

基于响应面法的交叉簧片铰链微位移机构优化设计

魏传新^{1,2,3}, 陈洪达^{2,3}, 尹达一^{1,2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 为提升一种新型交叉簧片柔性微位移机构的动力学性能, 采用响应曲面优化分析对微位移结构参数进行多目标优化设计。首先建立机构的 FEA 参数化模型, 分析机构的工作原理, 利用 ANSYS 对微位移机构进行动力学分析; 确定微位移机构的性能指标参数; 采用内切中心复合设计法建立响应曲面模型, 确定优化设计参数; 以交叉铰链簧片厚度作为优化设计变量, 前三阶频率作为目标函数, 微位移刚度作为约束函数, 采用非线性二次规划算法建立多目标参数优化模型, 在优化推荐的三个最优解中进行修正, 得到最终的设计方案。比较优化前后微位移机构的性能指标, 在机构刚度不变的情况下, 一阶频率提升 80%, 二、三阶频率提升 4%。研究得出以下结论, 簧片厚度对微位移机构动力学性能影响呈正相关, 且不同节点处簧片厚度影响不同, 采用该优化设计方案有效提升了机构的动力学性能。

关键词: 交叉簧片柔性铰链; 响应曲面; 内切中心复合设计; 非线性二次规划算法; 优化设计
中图分类号: TH702 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1018005

Optimization design of cross-spring compliant micro-displacement mechanism based on RSM

Wei Chuanxin^{1,2,3}, Chen Hongda^{2,3}, Yin Dayi^{1,2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: To achieve dynamic performance improvement of the cross-spring compliant micro-displacement magnifying mechanism (CMDMM), response surface methodology (RSM) was used to optimize the structure parameters for multi-objective analysis. Firstly the parametric analysis FEA model was built, and the working principle of the mechanism was analyzed. Having analyzed the kinematics, dynamics with the ANSYS software, the design performance parameters of the mechanism were determined. The standard response surface were established adopting the inscribed central composite designs methods, and the optimize parameters were extracted. The 8 groups of cross-spring thicknesses were selected to be the design variables. The former three steps natural characteristics were taken as optimal objective. The stiffness of the mechanism was used as the constraint function. A multi-objective

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

作者简介: 魏传新(1989-), 男, 博士生, 主要从事空间遥感设备的精密光机系统设计工作。Email: ls_wcx@163.com

导师简介: 尹达一(1976-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光电遥感技术方面的研究。Email: yindayi@mail.sitp.ac.cn

optimization design was proposed by Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian (NLPQL) method. Three candidate points were given after thousands iterations. One best candidate point was chose to be corrected as the final design point. The whole optimization program was established from all above steps. Compared the former three steps natural frequency of vibration before and after optimization, the first order frequency raised by 80%, the second and third orders become more than 4% increase. From those discussions above, a positive correlation between the thickness of the cross-spring and the dynamic performance can be concluded. It also showed that the thicknesses from different kinematic pairs had different effects on the dynamic. The response surface methodology was effective in dynamics optimization design.

Key words: cross-spring pivot; response surface methodology; inscribed central composite designs; NLPQL; optimization design

0 引言

微位移机构主要工作在高精密运动场合,在空间精密光束指向、深空光通信、超精密加工与测量以及微机械制造等领域^[1-3]有广泛应用,它可以提供微米、纳米量级的运动输出。由于其具有体积小、运动精度高、响应速度快、动态性能好等特性要求,传统的接触式运动副已不能满足。柔性元件具有无摩擦、无间隙、无噪声、运动精度高等优点,现在微位移机构设计中多采用柔性元件作为运动关节。

柔性环节作为整个运动机构的核心部件,其厚度、宽度、半径尺寸等结构特性参数对整个微位移机构的运动响应影响非常大,例如提高柔性元件的厚度,可以提高机构刚度以及动态特性,同时必须适配更高的驱动力。因此为了提高整个机构的综合性能指标,需要根据其静态特性以及动态特性均衡要求,对所有性能参数进行合理的多目标优化。

