高存储密度。因此,图案化记录介质将是超高密度磁盘的发展方向^[3]。西部数据公司多年来一直致力于图案化磁盘介质 BPM 的制备方法研究,从优化磁合金材料、改进图案形状等出发以开发具有更高磁记录密度的新型磁盘^[4-5]。

磁盘表面形状和运行参数将影响磁头浮动块表面气体润滑薄膜的静态和动态特性,从而影响磁头的飞行性能。近年来,学者们基于气体薄膜润滑理论,提出了各种分析理论和方法求解气体润滑 Reynolds 方程,以研究浮动块表面气体润滑的力学性能。Hwang 等基于改进的高阶滑流速度分布,提出了求解超薄膜气体润滑的修正 Reynolds 方程以克服求解线性 Boltzmann 方程的复杂性和难度^[6]。Hu 等提出基于对流扩散方程的多网格控制体积法求解高轴承数超薄膜气体润滑问题^[7]。王红志等用有限差分法计算超薄气膜润滑的磁头压力分布,分析了磁头偏离平衡位置时磁头的压力及刚度^[8]。史宝军等采用一种无网格-最小二乘有限差分法研究了磁盘速度、磁和浮动块表面容纳系数对气膜静态特性的影响^[9]。Duwensee 等对离散磁道磁盘 DTR,研究了磁槽深度、宽度和磁道间距对 4 个不同表面结构的磁头飞行高度、压力分布和纵向翻角(Pitch 角)的影响^[10-11]。Li 等提出一种数值模型进行图案化磁盘介质下磁头的性能分析,研究了图案化磁盘尺寸参数对磁头表面压力和飞行高度的影响^[12-13]。张延瑞等设计了三维凸台气体轴承模型,分别应用直接模拟蒙特卡罗法和气体分子薄膜润滑理论法计算了凸台高度、最小间隙等对气膜压力的影响,以研究采用图案化介质实现超高密度磁盘存储时的气体润滑问题^[14]。

纵观近年来有关图案化介质磁盘的研究,因其制备技术和高成本的限制阻碍了此类磁盘存储技术的发展,国外仅有少数学者开展了相关的气膜润滑特性研究,国内更是鲜有研究报道。为了研究图案化介质的气膜静态性能,本文基于气体润滑 Reynolds 方程和浮动块力平衡方程的求解,分别以圆柱形和立方形比特形状为图案化磁盘为研究对象,研究磁单元几何尺寸及形状对磁头浮动块的翻转角、俯仰角和表面气膜压力、承载力等静态特性的影响。

1 数学模型

图案化磁盘介质 BPM 是由一系列有序排列在磁盘表面的圆柱形或立方形磁单元构成的。图 1 给出了圆柱形和立方形 BPM 的结构和参数, b 为相邻磁单元间距, d 为圆柱形磁单元直径或立方形磁单元边长, h_b 为磁单元高度, $w=b-d$ 为相邻磁单元间距。图 2 所示为本文所研究的枢轴浮动块几何模型及表面有限元网格。浮动块长度 $L=850\ \mu\text{m}$,宽度 $B=700\ \mu\text{m}$ 。为了保证计算精度,细化了浮动块靠近读写磁头中心区域的网格。

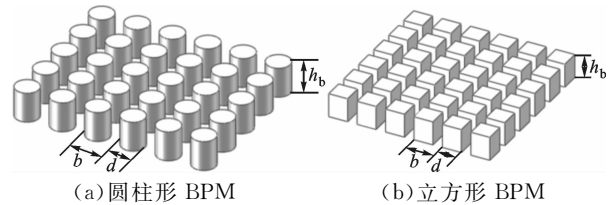


图 1 BPM 磁盘模型

忽略浮动块和磁盘表面粗糙度的影响,浮动块在磁盘上飞行时,稳态条件下浮动块和磁盘表面间的气膜压力服从静态无量纲 Reynolds 方程

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(QPH^3\frac{\partial P}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(QPH^3\frac{\partial P}{\partial Y}\right)=\Lambda_x\frac{\partial(PH)}{\partial X}+\Lambda_y\frac{\partial(PH)}{\partial Y}\quad(1)$$

