

文章编号 1004-924X(2009)11-2638-08

长缝光谱仪主结构的稳健优化设计

龚雨兵^{1,2,3}, 杨世模¹, 陈志远¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:为了减轻长缝光谱仪(LSS)主结构的重量,保持结构响应的高稳定性,对LSS主结构进行了稳健优化设计。分析了结构尺寸加工公差和材料参数波动等不确定性因素对LSS主结构稳健性的影响;调整结构尺寸加工公差,建立以结构质量为目标,以结构频率为约束的LSS主结构稳健优化模型,应用蒙特卡罗模拟方法和蚁群优化算法对稳健优化模型进行优化求解。结果表明,稳健优化后的结构质量为33 kg,比初始质量减少17.5%;频率为77 Hz。稳健优化最优结构质量较确定性优化略高,但结构响应更为稳定,具备抵抗尺寸波动和材料参数波动的能力,满足设计要求。采用的设计方法对类似结构的稳健优化设计有参考意义。

关键词:长缝光谱仪(LSS);稳健优化;蒙特卡罗;有限元分析

中图分类号:P111.3;TH744.1 **文献标识码:**A

Robust optimization design of primary structures of long slit spectrometers

GONG Yu-bing^{1,2,3}, YANG Shi-mo¹, CHEN Zhi-yuan¹

(1. *The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;*
2. *School of Mechanical & Electrical Engineering, Guilin University of Electronic
Technology, Guilin 541004, China;*
3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to minimize the mass of primary structure of a Long Slit Spectrometer (LSS), and to improve the robustness of structural response, the primary structure of the LSS was optimized based on robust optimization methods. The effects of the structure geometry tolerance and material property tolerance on the structure robustness were analyzed. Accordingly the structure geometry tolerance which has significant sensitivity to the structure robustness was adjusted. The robust optimization model of primary structure of the LSS with the constrained conditions of the fundamental frequency and the objective function of total mass was established. A Monte Carlo simulation and an ant colony optimization algorithm were applied to solve the optimization model. Experimental results show that the optimized structure has reduced the mass by about 17.5% compared to the original design. Although the mass of the optimal robust design is larger than the mass obtained by deterministic based optimization, it is insensitive to variations on design variables within a feasible region. The optimal

收稿日期:2008-10-06;修订日期:2008-12-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10878018)

robust structure design satisfies design requirements.

Key words: Long Slit Spectrograph (LSS); robust optimization; Monte Carlo simulation; Finite Element Analysis(FEA)

1 引言

世界空间紫外天文台(WSO/UV)是俄罗斯、中国及欧洲共同参与研制的,工作在 103~320 nm 波段的综合性大型空间紫外观测卫星^[1]。长缝光谱仪(LSS)作为 WSO/UV 的一个重要焦面仪器,主要是针对较遥远的暗弱目标天体进行中低分辨率的光谱观测,设计寿命为 5 年。

LSS 主结构是 LSS 的主体框架,是安装光学部件和其它部件的机械平台。为了实现 LSS 部件特别是光学部件的稳定支撑,确保能够承受卫星发射时的加速度过载、振动、冲击,适应工作轨道上的特殊空间环境,对主结构提出了较高的性能要求。主结构除需要满足各项性能指标外,还由于制造加工、发射以及空间环境等存在不确定性,需要保持各项性能指标足够稳定可靠,具有较好的抗干扰能力。

本文分析了 LSS 主结构的结构尺寸加工公差与材料属性偏差等两类不确定性因素对 LSS 主结构稳健性的影响。应用稳健优化设计方法对 LSS 主结构进行了稳健优化设计。优化后的主结构具有较轻的质量,同时结构性能稳健,对设计参数的变动不敏感,提高了主结构的安全性,可靠性。

2 稳健优化设计方法

结构优化设计技术在实际工程中得到了广泛应用。传统的确定性结构优化设计中,目标函数和约束函数的计算均以设计变量和其他参数的名义值为基础,然而,实际工程问题中,结构的不确定性是无法避免的。结构中的几何尺寸、构件的空间位置、材料性能和荷载等都存在着由于制造加工和材料老化等引入的误差或波动。结构的不确定性可能使得准则函数(目标函数)严重退化,成为劣值。特别是对于约束优化问题,优化解往往靠近约束边界,结构参数波动甚至可能使最优解违反约束(超界)成为不可行解。这就是说,一般的优化设计最优解可能是不稳健的,受不确