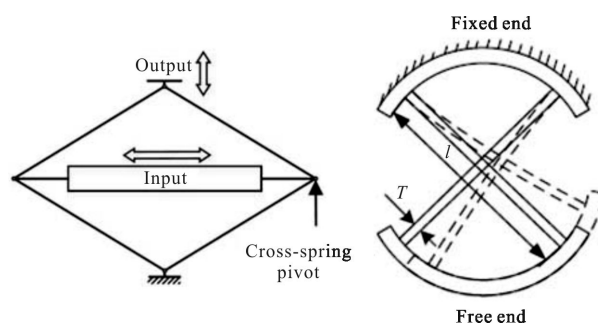
响应面法是指通过近似构造一阶或两阶隐式多项式来替代显式状态函数,进行多次迭代调整满足精度要求的一种计算方法。在有限元分析设计中,响应面法减少了有限元的完整迭代次数,大大降低了有限元计算量,具有很高的工作效率^[4]。响应面法考虑了试验随机误差,所获得的模型是连续的,它在试验条件寻优过程中可以连续的对试验参数进行各个水平的分析^[5]。相比正交试验设计与均匀试验设计,响应面法得到的回归方程精度更高,可以得出多种相关因素的交互作用等优点,并且响应面法能够将优化过程延伸到面域,相比其他点对点的优化方

法具有更显著的三维立体效果。同时响应面法能够减少最佳条件下的试验偏差,具有明显的优势^[6]。

文中以一种新型的八铰同轴微位移机构为研究对象^[7],该机构应用于空间光束指向领域,使用交叉簧片铰链作为柔性元件,将菱形节点作为集中柔度点,形成集中柔度柔性机构。集中柔度处的簧片结构参数直接影响整个机构的动力学性能,由于整个机构簧片数目较多,通过建立微位移机构的响应面模型对其动态性能参数进行优化研究,确定对机构动力学响应最敏感的簧片参数,并进行多簧片厚度的优化设计,提高机构的动力学性能。

1 微位移机构设计原理

整个机构为菱形构型,如图 1(a)所示,呈对称布局,采用图 1(b)所示的交叉簧片柔性铰链作为柔性



(a) 微位移放大机构工作原理 (b) 柔性铰链运动分析示意图
(a) Working principle of CMDMM (b) Sketches of two-end fixed cross-spring pivot

图 1 微位移机构示意图

Fig.1 Structure diagram of CMDMM

元件(其中 T 为簧片厚度, l 为弯曲簧片长度), 分别布置于菱形结构的四个节点处, 每个节点分别布置两个铰链, 两个铰链同轴布置, 分别连接同一节点处的两个连接杆。

该机构所有的柔性元件都集中在菱形的四个顶点上, 采用八个分布柔度转动副-交叉铰链, 由于此类柔性元件的商品化的机械接口较少, 出于实际工程的考虑, 设计采用商品化的双端固定交叉簧片柔性铰链接口。

微位移平台的作动机构为安装在水平对角线位置的压电陶瓷, 当压电陶瓷作动时, 引起竖直对角线发生伸缩运动。促动器作动时, 相邻的两个连接杆相相对其对称运动, 此时两个同轴的转动副相对菱形对角线产生的扭矩大小相等, 方向相反, 合力矩为零, 工作过程始终不对促动器以及上、下支撑座产生任何扭转, 保证促动器工作过程中不受任何剪切应力, 并且上、下底座运动保持设计方向不发生变化。

2 微位移机构的性能指标分析

动力学优化设计的一个主要目的是避免共振, 在外界振动环境保持不变的情况下, 要首先提升微位移机构的固有频率。对于单独工作的微位移放大机构, 一阶固有频率是主要的频率响应点, 对于多个组合的微位移机构, 可以通过不同的布局方式限制其一阶振型, 此时, 二、三阶固有频率是主要的振动响应点。因此, 为了提升机构的动力学响应性能, 应优化微位移机构的前三阶特征频率。

此外, 微位移机构的放大倍数、结构刚度等也是体现机构整体性能的核心指标。

微位移机构的运动步长受到压电作动器分辨率以及机构放大比的约束。根据图 2 所示的设计原理,

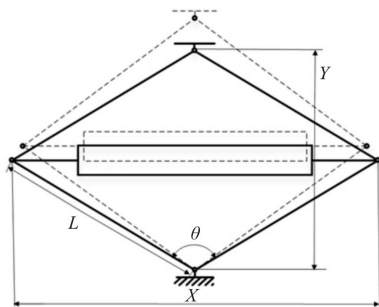


图 2 微位移机构运动参数示意图

Fig.2 Construction parameters of the CMDMM

该微位移的运动放大比为 $-\tan \frac{\theta}{2}$, 其中 θ 为菱形机构的竖直方向上的夹角。

为了兼顾机构运动量程和分辨率, 机构的放大比一般选择 1/3~3, 该设计结构中, 压电陶瓷的运动精度为 0.6 nm, 量程为 60 μm , 此处选择微位移机构的放大比为 1.67, 即菱形机构的夹角约为 118°, 则整个微位移机构的运动精度为 1 nm, 机构量程为 100 μm 。对于装配完成的微位移机构来说, 机构的放大倍数已经由计算确定, 一般不做优化调整。