式中: $P=p/p_a$ 为无量纲气膜压力(p_a 为环境压力); $H=h/h_{\min}$ 为无量纲气膜厚度($h_{\min}$ 为最小气膜厚度); $X=x/L$ 和 $Y=y/L$ 分别为浮动块长度和宽度方向坐标(L 为浮动块长度); $\Lambda_x=6\mu UL/(p_a h_{\min}^2)$ 和 $\Lambda_y=6\mu VL/(p_a h_{\min}^2)$ 分别是 x 、 y 方向的轴承数,其中 μ 为气体的动力黏度, U 和 V 分别是浮动块相对于磁盘在 x 、 y 方向的飞行速度(本文模拟中假设浮动块 x 方向沿磁盘切向,则 U 等于磁盘对应径向位置的线速度, $V=0$); Q 为考虑气体的稀薄效应所引入的修正因子,本文采用 Boltzmann 修正系数^[15]

$$Q=1+0.108\,42K_n+9.359\,3/K_n^{-1.174\,68}\quad(2)$$

其中 K_n 为 Knudsen 数, $K_n = \lambda/h$, λ 为气体分子的平均自由程。

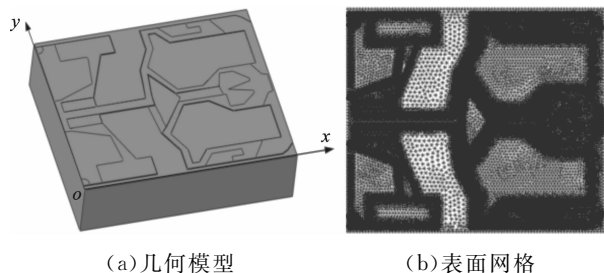


图 2 浮动块几何模型及表面网格

式(1)只能求解特定气膜厚度分布下浮动块表面的气膜压力分布,而浮动块飞行过程中,其运动与悬臂支架相关。当只考虑浮动块的垂直位移 z 、俯仰角 α 和翻转角 β 时,气体轴承的稳态气膜压力和气膜厚度分布还应满足浮动块的力和力矩平衡条件^[15]

$$\begin{bmatrix} \iint_A p(x, y) dA - F_{\text{ext}} \\ \iint_A p(x, y)(x - x_p) dA - M_a^{\text{ext}} \\ \iint_A p(x, y)(y - y_p) dA - M_\beta^{\text{ext}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_z & 0 & 0 \\ 0 & k_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & k_\beta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dz \\ d\alpha \\ d\beta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: F_{ext} 、 M_a^{ext} 、 M_β^{ext} 分别是悬臂支架作用在浮动块上的力和力矩; A 为浮动块表面积; k_z 、 k_α 和 k_β 分别是悬臂支架在 3 个方向的刚度系数; $p(x, y)$ 是有量纲气膜压力; x_p 和 y_p 是浮动块枢轴点对应的坐标。

式(1)气膜压力的求解采用牛顿-拉普森迭代法

$$P^{k+1} = P^k + dP \quad (4)$$

式中: P^k 、 P^{k+1} 分别为第 k 和 $k+1$ 次迭代的气膜压力; dP 为两次迭代的气膜压力变化量。

在某迭代步,当所有节点的压力变化 $dP \rightarrow 0$ 且满足式(3)的浮动块受力平衡条件时,认为迭代收敛并停止迭代,就可得到对应计算参数下浮动块表面的静态气膜压力和气膜厚度分布。

2 结果与讨论

2.1 浮动块表面气膜压力分布

本文中润滑气膜采用质量分数为 98% 氮气的空气-氮气混合工质,密度 $\rho = 0.1801 \text{ kg/m}^3$,动力黏度 $\mu = 2.018 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,环境压力 $p_a =$

$0.6586 \times 10^5 \text{ Pa}$, 气体分子的平均自由程 $\lambda = 1.90 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。

图 3 给出了浮动块长度方向的线速度 $U = 20 \text{ m/s}$ 时,飞行在光滑磁盘上的浮动块表面靠近读写磁头中心区域的压力分布。图 4 和图 5 分别是磁单元尺寸为 $b = 0.6 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $w = 0.3 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $h_b = 10 \text{ nm}$ 时,圆柱形和立方形 BPM 对应的浮动块压力分布。可以看出:气膜压力分布的最大值均出现在浮动块靠近读写磁头的中心区域;光滑磁盘对应的浮动块表面呈现光滑连续压力分布;飞行在 BPM 上的浮动块因磁盘表面磁单元的离散性,其靠近读写磁头中心区域的压力分布亦呈现出相应的离散化分布。在此磁单元尺寸参数下,两种 BPM 对应的压力分布存在差异,且立方形 BPM 对应的最大压力比圆柱形