定因素影响大。稳健优化设计是优化设计和稳健设计的结合^[2-5],通过调整设计变量的名义值和控制其偏差来保证设计最优解的稳健性,即一方面保证最优点的可行稳健性,当设计参数产生波动时仍能保持最优点是可行的;另一方面使最优点具有较低的灵敏度,即不灵敏性,设计参数的微小变动导致的性能指标波动小。图 1 描述稳健优化设计解具有的可行稳健性。由于设计参数 x_1 、 x_2 的波动,约束边界 g_1 、 g_2 对应移动 Δg_1 、 Δg_2 。此时一般优化设计解从可行域进入不可行域,而稳健优化设计解仍然处在可行域。图 2 描述目标函数的稳健性。设计 1 与设计 2 具有相同的目标函数值 y ;但在设计参数 x 同等波动下,设计 2 目标函数波动的“钟形”分布更“瘦小”,表明设计 2 具有更好的目标稳健性。一般地,众多不确定性因素主要可分为两类:一类是在设计中可以控制的因素,称为可控因素,如设计变量的制造公差等;另一类是在设计中不可控制的因素,称为不可控

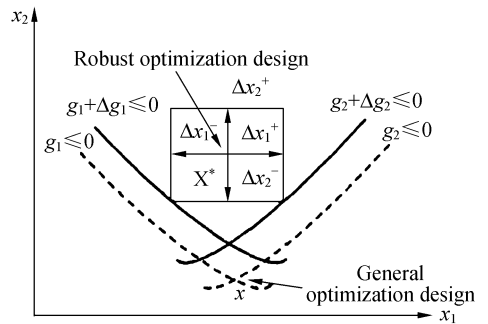


图 1 约束可行稳健性示意图

Fig. 1 Schematic diagram of feasible robustness

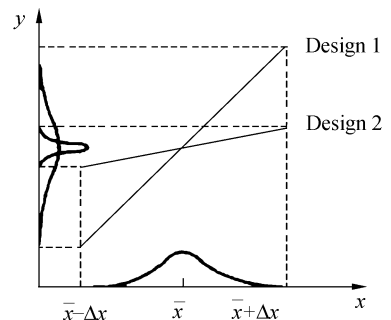


图 2 目标稳健性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of objective robustness

因素(噪声因素),如材料属性的波动、材料或元器件随着时间推移而发生老化或时效等^[4]。

3 LSS 主结构稳健性分析

3.1 LSS 主结构

WSO/UV 科学仪器箱由 3 个有效载荷组成,示意图如图 3 所示。其中 LSS 由中国研制,另外两个有效载荷(HIRDES)由德国研制。3 个有效载荷各占据仪器箱空间的 120° ,各载荷分别独立设计、制造、装调,然后相互连接组装成一体,连接到望远镜的光学平台上。LSS 系统工作在 $103\sim 320\text{ nm}$ 紫外波段,光谱分辨本领 $1\ 000\sim 2\ 000$,空间分辨率 $1\sim 2''$ 。LSS 的外形限制为五边形的方体^[6],尺寸为 $1\ 099\text{ mm}\times 589.05\text{ mm}\times 448.85\text{ mm}$,在顶面预留有刻槽,两个内侧面张角为 120° 。

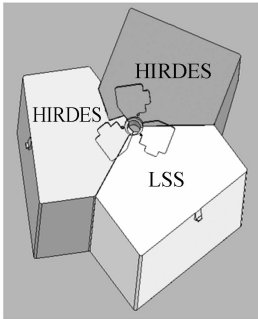


图 3 WSO/UV 仪器箱有效载荷布局示意图

Fig. 3 Layout of payloads in science instrument compartment in WSO/UV

本文根据限定的外形尺寸及结构性能指标,综合考虑各部件的安装调试需求并兼顾与另外两个有效载荷的连接,将 LSS 主结构设计为桁架式构型。LSS 桁架式主结构的示意图见图 4,由顶面、中间隔板,底面板、侧面板及直杆、斜杆与横梁构成,为满足通光要求,中间隔板的相应位置开通光孔。结构通过连接凸块,顶面内侧面(与另两有效载荷进行连接的两侧面)与外部相连接。

