

文章编号 1004-924X(2007)07-1002-07

# 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

张布卿,马建设,潘龙法,汝继刚  
(清华大学 光盘国家工程研究中心,北京 100084)

**摘要:**在分析了力矩器高频共振机理的基础上,通过有限元仿真分析,研究了影响力矩器高频动态特性的因素。采用有限元仿真和灵敏度分析相结合的方法找出各影响因素的贡献率,优化了结构设计参数。结果表明:聚焦和循迹方向的二阶共振频率分别提高了6.6%和17.5%,明显提高了力矩器的高频动态性能。该方法可以广泛应用于其它优化设计领域。

**关键词:**光学头;力矩器;高频动态特性;灵敏度分析法;有限元仿真

**中图分类号:**TP333.4 **文献标识码:**A

## Improvement of high frequency dynamic performance of actuator in optical pickup by finite element and sensitivity methods

ZHANG Bu-qing, MA Jian-she, PAN Long-fa, RU Ji-gang

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

**Abstract:** After analysis on the high frequency resonance mechanism of a actuator in optical pickup, the effect of parameters on the high frequency dynamic performance are studied by Finite Element Emulation(FEE). The FEE together with the sensitivity analysis method are used to analyze structure parameter's contributions to the second order resonance frequency, and then the structure is optimized. The result shows that the second resonance frequencies in the focusing and tracking directions are increased by 6.6% and 17.5% respectively, thus the dynamic performance of the lens actuator in high frequency is improved obviously. The method can also be used in other optimum design fields.

**Key words:** optical pickup; actuator; high frequency dynamic performance; sensitivity analysis method; finite element emulation

## 1 引言

力矩器是光学头系统的核心元件,它根据聚焦和循迹误差信号,实时地驱动物镜运动,使得聚焦光斑能够克服光盘的起伏振动或者其它因素造成的光斑在盘片聚焦和轨迹方向的偏移,从而精确地落在光盘的信息轨道上,实现高质量的数据读写。作为光盘系统的读写执行机构,力矩器的动态特性直接决定了整个光学头系统的性能。

有限元分析方法用于求解系统响应,已被广泛应用到结构、热学、流体等领域<sup>[1-3]</sup>。灵敏度分析是指对系统性能因设计变量或参数的变化表现出来的敏感程度的分析。这里,敏感程度即灵敏度通常用导数信息来表示,在基于梯度设计的优化过程中,它常为目标函数相对于设计变量的导数,这些导数信息反映了设计变量的改变对目标函数的影响。对灵敏度信息加以分析处理,可用于确定系统设计变量对目标函数的影响大小,指导设计与搜索方向、辅助决策<sup>[4]</sup>。有限差分(Finite Differences, FD)是一种用于估算灵敏度的较常用的近似方法,通过变量摄动的方式计算灵敏度信息,对函数形式无明确要求。这一特点使有限差分法既能对一般函数求导,也可对子程序封装的隐函数求导,在求导过程中对目标函数采用“黑箱”方式,使该方法的开发时间短,简单易行,所以在工程优化实践中得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。

本文首先根据力矩器动态特性有限元仿真实验给出影响其二阶共振频率的主要结构参数和各自的影响效果,然后用仿真实验和FD分析法相结合对二阶共振频率进行优化设计并给出最终设计参数,最后给出提高力矩器高频动态特性的一些有效途径。

