

文章编号 1004-924X(2007)11-1767-07

光学头三维悬线式力矩器的高次谐振

张布卿, 马建设, 程雪岷, 潘龙法

(清华大学 光盘国家工程研究中心, 北京 100084)

摘要:研究了分布在聚焦和循迹特性曲线上的高次谐振。对高次谐振的产生机理、物理模型、模态分布和测试方法等进行了研究。根据三维力矩器实际受力状况建立了低转角转动物理模型。利用有限元法分析计算了三维悬线式力矩器的模态分布和振型。介绍了高次谐振的测试方法,并对存在装配误差的力矩器进行实测。测试结果表明:不良力矩器往往在聚焦特性曲线上存在 1 700 Hz 左右的俯仰共振,在循迹特性曲线上存在 4 800 Hz 左右的偏转共振,其结果和有限元分析结果一致。结果还表明:高次谐振是光学头三维力矩器的固有属性,抑制高次谐振需要有效减小三维力矩器的装配误差。

关键词:光学头;三维悬线式力矩器;高次谐振;有限元法;模态分布

中图分类号:TP333.4 **文献标识码:**A

High-order resonance of three axis suspension wire actuator in optical pickup

ZHANG Bu-qing, MA Jian-she, CHENG Xue-min, PAN Long-fa

(Optical Memory National Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the servo control bandwidth of the three axis actuator in a optical pickup, the high-order resonances in the focusing/tracking directions are studied. The induced mechanism, physical model, modal distribution and the test approach on the high-order resonance are studied. The low angle yawing model is established according to the actual stress on the three axis actuator. Then the modal distribution and modes are analyzed and calculated with the finite element method. Finally, the test method of the high-order resonance is introduced and the actuators with assemble errors are measured. The test results show that the pitching resonance usually appears on the focusing performance curve under the frequency of 1 700 Hz and the yawing resonance usually appears on the tracking performance curve under the frequency of 4 800 Hz. The experiment results are consistent with the finite element analysis. The results also show that the high-order resonance is the inherent attribute of the three axis actuator, which can be restrained by reducing the assemble error of the three axis actuator.

Key words: optical pickup; three axis suspension wire actuator; high-order resonance; finite element method; modal distribution

收稿日期:2007-08-09;修订日期:2007-09-13.

基金项目:国家 863 高技术计划资助项目(No. 2007AA04Z127)

1 引言

光学头力矩器是光盘系统伺服控制环节中的最终执行机构,其动态性能的好坏决定着光学头的读写性能。随着光盘存储容量的增大和数据传输速度的提高,系统对光学容差的要求越来越高,伺服控制的精度也越来越高,具备径向倾斜功能的三维悬线式力矩器成为高密度光盘存储设备(Blu-ray/HD DVD 等)的必备组件。三维悬线式力矩器主要由可动部和磁路组成,其中由 6 根悬线、物镜架、物镜、驱动线圈组成的可动部经通电线圈在磁场中所受的电磁力/力矩实现聚焦、循迹和径向倾斜运动。

对于二维力矩器,聚焦和循迹相互之间的串扰运动^[1]以及径向倾斜运动的抑制^[2]往往是研究的重点,系统常常被简化为经典的质量-弹簧-阻尼二阶模型^[3]。而对于三维悬线式力矩器,不仅要考虑聚焦、循迹和倾斜 3 个运动之间的串扰,各个运动方向的幅频特性曲线也至关重要。良好的伺服性能要求力矩器有足够的伺服带宽,这在幅频相频曲线中表现为:在 1 阶共振频率和 2 阶共振频率之间,曲线光滑,没有局部的凸起和凹陷,即不存在局部的共振点,然而实际测试中往往会在其幅频特性曲线中发现俯仰共振和偏转共振,通称为高次谐波现象,严重影响后续的伺服工作。2 阶共振是在高频交变电流下的电磁力作用下造成的物镜架的弹性共振^[4],共振频率一般在 18 kHz 以上,而高次谐波频率距 2 阶共振频率有很大距离,用传统的 2 阶系统也无法解释。对于二维力矩器运动中所出现的扭转运动,研究学者普遍认为这是由于驱动力的中心与可动部的质心不重合而激发了扭转共振^[5]。然而对于三维力矩器,扭转运动是主运动,不应抑制,重点应放在 1~10 kHz 之间的高次谐波的研究上。