结构整体采用 CeSiC 材料。CeSiC 材料是一种新型的复合陶瓷材料,具有优异的机械及热性能,表现为高刚度、低密度、低线热膨胀系数、高热传导率、高抗蠕变性能和高化学稳定性等特点^[7]。材料的主要机械属性为密度 $\rho=2.65\times$

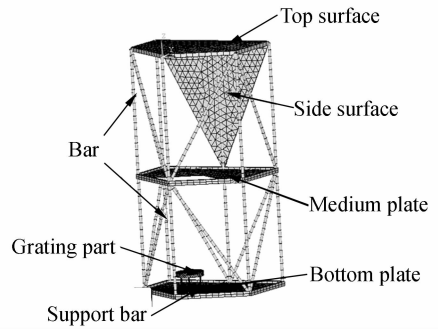


图 4 LSS 主结构有限元模型

Fig. 4 FEM of LSS primary structure

10^{-6} kg/mm^3 ,弹性模量 $E=249\times 10^3\text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.17$ 。

LSS 系统要适应火箭发射力学环境(包括加速度、振动和冲击等),结构必须具有足够的强度和刚度。三轴方向的加速度分别为 X 向 $5g$;Y 向 $5g$;Z 向 $10g$ (Z 向为光轴方向)^[6]。LSS 系统进入工作轨道后,温控系统将工作环境温度稳定在 $(20\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 。工作环境温度场较稳定,对 LSS 结构系统影响小。将结构质量作为 LSS 主结构设计目标,将动态刚度条件(结构自振频率要求)作为约束条件,对强度条件和工作环境温度变化效应进行校核。项目组要求主结构总体质量 $< 40\text{ kg}$,结构基频 $> 70\text{ Hz}$ 。

3.2 LSS 主结构稳健性分析

LSS 主结构选型确定后,对 LSS 主结构进行确定性结构优化,得出了最优解。但是确定性优化中,各选定参数是固定不变的,即没有波动。但如上文所述,结构几何尺寸、材料属性、生产加工、装配等都会产生误差。这些结构参数的波动可能导致结构性能的较大波动,甚至违反约束。因此有必要对主结构进行稳健性分析。

3.2.1 结构尺寸不确定

主要考虑结构尺寸的加工公差($\pm 0.1\text{ mm}$),属于可控因素。选取组成结构的 11 个几何尺寸作为设计变量,分别是顶面厚度、中间板厚度、底板厚度、侧面板厚度、管外径、管厚度、中板高度、底板高度、光栅部件厚度、支撑位置和支撑杆件直径。其中顶面厚度、光栅部件厚度服从正态高斯分布,其余变量服从均匀分布,概率分布如表 1,各变量相互独立。设计变量的均值由确定性优化

方法进行结构优化得出。

表 1 结构参数的波动

Tab. 1 Perturbation of structural parameters

序号	参数名称	变量名	分布类型	均值	波动范围
1	顶面厚度	TOPFACE_H	正态分布	17.1	2%
2	中板厚度	LAYER_2	均匀分布	2.0	±0.1 mm
3	底板厚度	LAYER_3	均匀分布	7.1	±0.1 mm
4	侧面板厚度	FUJIA	均匀分布	2.0	±0.1 mm
5	杆外径	OUT_RAD	均匀分布	13.2	±0.1 mm
6	杆壁厚	THICK_PIPE	均匀分布	3.6	±0.1 mm
7	中板高度	HT_LAYER_2	均匀分布	570	±5 mm
8	底板高度	HT_LAYER_3	均匀分布	1 079	±10 mm
9	光栅厚度	TH_GRAT	正态分布	18.0	2%
10	支撑位置	COE_D	均匀分布	0.80	±0.05
11	支撑圆半径	RD_SUPT	均匀分布	2.8	±0.1 mm

