

基于响应面法的柔性铰链优化设计

张超^{1ab},陈洪达^{1ab},张永贺²,刘晓华^{1ab}

(1. 中国科学院 a. 上海技术物理研究所; b. 红外探测与成像技术重点实验室,上海 200083;

2. 测量通信总体研究所,北京 100094)

摘要:为提高交叉簧片式柔性铰链(简称“交叉铰链”)的第2阶固有频率,通过基于遗传算法优化的BP神经网络响应面映射交叉铰链的结构参数与其第2阶固有频率之间的关系,建立了交叉铰链的结构参数优化模型,并在MATLAB中编程实现。最后,对最优化计算结果进行了动静态仿真分析和试验验证。结果表明,优化模型计算值、有限元仿真值以及测试值的一致性较好,误差均在工程允许的范围,与目前在用某型号交叉铰链相比其第2阶固有频率提高了21.7%。可见该优化设计方法是可行的,能够有效提高交叉铰链的第2阶固有频率。

关键词:天文望远镜;交叉铰链;响应面法;遗传算法;BP网络

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0071-04

Optimization Design of Cross-spring Flexural Pivots Based on Response Surface Method

ZHANG Chao^{1ab}, CHEN Hongda^{1ab}, ZHANG Yonghe², LIU Xiaohua^{1ab}

(1. a. Shanghai Institute of Technical Physics and b. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Integration Institute of Measurement and Communication, Beijing 100094, China)

Abstract: To improve the 2-order inherent frequency of cross-spring flexural pivots, the BP neural network response surface optimized with genetic algorithms is used to map the relationship between its structure parameters and the 2-order inherent frequency. And a mathematic model for the structure optimization is established based on MATLAB. Then, the result of the optimization calculation is used to make the static and dynamic analysis, simulation and experiment. The results show that the uniformity of optimization model computation results, simulation results and test results is good, and the errors are within the allowable range. Compared with the cross-spring flexural pivot currently used, the 2-order inherent frequency is increased by 21.7%. So, the optimization method in this article is available for use. It can effectively enhance the 2-order inherent frequency of the cross-spring flexural pivots.

Keywords: astronomical telescope; cross-spring pivots; response surface method; genetic algorithms; BP neural network

0 引言

低温光学的应用广泛,既是红外空间天文望远镜的核心技术之一,又是提高红外遥感仪器灵敏度的一个重要措施。它通过将仪器自身的温度降低至一个相对较低的量级来降低背景辐射。在低温条件下,需要解决结构自身以及结构和光学元件之间的热变形差问题。除合理选择材料外,采用柔性铰链吸收热变形差也是一个有效途径。图1所示为某低温主光学系统主镜支撑组件,采用背部3点支撑,柔性环节通过中心塞组件与主镜相连,每个柔性环节包含两个平行布置的交叉铰链。这种交叉铰链,具有运动范围大、应力特性良好等特点,在一定程度上弥补了传统切槽式柔性铰链的缺陷,应用空间得到进一步扩展^[1]。目前,国内外众多学者已对这类铰链展开了研究。Haringx等给出了交叉铰链受到纯弯矩载荷作用时顶点偏移量的椭圆积分解^[2]。Zelenika等推导了交叉铰链在广义载荷作用下的柔性转动刚度^[3]。Wittrick等通过移动

交叉点位置来改善交叉铰链的轴漂性能,提高其定位精度^[4]。刘承平等建立了交叉铰链的轴漂和柔性转动刚度模型^[5]。魏传新等基于交叉铰链设计了一种菱形微位移放大机构,并进行了试验验证^[6]。

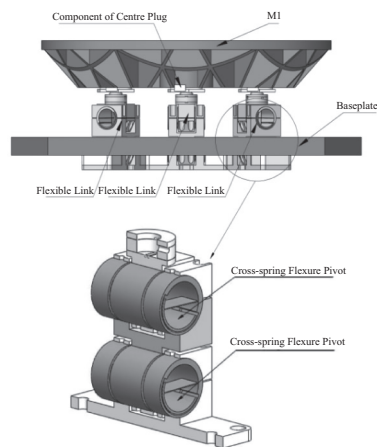


图1 主镜支撑组件

基金项目:国家自然科学基金(11573049)