## 2 影响力矩器二阶共振的主要结构参数

如图1所示,由物镜、物镜架、聚焦/循迹线圈和悬线组成的可动部是力矩器运动的主体。在

低频下,它是一个典型的弹簧—阻尼—质量块的二阶系统,其固有频率(一阶共振频率)主要由悬线的刚度和可动部的质量决定。但是,高频时在

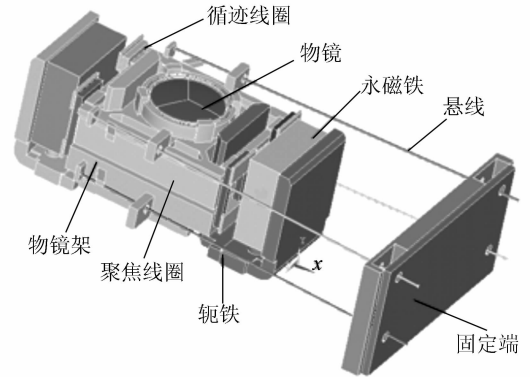


图1 四悬线式物镜力矩器的结构示意图

Fig. 1 Structure of 4 suspension wire lens actuator

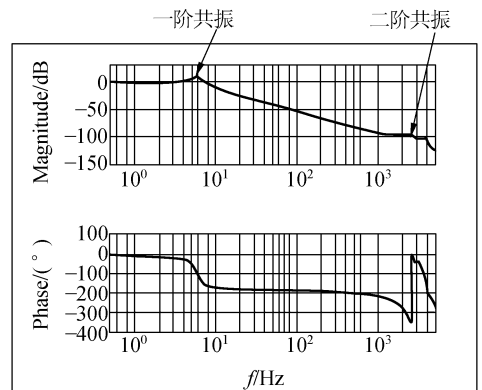


图2 聚焦方向上的幅频和相频测试曲线

Fig. 2 Plots of dynamic response in focusing direction

交变电流作用下产生的电磁力会激发包括聚焦/循迹线圈在内的物镜架的弹性振动。当高频激励作用力的频率接近弹性体的共振模态频率时,会出现弹性共振,影响物镜光学中心的位移响应,于是在高频段产生弹性共振峰,如图2所示的二阶共振。从一阶共振到二阶共振的起始频率范围称为力矩器的工作带宽,带宽越大,线性区越大,可控制性越好,工作性能越稳定。增大系统的伺服稳定性是力矩器设计的最重要的要求之一。随着光盘存储容量的增加和数据传输速度的提高,特别是蓝光高密度光盘系统需要更高的二阶共振频率和较低的二阶共振峰值以建立性能优良的伺服系统<sup>[6-7]</sup>。

随着数据传输率的提高,力矩器系统对响应快速性的要求越来越高,从而要求力矩器获得较大的磁场力并降低可动部的总质量。为了有效降低质量,力矩器物镜架的结构设计越来越复杂,同时产生的一个重要问题就是结构的刚度偏低,导致弹性模态频率偏低。提高结构的刚度最简单的方法就是选用弹性模量更大、密度更小的材料,但这受到实际材料和生产成本的制约很难改变。另一种可以提高结构刚度的方法就是调整物镜架的结构设计,在尽量减小对其余特性影响的情况下增大物镜架的刚度,从而达到提高二次共振频率、改善高频特性的目的。

本文用力矩器的有限元模型进行仿真,研究局部结构变化对高频动态特性的影响。以目前非常流行的某款悬线式 DVD 力矩器(结构如图 1 所示)为研究对象,其聚焦方向高频特性较好,二次共振频率在 30 kHz 以上,而循迹方向高频特性相对较差,仅为 18 kHz。因此,本文重点关注其循迹方向的频率特性改进,同时兼顾聚焦方向。

选择力矩器结构改变部位的基本过程为:

(1)首先对力矩器的物镜架组件进行模态分析,得到其各阶模态频率以及相应的模态振型。

(2)仔细观察对比每阶模态的振型,选择对物镜光学中心的振动影响贡献度大的模态。

(3)研究所选择模态的振型,从中找出应变能最大的部位,可以认为这些部位是引起该种振动的相对薄弱部位。

(4)针对结构薄弱部位,设计相应的结构加强方式,应注意尽量减小结构变动所带来的质量增加,并注意分配不同部位的质量分布,防止可动部的质心位置发生大的变化。

(5)针对不同的结构改变量,研究力矩器高频动态特性的变化规律。

采用上述步骤,通过模态分析(如图 3),发现应变能最集中的部位分布在物镜架 Z 方向(光盘径向)侧面的下部、X 方向(光盘切向)侧面的上部和下部,从中选择了五个位置对其进行刚度增强。图 4 给出了所有待改变位置的示意图,其中图 4(a)为物镜架上半部分的结构改变位置,图 4(b)为物镜架下半部分的结构改变位置。

