

文章编号 1004-924X(2015)04-1096-09

## 基于响应面法的微操作平台多目标优化

胡俊峰\*, 徐贵阳, 郝亚洲

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 为了提高微操作平台的操作空间和动态性能, 基于响应面法对一种新型微操作平台进行了多目标优化设计。采用中心组合设计方法选取仿真试验点, 根据试验点建立平台的参数化几何模型, 应用软件 ANSYS 对平台进行静力学和模态分析得到其固有频率、位移放大倍数和最大应力的响应值。根据所得的仿真试验数据, 采用最小二乘法和显著性检验建立反映平台性能指标的二阶多项式响应面模型。最后, 计算了反映响应面拟合度的评价指标, 验证了所建响应面模型的精确性。以微操作平台的放大倍数和固有频率为优化目标, 强度为约束, 建立了平台的多目标优化模型, 采用多目标遗传算法对平台进行优化得到 Pareto 解集。从 Pareto 解集可知, 固有频率与放大倍数之间是相互冲突的, 故需权衡固有频率和放大倍数从 Pareto 解集选取最优解。比较优化前后平台的各性能指标可知, 平台的固有频率增大了 35.58%, 放大倍数增大了 2.33%, 最大应力减小了 38.97%, 证明了提出的优化方法的有效性。

**关键词:** 微操作平台; 中心组合设计; 响应面法; 多目标遗传算法

**中图分类号:** TH703; TP274 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.1096

## Multi-objective optimization of micro-manipulation stage based on response surface method

HU Jun-feng\*, XU Gui-yang, HAO Ya-zhou

(School of Mechanical & Electrical Engineering,  
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

\* Corresponding author, E-mail: hjfsuper@126.com

**Abstract:** To improve the operating space and dynamic characteristics of micro-manipulation stages, the multi-objective optimization design was performed for a new micro-manipulation stage based on response surface method. The central composite design method was used to select test points and the parametric geometric modeling of the stage was built based on the test points. The software ANSYS was used to carry out statics and modal analysis to obtain the response values of natural frequency, displacement amplification ratio and the maximum stress of the stage. Then, the least square method and the test of significance were employed to build the two-order polynomial response surface model to reflect the performance index of the stage according to the simulation test data. The evaluation indexes reflecting fitting degree of the response surface were calculated to illustrate the veracity of the proposed response surface model. Furthermore, a multi-objective optimization model of micro-

**收稿日期:** 2014-09-20; **修订日期:** 2014-11-07.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 51265016); 江西省自然科学基金资助项目 (No. 20122BAB216029); 江西理工大学科研基金资助项目 (No. jxxj12050)

manipulation stage was established by taking the displacement magnification and the natural frequency as object functions, the strength as the constraint. The multi-objective genetic algorithm was taken to obtain Pareto solution set. The Pareto solution show that the natural frequency is in conflict with amplification ratio of the stage, so the optimal solution is chosen from Pareto set by weighing the natural frequency and amplification ratio. The comparative analysis of the performance indexes of the stage before and after optimizations shows that the natural frequency and the magnification ratio increase by 35.58 % and 2.33 %, respectively, and the maximum stress decreases by 38.97 %. It illustrate that the proposed optimization method is effective.

**Key words:** micro-manipulation stage; central composite design; response surface method; multi-objective genetic algorithm

## 1 引言

微操作平台被广泛应用于生物工程、医疗、机械制造、超精密加工、集成电路制造、扫描探针显微镜、航空航天等前沿领域<sup>[1-3]</sup>,而这些前沿领域的迅猛发展向微操作平台提出了更高要求,这些要求包括操作速度更快、操作空间更大、动态响应性能更好等<sup>[2]</sup>。柔顺机构通过柔性铰链的变形实现运动和力的传递,具有无摩擦、无间隙、精度高和运动灵敏等优点<sup>[3]</sup>,适用于微操作平台的执行机构。微操作平台既要求大的操作空间又要求快的动态响应,但是平台的操作空间和动态响应性能相互制约。例如,增大柔性铰链的厚度可提高平台的动态响应,但会减小平台的位移放大倍数,缩小其工作空间<sup>[4]</sup>。因此,为了提高平台的整体性能,需要综合平衡其静态和动态性能,对其进行多目标优化。