微位移机构的刚度是指单位水平驱动力作用下竖直方向上产生的位移。交叉簧片结构尺寸为整个微位移机构的核心结构参数, 簧片的结构参数决定了整个机构的特性参数。

该交叉簧片柔性微位移机构刚度为:

$$K = \frac{180 \sum_1^4 c_i}{\pi L^2 \sin \theta} \quad (1)$$

$$c_i = \frac{EbT^3}{6l} \quad (2)$$

式中: c_i 为第 i 个节点处的铰链扭转刚度; T 为簧片厚度; b 为簧片宽度; E 为材料弹性模量; l 为簧片长度; L 为菱形结构边长。

当簧片厚度均为 1.1 mm 时, 经计算, 此时整个微位移结构的刚度为 20.28 N/mm。

由于微位移机构工作的空间环境比较复杂, 空间平台上颤振频率主要集中在 0~20 Hz^[8], 为了满足微位移平台能够应用于空间平台上这一要求, 微位移的设计基本频率必须大于 20 Hz。经过仿真分析及扫频试验测试(如图 3 所示), 微位移结构的前三阶频率表 1 所示。

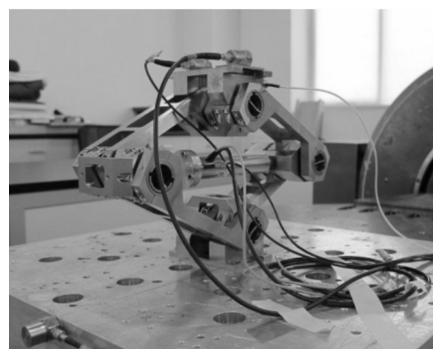


图 3 微位移机构扫频试验

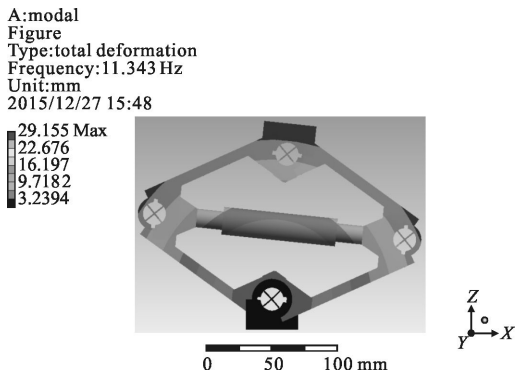
Fig.3 Sweep-frequency test of the CMDMM

表 1 微位移机构前三阶频率

Tab.1 First three orders frequency of CMDMM

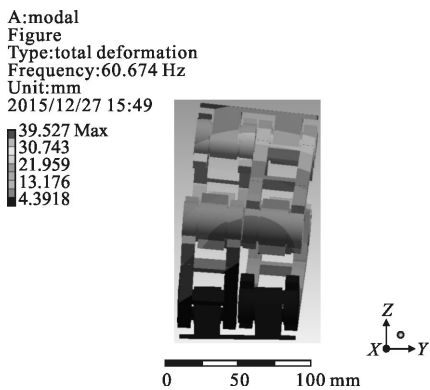
Mode	1	2	3
Frequency/Hz	11.343	68.674	106.61