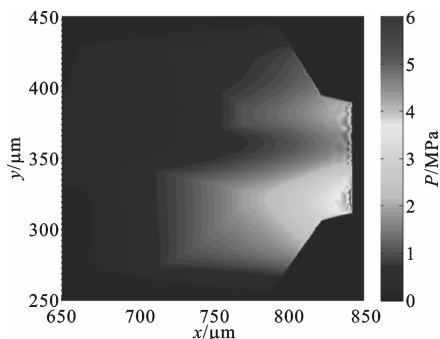


图 3 光滑磁盘对应浮动块表面压力的分布

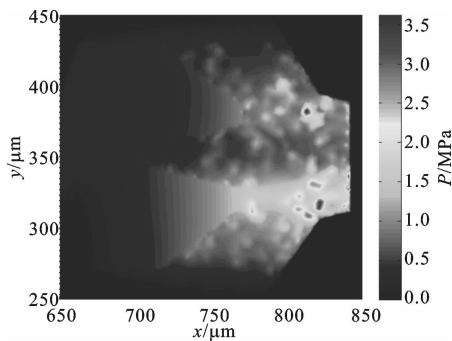


图 4 圆柱形 BPM 对应浮动块表面压力的分布

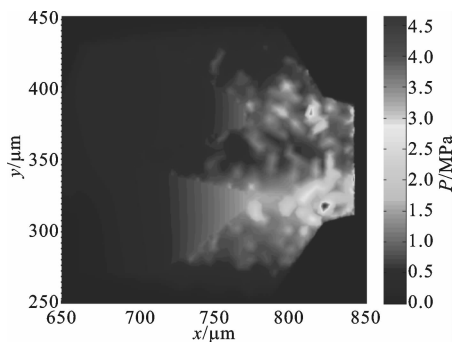


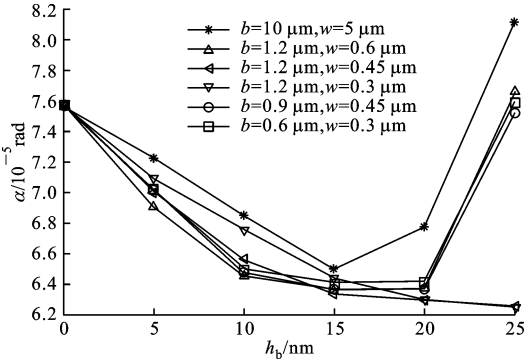
图 5 立方形 BPM 对应浮动块表面压力的分布

BPM 的要大,最大压力均出现在靠近读写磁头中心的下侧区域,这与浮动块俯仰角的方向相关。

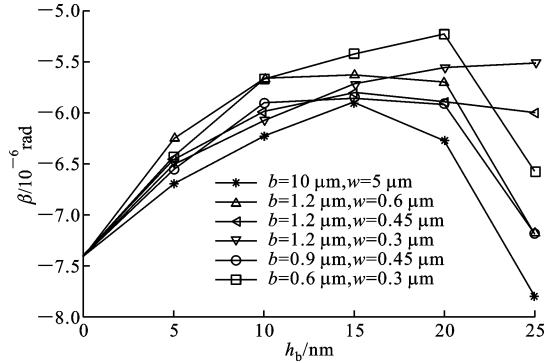
2.2 BPM 尺寸对浮动块静态性能的影响

当磁盘表面形貌变化时,浮动块的稳态飞行姿态和对应的气体润滑薄膜厚度、压力及气膜承载力都将随之改变。为了研究磁盘表面形貌对浮动块表面气体润滑静态性能的影响,本文计算了浮动块长度方向的线速度 $U=20\text{ m/s}$ 、磁单元高度 $h_b=5, 10, 15, 20, 25\text{ nm}$ 时,6 组立方图案化磁盘介质尺寸对应的浮动块俯仰角、翻转角及表面气膜压力等静态性能。在图 2 所示浮动块几何模型坐标系中,枢轴点坐标位置为 $x_p=425\text{ }\mu\text{m}$, $y_p=350\text{ }\mu\text{m}$,悬臂支架刚度可通过有限元分析得到,本文取 $k_z=20\text{ N/m}$, $k_\alpha=k_\beta=3.5\times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{m/rad}$ 。