目前,基于柔顺机构的微操作平台的优化为采用伪刚体法或有限元法建立平台的优化数学模型,根据目标函数对设计变量的导数信息,采用传统优化算法搜索目标函数的极值得到最优解。胡俊峰<sup>[5]</sup>基于伪刚体法以最大化平台工作空间为目标对3自由度精密定位平台进行目标优化;KK Oh<sup>[6]</sup>采用伪刚体法以提高平台精度为目标对微定位平台进行优化;王雯静<sup>[7]</sup>基于有限元法建立柔顺机构动力学模型,为柔顺机构优化提供了理论模型。但是,上述的建模过程复杂,所建立的理论模型精度不高,特别是当机构结构复杂、涉及的设计变量数目较多时,建模工作量较大。由于伪刚体法是将柔性铰链视为传统运动副建立平台的力学模型,该方法适宜于描述其静态力学性能,而

且该方法视铰链为理想铰链,所建立的模型精度低。有限元法是将柔顺机构柔性铰链和杆件划分为按一定方式相互联结的单元,具有多个自由度。该方法描述平台的力学性能精度高,但计算量大,计算效率低,不能得出机构参数与其性能之间的封闭形式的函数关系,不便于进行优化设计。由于微操作平台结构复杂,铰链和杆件数量多,运动和力传递复杂,采用伪刚体法或有限元法均难以建立其精确的封闭形式的理论模型。响应面法(Response Surface Methodology, RSM)是一种采用试验设计理论对指定的设计点集合进行试验,得到优化目标和约束的响应面模型,以预测非试验点响应值的建模方法,具有计算方便,易于迭代等优点<sup>[8-10]</sup>,所以基于该模型的优化可提高平台的优化效率和保证优化结果的精准性。

本文以一种新型的微操作平台为对象,采用试验设计方法建立反映平台静态和动态性能的响应面模型,采用多目标遗传算法对微操作平台进行多目标优化,以满足平台的静态和动态性能要求。

## 2 微操作平台

微操作平台设计原理如图1所示,字母B、C、D、E、H表示铰链,数字I、II、III、IV表示杆件。平台的设计要求为较大操作空间和较快的响应速度。为增大平台操作空间,平台利用差动式杠杆放大原理对输入位移进行二次放大。如图1所示,杆I中点I为输入端,杆IV中点O为输出端,BCDE组成第1个杠杆机构,C为杠杆II的支点,且 $|DE| > |CD|$ ,则E点的位移得到第1级放大。IFEHO组成第二个杠杆机构,输出点O

的位移由两部分组成,一部分是由杠杆机构 II 输出的 E 点位移,再经杠杆机构 III 以 F 点作为支点放大;另一部分是由输入端 I 点传递到 F 点的位移,经杠杆机构 III 以 E 点作为支点放大。由于 1 级放大机构的放大作用使得 E 点与 F 点之间具有位移差,则点 E 的位移形成差动式杠杆第 2 级放大。平台的位移放大是第一级放大和二级放大综合作用的结果。为提高平台动态响应速度,平台采用对称的 4 对直圆型铰链 B、C、D、E 和 1 对直角型柔性铰链 F 相结合的方式实现运动的传递。利用直角柔性铰链 H 作为导向机构,使得杆 III 末端 y 方向的位移能最大限度地传递到输出端,以提高平台的放大倍数。平台采用结构紧凑的对称式结构,以提高其刚度和固有频率。

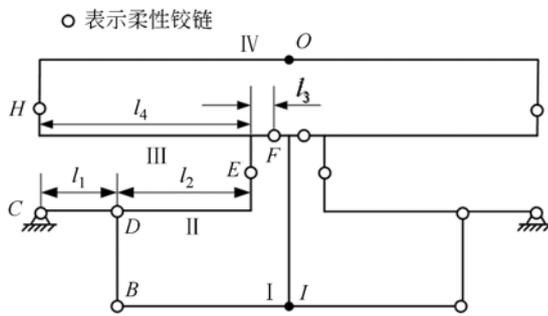


图 1 微操作平台设计原理图

Fig. 1 Design schematic of micro-manipulation stage

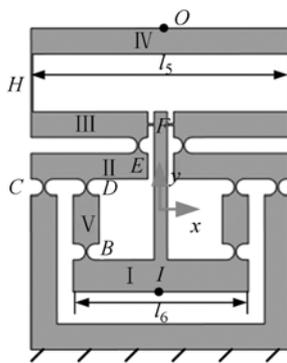


图 2 微操作平台

Fig. 2 Micro-manipulation stage

所设计的一维微操作平台如图 2 所示,当在平台输入端 I 输入一个 y 方向的位移,经杠杆放大机构在输出端 O 输出一个 y 方向的位移。根据平台的设计原理,设定其初始结构参数如表 1 所示, $l_1 \sim l_6$  分别表示图 1 和图 2 所示各杆件的长度, $r, b$  分别为直圆型柔性铰链的半径和宽度,

$l_F, l_H$  分别为直角型铰链 F 和 H 的长度,所有铰链厚度均相同,均为  $t$ 。

表 1 平台的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of the stage (mm)