本文在传统力矩器 2 阶模型的基础上,结合实际工业产品加工和装配工艺上存在的限制因素,刻画三维力矩器的真实受力情况,揭示高次谐波产生的机理,并通过有限元计算模拟和实验测试相结合的方法来研究高次谐波,最后给出了抑制高次谐波的一些途径。

2 高次谐振的产生机理和物理模型

图 1 为本文所研究的三维悬线式力矩器可动部的结构示意图。良好的力矩器特性要求在 1 阶共振频率和 2 阶共振频率之间的曲线平滑(如图 2 所示),而图 3 的幅频特性曲线则显示出由于俯仰共振、偏转共振的存在而严重影响后续的伺服控制。

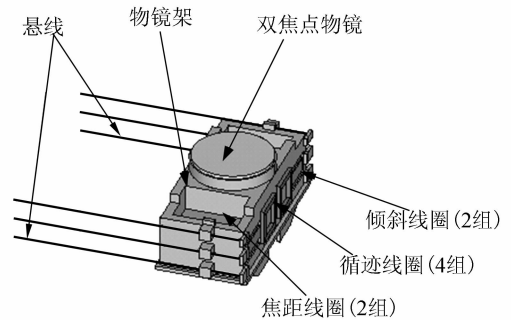


Fig. 1 可动部的结构配置

Fig. 1 Structure configuration of moving part

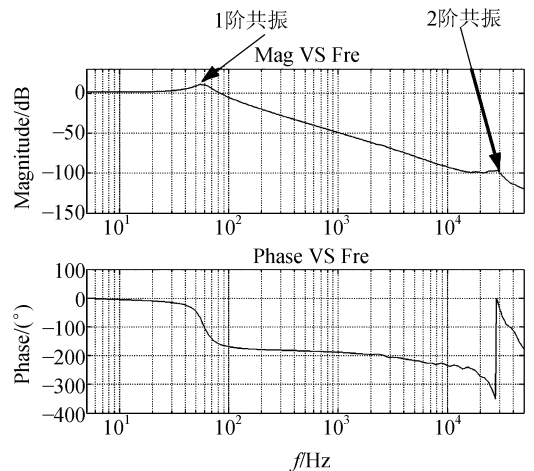


图 2 良好的幅频特性曲线

Fig. 2 Good performance curve

为了研究力矩器的高次谐波,首先建立三维悬线式力矩器在循迹方向上的运动模型。如图 4 所示,以悬线初始放置方向为 X 轴,循迹运动方向为 Z 轴,聚焦运动方向为 Y 轴,取可动部处于静止状态下的质心 G 为坐标原点 O 建立直角坐标系 XOZ ,研究循迹运动。由于力矩器加工和装配工艺存在的一些误差(如永磁铁装配误差、轭铁