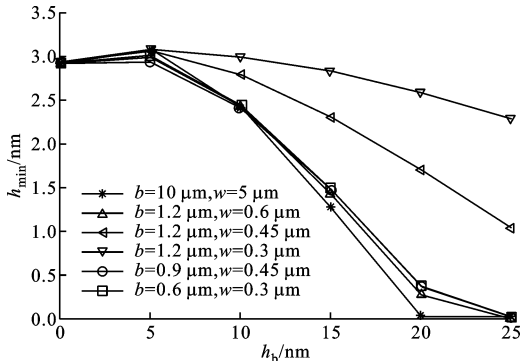
图 6 是不同立方 BPM 尺寸参数下,浮动块的静态性能随磁单元高度的变化。可以看出,随磁单元高度 h_b 的增加,图案化介质 BPM 参数为 $b/w=2$ 时,浮动块的俯仰角 α 、翻转角 β 先减小后增大,且同一高度下较大的 w 对应的 α 角也越大;对 $b/w>2$ 的图案化介质 BPM,浮动块的 α 角和 β 角单调减小,且 b/w 值越大 β 角减小速率越快。当 $b/w=2$ 时,最大气膜压力 $p_{\max}$ 随磁单元高度的增加逐渐减小,而 $b/w>2$ 对应的 $p_{\max}$ 则逐渐增大,且 b/w 值越大 $p_{\max}$ 也越大,其值甚至大于光滑磁盘的对应值。对所研究的图案化介质 BPM 尺寸参数,浮动块的最小气膜厚度 $h_{\min}$ 和承载力 F 都随磁单元高度增大而减小, b/w 值越大, $h_{\min}$ 和 F 也越大,这与文献 [13] 的结果是一致的,相同 b/w 值对应的最小气膜厚度和承载力几乎接近。因此,采用具有较大 b/w 值的图案化磁盘结构将有利于提高气膜润滑的静态性能。BPM 对应的气膜承载力均小于光滑磁盘的承载力,表明图案化介质磁盘尽管提高了磁盘的存储密度和存储容量,但会降低超薄气膜润滑的承载



