

红外导引头稳定平台主框架拓扑优化设计

刘仲宇^{1,2}, 张涛¹, 王平¹, 王统军¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高红外导引头稳定平台动态性能, 减小振动环境对其稳定精度和光电载荷成像质量的影响, 采用基于变密度法的拓扑优化理论, 利用 NX/TOSCA 软件, 以刚度最大化为目标函数, 以体积比约束为设计响应约束, 对红外导引头稳定平台主框架进行了拓扑优化设计。对比分析了经优化设计和经验设计的主框架结构形式的刚度及模态振型。结果显示, 经拓扑优化的主框架在动态性能有所提高的情况下, 结构质量大幅度地减小, 最大变形量由 $3.2\ \mu\text{m}$ 减小到 $2.8\ \mu\text{m}$, 一阶固有频率由 $1\ 567\ \text{Hz}$ 提高到 $1\ 953\ \text{Hz}$, 质量减小 32.4% , 有利于导引头轻量化水平的提升和整机性能的提高。最后, 通过振动试验和稳定精度的检测数据验证了主框架的动态性能, 说明了拓扑优化结果的正确性, 这种拓扑优化方法可为其他重要件结构设计提供帮助。

关键词: 机械设计; 拓扑优化; 变密度法; 红外导引头

中图分类号: V241.02 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0218001

Topology optimization design for main frame of infrared seeker's stabilization platform

Liu Zhongyu^{1,2}, Zhang Tao¹, Wang Ping¹, Wang Tongjun¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the dynamic performance of infrared seeker's stabilization platform and diminish the negative effect of vibration environment on the stabilized accuracy and image quality of electro-optical load, a topology optimization based on the variable density theory was studied. In the topology optimization of the main frame of infrared seeker's stabilization platform, the maximum stiffness was taken as an objective function and the volume ratio constraint was taken as response functions by using the software of NX/TOSCA. The stiffness and modal performance of the main frame structure after optimization were analyzed by comparing with experience design. The results show that the mass of the main frame is reduced tremendously by 32.4% under the condition of the improved dynamic performance, the maximum deformation is reduced from $3.2\ \mu\text{m}$ to $2.8\ \mu\text{m}$, and the first order natural frequency is

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家“863”计划(2013AA122102); 国家“973”计划(2009CB7240020603B)

作者简介: 刘仲宇(1982-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事光电仪器结构设计与优化方面的研究。Email: ciomplzy@163.com

导师简介: 张涛(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电仪器系统设计与研究。Email: zhangt@ciomp.ac.cn

improved from 1 567 Hz to 1 953 Hz, that is beneficial to the lightweight level of ascension and the performance improved. Finally, the dynamic performance of the main frame is verified by vibration test and stabilized accuracy test, which proved the result of the topology optimization. This topology optimization method will provide help to structure design of the other important parts.

Key words: mechanical design; topology optimization; variable density method; infrared seeker

0 引言

近年来,红外制导武器因制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、能够昼夜作战等优点,受到各军事强国的高度重视。红外导引头^[1-2]是红外制导武器的核心部件之一,它通常由一个陀螺稳定平台系统组成,从而实现目标的搜索、识别与跟踪。主框架作为稳定平台的关键件之一,承载着整个稳定平台轴系和传感器载荷,良好的力学性能直接关系到平台的固有特性,因此有必要对其进行结构优化设计,从而提高稳定平台的动态性能。

结构优化设计^[3]是综合考虑结构的性能、材料及加工工艺等约束条件,来达到某一个或几个设计目标的最优实现。按照设计变量的类型,结构优化设计可分为尺寸优化设计、形状优化设计和拓扑优化设计。虽然尺寸优化和形状优化技术相对发展比较成熟,但是在尺寸优化和形状优化中,结构的拓扑构形保持不变,而结构的拓扑构形选择恰当与否直接决定了结构设计的优劣。结构拓扑优化设计是在结构概念设计过程中,在给定设计目标和约束的情况下寻求最优的产品拓扑,它的主要思想是在给定的设计区域内寻求最优材料的分布。它用运筹学中的数学规划理论求解优化问题,是产品结构优化真正的最优解。因此,在结构的设计和优化过程中,拓扑优化比尺寸和形状优化更具有理论意义和应用价值。