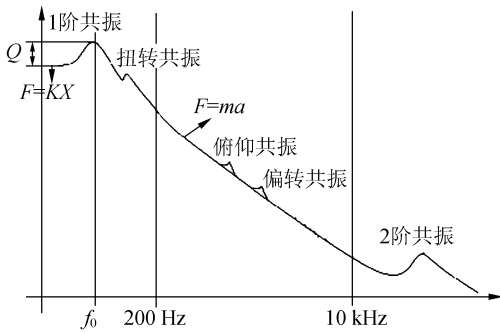


图 3 存在高次谐振的幅频特性曲线

Fig. 3 Performance curve with high-order resonance

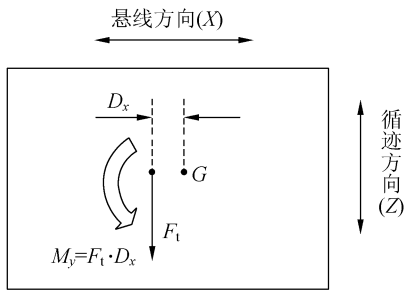


图 4 循迹运动实际受力分析图

Fig. 4 Force analysis in tracking movement

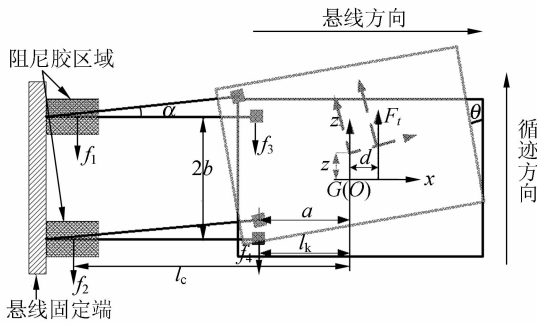


图 5 循迹运动串扰力矩激发图

Fig. 5 Interference torque generation in tracking movement

装配误差等),使得通电线圈在磁场中受到的驱动力与可动部质心往往并不重合,设定其间距为 d 。这样由于质心与力心的不重合将激发绕 Y 轴的串扰力矩(如图 5 所示),由此导致驱动力以及弹性回复力、阻尼力分布发生变化。假设微小转动的角度为 θ ,在循迹运动方向产生位移 z 时,依据牛顿运动定理有:

$$F_1 \cos \theta - f_1 - f_2 - f_3 - f_4 = m\ddot{z} \quad (1)$$

据刚体转动定理,有:

$$F_1 d + (f_1 + f_2) l_c + (f_3 + f_4) l_k = I_y \ddot{\theta} \quad (2)$$

在上述两式中, f_1 和 f_2 分别为前后 3 根悬线在阻尼区域内所受的等效阻尼力, f_3 和 f_4 分别为前后 3 根悬线在 Z 方向提供的弹性回复力, F_1 为循迹驱动力; l_c 为等效阻尼力距离可动部质心的距离, l_k 为回复力距离可动部质心的距离。根据回复力、阻尼力以及安培力公式,可以分别得到: $f_1 = C_z(\dot{z} - a\dot{\theta})$, $f_2 = C_z(\dot{z} + a\dot{\theta})$, $f_3 = K_z(z - a\theta)$, $f_4 = K_z(z + a\theta)$, $F_1 = NIB_1L$,

其中, C_z 为 3 根悬线所在阻尼区的等效阻尼系数, K_z 为 3 根悬线在循迹方向上的等效刚度, N 为循迹线圈的匝数, I 为循迹线圈所加电流, B_1 为循迹线圈所在磁场的等效磁感应强度, L 为单匝线圈的有效长度。

将上述参数带入到式(1)、(2)中,可得

$$\begin{cases} B_1 ILN \cos \theta - 2C_z \dot{z} - 2K_z z = m\ddot{z} \\ B_1 ILNd + 2C_z \dot{z} l_c + 2K_z z l_k = I_y \ddot{\theta} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)说明绕 Y 轴转动和循迹运动是相互耦合的。事实上, $2K_z$ 代表了三维力矩器 6 根悬线在 Z 方向上(循迹方向)总的等效刚度, $2C_z$ 代表了阻尼胶在 Z 方向上总的阻尼系数,令 $K_z' = 2K_z$, $C_z' = 2C_z$,考虑低转角下, $\cos \theta \approx 1$,对式(3)做拉普拉斯变换,易得系统的传递函数为:

$$G(z) = \frac{Z(s)}{I(s)} = \frac{NB_1L}{s^2 + \frac{C_z'}{m}s + \frac{K_z'}{m}} \quad (4)$$

$$G(\theta) = \frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{(C_z' l_c s + l_k K_z' + d) B_1 L N}{I_y s^2 (m s^2 + C_z' s + K_z')} \quad (5)$$

可见,在低转角下,循迹方向上电流-位移关系仍然满足 2 阶系统模型,循迹方向固有频率为

$$f_{\theta_0} = 2\pi\sqrt{\frac{K_z'}{m}}$$

而绕 Y 轴转动(即偏转运动)方向,其电流-转角关系是一个 4 阶系统模型,而且偏转运动总是和循迹运动耦合在一起的。即当循迹运动过程中由于驱动力与质心的偏移导致偏转扭矩,若激励扭矩的频率与可动部绕 Y 轴转动的固有频率接近时就会发生偏转共振。同理,对于聚焦方向,由于聚焦驱动力和可动部质心的不一致,也会激励物镜架绕 Z 轴的转动,即所谓的俯仰运动,其受力分析与上述分析完全相似。