作者简介:张超(1991—),男,安徽马鞍山人,工程师,硕士,从事空间遥感仪器动力学方面的研究。

交叉铰链的第1阶固有频率是其柔性维刚度的反映;从第2阶固有频率开始,是其除柔性维外各维刚度的反映。很少有人研究这类铰链的动态特性,认为其除柔性维外的模态频率往往很高,完全可视为刚体。可是,这里的交叉铰链除柔性维外各维刚度对图1中主镜支撑组件的基频有着重大影响,不能视为刚体。因此,对交叉铰链的动态特性研究是必要的,有利于提高整个组件的基频。整个组件对温度适应性的要求决定了交叉铰链的柔性维转动刚度(简称“扭转刚度”),在此前提下希望尽量提高整个组件的基频。故对交叉铰链的结构参数进行优化,使其扭转刚度在满足要求的情况下其他各维越高越好。而交叉铰链的第2阶固有频率最能反映其除柔性维外的各维刚度。所以,本文以交叉铰链的第2阶固有频率为目标对其结构参数进行优化,为交叉铰链的工程应用、性能改善等提供参考。

1 数学模型

1.1 设计变量

交叉铰链的结构参数如图2所示。通过灵敏度分析发现,长度 L 、外径 D 、壁厚 W 以及簧片厚度 t 对交叉铰链的第2阶固有频率影响显著,确定作为设计变量;其余参数的影响不大,取值保持不变,并且根据交叉铰链的工程应用情况,4个设计变量的取值范围为:

$$\begin{cases} 20 \text{ mm} \leq L \leq 120 \text{ mm} \\ 12 \text{ mm} \leq D \leq 65 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq W \leq 10 \text{ mm} \\ 0.2 \text{ mm} \leq t \leq 2.7 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

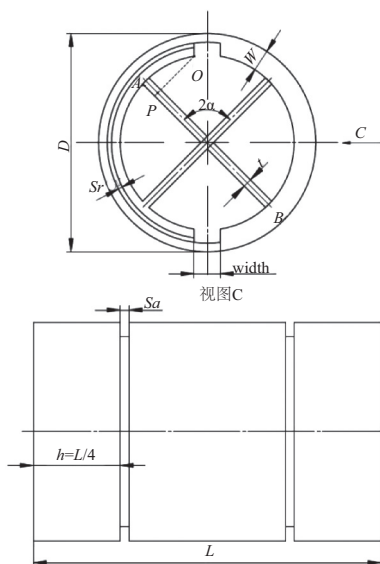


图2 交叉铰链的结构参数

1.2 约束条件

除了设计变量的取值范围外,约束条件还要包括几何约束和扭转刚度约束。

首先,根据交叉铰链的几何关系(图2),为了使簧片两端不与切槽重叠,点 O 到簧片中心线 AB 的距离 OP 不能小

于簧片厚度的一半,推导出设计变量须满足的几何约束为:

$$2t^2 + 6\sqrt{2}t + 18 - (D - 2W)^2 \leq 0 \quad (2)$$

其次,根据工程上的具体使用需求,交叉铰链的扭转刚度是确定的,需要在优化过程中保持不变,因此其刚度约束为:

$$K_{Rz} = \frac{E(L-2)t^3}{12(D-2W)} \cdot \frac{\pi}{180} = K \quad (3)$$

1.3 优化模型

交叉铰链的优化设计可以归结为求解以下非线性约束优化问题,即在给定的约束条件下,寻找最优的结构参数 L 、 D 、 W 、 t 的组合,使交叉铰链的第2阶固有频率 f_2 最大。

$$\begin{cases} \text{设计变量: } \mathbf{X} = [L, D, W, t]^T \\ \text{Min}(-f_2(\mathbf{X})) = \text{Min}(-f_2(L, D, W, t)) \\ \text{s.t.} \quad 2t^2 + 6\sqrt{2}t + 18 - (D - 2W)^2 \leq 0 \\ \frac{E(L-2)t^3}{12(D-2W)} \cdot \frac{\pi}{180} = K \\ 20 \leq L \leq 120, 12 \leq D \leq 65 \\ 2 \leq W \leq 10, 0.2 \leq t \leq 2.7 \end{cases} \quad (4)$$