$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$
13	16	4.7	32.5	54	80
$r$	$b$	$l_F$	$l_H$	$t$	
2.5	12.5	2	18	0.5	

### 3 基于响应面法的优化流程

微操作平台的操作空间和动态响应速度是体现其整体性能的两个重要指标,但由于它们是互相矛盾的,需要采用多目标优化方法找到其平衡点。位移放大倍数反映了平台的操作空间和运动分辨率,固有频率反映了其动态响应的快慢,平台的优化目标为其固有频率和位移放大倍数。基于响应面法的平台优化流程如图 3 所示,首先,采用软件 SolidWorks 建立微操作平台的参数化几何模型,根据平台结构和工作原理确定初始设计变量和变化区间;然后,通过软件 ANSYS 与 SolidWorks 之间的无缝连接接口,将参数化 CAD 模型转化为 CAE 模型,利用 ANSYS 仿真模块对平台的 CAE 模型进行静力学和模态分析,以获得性能指标的响应值;采用中心组合试验设计方法确定试验样本点,根据样本点建立反映平台性

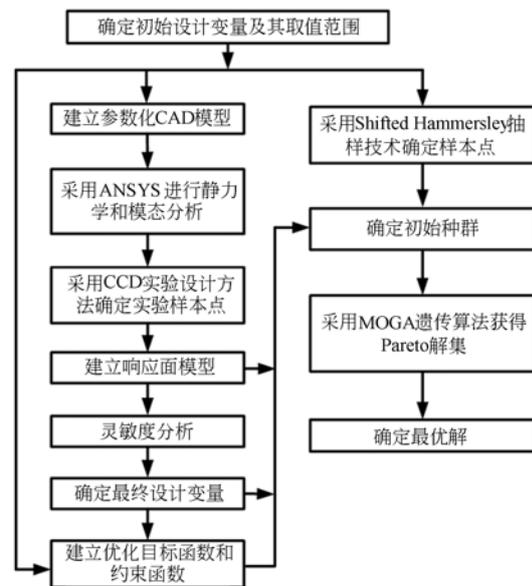


图 3 平台的优化流程

Fig. 3 Optimization process of stage

能指标的响应面模型。最后,分析平台性能指标对初始设计变量的灵敏度以确定最终优化设计变量,根据目标函数、约束函数和最终设计变量建立多目标优化数学模型,运用转移哈默斯利序列抽样技术在可行解区域内抽取均匀分布的样本点。作为遗传算法的初始种群,采用多目标遗传优化算法(MOGA)得到 Pareto 解集。

#### 4 微操作平台的性能分析

为了获得反映微操作平台性能指标的响应面模型,需要得到对应于试验点的响应值,鉴于难以加工出成批的不同尺寸的平台以获得试验数据,本文采用商业软件 ANSYS 对平台进行静力学和模态分析,以获得其仿真试验数据。

微操作平台的放大倍数为其输出端的位移与输入端的位移之比:

$$A = y_o / y_i, \quad (1)$$

式中:  $y_o$  为输出端的位移,  $y_i$  为输入端的位移。

如图 2 所示,根据放大倍数的定义,在输入端 I 施加单位位移,即  $y_i = 1 \mu\text{m}$ ,采用 ANSYS 测量输出 O 端的位移  $y_o$ ,即为平台的位移放大倍数。由于微操作平台为单自由度,采用 ANSYS 进行模态分析获得平台的第 1 阶固有频率即为反映其动态性能的指标。同时,由于基于柔性铰链的微操作平台是利用铰链的变形传递运动和力,最大应力发生在柔性铰链最小厚度处,容易发生断裂。为了保证平台的强度,需要对平台所受的最大主应力进行分析。设平台采用低压叠堆压电陶瓷驱动器驱动,其标称推力为 200 N,当在平台输入端施加 200 N 的输入力时,通过分析平台的应力云图可知,平台最大应力发生在铰链的厚度最小处,则取该点的应力作为强度性能指标。为了提高试验点的精度,平台的有限元模型采用二次实体单元 Solid 95,同时考虑柔性铰链的尺寸较小,铰链处网格密度设为 0.1 mm,其他地方网格密度设为 0.5 mm。材料选用铝合金,其弹性模量为 71 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2 770 kg/m<sup>3</sup>。平台优化前的性能指标如表 2 所示。