近几年,在汽车、航天、航空等领域,由于对产品重量和性能的特殊要求,拓扑优化技术得到快速的发展。代表性的工作有:朱剑峰等人对汽车变速箱壳体结构的拓扑优化设计^[4];李畅等人对空间相机框架的拓扑优化设计^[5];许华旻等人对飞行模拟器大臂结构的拓扑优化^[6]。文中将拓扑优化技术引入到导引头稳定平台主框架结构设计中,利用拓扑优化技术优化出结构加权柔度最小下的结构材料分布,改善框

架的动态性能,获得了主框架最佳的拓扑结构,达到了良好的优化效果。

1 拓扑优化理论

拓扑优化的主要思想是将寻求结构的最优拓扑问题转化为在给定的设计区域内寻求最优材料的分布问题。目前比较成熟的优化方法有均匀化法、渐进结构法、变密度法等。其中,变密度法^[7]是目前工程设计中广泛应用的方法,很多大型 CAE 软件如 NX/NASTRAN、ANSYS、Hyperworks 都已开发出基于变密度法的拓扑优化模块,文中将基于此方法进行拓扑优化设计。变密度法最早由 Mlejnek 等人根据均匀化方法提出。基本思想是:定义一个经验公式来表达每个单元的弹性模量与密度之间假定的函数关系,采用材料的相对密度作为优化设计变量,实现结构的拓扑优化。为了使拓扑优化的结果便于抽象成可加工的结构,对于中间密度值进行惩罚,使得其单元密度向 0~1 的两端聚集。在优化过程中,除了定义设计变量外,还要定义约束条件和目标函数。常以结构柔度最小化为目标函数,以结构体积轻量化比及节点应变量为约束条件,其变密度法拓扑优化数学模型^[8]为:

$$\begin{cases} \text{find } \rho=(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)^T \in R^n \\ \min C(\rho)=F^T U=U^T K U \\ u \leq a \\ V(x)=\sum_{i=1}^n \rho_i v_i=\rho_0 V_0 \leq V^* \\ 0 < \rho_{\min} < \rho_i \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为相对密度,是设计变量; n 为设计域中有限单元个数; $C(\rho)$ 为目标函数,表示结构的柔顺度; K 为结构的总体刚度矩阵; U 为结构的总体位移向量; F 为结构所受的载荷向量; u 为某一个节点的变型量; a 为位移约束值; V 为结构优化后的体积; v_i 结构单元体积; ρ_0 为给定材料用量比率; V_0 为初始结构体

积; V^* 为体积上限; ρ_{\min} 为最小相对密度。

拓扑优化设计的优化过程主要分为 4 步: (1) 建立有限元模型; (2) 对主模型施加载荷和边界条件; (3) 定义设计域、目标函数及约束; (4) 迭代更新设计变量, 计算弹性模量、刚度、应变能、体积等函数, 判断结果是否收敛。

2 红外导引头稳定平台主框架拓扑优化设计

2.1 拓扑优化有限元模型的建立

在进行主框架结构拓扑优化设计前, 首先要设计主框架初始结构模型。根据主框架自身功能及空间布局的需要, 可以利用实体单元建立初始结构模型。然后对初始结构进行有限元划分, 定义材料属性。因拓扑优化计算的规模巨大, 分析耗时与网格数量存在直接关系。为提高计算效率, 必须对有限元模型网格数量进行控制。通常, 控制网格数量会影响分析精度, 而拓扑优化设计只是对网格单元的整体分布规律求解, 所以对网格的数量不敏感。由于主框架模型以中心轴为中线基本对称且无明显过薄的特征结构, 因此, 选取 3D 十节点四面体网格进行网格划分, 共划分 18 837 个单元, 34 143 个节点。