2 目标函数的响应面建模

交叉铰链的第2阶固有频率与结构参数之间关系的高度非线性,没有明确的解析式。人工神经网络具有高阶非线性处理能力^[7],其中BP网络是目前应用最广泛的,理论上能充分逼近任何复杂的函数^[8]。但是,BP网络本身也存在一些缺陷,容易陷入局部最小值。遗传算法是一种全局搜索算法,具有潜在的并行性,通过遗传算法对BP网络的权值和阈值进行优化,能够解决BP网络容易陷入局部最小值的问题^[9]。所以,本文采用基于遗传算法优化的BP网络响应面模型。

2.1 试验设计

建立BP网络响应面首先需要得到用于网络训练和评价的样本。合理的样本数量以及在设计空间内的分布情况能够有效降低响应面的预测误差。本文采用优化空间填充设计(OSF)选取样本点,能够解决传统试验法抽样过程中存在的点堆积问题^[10],用尽量少的样本数量得到分布尽可能均匀、全面的样本集。

在设计变量的取值范围内,根据优化空间填充设计方案,设计了4因素的分析试验,并在有限元软件中完成仿真,计算得到对应的第2阶固有频率,具体仿真试验方案和结果见表1,共有486组数据。

表1 仿真试验方案和结果

试验序号	结构参数/mm				f_2/Hz
	L	D	W	t	
1	85.350 0	43.600 0	5.532 5	1.919 0	2 865.8
2	119.600 0	35.108 0	5.296 0	1.590 0	3 431.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
486	85.312 5	36.346 9	8.475 0	2.582 8	4 813.0

2.2 基于遗传算法优化的 BP 网络响应面

将每组结构参数以及对应的响应目标作为建立响应面的输入输出数据,网络结构为 4-7-1,遗传算法采用实数编码。在 MATLAB 中经过迭代、寻优以及网络训练,得到了第 2 阶固有频率关于设计变量的响应面,并对响应面模型进行评价,平均相对误差和最大相对误差分别为 4.68% 和 11.09%,整个数据集的拟合系数为 0.99497,说明建立的响应面模型预测误差较小,能够准确反映交叉铰链的结构参数与其第 2 阶固有频率之间的关系。

由图 3 可见,外径 D 对第 2 阶固有频率 f_2 的影响极其显著,4 因素对目标函数影响的大小顺序为: $D > t > L > W$ 。在取值范围内,外径 D 的增大将会导致 f_2 的降低,而簧片厚度 t 的增大将会引起 f_2 的升高。不同的壁厚 W 时,随着长度 L 的增大, f_2 的变化情况并不相同。当壁厚 W 为 10 mm 时, f_2 将会随着长度 L 的增大而升高;当壁厚 W 为 2 mm 时, f_2 将会随着长度 L 的增大先急剧升高再缓慢下降再平稳升高,并且, f_2 关于壁厚 W 的变化情况,随着外径 D 的取值不同,也不相同。因此,外径 D 、簧片厚度 t 、长度 L 以及壁厚 W 对第 2 阶固有频率 f_2 的影响不是简单的线性关系,而是复杂的非线性耦合关系。