由图 4 所示的振型可知,一阶振型主要为绕底



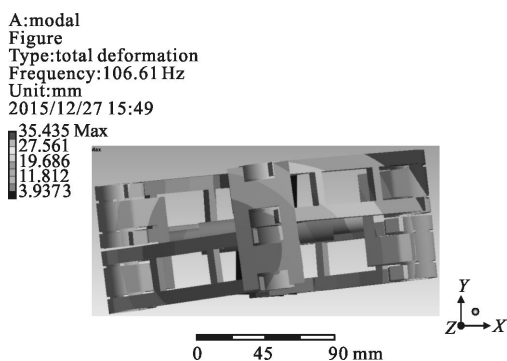
(a) 微位移机构一阶振型

(a) First order mode vibration modes of CMDMM



(b) 微位移机构二阶振型

(b) Second order mode vibration modes of CMDMM



(c) 微位移机构三阶振型

(c) Third order mode vibration modes of CMDMM

图 4 微位移机构前三阶振型图

Fig.4 First three vibration modes of CMDMM

较铰链转动,二阶振型主要为微位移机构的前后侧摆,三阶振型主要为微位移机构绕竖直 Z 轴方向的转动。为了增大微位移机构的工作带宽,需提高机构的前三阶特征频率。

3 基于响应面法的优化设计

3.1 优化设计流程

微位移机构的放大倍数体现了微位移机构的运动灵敏度以及量程范围,刚度体现了弹性变形的能力,前三阶特征频率则体现了结构的振动响应能力。当机构设计完成后,放大倍数随着驱动机构的灵敏度以及运动范围确定,对于选定好的微位移机构,在驱动力一定的前提下,优化设计前三阶频率最高的机构。

根据图 5 流程图所示,使用软件建立机构的三维参数化 CAD 模型,根据机构的设计原理确定合理的结构设计参数,将参数化模型导入 ANSYS,转化为 CAE 模型,对样机 CAE 模型进行模态分析,在响应面分析模块进行合理的参数区间设计,选取合适的试验点,建立所有设计点的曲面响应模型。根据响应面灵敏度确定优化参数。根据最终确定的设计变量建立目标函数、边界函数,进行多目标优化,并采用非线性二次规划算法^[9](NLPQL)进行优化,在可行区域内获得最优解集。

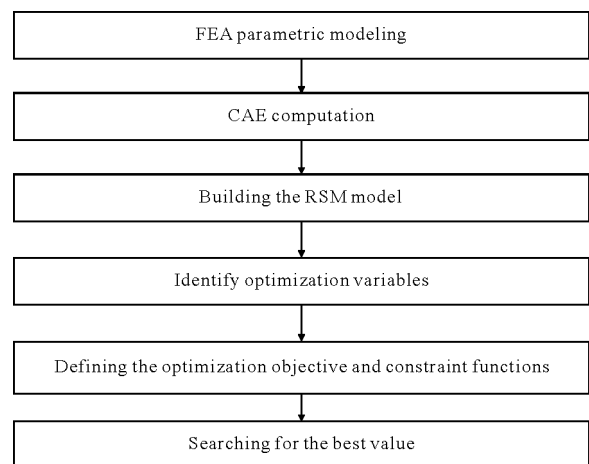


图 5 微位移机构优化设计流程图

Fig.5 Optimization design flow chart of CMDMM

3.2 建立响应面模型

3.2.1 确定初始设计变量

对于已经设计完成的机构构型,考虑设计的互

换性,其进一步的优化设计应保证具有相同规格的机械接口。因此对于交叉簧片柔性铰链来说,簧片厚度参数是主要的优化设计变量,优化设计前后,铰链机械接口规格以及其他结构参数均保持不变。

由于每个柔性铰链具有三个独立簧片,整个机构具有 24 片簧片,簧片均采用壳单元进行建模,其他部分均采用实体单元;将实体模型导入 ANSYS,在 modal 中将簧片厚度、前三阶频率进行参数化,共产生 24 个输入参数,三个输出参数。为了保证结构运动的对称性,设计过程中,每一个节点处的两个铰链刚度相等,且水平对角线两端的四个铰链刚度相等。因此,整个微位移结构具有三种厚度, t_1, t_2, t_3 分别对应竖直对角线底铰两个铰链六片簧片厚度、顶铰两个铰链六片簧片厚度、水平对角线两节点四个铰链 12 片簧片厚度。微位移机构刚度 K ,前三阶特征频率为 f_1, f_2, f_3 。初始设计中,整个微位移机构所采用的八个柔性铰链均为同一规格,其厚度 $t_1=t_2=t_3=1.1\text{ mm}$ 。所有铰链的机械接口保持不变。