通过有限元仿真,我们分别对五个结构参数

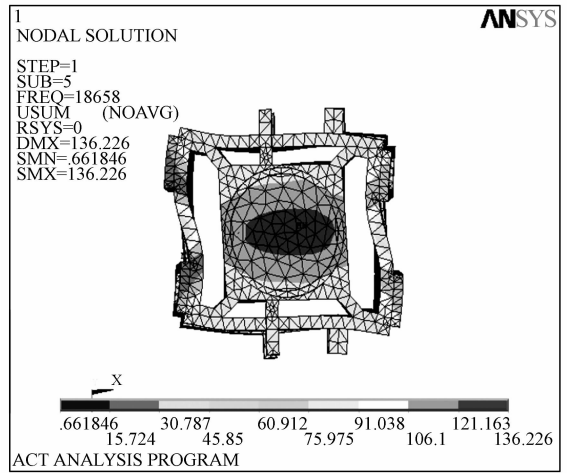


图 3 物镜架的有限元振动模态分析

Fig. 3 Finite element vibration mode analysis of lens holder

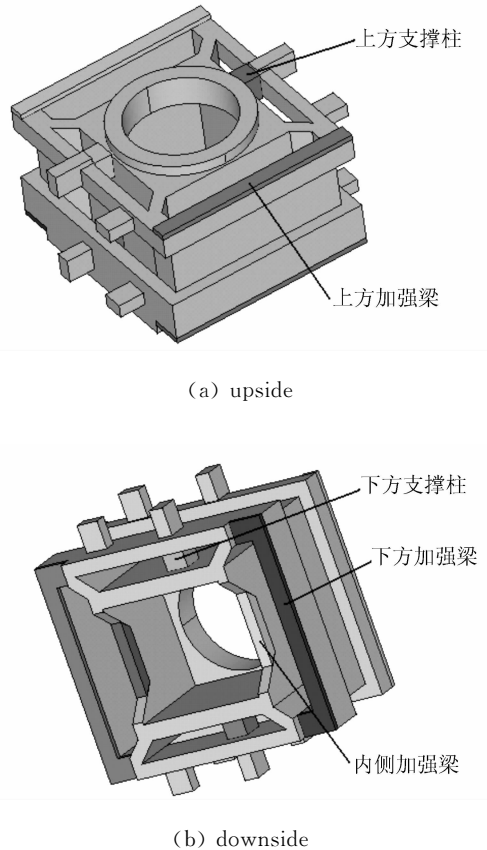
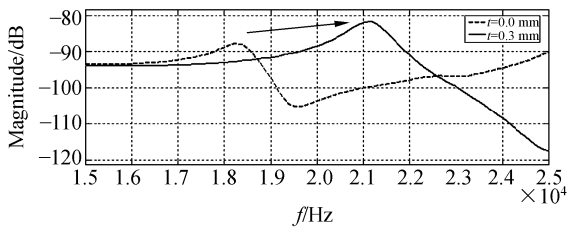


图 4 物镜架的结构调整位置示意图

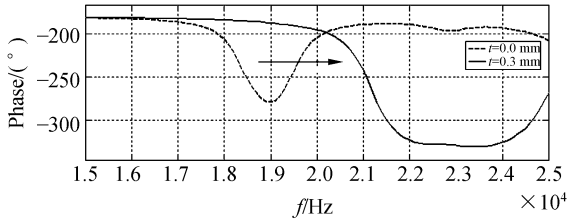
Fig. 4 Adjustive position for lens holder