表 2 平台的优化前的性能指标

Tab. 2 Performance index of stage before optimization

位移放大倍数	固有频率/Hz	最大应力/MPa
8.17	119.47	215.46

### 5 建立响应面模型

#### 5.1 确定初始设计变量

根据微操作平台的结构和工作原理可知,平台的位移放大倍数和固有频率与结构参数  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 、 $r$ 、 $b$ 、 $t$  和  $l_H$  有关,由于  $l_4$  可由  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $r$ 、 $t$  得到,选用参数  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $r$ 、 $b$ 、 $t$  和  $l_H$  为初始设计变量,设  $\mathbf{X} = (l_1, l_2, l_3, r, b, t, l_H)$  为设计变量列向量,根据表 1 所示的结构参数确定各设计变量的取值如表 3 所示。

表 3 初始设计变量取值范围

Tab. 3 Range of initial design variables (mm)

$l_1$	$l_2$	$l_3$	$r$	$b$	$t$	$l_H$
[10,16]	[13,19]	[3,5,6,5]	[1,8,3,2]	[11,13]	[0,25,0,75]	[10,26]

#### 5.2 试验点的选取

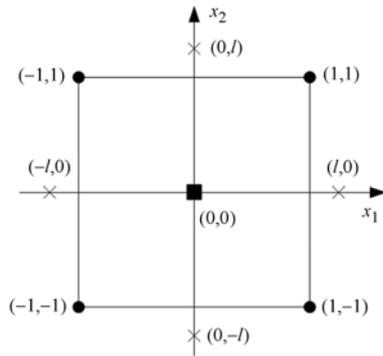
试验点的选取对建立精确的响应面模型至关重要,需选择合适的试验设计方法确定试验点,试验设计方法不仅要保证试验样本点的数目,还要使这些试验点尽量充满整个设计空间。对于微操作平台的优化设计,由于设计变量较多,采用全因子试验设计或正交试验设计等设计方法都会使试验次数较多,计算时间长,本文选取的中心组合试验设计方法(Central Composite Designs, CCD)<sup>[11]</sup>能以最少的试验点建立二阶响应曲面模型,试验样本点则选择 CCD 来获得。

对于  $k$  个因子的中心组合试验设计由 3 类不同的试验点组成:

$$m = m_c + m_r + m_0, \quad (2)$$

式中:  $m_c = 2^{k-\xi}$  ( $\xi$  为析因变量)为各因素均取 2 水平(+1, -1)的析因设计试验点,即沿着输入变量空间对角线所在轴的  $\pm 1$  位置处的点,用于估计响应面模型的一阶项和交互作用项;  $m_r = 2k$  为分布于坐标轴上的星号点,这些点扩展了设计区域,它们与中心点的距离  $l$  为星号臂,调节  $l$  可以得到所期望的优良性;  $m_0$  为各因素均取零水平的试验点即中心点,它提供一致精度和纯误差的估计<sup>[12]</sup>。  $k$  为 2 时试验点分布,如图 4 所示。

因此,CCD 需要的试验点的个数为  $2^{k-\xi} + 2k + 1$ 。由于设计变量数为 7,如果采用全因子试

图 4 CCD 试验点分布 ( $m=2$ )Fig. 4 Distribution of CCD test point ( $m=2$ )

验,析因试验点较多,可忽略某些高阶交互效应,采用 1/2 分式析因设计。同时为使二阶响应面模型中的一阶项系数及交叉项系数可估,试验的分辨率应尽可能高,选用 7 个设计变量水平全为 1 的试验点作为析因设计的试验点,分辨度为  $\text{VII}^{[13]}$ ,则 CCD 试验点数为  $m=2^{7-1}+2\times 7+1=79$ 。为了满足可旋转性要求,取  $l=\sqrt[4]{m_c}=2.828$ 。

### 5.3 响应面模型

为了建立微操作平台的性能指标与设计变量之间关系,利用 ANSYS 得到的平台 79 个试验点对应的固有频率、放大倍数和最大应力的响应值,并根据试验点和响应值建立平台的二阶多项式响应面模型,该模型可表示为:

$$Y_u(\mathbf{X}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^7 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon, \quad (3)$$

式中:  $Y_u(\mathbf{X})$  ( $u=1,2,3$ ) 分别为固有频率  $f$ 、位移放大倍数  $A$  和最大应力  $\sigma_{\max}$ ,  $x_i, x_j$  ( $i, j=1,2,\dots,7$ ) 为设计变量各分量,  $\epsilon$  为随机误差,  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  为未知系数,其中  $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  分别表示为  $x_i$  的线性效应、 $x_i$  的二次效应以及  $x_i$  和  $x_j$  之间的交互作用效应。

式(3)可写为如下的矩阵形式:

$$\mathbf{Y}_u(\mathbf{X}) = \mathbf{D}_u \cdot \mathbf{B}_u + \epsilon_u, \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{D}_u$  为由试验点组成的设计矩阵,  $\mathbf{B}_u$  为未知系数矩阵,它可由最小二乘法估计得到:

$$\mathbf{B}_u = (\mathbf{D}_u^T \mathbf{D}_u)^{-1} \mathbf{D}_u^T \mathbf{Y}_u. \quad (5)$$