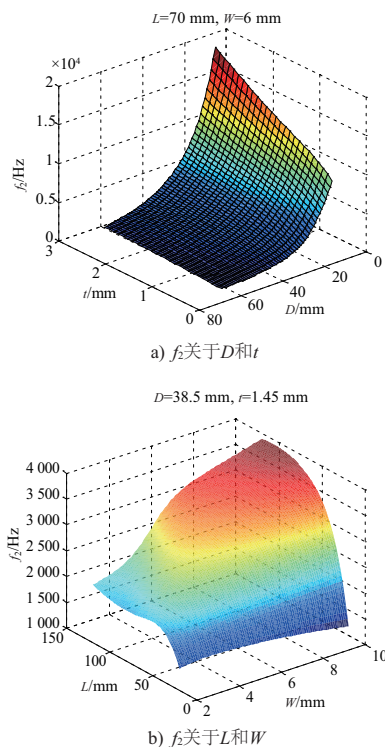


图 3 响应曲面

3 交叉铰链的结构参数优化

3.1 最优化计算

将建立的响应面代入式(4),在 MATLAB 中编程实现交叉铰链的结构参数优化。现对目前在用某型号交叉铰链(长度 80 mm,外径 40 mm,壁厚 4 mm,簧片厚度 1 mm,

扭转刚度 $820 \text{ N} \cdot \text{mm}/(^{\circ})$,第 2 阶固有频率 2177.1 Hz)进行优化,以外径 $D = 40 \text{ mm}$ 、柔性铰转动刚度 $K_{\text{re}} = 820 \text{ N} \cdot \text{mm}/(^{\circ})$ 为设计要求,以 $X_0 = (80, 40, 4, 1)$ 为初始点,在 MATLAB 中经过迭代和搜索寻优,求解出在可行域内收敛的最优解,对应的第 2 阶固有频率为 2603.2 Hz。其余对目标函数影响不显著的因素按图 2 取值,得到优化后交叉铰链的主要结构参数见表 2。

表 2 优化后交叉铰链的主要结构参数

L/mm	D/mm	W/mm	t/mm	width/mm	Sa/mm	Sr/mm	$2\alpha/(^{\circ})$
72.7	40	10	0.89	3	1	0.5	90

3.2 最优解校验

对优化后的交叉铰链进行仿真分析,可得扭转刚度仿真值为 $873 \text{ N} \cdot \text{mm}/(^{\circ})$,与优化模型计算值误差为 6.1%。误差是由推导过程中略掉二次方以上的高阶项引起的,在工程上允许的范围。图 4 为优化后交叉铰链的模式分析结果,可见其第 2 阶固有频率的仿真值为 2649.2 Hz,与响应面预测值误差为 1.7%,结果令人满意,验证了本文基于响应面法的交叉铰链的结构参数优化是可行的,并且与目前在用某型号交叉铰链相比其第 2 阶固有频率提高了 21.7%。

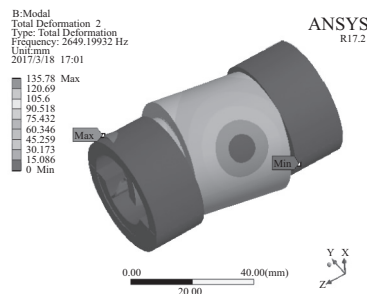


图 4 模态分析结果

4 试验分析

为了进一步验证本文研究方法的可行性以及仿真的准确性,对交叉铰链进行正弦扫频试验和刚度测试。

首先,对试件在 x 、 y 、 z 3 个方向上分别进行了正弦扫频试验。图 5 为试件在 x 、 y 、 z 3 个方向上的扫频试验结果。可以看出,共有 5 个共振峰,频率分别为 125.7 Hz、911.7 Hz、922.5 Hz、1025.1 Hz、2253.6 Hz。通过不同测点之间的相位关系确定振型,其中频率为 2253.6 Hz 时对应的振型为交叉铰链及试验工装绕 z 轴的摆动,与交叉铰链自身的第 2 阶振型一致,频率误差为 13.4%,误差在工程允许的范围,验证了本文对交叉铰链模态仿真以及优化模型计算的准确性。

其次,对试件的柔性铰转动刚度进行测试,试验装置包括 ALGOL 指针式拉压力计、TESA-white 测高仪、夹具等。分批次施加载荷,记录每一次加载后的变形情况(线位移),并计算得到对应的刚度值,最后取平均值为试件