采用 ANSYS 概率设计模块 (Probabilistic Design) 进行分析^[8],以响应面分析方法 (Response Surface Method Analysis) 作为求解方法,采用中心抽样法 (Central Composite Design Sampling) 抽样。按照中心抽样法,对 11 个变量,程序进行了 151 次抽样计算。对 151 次的抽样结果进行最小二乘法拟合,得到输出与输入变量之间的数学表达式 (响应面函数)。根据响应面函数,进行 500 000 次的蒙特卡罗模拟 (Monte Carlo Simulation),统计输出变量的均值、偏差等^[9-10]。

经过计算,结构基频的分布如图 5,类似正态分布,均值为 72.12 Hz,其最大值为 73.83 Hz、最小值为 70.39 Hz。在假定的各输入变量的概率

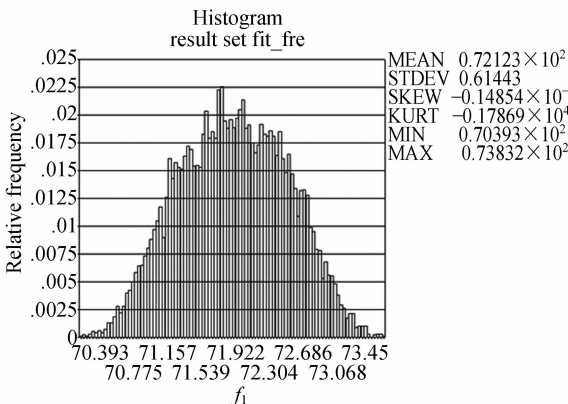


图 5 结构基频分布图

Fig. 5 Distribution of fundamental frequency

分布下,结构基频都 > 70 Hz,满足约束条件。

各设计变量对结构频率的灵敏度如图 6 直方图与饼图所示。灵敏度越大的变量其相应的直方块与饼面积也越大,可以看出:底面板高度对基频的影响最大,并且为负向灵敏度;杆件厚度、杆件外径、侧面板厚度次之,为正向灵敏度;中间板厚度、光栅部件结构与基频关系不大。灵敏度最大的底板高度公差适当减小,可以较明显提高基频,而灵敏度小的尺寸公差则可适当放松。

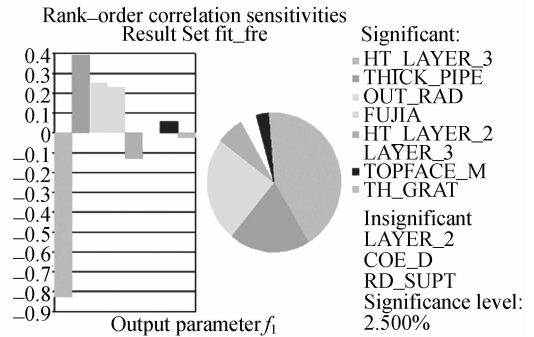


图 6 结构尺寸对结构频率的灵敏度

Fig. 6 Sensitivities of design variables to basic frequency

3.2.2 材料参数不确定

为满足设计指标,LSS 主结构优选 CeSiC 材料作为结构材料。CeSiC 材料热机械性能优异;但其性能参数受工艺水平影响,有一定的波动。目前文献报道中,CeSiC 材料的参数也各有所不同。CeSiC 材料参数中,弹性模量与结构基频的关系最为密切。考虑 CeSiC 材料弹性模量变动对结构基频的影响,属于不可控因素。不失一般性,假定 CeSiC 材料弹性模量服从正态分布,偏差值是均值的 5%。