由式(5)可得平台的性能指标的响应面模型,对响应面模型进行显著性检验,删除模型中不显著项,得到固有频率、位移放大倍数和最大应力响

应面模型分别为:

$$f = 34.73l_1 + 19.88l_2 - 26.77l_3 - 109.15r + 6413.27t + 13.35l_H - 89l_1t - 33.3l_3b + 0.08l_1l_H - 70.47l_2t + 0.07l_2l_H - 344.77l_3t + 0.29l_3l_H - 41.15tl_H + 7.94l_3^2 + 160.47r^2 + 7373.45t^2 - 3048.45. \quad (6)$$

$$A = 2.95l_2 - 2.34l_1 - 29.32l_3 + 18.23r + 947.99t + 0.35l_H + 3.43l_1t + 2.67l_3r - 4.07l_2t + 54.46l_3t - 52.91rt - 0.64l_3^2 - 1120.87t^2 - 183.73. \quad (7)$$

$$\sigma_{\max} = 0.08l_2 - 0.72l_1 - 18.67l_3 + 24.87r + 944.18t + 0.004l_H + 33.45l_3t - 54.29rt - 916.84t^2 - 209.69. \quad (8)$$

为了评估响应面模型能否精确反映平台的性能指标,采用评价指标复相关系数  $R^2$ 、修正的复相关系数  $R_{\text{adj}}^2$  和平均平方误差  $\sigma_{\text{MSE}}$  检验,其表达式分别为:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{SSE}}{\text{SSY}}, \quad (9)$$

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \left( \frac{m-1}{m-k} \right) \frac{\text{SSE}}{\text{SSY}}, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\text{SSE}}{m}} / \left( \frac{\sum_{i=1}^m Y_i}{m} \right) = \sqrt{\frac{\text{SSE} \cdot m}{(\mathbf{1}^T \mathbf{Y}_u)^2}}, \quad (11)$$

式中:  $\text{SSY}$  为响应值与响应均值差的平方和,  $\text{SSE}$  为响应值与响应估计值差的平方和,  $Y_i$  为对应于各试验点的响应值,  $\mathbf{1}$  为  $m \times 1$  的全为 1 的列向量。

由  $\text{SSY}$  和  $\text{SSE}$  定义可确定其表达式为:

$$\text{SSY} = \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2 = \mathbf{Y}_u^T \mathbf{Y}_u - \frac{(\mathbf{1}^T \mathbf{Y}_u)^2}{m}, \quad (12)$$

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \mathbf{Y}_u^T \mathbf{T}_u - \mathbf{B}_u^T \mathbf{D}_u^T \mathbf{Y}_u, \quad (13)$$

式中:  $\bar{Y}$  为响应值的平均值,  $\hat{Y}_i$  为根据响应面模型得到的响应估计值。

平台的固有频率、放大倍数和最大应力的响应面模型的各项评价指标如表 4 所示,由表 4 可知,固有频率响应面模型的评价指标  $R^2$  和  $R_{\text{adj}}^2$  值接近于 1,而位移放大倍数和最大应力  $R^2$  的  $R_{\text{adj}}^2$  和值均不接近于 1,且  $R^2$  值和  $R_{\text{adj}}^2$  相差较大,说明位移放大倍数和最大应力响应面模型拟合度不

高,且存在对平台性能指标影响不大的设计变量,需要进行灵敏度分析以进一步确定对平台性能指标影响大的设计变量。

表 4 调整前与调整后的评价指标

Tab. 4 Evaluation indexes before adjustment and after adjustment

性能指标	调整前			调整后		
	$R^2$	$R_{adj}^2$	$\sigma_{MSE}$	$R^2$	$R_{adj}^2$	$\sigma_{MSE}$
固有频率	0.967 9	0.965 2	0.044 1	0.992 9	0.992 4	0.113 1
放大倍数	0.803 6	0.787 2	0.035 3	0.990 3	0.989 5	0.093 4
最大应力	0.851 6	0.839 2	0.144 5	0.944 6	0.940 0	0.248 7

### 5.4 灵敏度分析

设计变量的选取对响应面模型的拟合度和计算效率有直接影响,为了提高响应面模型的精度和优化效率,需要对设计变量进行筛选,删除对平台的性能指标影响较小的设计变量。根据 CCD 试验数据,对平台进行灵敏度分析能得到对性能指标影响较大的设计变量。平台的性能指标对设计变量的灵敏度采用 Spearman 相关系数表示<sup>[13]</sup>,根据 79 个试验点数据可计算出固有频率、放大倍数和最大应力对各设计变量的灵敏度分别如图 5(a)、(b)和(c)所示,图中正值表示性能指标与设计变量呈正比关系,负值表示它们之间为反比关系。