上述模型中绕 Y 轴转动的分析是在悬线和物镜架整体(即整个可动部)是刚体的前提下进行

的,只在悬线偏离平衡线的情况下适用。一旦有较大偏角,由于 6 根悬线的长度和约束条件完全一样,物镜架的偏转会导致悬线的梁变形,使得上述刚体模型不再适用。

3 有限元模态分析

上述模型只是给出了在循迹方向上的偏转运动和聚焦方向上的俯仰运动的产生机理和数学描述,而且刚体模型的适用范围也非常狭窄,不利于定量分析高频谐振频率和峰值的分布。为了精确计算高频谐振频率,本文利用有限元分析软件 ANSYS 对可动部做模态计算。有限元分析方法作为一种用来求解系统响应的方法,已被广泛应用到结构、热学、流体等领域^[6-7]。表 1 给出了可动部各实体的物理属性和单元划分情况。

表 1 可动部各实体的物理属性和单元划分

Tab.1 Physical property and element division of each component in moving part

	密度 (kg/m ³)	泊松比	弹性模量 (GPa)	单元类型	划分单元数
物镜	1.0e3	0.37	2.62	SOLID92	2 233
物镜架	1.17e3	0.48	4.0	SOLID92	24 849
聚焦线圈	7.2e3	0.34	8.0	SOLID45	4 292
循迹线圈	7.2e3	0.34	8.0	SOLID45	1 729
倾斜线圈	7.2e3	0.34	8.0	SOLID45	2 346
悬线	7.5e3	0.29	169	BEAM189	174

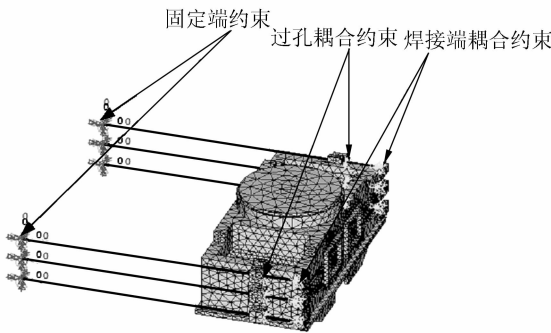


图 6 可动部单元划分和约束条件

Fig. 6 Element divisions of moving part and their constrain conditions

可动部的约束条件如图 6 所示,悬线根部是固定约束,即

$$U=0, \theta=0. \quad (6)$$

耦合条件分为两种,一种是悬线和物镜架之

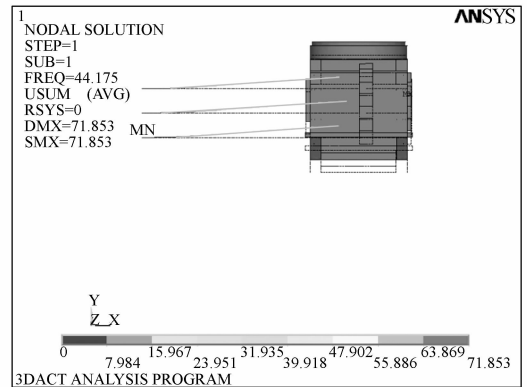
间过孔的耦合,即

$$U_{y1}=U_{y2}, U_{z1}=U_{z2}. \quad (7)$$

另一种是悬线与物镜架之间的焊接耦合,即

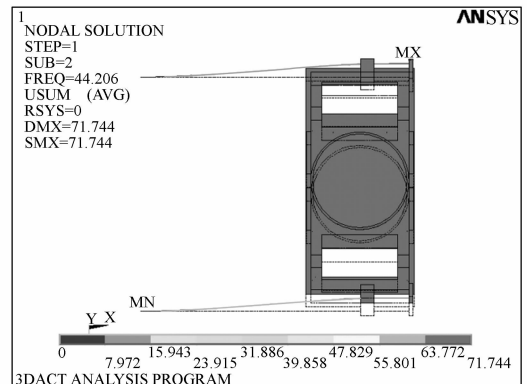
$$U_{x1}=U_{x2}, U_{y1}=U_{y2}, U_{z1}=U_{z2}, \theta_1=\theta_2. \quad (8)$$

对力矩器可动部的前 20 阶模态进行计算,根据模态对光学中心振动的贡献度大小,可以选出可动部模态中的实际有效模态。力矩器可动部在中低频段的振动主要包括 5 种振动模态,分别代表了力矩器除 X 方向以外的 5 个运动自由度。它们分别是沿 Y 轴和 Z 轴的平动模态,即聚焦和循迹固有模态,绕 X 轴转动的扭转模态,绕 Z 轴转动的俯仰模态以及绕 Y 轴转动的偏转模态。各个模态在适当的外在激励下将会引起共振,表 2 给出了仿真计算得到的各个模态下的共振频率,图 7 是主要模态的振型图。频率为 1 756 Hz 的俯仰模态和 4 817 Hz 的偏转模态是可动部的固有属性,当外力频率接近它们时,就会出现所谓的俯仰和偏转共振。