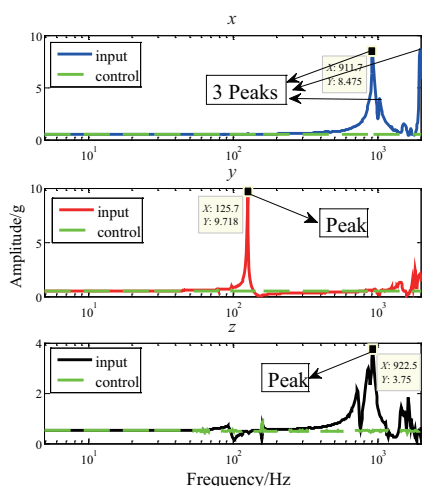


图5 扫频试验结果

的柔性铰链转动刚度,相关测试数据如表3所示。

表3 柔性铰链转动刚度测试数据

测试项目	序号					
	1	2	3	4	5	6
转矩/(N·mm)	950	950	1 425	1 425	1 900	1 900
位移/mm	2.194	2.195	3.196	3.184	4.284	4.296
刚度/(N·mm/(°))	717.9	717.8	739.2	742.0	735.3	733.2

由表3可得,试件的柔性铰链转动刚度测试平均值为 $730.9 \text{ N} \cdot \text{mm}/(^{\circ})$,与优化模型计算值 $820 \text{ N} \cdot \text{mm}/(^{\circ})$ 误差为10.9%。分析发现,加工精度问题导致交叉铰链的实际尺寸与最优化计算结果之间存在偏差,且存在不均现象,均会使测试结果偏小,是误差的主要原因。误差在工程允许的范围内,能够说明本文对交叉铰链扭转刚度仿真以及优化模型计算的准确性。

5 结语

为提高交叉铰链的第2阶固有频率,本文提出了基于

响应面法的优化设计方法。基于遗传算法优化的BP神经网络响应面映射交叉铰链的结构参数与其第2阶固有频率之间的关系,并在MATLAB中编程实现交叉铰链的优化模型。最后,对最优化计算结果进行动静仿真分析和试验验证。仿真结果表明,优化模型计算值与仿真值一致,扭转刚度误差为6.1%,第2阶固有频率误差为1.7%。扫频试验结果与计算值误差为13.4%,扭转刚度测试值与计算值误差为10.9%,均在工程允许范围内。以上结果验证了优化模型计算值、有限元仿真值以及测试值的一致性,并且优化后与目前在用某型号交叉铰链相比其第2阶固有频率提高了21.7%。

参考文献:

- [1] Fowler R M, Howell L L, Magleby S P. Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms[J]. Mechanical Sciences, 2011, 2(2): 205-215.
- [2] Haringx J A. The cross-spring pivot as a constructional element Flow[J]. Turbulence and Combustion, 1949, 1(1): 313-332.
- [3] Zelenika S, Bona F D. Analytical and experimental characterisation of high-precision flexural pivots subjected to lateral loads[J]. Precision Engineering, 2002, 26(4): 381-388.
- [4] Wittrick W H. The properties of crossed flexure pivots, and the influence of the point at which the strips cross[J]. Aeronautical Quarterly, 1951, 2(4): 272-292.
- [5] 刘承平, 赵宏哲, 毕树生, 等. 一种用于机载设备的高精度转动型柔性铰链[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 694-702.
- [6] 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.
- [7] 于兰峰, 王金诺. 基于遗传算法和神经网络的塔机结构动态优化设计[J]. 中国机械工程, 2008, 19(1): 61-63.
- [8] 桂劲松, 康海贵. 结构可靠度分析的响应面法及其Matlab实现[J]. 计算力学学报, 2004, 21(6): 683-687.
- [9] Ding S, Su C, Yu J. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm[J]. Artificial Intelligence Review, 2011, 36(2): 153-162.
- [10] 张润楚, 王兆军. 关于计算机试验的设计理论和数据分析[J]. 应用概率统计, 1994(4): 420-436.

收稿日期:2018-06-05