在其设计空间内进行了二阶共振频率移动实验,图 5~9 即为单独改变某一参数所得到的循迹方向上的特性移动曲线。可以看出它们对二阶共振频率的增加都有贡献,只是贡献率不同。



(a)循迹方向的幅频响应

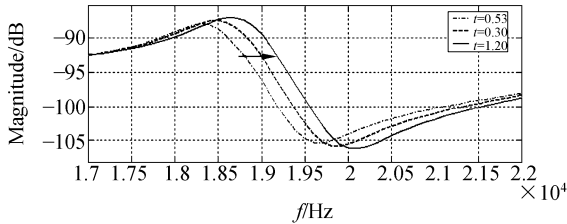
(a) Magnitude-frequency response in tracking direction



(b)循迹方向的相频响应

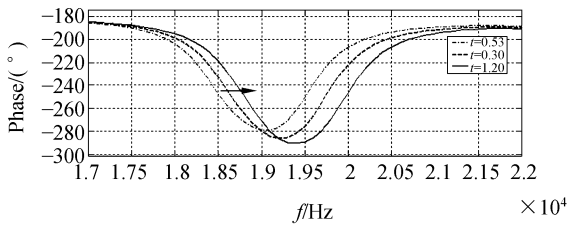
(b) Phase-frequency response in tracking direction

图 5 上方加强梁高度对循迹方向二阶共振的影响  
Fig. 5 Influence of height of upper strengthening beam on the 2nd resonance in tracking direction



(a)循迹方向的幅频响应

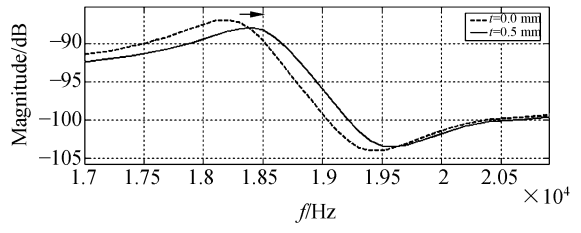
(a) Magnitude-frequency response in tracking direction



(b)循迹方向的相频响应

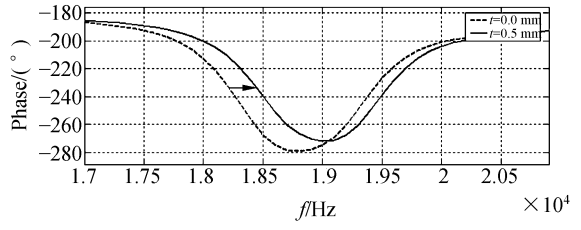
(b) Phase-frequency response in tracking direction

图 6 上方支撑柱宽度对循迹方向二阶共振的影响  
Fig. 6 Influence of width of upper supporting bar on the 2nd resonance in tracking direction



(a)循迹方向的幅频响应

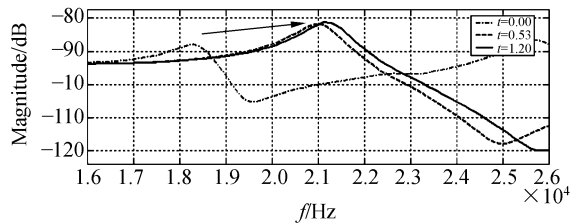
(a) Magnitude-frequency response in tracking direction



(b)循迹方向的相频响应

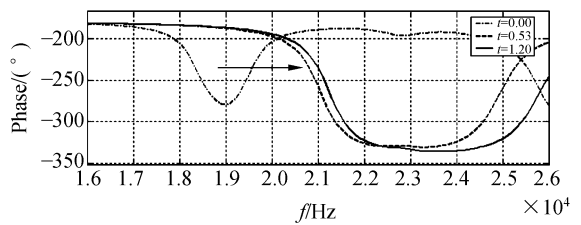
(b) Phase-frequency response in tracking direction