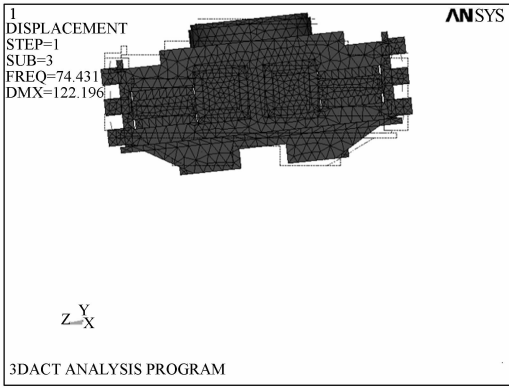
(a) 聚焦共振

(a) Focusing resonance

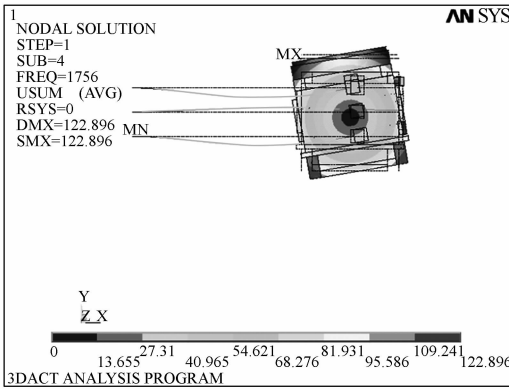


(b) 循迹共振

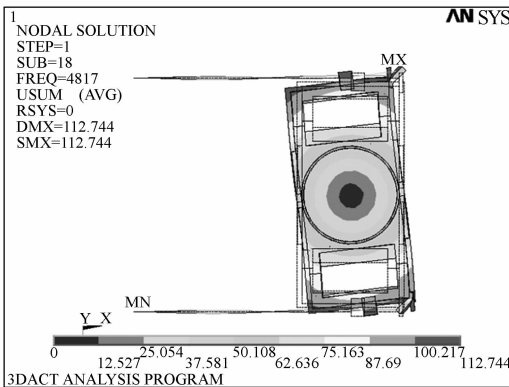
(b) Tracking resonance



(c) 扭转共振
(c) Rolling resonance



(d) 俯仰共振
(d) Pitching resonance



(e) 偏转共振
(e) Yawing resonance

图 7 三维力矩器中低频段内主要振动模式
Fig. 7 Main vibration modes in low and median frequencies in three axis actuator

表 2 可动部的主要振动模式

Tab. 2 Main vibration modes of moving part

模态阶数	1	2	3	4	18
模态频率(Hz)	44.17	44.20	74.43	1 756	4 817
振动形式	聚焦 共振	循迹 共振	扭转 共振	俯仰 共振	偏转 共振

4 实验与结果分析

三维力矩器高次谐波的测试平台如图 8 所示,用单点式激光测振仪 OFV505/5000 分别测定力矩器两侧测试点的位移响应,两路信号的差值即代表了力矩器的倾角大小信息,送入动态信号分析仪 35670A 进行处理,得到倾斜方向的动