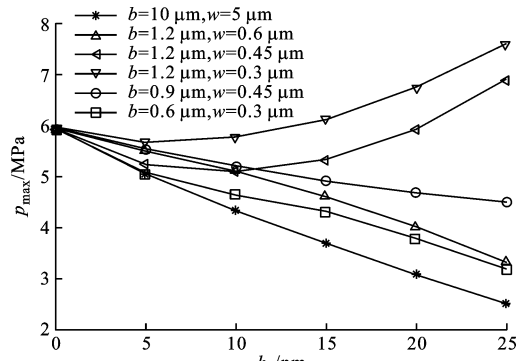
(a) 俯仰角 α



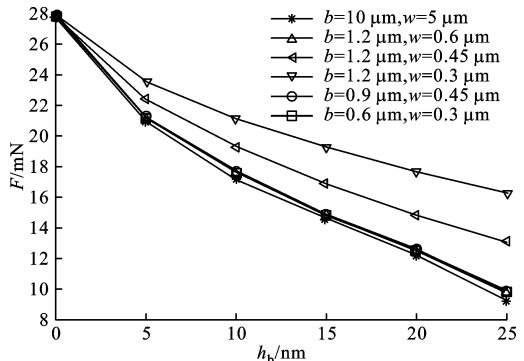
(b) 翻转角 β



(c) 最小气膜厚度 $h_{\min}$



(d) 最大气膜压力 $p_{\max}$

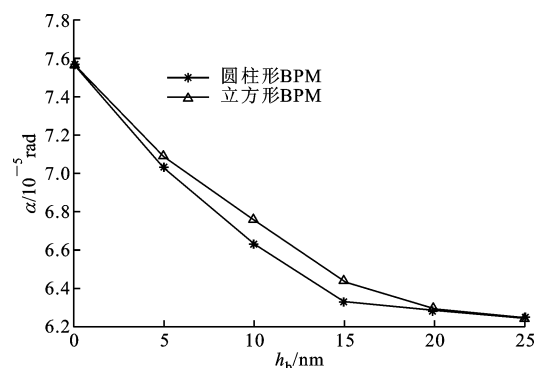


(e) 承载力 F

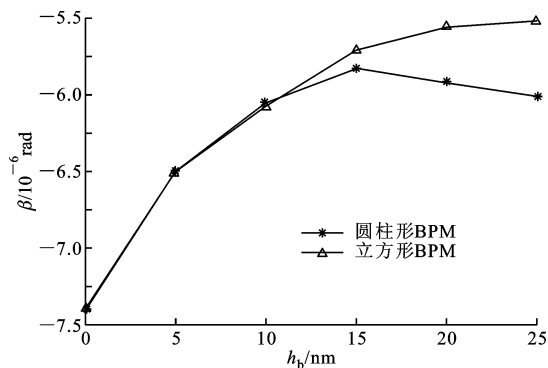
图 6 立方 BPM 对应浮动块静态性能随磁单元高度的变化

能力。

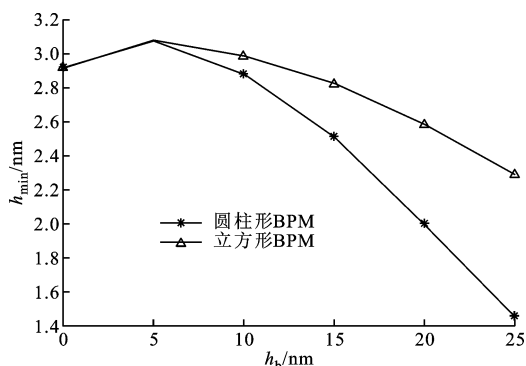
图7比较了磁单元尺寸为 $b=1.2\ \mu\text{m}$ 、 $w=0.3\ \mu\text{m}$ 时,圆柱形和立方形BPM对应的浮动块静态性能。实验结果表明,对此 b/w 值,随磁单元高度 h_b 增大,两种图案化介质对应的浮动块俯仰角 α 、翻转角 β 、气膜承载力 F 和最小气膜厚度 $h_{\min}$ 都逐渐减小,最大气膜压力 $p_{\max}$ 则先减小后增大。相比圆柱形BPM,立方形BPM以较小的浮动块翻转角产生了较大的最大气膜压力、承载力和最小气膜厚度。因此,对具有超高磁盘存储密度的图案化磁介质而言,立方形BPM对应的浮动块具有比圆柱形BPM更优越的盘静态性能。文献[12]指出,随磁单元高



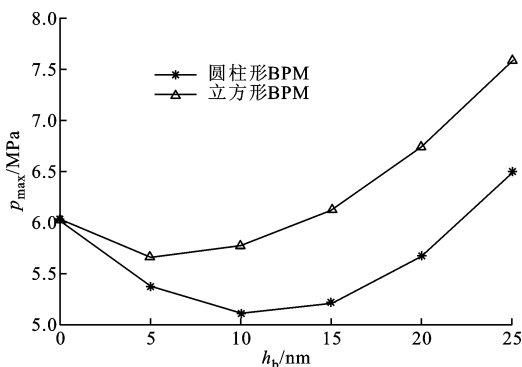
(a) 俯仰角 α



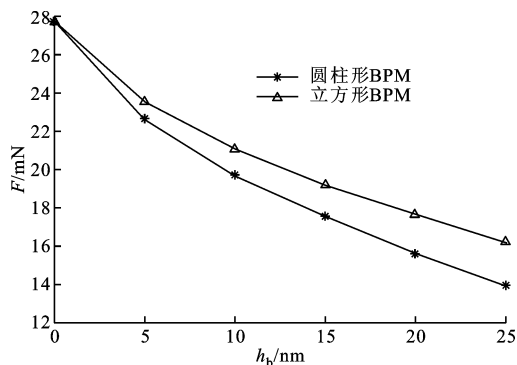
(b) 翻转角 β



(c) 最小气膜厚度 $h_{\min}$



(d) 最大气膜压力 $p_{\max}$



(e) 承载力 F

图7 圆柱形和立方形BPM对应浮动块静态性能比较

度增大,圆柱形BPM对应的磁头飞行高度减小速率大于立方形BPM,与本文的结论是一致的,这也是磁盘厂商致力于立方形BPM研制和制备技术的主要原因^[4]。

3 结 论

本文通过对图案化介质磁盘的静态性能分析及数值模拟,得到如下结论。

(1)采用有限元法和牛顿-拉普森法迭代求解气膜润滑的非线性Reynolds方程和浮动块的力平衡方程,可以有效求解任意磁盘和浮动块几何模型下的润滑气膜压力、承载力、浮动块飞行姿态等静态性能。