3.2.2 选取试验点

试验点的选取对整个优化模型的正确性具有关键性的意义^[10],此处采用中心复合试验设计法(Central Composite Design,也称为星点设计),它主要是在两水平析因设计的基础上加上极值点和中心点构成, F 为析因设计部分试验次数:

$$F=2^k \tag{3}$$

式中: k 为因素数。

极值点分布在轴向上,也称为轴向点、始点。两水平析因设计只能用于线性考察,为了满足多因素线性拟合,需要增加极值因素,一般用坐标表示为: $(\pm\alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm\alpha)$ 。其中 α 的选取依赖设计域与操作域,具有多种选择,一般取 $1\sim\sqrt{k}$,对于 k 个因素的模型极值点共有:

$$S=2k \tag{4}$$

中心点也称为设计中心,为设计零位,位于图形中间的点。

常用的中心复合试验设计法一般有三种,外切中心复合设计、内切中心复合设计以及面心立方设计。其中内切中心复合设计具有较好的一致精度和可旋转性,并且具有最优的外推稳健性,因此优化设计选择内切中心复合设计方法。内切中心复合设计的界限评估值为 $[-1, -1/a, 0, 1/a, 1]$,对于可选择的

中切中心复合设计, $\alpha=2^{k/4}$,当 $k=3, \alpha=1.682$ 。簧片厚度选择区间为 $[0.4, 2]$,故其界限评估值为 $[0.4, 0.724\ 32, 1.2, 1.675\ 7, 2]$ 。

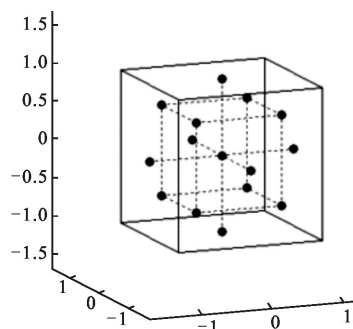


图 6 优化设计点分布示意图

Fig.6 Design points distribution sketch

因此该次优化设计共有 $N=2^k+2k+1=15$ 组设计点,如表 2 所示。

表 2 15 组优化响应点

Tab.2 15 optimal experimental response points

No.	P1/mm	P2/mm	P3/mm
1	1.2	1.2	1.2
2	0.4	1.2	1.2
3	2	1.2	1.2
4	1.2	0.4	1.2
5	1.2	2	1.2
6	1.2	1.2	0.4
7	1.2	1.2	2
8	0.724 32	0.724 32	0.724 32
9	1.675 7	0.724 32	0.724 32
10	0.724 32	1.675 7	0.724 32
11	1.675 7	1.675 7	0.724 32
12	0.724 32	0.724 32	1.675 7
13	1.675 7	0.724 32	1.675 7
14	0.724 32	1.675 7	1.675 7
15	1.675 7	1.675 7	1.675 7

3.2.3 二次响应面模型回归分析

模型分析中通常采用多项式来表示响应面模型,二阶标准响应面模型是 ANSYS 中默认的元模型,其方程式为:

$$F_n(T)=a_0+\sum_{i=1}^3 a_i t_i+\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^i b_{ij} t_i t_j+R \tag{5}$$

式中： a_0, a_i, b_{ij} 均为待定系数，其个数 $P = \frac{(3+1)(3+2)}{2} = 10$ ； t_i 为模型设计变量，即为簧片厚度； $f_n(T)$ ， $(n=1, 2, 3)$ 为整个机构的前三阶响应频率输出值； R 为模型 $f_n(T)$ 响应噪声或者误差。

在响应面分析中，首先要得到准确的回归方程模型。对于模型的评估能力，多采用 R^2 (判定系数)、 R_a^2 (修正判定系数) 和 σ_{RMSE} (均方根误差) 来评价^[11]：

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (6)$$

$$R_a^2 = \frac{SSE / (N - P - 1)}{\frac{SST}{(P - 1)}} \quad (7)$$

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (F_i - f_i)^2}{L} / \frac{\sum_{i=1}^L F_i}{L}} \quad (8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^L (F_i - f_i)^2 \quad (9)$$