图 7 下方加强梁高度对循迹方向二阶共振的影响  
Fig. 7 Influence of height of lower strengthening beam on the 2nd resonance in tracking direction



(a)循迹方向的幅频响应

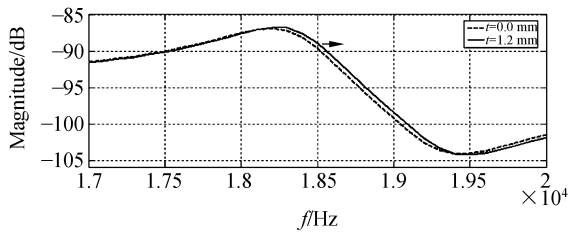
(a) Magnitude-frequency response in tracking direction



(b)循迹方向的相频响应

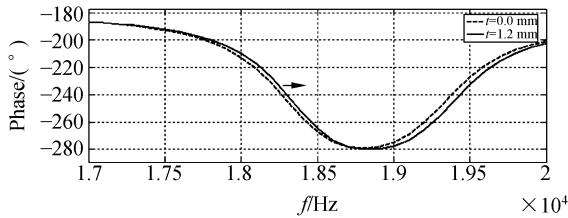
(b) Phase-frequency response in tracking direction

图 8 下方支撑柱宽度对循迹方向二阶共振的影响  
Fig. 8 Influence of width of lower supporting bar on the 2nd resonance in tracking direction



(a) 循迹方向的幅频响应

(a) Magnitude-frequency response in tracking direction



(b) 循迹方向的相频响应

(b) Phase-frequency response in tracking direction

图 9 内侧加强梁高度对循迹方向二阶共振的影响

Fig. 9 Influence of height of inside strengthening beam on the 2nd resonance in tracking direction

### 3 采用灵敏度分析方法改善力矩器的高频动态特性

#### 3.1 灵敏度分析原理

本文将有限元仿真方法和灵敏度分析相结合,对于设计变量  $X_i$  的改变,用有限元法计算系统特性的变化,从而得到灵敏度。基本步骤如下:

(1) 选取设计变量  $X$ 。计算差分

$$\Delta X = X_e - X_c, \quad (1)$$

其中,  $X_e$  为优化设计中设计变量的目标值,  $X_c$  为设计变量的当前取值。

(2) 确定目标量  $\phi$ 。此处为仿真得到的力矩器的二次共振频率,其差分

$$\Delta \phi = \phi_e - \phi_c, \quad (2)$$

其中,  $\phi_e$  为优化设计中目标量的目标值,  $\phi_c$  为当前取值,即由  $X_c$  通过有限元仿真得到的二次共振频率。

(3) 建立灵敏度矩阵。设计变量  $X$  对二次共振频率的一阶灵敏度矩阵表示为:

$$S = \frac{\Delta \phi}{\Delta X} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \phi_1}{\Delta X_1} & \frac{\Delta \phi_1}{\Delta X_2} & \cdots & \frac{\Delta \phi_1}{\Delta X_m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\Delta \phi_s}{\Delta X_1} & \frac{\Delta \phi_s}{\Delta X_2} & \cdots & \frac{\Delta \phi_s}{\Delta X_m} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,  $m$  和  $s$  分别为设计变量和目标量的个数,此处  $m=5$ ,分别为五种局部结构设计的尺寸,  $s=2$ ,表示聚焦和循迹方向的二次共振频率。

(4) 得到设计变量的变化量  $\Delta X$ 。

$$\begin{aligned} \Delta X &= S^{-1} \Delta \phi & s &= m \\ \Delta X &= S^T (SS^T)^{-1} \Delta \phi & s &< m, \\ \Delta X &= (S^T S)^{-1} S^T \Delta \phi & s &> m \end{aligned} \quad (4)$$