(2)最大气膜压力均出现在靠近读/写磁头的中心区域;相比光滑磁盘表面,图案化介质磁盘磁单元的离散性分布会使浮动块表面气膜压力分布同样呈现出离散化特征,且相同尺寸下,不同磁单元形状对应的压力分布也不尽相同。

(3)较小的磁单元尺寸比 b/w 时,浮动块的俯仰角、翻转角随磁单元高度增大先减小后增大,而较大 b/w 时则逐渐减小;最小气膜厚度和承载力均随磁单元高度增大而减小。

(4)飞行在立方形 BPM 上的浮动块具有比圆柱形 BPM 更大的最小气膜厚度、承载力和最大气膜压力,表明立方形 BPM 比圆柱形 BPM 具有更好的静态性能。

致谢 本文研究工作是在美国加州大学圣地亚哥分校(University of California, San Diego)磁记录研究中心(Center for Memory and Recording Research) Frank E. Talke 教授的精心指导下和研究生的大力帮助下完成的,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] SOENO Y, MORIYA M, ITO K, et al. Feasibility of discrete track perpendicular media for high track density recording [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(4): 1967-1971.
- [2] WACHENSCHWANZ D, JIANG W, RODDICK E, et al. Design of a manufacturable discrete track recording medium [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(2): 670-675.
- [3] 钟智勇, 荆玉兰, 陈宏猷, 等. 图案化磁记录技术 [J]. 技术论坛, 2004(5): 24-27.
ZHONG Zhiyong, JING Yulan, CHEN Hongyou, et al. Patterned magnetic recording technology [J]. China Mediatech, 2004(5): 24-27.
- [4] ALBRECHT T R, ARORA H, AYANOR-VITIKKATE V, et al. Bit patterned magnetic recording: theory, media fabrication, and recording performance [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(5): 1-44.
- [5] ALBRECHT T R, BEDAU D, DOBISZ E, et al. Bit patterned media at 1 Tdot/in² and beyond [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(2): 773-778.
- [6] HWANG C C, FUNG R F, YANG R F, et al. A new modified Reynolds equation for ultrathin film gas lubrication [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(2): 344-347.
- [7] HU Y, BOGY D B. Solution of the rarefied gas lubrication equation using an additive correction based multigrid control volume method [J]. ASME Journal of Tribology, 1998, 120(1): 280-288.
- [8] 王红志, 黄平, 孟永刚, 等. 磁头/磁盘气体润滑特性计算与分析 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 358-361.
WANG Hongzhi, HUNAG Ping, MENG Yonggang, et al. Calculation and analysis of air bearing performance for magnetic head/disks [J]. Tribology, 2006, 26(4): 358-361.
- [9] 史宝军, 季家东, 杨廷毅, 等. 磁盘速度与容纳系数对硬盘气膜静态特性的影响 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 95-101.
SHI Baojun, JI Jiadong, YANG Tingyi, et al. Effects of disk velocity and accommodation coefficients on static characteristics of air bearing films in hard disk drives [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 95-101.
- [10] DUWENSEE M, SUZUKI S, LIN J, et al. Air bearing simulation of discrete track recording media [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 2489-2491.
- [11] DUWENSEE M, SUZUKI S, LIN J, et al. Simulation of the head disk interface for discrete track media [J]. Microsystem Technologies, 2007, 13(8): 1023-1030.
- [12] LI Hui, ZHENG Hao, YOON Y, et al. Air bearing simulation for bit patterned media [J]. Tribology Letters, 2009, 33: 199-204.
- [13] LI Hui, TALKE F E. Numerical simulation of the head/disk interface for bit patterned media [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(11): 4984-4989.
- [14] 张延瑞, 孟永刚. 基于连续模型和离散模型的微尺度三维凸台轴承的气体润滑分析 [J]. 摩擦学学报, 2011, 31(4): 397-407.
ZHANG Yanrui, MENG Yonggang. Gas lubrication analysis of three dimensional micro scale gas slider bearings with bumps based on continuum and discrete models [J]. Tribology, 2011, 31(4): 397-407.
- [15] DUWENSEE M. Numerical and experimental investigation of the head disk interface [D]. San Diego, CA, USA: University of California, 2007.

(编辑 武红江)