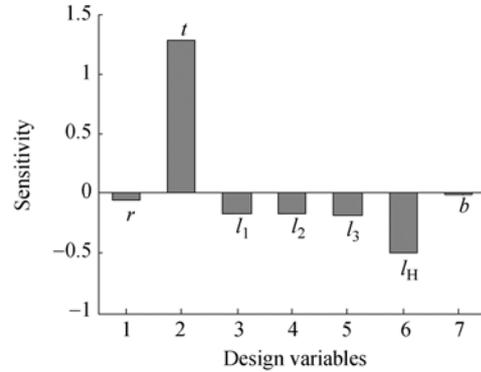
由图 5 可知,对于固有频率,设计变量  $t$  对其影响最大,且成正比关系,变量  $b$  影响很小;对于位移放大倍数,各变量对其灵敏度均比较小,而变量  $b$  对位移放大倍数几乎没有影响;对于平台的最大应力,变量  $t$  对其灵敏度很大且为负,变量  $r$ 、 $b$ 、 $l_H$  对其灵敏度较小。综上所述,变量  $b$  对优化目标的影响相对于其他设计变量来说较小,是导致所建立的响应面模型拟合度不高的主要因素,可将其删除。因此,将变量  $r$ 、 $t$ 、 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_H$  作为下一步优化的设计变量。

根据新的设计变量在 CCD 决策空间中构造出 45 个试验点,并根据其响应值建立新的响应面模型为:

$$f' = 1.99l_1 + 3.87l_2 + 28.5l_3 + 4\ 812.39t - 1.03l_H - 2\ 569.48, \quad (14)$$

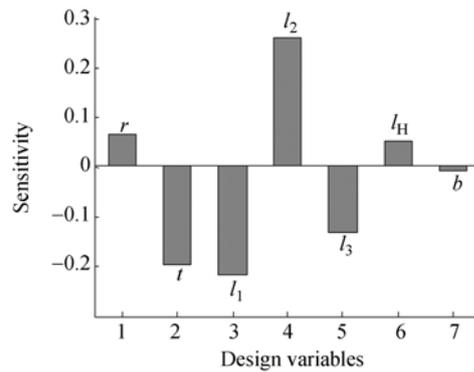
$$A' = 553.29t - 0.18l_2 - 0.17l_3 - 3.68r - 2.07l_1 - 0.01l_H + 22.08l_3t + 0.04l_1^2 - 670.19t^2 - 102.79, \quad (15)$$

调整后的响应面模型评价指标如表 4 所示。由表 4 可知,调整后的所有响应面模型的  $R^2$  和  $R_{adj}^2$  值均接近于 1,且  $\sigma_{MSE}$  较小,说明响应面模型具有高拟合度和高精度性。



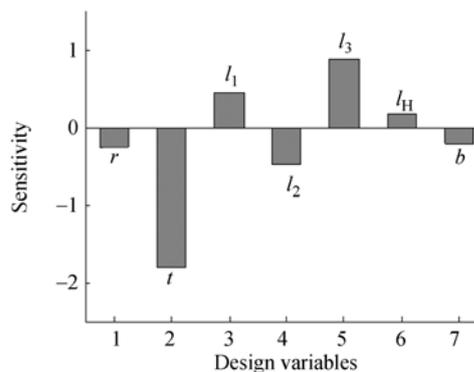
(a) 固有频率对设计变量的灵敏度

(a) Sensitivity of natural frequency on design variables



(b) 放大倍数对设计变量的灵敏度

(b) Sensitivity of amplification ratio on design



(c) 最大应力对设计变量的灵敏度

(c) Sensitivity of maximum stress on design variables

图 5 性能指标对设计变量的灵敏度

Fig. 5 Sensitivity of performance indexes on design variables

### 6 基于遗传算法的多目标优化

优化微操作平台时,希望平台的位移放大倍数和固有频率均尽可能大。根据建立的响应面模型,以微操作平台的位移放大倍数  $A$  和固有频率  $f$  为目标函数,强度为约束函数,建立的平台多目标优化数学模型为:

$$\min F(\mathbf{d}) = \min\{(-f), (-A)\} \text{ s. t. } \sigma_{\max} \leq \sigma_s/n$$

$$d_i \leq d_i \leq \bar{d}_i (i=1, 2, \dots, 6), \quad (17)$$

式中,  $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_6)$ ,  $d_i$  分别为设计变量  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $r$ 、 $t$ 、 $l_H$ ,  $d_i$  为设计变量下限,  $\bar{d}_i$  为设计变量上限,  $\sigma_{\max}$  为最大应力,  $\sigma_s$  为材料的屈服强度,  $\sigma_s$  为 280 MPa,  $n$  为安全系数, 设  $n=2.5$ 。