与 3.2.1 分析类似,以响应面分析方法作为求解方法,采用中心抽样法抽样。为减少计算量,仅考虑 11 个结构尺寸参数中对结构频率影响最大的前 4 个结构尺寸参数的波动 (见 3.2.1)。对于 5 个变量,程序进行 27 次的抽样及 500 000 次的蒙特卡罗模拟。结构基频的分布如下图 7,近似服从正态分布,均值为 72.19 Hz。其最大值为 79.51 Hz、最小值为 63.73 Hz。在假定的各输入变量的波动分布下,结构基频存在不满足频率约束条件 (70 Hz) 的可能性。结合设计变量对结构频率的灵敏度图 (下图 8) 分析,这主要是由于 CeSiC 材料弹性模量的波动引起的。为了提高 LSS 主结构的稳健性,一种方法是对 CeSiC 材料制造

工艺进行严格控制,减少实际值对设计值的偏差;另一种方法则是在不减少偏差的情况下,进行稳健优化设计,降低该偏差对结构性能的影响。LSS 主结构目前还处于设计阶段,采用后者更经济。

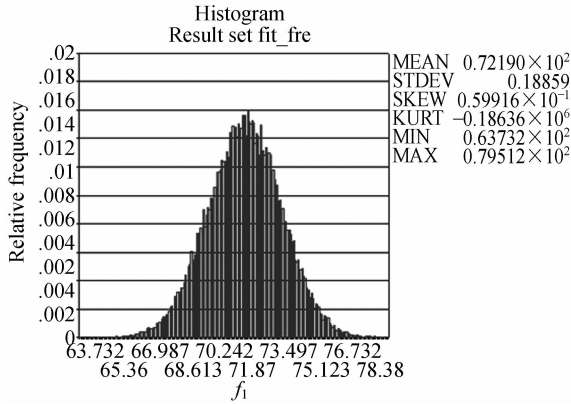


图 7 结构基频分布图

Fig. 7 Distribution of fundamental frequency

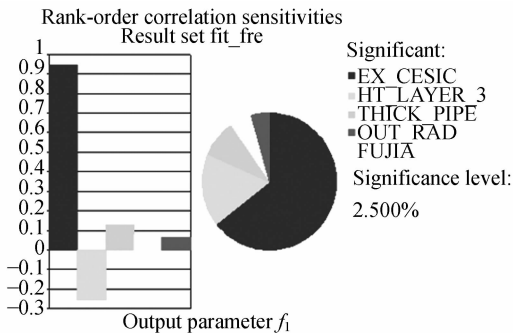


图 8 结构尺寸对结构频率的灵敏度

Fig. 8 Sensitivities of design variables to fundamental frequency

4 LSS 主结构稳健优化设计

4.1 稳健优化设计数学模型

已有众多文献对稳健优化设计数学模型进行了研究^[9-12]。文献[12]采用灵敏度概念在公差分配中实现封闭环公差的稳健性。文献[13]利用最坏情况容差来建立约束,保证约束的可行稳健性。文献[14]提出考虑不确定因素导致约束的最大波动来分析约束可行稳健性。文献[15]应用设计敏感区理论和最坏情况分析原理,提出性能稳健偏差估计和自动多点寻优的稳健设计优化方法。本文借鉴文献[11]的研究,采用随机模型,将目标函

数和约束函数的标准差分别作为目标函数和约束函数分散(变异)程度的度量,并将其引入到目标函数和约束条件中提高目标稳健性与约束可行稳健性。采用加权线性组合法权衡目标函数均值与标准差的重要程度。LSS 主结构质量作为优化设计目标。主结构基频作为约束条件,需大于 70 Hz。建立的稳健设计优化模型如下。

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{X} \\ & \text{Min } F(\mathbf{X}) = (1 - \alpha)E(f(\mathbf{X})) / \mu^* + \\ & \alpha\sigma(f(\mathbf{X})) / \sigma^* \text{ S. T. } E(g(\mathbf{X})) - \\ & \beta\sigma(g(\mathbf{X})) - 70 \geq 0 \quad X^L \leq \mathbf{X} \leq X^U \quad (1) \end{aligned}$$