将变化量加到设计变量上,有

$$X_{i+1} = X_i + \alpha \Delta X, \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  为权重因子,通常  $\alpha < 1$ 。

对上述过程重复进行迭代,直到  $\Delta X$  小于设定的收敛准则。通过合适的  $\alpha$  的选择,保证迭代过程的收敛性。

#### 3.2 使用灵敏度分析法改善力矩器的高频动态特性

使用上述方法来确定物镜架结构调整的组合方案。设计变量取为上方结构梁的高度、上方支撑柱的宽度、下方加强梁的高度、下方支撑柱的宽度和内侧加强梁的高度,其初始值和设计约束的取值范围列于表 1。

设计的目标量取为聚焦方向的二次共振频率和循迹方向的二次共振频率,使二次共振频率在聚焦方向增大 2 kHz,在循迹方向增大 3 kHz。由上述对各个因素的影响分析,可得到二次共振频率对设计变量的灵敏度矩阵,数值列于表 2。权重因子  $\alpha=0.10$ 。

表 1 设计变量的初始值和最大值

Tab. 1 Initialization values and maximum values for design parameters

设计变量	初始值	最大值
上方结构梁的高度(mm)	0.00	0.50
上方支撑柱的宽度(mm)	0.53	1.50
下方加强梁的高度(mm)	0.00	0.65
下方支撑柱的宽度(mm)	0.00	1.50
内侧加强梁的高度(mm)	0.00	1.47

表 2 二次共振频率对设计变量的灵敏度矩阵

Tab. 2 Sensitivity matrix for the 2nd resonance frequency to design parameters

	变量 1	变量 2	变量 3	变量 4	变量 5
聚焦频率	1.333	0.010	0.400	0.010	0.500
循迹频率	9.667	0.597	0.400	2.333	0.010

经过迭代,最终得到的各设计变量取值列于表 3。应用这些结构调整以后,使用有限元仿真得到新的聚焦和循迹方向二次共振频率,改进前后的对比列于表 4,可以看出分别提高了 6.6%和 17.5%,聚焦和循迹方向的动态特性曲线对比分别如图 10、11 所示。调整后的可动部总质量为 322 mg,比设计前仅增大了 2.1%,对低频动态特性的影响可忽略。

表 3 设计变量的最终取值

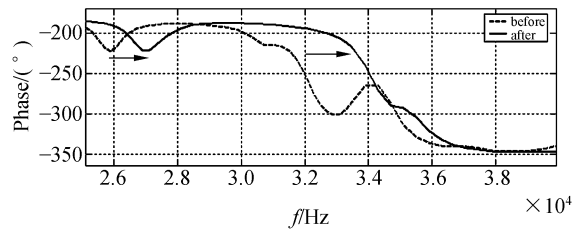
Tab. 3 Final values for design parameters

	变量 1	变量 2	变量 3	变量 4	变量 5
取值(mm)	0.20	0.80	0.15	0.80	0.30

表 4 二次共振频率的初始值和结果值

Tab. 4 Initialization values and optimized values for the 2nd resonance frequency

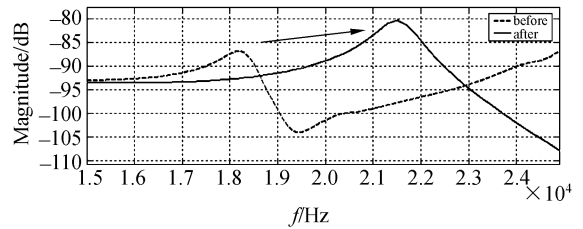
目标量	初始值	结果值	提高比例
$\phi_1$ : 聚焦方向二次共振频率(kHz)	32.0	34.1	6.6%
$\phi_2$ : 循迹方向二次共振频率(kHz)	18.3	21.5	17.5%