$$SST = \sum_{i=1}^L F_i^2 - (\sum_{i=1}^L f_i)^2 / L \quad (10)$$

针对上述三个设计参数的 15 个设计点进行回归分析，得到一个如图 7 所示的相应曲面，表 3 给出了该曲面模型的拟合优度值。

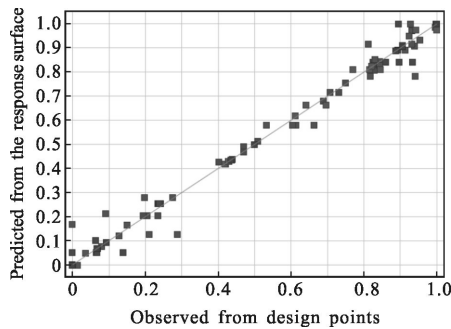


图 7 优化设计拟合优度曲线图

Fig.7 Goodness of fit curve of the response points

表 3 优化设计拟合优度值

Tab.3 Goodness of fit for the optimization

	The first frequency	The second frequency	The third frequency
R^2	1	0.971 1	0.995 88
R_a^2	1	0.966 29	0.994 23
σ_{RMSE}	0.013 589	1.395 9	0.708 8

通过表 3 可以看出，该回归模型对于前三阶频率具有极高的拟合度。

在模型分析中，设计变量参数对于模型回归分

析的拟合度以及运算效率有着不同影响，设计变量 t_i 相对优化目标 f_i 的影响的强弱可以用灵敏度曲线来表示。灵敏度^[12]定义为：

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^3 \frac{\partial f(T^*)}{\partial x_i} \rho_{ij} \sigma x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial f(T^*)}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f(T^*)}{\partial x_j} \rho_{ij} \sigma x_i \sigma x_j \right]}} \quad (11)$$

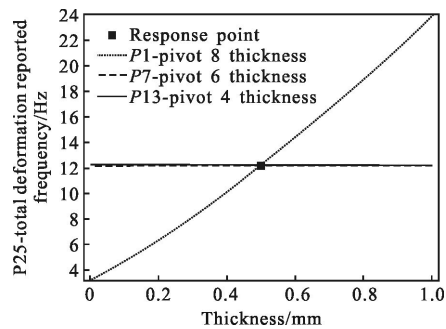
式中： β_i 表示第 i 个设计变量对回归响应函数标准差的相对贡献，同时也反映了个设计变量对回归模型影响的相对强弱。公式(11)中， $\sum_{i=1}^3 \beta_i^2 = 1$ 。

对于研究中的回归模型响应灵敏度曲线分别如图 8(a)~8(c)所示。

由三条曲线可以看出：微位移机构底铰对于一阶扭转频率响应十分敏感，顶角簧片厚度以及水平铰簧片厚度影响近乎为零。

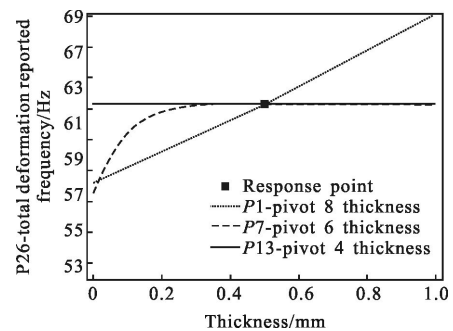
底铰簧片厚度对于二阶、三阶频率呈线性响应，灵敏度值相对一阶频率减小。

顶铰簧片厚度对于二阶频率在小于 0.35 mm 时呈指数响应，簧片厚度大于 0.35 mm 时响应近乎为零；对于三阶频率在小于 0.5 mm 时呈指数响应，簧片厚度大于 0.5 mm 时响应近乎为零。



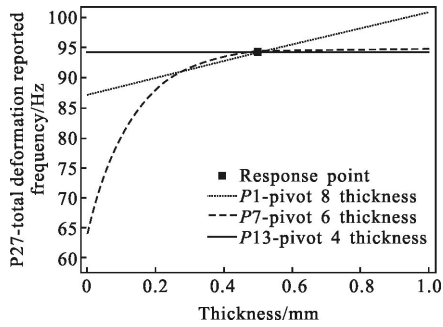
(a) 一阶频率灵敏度曲线

(a) First order frequency local sensitivity curve



(b) 二阶频率局部灵敏度曲线

(b) Second order frequency local sensitivity curve



(c) 三阶频率局部灵敏度曲线

(c) Third order frequency local sensitivity curve

图 8 响应点灵敏度曲线

Fig.8 Local sensitivity curve of the response points

水平位置四个铰链对于前三阶频率响应均较低。故底铰簧片厚度对于整个前三阶频率优化具有显著影响。

3.3 基于非线性二次规划算法的多目标优化

非线性二次规划算法(NLPQL)属于梯度优化算法的一种,由克劳斯提出,主要用于解决非线性约束的数学规划问题,核心算法采用二次连续规划法。

$$\text{Minimize: } f=f(\{x\}) \quad (12)$$

Subject to:

$$g_m(\{x\}) \leq 0, \forall k=1, 2, 3, \dots, M \quad (13)$$

$$h_n(\{x\}) \leq 0, \forall l=1, 2, 3, \dots, N$$

where

$$\{x_L\} \leq \{x\} \leq \{x_U\} \quad (14)$$

假设目标函数 f 、约束函数 g_m 、 h_n 均连续可微,算法主要思想为通过二阶近似的拉格朗日算法以及线性约束条件生成二次规划子问题序列,算法的二阶项通过类牛顿算法更新,整个算法的稳定性通过一维的线搜索(Armijo 条件)来保证。

优化目标为一阶频率尽可能大,目标函数为:

$$\text{Minimize: } f=f(\{t_1, t_2, t_3\}) \quad (15)$$

对于该优化设计中,约束函数为整个微位移机构的刚度,以保证微位移机构的驱动机构保持不变,微位移机构中的共使用八个簧片厚度为 1.1 mm 的柔性铰链,微位移机构的刚度为 20.28 N/mm,则约束函数为:

$$g_m(\{x\})=K-20.28 \quad (16)$$

优化设计共有 1000 个评估点,产生 1014 个样本集,经过迭代优化选出三组最优设计点,如表 4 所示。

表 4 候选最优设计点

Tab.4 Final candidate optimization points

Parameter variable	Condidate point 1	Condidate point 2	Condidate point 3
t_1/mm	1.542	1.581 6	1.452
t_2/mm	0.921 11	0.846 11	1.258 6
t_3/mm	0.694 9	0.460 75	0.476 2
f_1/Hz	18.573	19.275	17.029
f_2/Hz	72.317	72.208	71.966
f_3/Hz	106.12	103.57	110.42
$K/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	19.54	18.12	20.10

综合比较所推荐的三个参考点,第二个参考点具有更高的一阶频率和较高的二、三阶频率,因此选择第二个参考点参数作为设计变量。为满足簧片厚度参数的实际加工需求,第二组设计变量进行修正,由于微位移机构在第二组候选点尚有余量,且根据图 8 可知,簧片厚度 t_1 对一阶频率具有最高的敏感度,因此适当修正簧片厚度 t_1 ,如表 5 所示。

表 5 优化前后设计点对比

Tab.5 Design points before and after optimization

Design variable	Optimizing initial value /mm	Optimal value /mm	Corrected value /mm
t_1/mm	1.1	1.581 6	1.65
t_2/mm	1.1	0.846 11	0.85
t_3/mm	1.1	0.460 75	0.46

将修正设计变量参数代入模型进行进一步的仿真分析,可以得出优化后的前三阶机构频率,将优化前后的频率进行比对,如表 6 所示。可以看出,在整个机构刚度基本保持不变(减小 0.16%)的前提下,一阶频率指标提升 80%,优化效果显著,二、三阶频率均提升超过 4%。

表 6 优化前后设计指标对比

Tab.6 Comparative parameters performance before and after optimization

Index parameter	Initial value	Optimal value	Indicator performance
f_1/Hz	11.343	20.505	80.8%
f_2/Hz	68.674	71.532	4.2%
f_3/Hz	106.61	111.73	4.8%
$K/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	20.28	20.25	-0.16%

为提升系统工作带宽,仅关心一阶频率的大小,可将一阶频率 f_1 作为优化目标,目标函数即为:

$$\text{Minimize: } f_1=f(\{t_1, t_2, t_3\}) \quad (17)$$

约束函数保持不变,则最优结果如表 7 所示。

表 7 一阶频率优化设计参数点

Tab.7 First order frequency optimal design point

Parameter variable	Initial value	Corrected value	Candidate point 3
t_1/mm	1.1	1.668	1.7
t_2/mm	1.1	0.555 49	0.5
t_3/mm	1.1	0.500 3	0.5
f_1/Hz	11.343	20.603	21.213
$K/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	20.28	19.29	20.15