式中, \mathbf{X} 是设计变量矢量, X^L 和 X^U 是设计变量的下限和上限。 $f(\mathbf{X})$ 是结构总质量, $g(\mathbf{X})$ 是频率约束函数。 $E(f(x))$ 和 $\sigma(f(x))$ 分别表示结构总质量的期望值和标准差,由蒙特卡罗模拟计算得出。 $E(g(\mathbf{X}))$ 和 $\sigma(g(\mathbf{X}))$ 分别表示原始频率约束函数的期望值和标准差,由蒙特卡罗模拟计算得出。 β 取值较大时,对应约束条件的稳健性要求较强。文中 β 取值为 3, μ^* 和 σ^* 是预先给定的分目标归一化系数。根据多次试算结果, μ^* 设定为 33, 近似为最小值; σ^* 设定为 0.15。通过给定不同的权重系数 α , 可以得到优化设计问题不同的 Pareto 解。结构总质量的期望值比标准差更为重要; 设置 $\alpha = 0.2$ 提高期望值权重。

主结构有 9 个尺寸变量作为设计变量。考虑 CeSiC 材料弹性模量的波动,为减少计算量,根据 3.2.1 的分析仅考虑了影响最大的前 4 个结构尺寸参数的波动。同时根据 3.2.1 的分析结果对可控因素即尺寸公差进行了调整。调整灵敏度最大的尺寸公差,即调整底板厚度的公差由 ± 10 mm 为 ± 0.4 mm(通过改变组装方式实现)。由于顶面厚度对结构总质量的影响最大,优化设计中也考虑其加工公差。不确定因素的波动见表 2。

表 2 不确定因素波动

Tab. 2 Perturbation of design variables

序号	变量名称	分布类型	波动范围
1	侧面板厚度	均匀分布	± 0.1 mm
2	杆件外径	均匀分布	± 0.1 mm
3	杆壁厚	均匀分布	± 0.1 mm
4	底板高度	均匀分布	± 0.4 mm
5	顶面厚度	正态分布	2%
6	弹性模量	正态分布	5%

4.2 稳健优化计算结果

采用蚁群优化算法评价并提出了新的设计方案,由蒙特卡罗模拟方法统计设计方案的输出特性,如结构质量、频率的均值及标准差等。稳健优化流程图如图 9 所示。设置迭代次数为 20 次,优化历程图如图 10 所示。稳健优化解如表 3 所示。可以看出,稳健优化后,结构质量为 33 kg,较初始质量减少约 17.5%。稳健优化后的结构质量比确定性优化略高,表明稳健优化解是以增加结构质量来换取(提高)结构响应稳定性的。

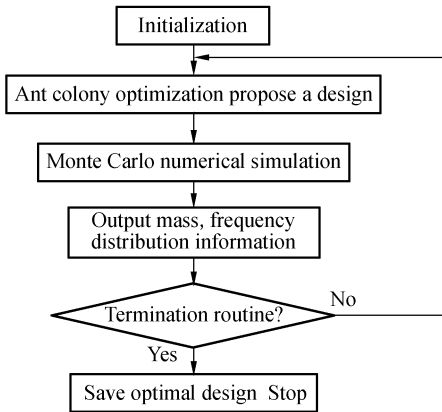


图 9 稳健优化流程简图

Fig. 9 Flowchart of robust optimization

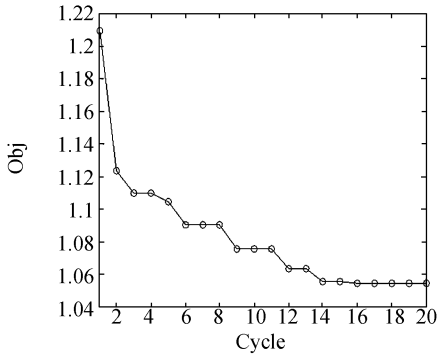


图 10 稳健优化历程图

Fig. 10 Iterative history of robust optimization

稳健优化最优设计的频率累计概率分布如图 11,确定性优化最优设计对应的频率累计概率分布如图 12。对比图 11、12 可以看出,在同等设计参数波动下,稳健优化最优设计满足频率约束条件(>70 Hz)的概率近似为 100%;而确定性最优设计解则只有 87%左右,稳健优化最优设计的稳健性得到提高。经校核,稳健优化结构承受发射加速度过载时,CeSiC 材料最大 Von Mises 应力为 95.3 MPa,小于其屈服强度(>130 MPa),结