2.2 受力、约束边界和优化参数分析

主框架在导引头中承受的力主要来自两个方面: 一是轴系和载荷自重通过轴承施加的力, 其受力方向指向地心; 二是导弹在发射过程中轴系和载荷过载通过轴承施加的力, 其受力方向是沿着导引头的飞行方向, 指向导弹尾部。文中分析的导引头装载在小型空地导弹上, 导弹在整个打击过程中主要经历加速、平飞、末制导打击三个阶段, 飞行轨迹呈抛物线状, 所以导弹的工况是变化的。取三种工况在沿导弹方向和垂直导弹方向的力的最大值作为主框架的复合工况受力情况。因导弹在飞行过程中可能发生旋转, 所以对主框架在垂直导弹方向分析受力时须考虑两个方向。根据三维软件模拟结果, 载荷和轴系的总质量约 4 kg。可计算, 垂直导弹方向的施加力为 40 N。对于沿导弹方向的力与导弹过载程度有关, 一般空地导弹最大过载 4 g。可计算, 施加的力为 160 N。

主框架的约束边界来自与载荷舱的连接。将与载荷舱接触面的六个自由度全部约束。有限元模型及其受力和边界约束如图 1 所示。

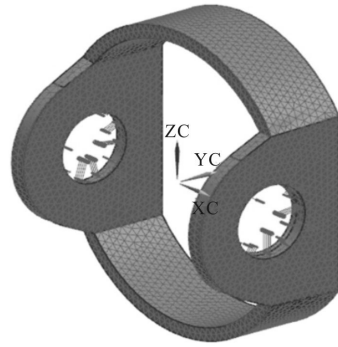


图 1 主框架有限元模型

Fig.1 Finite element model of the main frame

按照拓扑优化流程, 在 NX 拓扑优化模块中对优化参数进行设计。拓扑优化的设计目标是主框架刚度的最大化; 其设计约束需增加拔模方向约束; 其设计响应限制主要考虑体积比约束。

2.3 优化结果

利用 Tosca 拓扑优化求解器对有限元模型进行求解, 经过 25 次迭代, 计算结果收敛, 得到了拓扑优化的分析结果, 如图 2 所示。其中深色为密度值接近零的区域, 即材料去除的区域, 浅色为材料需要保留的区域。根据分析结果可见, 主框架两侧面的材料保留较多, 而上下两个圆柱面的材料几乎全部被优化掉。这说明上下圆柱面对载荷力分担贡献小, 与力学理论是一致的。另外, 为了保证结构的完整性, 对局部边界连接部分的结构材料进行了保留。

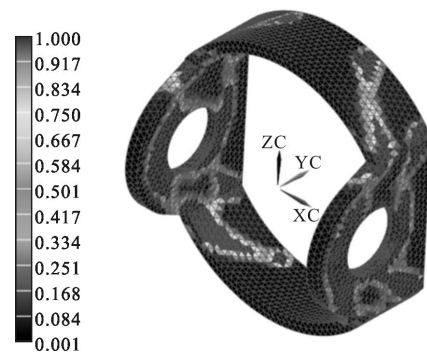


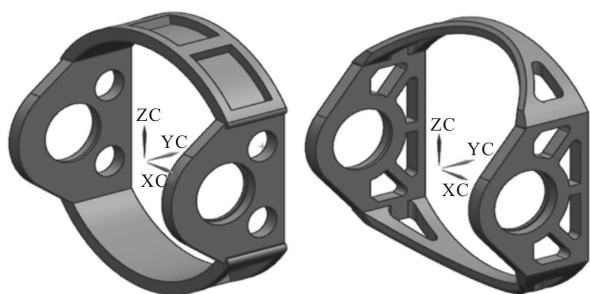
图 2 主框架拓扑优化后的密度分布图

Fig.2 Schematic diagram of the density distribution after topology optimization of the main frame