(b) 聚焦方向的相频响应

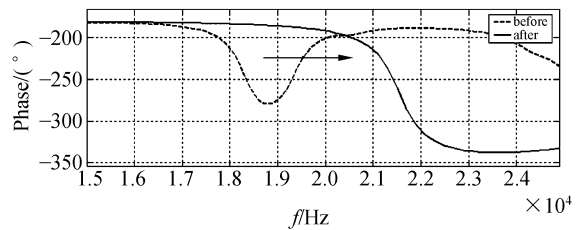
(b) Phase-frequency response in focusing direction

图 10 物镜架调整前后的聚焦方向高频动态特性对比  
Fig. 10 Comparison of the dynamic performance in high frequency in focusing direction before and after adjustment



(a) 循迹方向的幅频响应

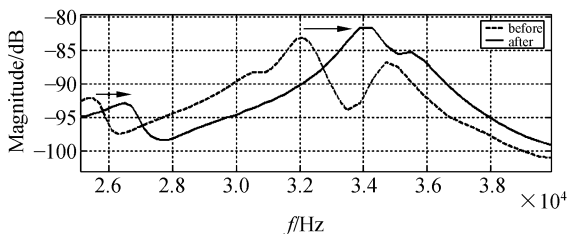
(a) Magnitude-frequency response in tracking direction



(b) 循迹方向的相频响应

(b) Phase-frequency response in tracking direction

图 11 物镜架调整前后的循迹方向高频动态特性对比  
Fig. 11 Comparison of the dynamic performance in high frequency in tracking direction before and after adjustment



(a) 聚焦方向的幅频响应

(a) Magnitude-frequency response in focusing direction

## 4 结论

通过有限元仿真与灵敏度分析法相结合,有效地进行了光学头力矩器物镜架结构设计参数的优化选择,使物镜力矩器的聚焦、循迹二阶共振频率分别由 32 kHz、18.3 kHz 增加到 34.1 kHz、21.5 kHz,提高比例分别为 6.6%和 17.5%,从而明显改善光学头力矩器的高频共振特性。据此,可以提出以下提高力矩器高频动态特性的有

效途径:(1)对物镜架薄壁结构增加厚度或加局部支撑;(2)对变形集中区增加肋板等以增加弯曲刚度;(3)对过于细小的连接部位增大尺寸以增加扭

曲刚度;(4)严格控制增加的质量,同时注意质量分布保持质心不变。

该方法同样适用于其它优化设计领域。

### 参考文献:

- [1] 孙立宁, 马立, 荣伟彬, 等. 一种纳米级二维微定位工作台的设计与分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 71-76.  
SUN L N, MA L, RONG W B, *et al.*. Design and analysis on a 2-DOF nanopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 71-76. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 潘振宽, 丁洁玉, 高磊, 等. 多体系统动力学动态最优化设计与灵敏度分析[J]. 力学学报, 2005, 37(5): 611-619.  
PAN ZH K, DING J Y, GAO L, *et al.*. Dynamic optimization of multibody system dynamics and design sensitivity analysis [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, 37(5): 611-619. (in Chinese)
- [5] 颜力, 陈小前, 王振国. 飞行器多学科设计优化中的灵敏度分析方法研究[J]. 航空计算技术, 2005, 35(1): 1-6.  
YAN L, CHEN X Q, WANG ZH G. The study of sensitivity analysis in the multidisciplinary design optimization of flying vehicles [J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2005, 35(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] PARK K H, CHOI C H, RYU J. Hybrid actuator for high speed and high precision optical disk drives [J]. *Mechanics II*, 2001: 527-543.
- [7] CHOL I H, CHUNG W E. Compact disk/digital video disk (cd/dvd)-compatible optical pickup actuator for high density and high speed [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, 37: 2189-2196.

作者简介: 张布卿(1982—), 男, 河南新野人。清华大学博士研究生, 研究方向为光存储技术, 主要从事 DVD、HD DVD、Blue-Ray 光学头中力矩器动态性能的设计研究。E-mail: bq-zhang05@mails. tsinghua. edu. cn