可以看出,在驱动力保持不变的前提下,整个微位移机构一阶频率最高为 21.21 Hz。

当该机构单独作为微位移放大机构使用时,需要尽可能提高其一阶频率,当具有多个微位移机构组合使用时,机构的前两阶频率均可以用多个组合方式进行抑制,提升整套微位移机构的运动带宽。

4 结 论

采用交叉簧片柔性铰链的微位移机构属于集中柔度柔性机构,具有可靠的放大比和稳定的结构刚度,由于其结构设计相对复杂,动力学响应因素繁多,通过响应面法进行优化设计分析,可以得出以下结论:

(1) 交叉铰链柔性微位移机构的结构刚度与簧片厚度的三次方成正比关系,簧片厚度增加会显著提升机构的动力学性能。

(2) 不同节点处的簧片厚度分布对微位移机构的自身结构频率影响不同,其中菱形机构的底铰簧片厚度对机构的一阶响应频率影响最大。

(3) 采用响应面法的优化设计可以有效地提升机构性能,在驱动力与结构刚度保持不变的情况下,一阶频率可以提升 80%,二、三阶频率可以提升 4% 以上,具有显著的实际工程意义。

参考文献:

[1] Bhagat U, Shirinzadeh B, Clark L, et al. Design and analysis of a novel flexure-based 3-DOF mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 74(6): 173-187.

[2] Liu Hua, Liu Weiqi, Feng Rui, et al. Novel design and analysis of a flexible mechanism of moving mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 184-189. (in Chinese)
柳华, 刘伟奇, 冯睿, 等. 新型全柔性动镜机构的设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 184-189.

[3] Fang Chu, Guo Jin, Xu Xinhang, et al. Design of three DOFs flexure support for FSM driven by piezoelectric ceramics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2987-2994. (in Chinese)
方楚, 郭劲, 徐新行, 等. 压电陶瓷驱动 FSM 三自由柔性支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2987-2994.

[4] Jiang Shuihua, Li Qingdian, Fang Guoguang. A comparative study of response surface method and stochastic response surface method for structural reliability analysis [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, 45 (1): 46-53. (in Chinese)
蒋水华, 李庆典, 方国光. 结构可靠度分析的响应面法和随机响应面法的比较[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45 (1): 46-53.

[5] Wang Shuxin, Li Jinglin, Zhang Fan, et al. Optimization of large aperture space reflector based on RSM[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 291-297. (in Chinese)
王书新, 李景林, 张帆, 等. 响应面模型的大口径空间反射镜优化[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 291-297.

[6] Cheng Jingli, Zheng Min, Lou Jianqing. Comparison of several common optimal experimental design methods [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2012, 31(7): 7-11. (in Chinese)
程敬丽, 郑敏, 楼建晴. 常见的试验优化设计方法对比[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(7): 7-11.

[7] Wei Chuanxin, Chen Hongda, Yin Dayi. Design of spatial compliant micro-displacement magnifying mechanism based on the cross-spring flexural pivot [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3168-3175. (in Chinese)
魏传新, 陈洪达, 尹达一. 基于交叉簧片柔性铰链的空间微位移机构[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3168-3175.

[8] Lee S, Alexander J W. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [C]//SPIE, 2000, 3932: 150-157.

[9] Yu Xudong, Gao Na, Tang Jianxun, et al. Optimization design of mounting case of the mechanically dithered ring laser gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010,

- 39(4): 680–685. (in Chinese)
- 于旭东, 高娜, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺安装盒优化设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 680–685.
- [10] Hu Junfeng, Xu Guiyang, Hao Yazhou. Multi-objective optimization of micro-manipulation stage based on response surface method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1096–1104. (in Chinese)
- 胡俊峰, 徐贵阳, 郝亚洲. 基于响应面法的微操作平台多目标优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1096–1104.
- [11] Jiang Heng, Guan Yisheng, Qiu Zhicheng, et al. Dynamic and static multi-objective optimization of a vertical machining center based on response surface method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(11): 125–133. (in Chinese)
- 姜衡, 管贻生, 邱志成, 等. 基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 125–133.
- [12] Peng Maolin, Yang Zichun, Cao Yueyun, et al. Reliability robust design optimization based on response method [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28 (8): 1784–1790. (in Chinese)
- 彭茂林, 杨自春, 曹跃云, 等. 基于响应面法的可靠性稳健设计优化[J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1784–1790.