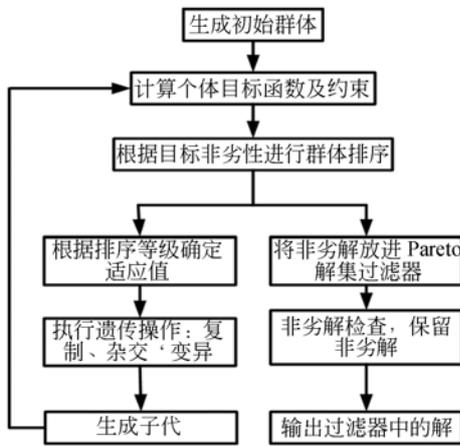


图 6 MOGA 优化过程  
Fig. 6 Optimization process of MOGA

多目标遗传算法(MOGA)能并行处理多个目标,鲁棒性强,本文采用该算法求解该优化问题。MOGA 的优化过程如图 6 所示,首先,采用 Shifted Hammersley 抽样方法在设计空间抽取均匀分布样本点作为遗传算法的初始种群,群体规模为 100;然后,由式(17)计算出个体的目标值和约束值,并根据该目标值进行非劣性的群体排序,由于希望平台的固有频率较大,设固有频率这一目标的排序等级为高,位移放大倍数为低;最后,根据排序结果分两种情况:①如果解不是非劣解,根据其适应值进行遗传迭代,设交叉概率为 0.2,变异概率为 0.07,最大进化代数为 100。②如果解为非劣解,则经过 Pareto 解集过滤器得到 Pareto 解集。

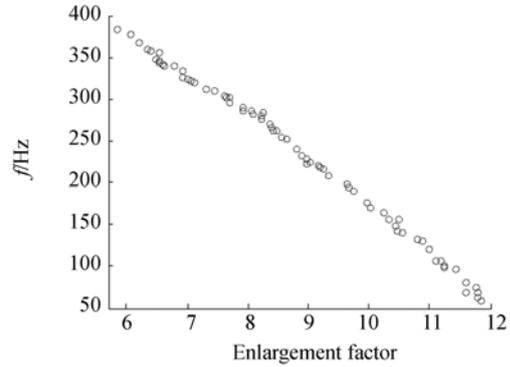


图 7 Pareto 解集  
Fig. 7 Pareto set

图 7 表示微操作平台优化的 Pareto 最优解集,由图可知,固有频率与放大倍数之间是相互冲突的,当固有频率较大时,放大倍数较小,所以不存在一个最优设计点使得这两个目标同时达到最优。根据目标期望权衡这两个目标,从图 7 所示的 Pareto 解集中选取 3 组合适的设计方案如表 5 所示。同时,希望平台的固有频率较大,又希望其放大倍数大于优化前的,因此选择第 1 组作为最终的设计方案,最终的设计方案所对应的各设计变量值如表 6 所示。为了便于平台的加工制造,根据设计变量与性能指标的关系对设计变量进行修正,修正结果如表 6 所示。

表 5 优化解集  
Tab. 5 Optimization set

序号	位移放大倍数	固有频率/Hz	最大应力/MPa
1	8.437	169.381	101.844
2	8.427	167.821	103.429
3	8.049	179.507	89.557

表 6 优化后的设计变量  
Tab. 6 Design variables after optimization (mm)

设计变量	优化前	优化后	修正值
$l_1$	13	11.733	11.7
$l_2$	16	16.785	16.7
$l_3$	5	4.655	4.6
$r$	2.5	2.393	2.4
$t$	0.5	0.574	0.58
$l_H$	18	15.611	15.6

为了说明微操作平台的参数优化后相对于优化前的性能的改善,优化前与优化后的性能指标对比结果如表7所示。由表7可知,位移放大倍数相对于优化前增大了2.33%,变化相对较小;固有频率增大了35.58%,变化较大。同时,最大应力减小了38.97%,远小于材料的许用应力。因此,优化结果满足优化目标。

表7 优化前与优化后的性能指标对比

Tab.7 Comparison of performance before and after optimizations

性能指标	优化前	优化后	增大比例/%
位移放大倍数	8.17	8.36	2.33
固有频率/Hz	119.47	161.98	35.58
最大应力/MPa	215.46	131.49	-38.97