构不会发生永久性变形;在空间轨道工作热环境下最大位移约为 5 μm,满足要求。

表 3 稳健优化设计

Tab. 3 Robust optimization design

设计变量	稳健优化	确定性优化	取值范围	
			最小值	最大值
顶面厚度 mm	17.2	17.1	17	20
中间板厚度 mm	2.0	2.0	2	20
底面厚度 mm	6.0	7.2	2	20
侧面板厚度 mm	3.6	2.0	2	20
杆外径 mm	18.9	13.2	10	20
杆壁厚 mm	2.1	3.6	2	5
光栅厚度 mm	10	18	2	20
支撑位置	85%	80%	10%	90%
支撑圆半径 mm	6.6	2.8	2	10
频率 Hz	均值	77.0	>70	
	标准差	2.11	1.94	
质量 kg	均值	33.0	32.8	
	标准差	0.20	0.18	

备注 稳健优化最优质量相对初值(40 kg)减少 17.5%

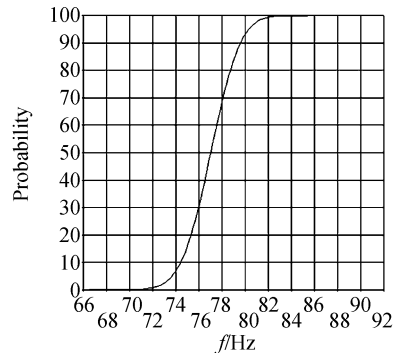


图 11 稳健最优设计的累计概率分布

Fig. 11 Cumulative distribution function of robust optimal design

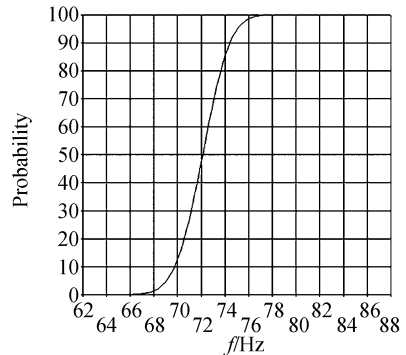


图 12 确定性最优设计的累计概率分布

Fig. 12 Cumulative distribution function of deterministic optimal design

5 结 论

本文对 LSS 主结构进行稳健性分析,分析可控因素和不可控因素对结构频率约束的影响。在考虑结构尺寸加工公差和材料制造误差情况下,建立了 LSS 主结构稳健优化设计模型。采用蒙

特卡罗模拟方法和蚁群优化算法,对 LSS 主结构进行稳健优化设计。稳健优化最优解,结构质量为 33 kg,较初值减少约 17.5%;频率为 77 Hz,满足设计要求。与确定性优化设计比较,稳健优化设计解具有目标稳健性和约束可行稳健性,对设计参数的变动不敏感。采用的稳健设计方法对类似结构的稳健优化设计有参考意义。

参考文献:

- [1] 国防科工委.“十一五”空间科学发展规划[R].北京,2007.
Commission of science technology and industry for national defense. Space Science Development Plan for the 11th Five-Year Plan[R]. Beijing, 2007. (in Chinese)
- [2] 陈立周,翁海珊.工程稳健优化设计[J].机械设计,1998,(8):6-9.
CHEN L ZH, WENG H SH. Engineering robust optimization design[J]. *Mechanical Design*, 1998, (8):6-9. (in Chinese)
- [3] HANS G, BERNHARD S. Robust optimization-a comprehensive survey[J]. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2007, 196:3190-3218.
- [4] 陈立周.稳健设计[M].北京:机械工业出版社,1999.
CHEN L ZH. *Robust Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)
- [5] 程贤福.稳健优化设计的研究现状及发展趋势[J].机械设计与制造,2005,(8):158-160.
CHENG X F. Research status and developing trend of robust optimal design[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005, (8):158-160. (in Chinese)
- [6] MOISHEEV A A. Summary of the “Spectrum-UV/WSO-UV” Space Complex and Its Components[R]. Beijing: Lavochkin Association, 2006.
- [7] MICHAEL D, STEFAN B. Design, manufacturing and performance of CeSiC mirrors and structures [J]. *SPIE*, 2004, 3132:171-181.
- [8] 刘涛,杨凤鹏.精通 ANSYS[M].北京:清华大学出版社,2002.
LIU T, YANG F P. *Mastering ANSYS* [M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)
- [9] 王家骥,金光,颜昌翔.机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J].光学精密工程,2005,13(2):105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):105-116. (in Chinese)
- [10] 赵玲玲,胡家升,李祥.非共轴掠入射 X 射线显微镜参数的误差分析[J].光学精密工程,2006,14(1):34-42.
ZHAO L L, HU J SH, LI X. Error analysis on the parameters of non-coaxial grazing X-ray microscope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):34-42. (in Chinese)
- [11] 亢戍,程耿东.非确定性结构静动态特性稳健优化设计[J].力学学报,2006,38(1):57-65.
KANG ZH, CHENG G D. Structural robust design concerning static and dynamic performance based on perturbation stochastic finite element method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(1):57-65. (in Chinese)
- [12] 周恺,蔡颖,张振家,等.稳健设计理论在公差分析中的应用[J].北京理工大学学报,2003,23(5):557-560.
ZHOU K, CAI Y, ZHANG ZH J, et al.. Application of robustness design theory in tolerance analysis[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(5):557-560. (in Chinese)
- [13] 唐登运.天线结构的稳健优化设计[J].电子机械工程,2007,23(2):6-8.
TANG D Y. Robust optimization design of an antenna structure [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2007, 23(2):6-8. (in Chinese)
- [14] 许焕卫,黄洪钟,何俐萍.稳健设计中的稳健可行性分析[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(S2):1721-1724.
XU H W, HUANG H ZH, HE L P. Feasibility robustness analysis in robust optimization designs [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2007, 47(S2):1721-1724. (in Chinese)
- [15] 刘德顺,岳文辉,杜小平.系统性能稳健偏差与多

点稳健设计优化[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10):1-9.

LIU D SH, YU W H, DU X P. Robust perform-

ance variation for robust design optimization with optimal points[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(10):1-9. (in Chinese)

作者简介:



龚雨兵(1978—),男,湖北人,博士研究生,2004年于桂林电子科技大学获得硕士学位,主要从事光机电系统结构优化设计等方面的研究。E-mail: gybcome@sst. bao. ac. cn



陈志远(1973—),男,河南人,博士,高级工程师,2004年于中国科学院国家天文台获得博士学位,主要从事空间天文仪器分析和环境试验研究。E-mail: sat@sst. bao. ac. cn

导师简介:



杨世模(1954—),男,江苏人,研究员,博士生导师,1982年于东南大学机械工程系获工学学士学位,主要从事空间天文仪器总体结构等方面的研究。E-mail: ysm@bao. ac. cn

●下期预告

端面泵浦热传导各向异性激光棒温场特性

李 隆^{1,2}, 聂建萍¹, 史 彭¹, 冯小娟¹, 甘安生¹

(1. 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055;

2. 中国科学院 物理研究所, 北京 100190)

为了解决 LD 端面泵浦热传导各向异性激光介质产生的热效应问题,建立了端面绝热、侧面冷却的 Nd:YVO₄ 晶体热模型。考虑到 Nd:YVO₄ 为热传导各向异性材料,而光纤耦合 LD 输出光束有着超高斯分布的特点,利用特征函数法和常数变异法得到了超高斯光束端面泵浦热传导各向异性激光介质温度场的一般解析表达式。并定量分析了超高斯泵浦光阶次、泵浦功率以及光斑尺寸对于 Nd:YVO₄ 晶体温度场的影响。研究结果表明:若 LD 输出功率为 50 W,光学聚焦耦合器的传输效率为 82%,4 阶超高斯光束端面泵浦掺钕离子质量分数为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体时,泵浦面获得 528.95 °C 的最大温升。所得结果可用于 LD 端面泵浦热传导各向异性激光介质全固态激光器热稳腔的设计之中,对于提高激光器性能具有了理论指导作用。