3 优化结果对比分析

根据主框架拓扑优化的结果, 对主框架的结构

进行了重新建模。与根据经验设计的采取轻量化措施的主框架结构形式进行工程对比分析，经过经验设计和优化设计的结构形式如图 3 所示。



(a) 经验设计

(b) 优化设计

(a) Experience design

(b) Optimal design

图 3 主框架的两种结构形式图

Fig.3 Two kinds of structure forms for the main framework

3.1 静力学对比分析

两种结构形式的静力学分析结果如表 1 所示。从表中可见，主框架经过优化设计后，最大变形量由 $3.2\ \mu\text{m}$ 减小到 $2.8\ \mu\text{m}$ ，变形量减小 12.5%；最大应力值由 0.96 Mpa 减小到 0.61 Mpa，应力值减小 36.5%；质量由 0.34 kg 减小到 0.23 kg，质量减小 32.4%。可见，拓扑优化模型实现了材料的最优分布，使结构强度提高的同时大幅减小了自身质量，有利于提升平台的轻量化水平和提高主框架内装轴系的精度和红外载荷的视轴精度。

表 1 两种结构形式的静力学分析结果

Tab.1 Static analysis results for two kinds of structure forms

Index	Maximum deformation/ μm	Maximum stress/Mpa	Mass/kg
Experience design	3.2	0.96	0.34
Optimal dedign	2.8	0.61	0.23
Change rate	12.5%	36.5%	32.4%

3.2 模态对比分析

模态分析是对结构动态特性的解析。主框架两种结构形式的模态分析结果如表 2 所示。表中列出了主框架两种结构形式前三阶的固有频率，其中一阶频率由 1 567 Hz 提高到 1 953 Hz，提高了 25%，结构的动态特性得以大幅提升，增大了伺服系统带宽，

使导引头在各个工作阶段都具有良好的稳定精度和抗干扰能力。

表 2 两种结构设计的模态分析结果

Tab.2 Modal analysis results for two kinds of structure forms

Model order	1	2	3
Experience design/Hz	1 567	1 935	2 605
Optimal dedign/Hz	1 953	2 346	3 290
Change rate	25%	21%	26%

4 试验验证

经过优化并详细设计的主框架被加工和装配在红外导引头上，如图 4 所示。将整个导引头按挂飞状态，通过专用工装，置于振动台上进行正弦扫频试验，振动量值为 $2.5\ \text{g}$ ，频段为 20~2 000 Hz。图 5 为红外导引头的正弦扫频振动试验曲线。从图中可见，红外导引头在 26 Hz、75 Hz 频率处出现两个共振峰，说明在此频点产生了谐振，分析其原因：一是导引头对外安装结构壁薄且为悬壁结构；二是框架轴系刚度较低易发生低频谐振。然而主框架提供的支撑刚度良好，稳定平台跟踪状态稳定，达到了伺服带宽的要求。图 6 为红外导引头在三轴摇摆台上，以中小型固定翼飞机姿态变化典型参数 ($5\ (^{\circ})/\text{s}$, 1 Hz) 进行摇摆的稳定精度检测结果。试验通过测量红外载荷相邻两视场之间的角度差来获得稳定精度数据。因主框架主要承载俯仰轴系，故只对俯仰稳定精度进行了采样。经计算，俯仰稳定精度为 $20.6\ \mu\text{rad}(\text{RMS})$ ，满足指标小于 $30\ \mu\text{rad}$ 要求。通过以上两个试验，说明主框架动态刚度满足实际使用要求，验证了主框架拓扑优化结果的正确性。