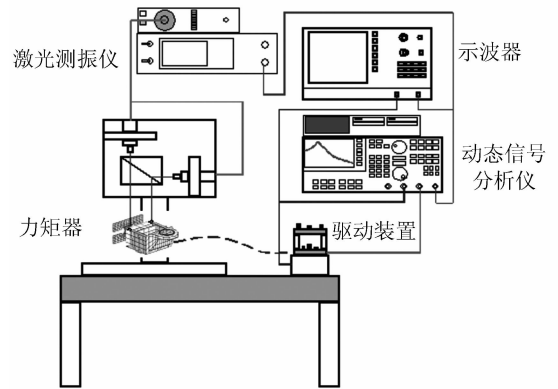


图 8 三维力矩器高次谐波测试平台

Fig. 8 High-order resonance test platform for three-axis actuator

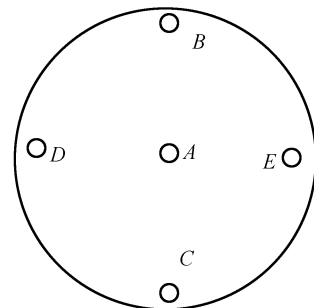


图 9 物镜上 5 个测试点

Fig. 9 Five test points on objective lens

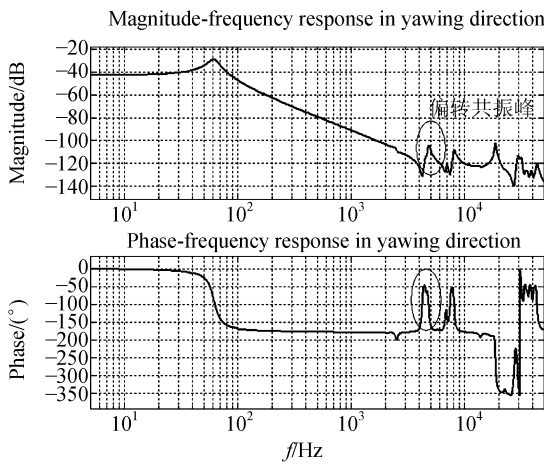
态特性曲线。如图 9 所示,在物镜上选择 ABC-DE 共 5 个对称的测试点,分别测定 5 个点的聚焦方向的动态响应曲线,得到数据如下:

$$\begin{aligned}
 G_D(f) &= A_D(f) \angle \varphi_D(f) \\
 G_E(f) &= A_E(f) \angle \varphi_E(f)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

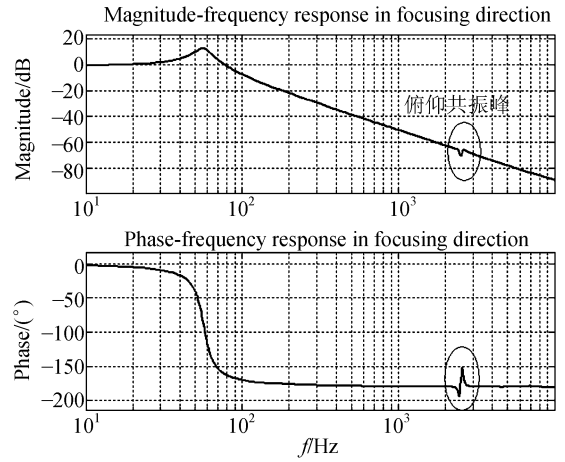
其中, A_D 、 φ_D 、 A_E 、 φ_E 分别为 D 和 E 点的幅值响应和相位响应。物镜绕 Z 轴转动角度(即俯仰特性)可以由 D 和 E 点在聚焦方向的复数位移的差值得到, 即

$$\theta(f) = \frac{(A_D \cos \varphi_D - A_E \cos \varphi_E) + i(A_D \sin \varphi_D - A_E \sin \varphi_E)}{2r} \quad (10)$$

循迹方向上的高次谐振可用类似方法进行处理, 对存在磁铁装配误差的力矩器进行高次谐振特性测试所得的曲线如图 10 所示。循迹方向上在 4 800 Hz 左右存在偏转共振, 聚焦方向上在 1 700 Hz 左右存在俯仰共振, 这与有限元计算结果是一致的。



(a) 循迹方向上出现的高次谐振
(a) High-order resonance in tracking direction



(b) 聚焦方向上出现的高次谐振
(b) High-order resonance in focusing direction

图 10 高次谐振测试曲线

Fig. 10 High-order resonance test curves in three-axis actuator

5 结 论

本文根据光学头三维悬线式力矩器的实际受力状况构建了低转角运动耦合模型, 揭示了高次谐振的产生机理和特征, 并基于有限元分析计算了可动部的模态振型, 结合高次谐振测试平台, 指出在聚焦方向上存在 1 700 Hz 左右的俯仰共振, 在循迹方向上存在 4 800 Hz 左右的偏转共振。

为了有效抑制高次谐振的发生, 需有效减小驱动力中心、可动部质心的不一致性, 可通过提高三维悬线式力矩器各组件特别是磁铁和轭铁的装配精度来保证。

参考文献:

- [1] HUANG L, GONG M L, JIA W P, *et al.*. Movement dynamics analysis for an optical pickup head lens actuator in a digital versatile disc system [J]. *Chinese Physics*, 2002, 11(9): 932-939.
- [2] NAGASATO M, HOSHINO I. Development of two-axis actuator with small tilt angles for one-piece optical heads [J]. *Jpn. J. Appl. Phys*, 1996, 35: 392-397.
- [3] 徐端颐. 光盘存储系统设计原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
XU D Y. *Principle and Design of Optical Storage Systems* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [4] 张布卿, 马建设, 潘龙法, 等. 用有限元和灵敏度分析法改善光学头力矩器高频动态特性 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1002-1008.
ZHANG B Q, MA J SH, PAN L F, *et al.*. The study of improving the high frequency dynamic performance of the actuator in the optical pickup with the finite element and sensitivity method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1002-1008. (in Chinese)

- [5] PARK K, SEO J, WANG S. Flux leakage effect on subsidiary resonance of optical disk drives [J]. *IEEE Trans. Magn.*, 1999, 35(5):3676-3678.
- [6] 王延凤,李书功,谢涛. 谐波齿轮传动柔轮有限元力学分析及结构参数改进[J]. 光学精密工程, 2005,13(增):92-96.
WANG Y F, LI SH G, XIE T. Finite element mechanics analysis of flexspline in harmonic driver and improvement of structural parameter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.):92-96. (in Chinese)
- [7] 王雷,谭久彬,刘玉涛. 超磁致伸缩体内涡流效应有限元分析[J]. 光学精密工程, 2006,14(3): 110-114.
WANG L, TAN J B, LIU Y T. Analysis on eddy current effect in giant magnetostriction with finite element method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3): 110-114. (in Chinese)

作者简介:张布卿(1982—),男,河南新野人,清华大学博士研究生,主要从事光学头多维力矩器动态性能的设计研究;E-mail: bq-zhang05@mails. tsinghua. edu. cn

潘龙法(1946—),男,清华大学光盘国家工程研究中心主任,研究员,博士生导师,主要研究领域为光存储、微细工程与精密机械。E-mail: panlf@omnrc. edu. cn

(本栏目编辑 李树军)

《超声电机技术与应用》新书介绍

超声电机是在 20 世纪 80 年代迅速发展和应用起来的、基于压电效应和超声振动的一种新型微电机。它突破了传统的电磁效应电机原理,具有力矩/质量比大、结构紧凑、低速大扭矩、响应快、电磁兼容性和控制性能好等突出优点,已在机器人、精密仪器仪表、医疗器械,航空航天及新型武器装备等领域得到广泛的应用。

我国振动理论和应用学术界的知名专家、中国科学院院士赵淳生教授及其团队是我国超声电机技术研究领域最主要的开拓者之一,他们把我国的超声电机技术推进到国际先进水平,受到世界各国科技工作者的重视和关注,并曾获得"2004 年国家技术发明二等奖"。

赵淳生院士及其科研团队对十多年来从事超声电机技术研究进行了总结和提炼,撰写成《超声电机技术与应用》一书,并将于 2007 年 9 月由科学出版社出版发行。该书贯穿着科学发展观和自主创新的指导思想,从振动和波动理论出发,全面而系统地阐述了超声电机的运动机理、机电耦合模型、结构参数优化设计和驱动与控制技术,总结和提出了超声电机的系统的理论和方法,以及著者在实验研究和工程应用方面所做的大量工作和积累的经验。

该书共分 16 章。书中首先概略叙述了超声电机的发展;其次详细地叙述了现有各类超声电机的运动机理,设计、制造和试验技术,驱动和控制技术,以及超声电机在工程中的应用;书中扼要叙述了驻波和行波理论、摩擦和超声电机用的摩擦材料和压电材料等基本知识,为深入学习超声电机技术提供了必要的理论基础。

该书毫无保留地将这一高新技术介绍给广大正在从事或将要从事超声电机研究的人员和读者,希望对从事超声电机或作动器的科研、设计和应用的工程技术人员,高等院校精密工程或精密驱动等相关专业的研究生、博士生教学用书。我们也希望该书的出版将促进我国超声电机技术的发展与应用,也为世界超声电机技术的发展做出积极的贡献。

附:1.《超声电机技术与应用》:

页码:588 页

装帧:纸面精装

插页:12 页(彩色图片)

定价:98.00 元

2. 联系方式

联系人:段博原(责任编辑)

电 话:010-6403 3891

E-mail: gk@mail. sciencep. com

地 址:北京东黄城根北街 16 号

邮 编:100717