#### 参考文献:

- [1] UMESH B, BIJIAN S, LEON C, *et al.*. Design and analysis of a novel flexure-based 3-DOF mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 74: 173-187.
- [2] 李杨明,肖霄,汤晖. 一种新型3自由度大行程微定位平台设计与分析 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(19): 48-54.
- LI Y M, XIAO X, TANG H. Design and analysis of a novel 3-DOF large stroke micro-positioning platform [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(19): 48-54. (in Chinese)
- [3] 胡俊峰,徐贵阳,郝亚洲. 基于动态特性的复合桥式微动平台优化设计 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 306-312.
- HU J F, XU G Y, HAO Y ZH. Optimization design of a compound bridge-type micro-platform based on dynamic characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 306-312. (in Chinese)
- [4] 马立,谢炜,刘波,等. 柔性铰链微定位平台的设计 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 338-344.
- MA L, XIE W, LIU B, *et al.*. Design of micro-positioning stage with flexure hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 338-344. (in

## 7 结 论

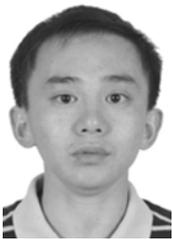
本文以一种新型微操作平台为对象,提出一种基于响应面法的多目标优化设计方法。采用差动式杠杆原理设计了一种新型的微操作平台,所设计的平台具有结构紧凑、运动空间大、固有频率高的特点。考虑微操作平台的结构复杂性,采用仿真试验设计方法得到试验数据,建立反映平台性能指标的二阶多项式响应面模型,为平台的多目标优化提供了精确的理论模型。以平台的位移放大倍数和固有频率为目标、以强度为约束,采用多目标遗传算法对其进行多目标优化,优化结果表明在保证平台的强度的前提下,位移放大倍数增大了2.33%,固有频率增大了35.58%,说明了优化方法的有效性,满足平台的静态和动态要求。

Chinese)

- [5] 胡俊峰,张宪民. 3自由度精密定位平台的运动特性和优化设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2686-2695.
- HU J F, ZHANG X M. Kinematical properties and optimal design of 3-DOF precision positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2686-2695. (in Chinese)
- [6] KK O, LIU X J, KIM J. Optimal design of a micro parallel positioning platform [J]. *Robotica*, 2005, 23(1):109-122.
- [7] 王雯静,余跃庆. 基于有限元法的柔顺机构动力学分析 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(9):79-85.
- WANG W J, YU Y Q. Dynamic analysis of compliant mechanisms based on finite element method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(9):79-85. (in Chinese)
- [8] HEINONEN O, PAJUMEN S. Optimal design of stiffened plate using metamodeling techniques [J]. *Journal of Structural Mechanics*, 2011, 44(3): 218-230.
- [9] ALASWAD A, OLABI A G, BENYOUNIS K Y. Integration of finite element analysis and design of experiments to analyze the geometrical factors in bi-layered tube hydroforming [J]. *Materials and Design*, 2011, 32(2): 838-850.
- [10] 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.
- JIANG H, GUAN Y SH, QIU ZH CH. 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)
- [11] BOX G E P, DRAPER N R. *Experimental model building and response surfaces* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- [12] 张志红, 何桢, 郭伟. 在响应曲面方法中三类中心复合设计的比较研究 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007, 24(1): 87-91.
- ZHANG ZH H, HE ZH, GUO W. A comparative study of three central composite designs in response surface methodology [J]. *Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*, 2007, 24(1): 87-91. (in Chinese)
- [13] 傅珏生, 张健, 王振羽. 实验设计与分析 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- FU Y SH, ZHANG J, WANG ZH Y. *Design and Analysis of Experiments* [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing Press, 2007.
- [14] POLES S, FU Y, RIGONI E. The effect of initial population sampling on the convergence of multi-objective genetic algorithms [J]. *Multi-objective Programming and Goal Programming: Theoretical Results and Practical Applications*, 2009, 618: 123-133.
- [15] 李倩, 詹浩, 朱军. 基于 Pareto 遗传算法的机翼多目标优化设计研究 [J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(1): 134-137.
- LI Q, ZHAN H, ZHU J. Exploring combination of Pareto genetic algorithm (GA) with aerodynamic analysis software for multi-objective optimization of wing [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(1): 134-137. (in Chinese)

#### 作者简介:



胡俊峰(1978—),男,江西临川人,博士,副教授,2010年于华南理工大学获得博士学位,主要从事柔顺机构及振动控制方面的研究。E-mail: hjfsuper@126.com



徐贵阳(1991—),男,江西九江人,硕士研究生,2012年于江西理工大学获学士学位,主要从事柔顺机构方面的研究。E-mail: xuguiyang911009@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)