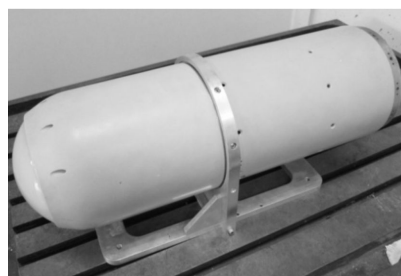


图 4 振动试验图片

Fig.4 Picture of vibration test

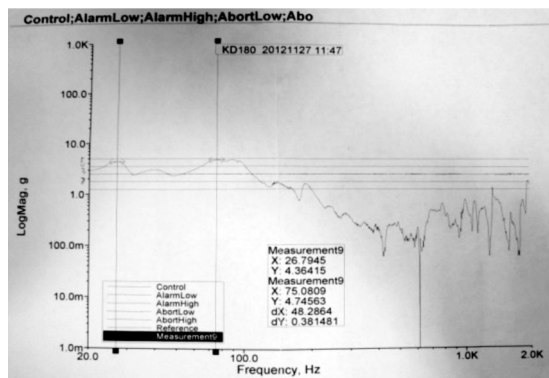


图 5 振动试验曲线

Fig.5 Chat of vibration test

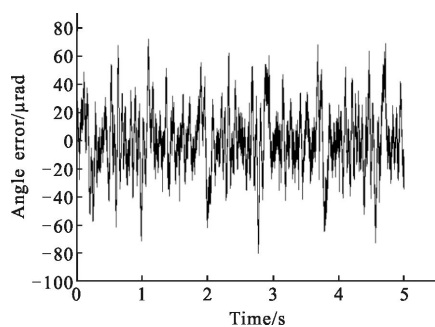


图 6 稳定精度检测数据

Fig.6 Test data of stabilized accuracy

5 结 论

基于拓扑优化变密度法,对红外导引头稳定平台主框架进行了拓扑优化设计。以刚度最大化为目标函数,计算出主框架材料的最优分布,获得了最优拓扑结构,得到以下结论:

(1) 对比经验设计和拓扑优化设计的主框架静力学分析结果,最大变形量由 $3.2\ \mu\text{m}$ 减小到 $2.8\ \mu\text{m}$,变形量减小 12.5%;质量由 $0.34\ \text{kg}$ 减小到 $0.23\ \text{kg}$,质量减小 32.4%。有利于导引头轻量化水平的提升和视轴精度的提高。

(2) 对比经验设计和拓扑优化设计的内框架模态分析结果,一阶固有频率由 $1\ 567\ \text{Hz}$ 提高到 $1\ 953\ \text{Hz}$,提高了 25%,有利于伺服带宽的提高及高稳定精度的实现。

研究表明,拓扑优化将结构设计空间材料的最优分布,应用于产品的概念设计阶段,大大节省了后续轻量化的时间,相比凭经验进行的轻量化设计,结构设计更趋合理。可见,对红外导引头稳定平台主框架进行拓扑优化是必要的,该方法也可用于其他红外导引头零件结构的优化设计。

参考文献:

- [1] Zhang Xin, Jia Hongguang. 90° off-axis angle infrared optical system of roll-pitch seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 143-147. (in Chinese)
- [2] Wang Min, Huang Chenggong, Guo Zhenghong, et al. Design and consistency analysis of IR imaging seeker closed-loop injection simulation experiment system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3211-3216. (in Chinese)
- [3] Wang Ping, Zhang Guoyu, Liu Jiayan, et al. Topology optimization design for inner frame of airborne electro-optical platform [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(13): 135-141. (in Chinese)
- [4] Zhu Jianfeng, Lin Yi, Chen Xiaokai, et al. Structural topology optimization based design of automotive transmission housing structure[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(3): 584-589. (in Chinese)
- [5] Li Chang, He Xin, Liu Qiang. Design and topology optimization of space camera frame fabricated by high volume fraction SiC/Al composite material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2526-2531. (in Chinese)
- [6] Xu Huayang, Guan Liwen, Wang Liping, et al. Topology optimization for the arm of flight simulator under inertial loads [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(9): 14-23. (in Chinese)
- [7] Mlejnek H P, Len R S. An engineer's approach to optimal material distribution and shape finding computer method in applied mechanics and engineering [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1993, 106(1-2): 1-26.
- [8] Fang Zifan, Yang Lei, Du Daojia, et al. Research on topology optimization design for support structure [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(15): 1836-1839. (in Chinese)