

摆镜式 IRST 反射镜支架结构与优化^{*}

陈兆兵[†], 郭 劲, 王 兵, 韩旭东

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2009 年 12 月 9 日收稿; 2010 年 6 月 14 日收修改稿)

Chen Z B, Guo J, Wang B, et al. Design and optimization of reflector bracket for moving mirror IRST [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences 2011, 28(2): 155-160.

摘 要 依据某复合型 IRST 系统的要求, 设计了适合该系统的支架结构. 以该结构质量最优和转动惯量最小为目标, 对支架进行了以平面轴向厚度为变量, 以模态频率和自重变形为约束的优化与分析. 结果表明, 在结构模态低阶频率和最大变形量变化极小的前提下, 支架质量由原来的 0.62kg 减小到 0.38kg, 转动惯量由原来的 $0.0098\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 减小到 $0.0056\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

关键词 IRST, 反射镜支架, 结构设计, 有限元分析, 结构优化

中图分类号 TP391.9

近程导弹打击在现代战争中已经成为两军直接对抗时进行定点清除的有效手段^[1], 而 IRST 系统是防御导弹打击的被动式告警设备中不可或缺的设备之一. 摆镜式 IRST 系统是这种告警跟踪设备设计中常用的结构, 系统在进行告警与跟踪的过程中, 伺服电机要驱动整个光电系统的头部进行运动. 系统的探测精度在很大程度上取决于反射镜组件的定位精度, 而系统的响应速度则取决于反射镜组件的动态性能. 这就要求系统中的扫描反射镜组件既具有较好的刚性固化能力又具有较小的转动惯量, 而组件中的反射镜部分由于设计方面的要求, 其轻量化受到一定的限制. 因此我们将研究重点转移到组件中支撑结构的设计及质量、转动惯量的优化方面.

当前采用反射镜形式的 IRST 系统的镜面支撑形式, 主要有底座与镜子固连到一起的一体化方式和将镜子通过镜边框架单独支撑并与底座连接方式 2 种^[2]. 反射镜与底座固连的方式能够简化系统的结构、节约空间, 但其缺点则是装校麻烦、需要较成熟的装校技术与经验; 而单独支撑的形式则与之相反. 在我们的设计中主要以对整体结构进行简化与轻量化, 因此在支撑形式上选择了第一种. 在反射镜组件的结构轻量化研究中, 当前主要以采用密度更小的复合型材料为主. 在我们的研究中采用了仿真的形式为结构设计做参考. 这种同时进行结构与结构轻量化分析的方式, 能够在设计之初就将系统的轻量化性能维持在一定的水平上, 这种优化方法对于 IRST 系统的反射镜支架结构与优化具有较大的应用价值.

1 IRST 系统反射镜支架结构设计

1.1 反射镜支撑结构形式选择

反射镜与底座固连的支撑形式中常用的镜面支撑方式有周边支撑、侧面支撑及背部支撑等 3 种形式, 如图 1 所示. 下面分别对上述几种支撑形式进行探讨.

^{*} 中国科学院长春光机所三期创新工程项目资助

[†]E-mail: chenzhaoxing99@163.com

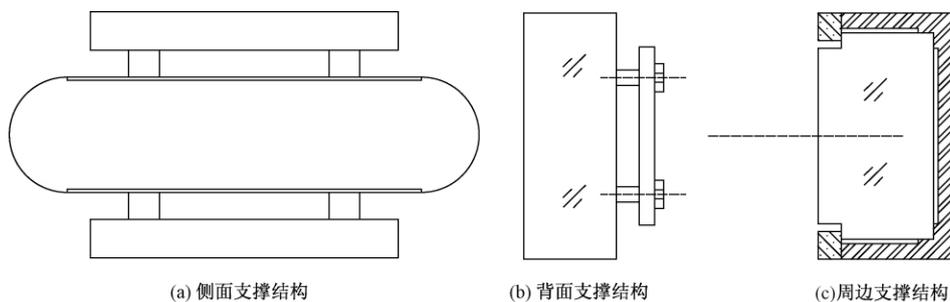


图 1 反射镜支撑结构简图

侧面支撑是以光学反射镜的 2 个侧面为定位基准的一种支撑方式. 在反射镜对称的 2 个侧面上加工有一定数量和深度的盲孔, 采用胶接方式在盲孔处放置与光学反射镜线膨胀系数相匹配的柔性支撑结构, 借助柔性支撑结构将反射镜和镜座连接在一起. 该支撑结构能消除因装配和环境温度变化产生的应力, 反射镜的质量通过侧面支撑结构卸荷到镜座上. 该支撑适用于长宽比大于 2、外形尺寸大 (大于 300mm)、面型精度要求高和质量轻的反射镜. 背部支撑是以光学反射镜的背部为定位基准的一种支撑方式. 在反射镜背部合适的位置加工一定数量的盲孔, 采用柔性支撑结构按一定的组合方式将反射镜和镜座连接在一起. 该支撑结构的反射镜也可将质量通过背部柔性支撑结构卸荷到镜座上. 由于背部支撑点数为 3 点或多于 3 点的组合, 支撑点间的连线形成的角度应为锐角, 因此背部柔性支撑也适用于反射镜的长宽比小、长边尺寸大、面形精度要求高和质量轻的反射镜支撑结构. 周边支撑是以光学反射镜的底面及某一个长边的侧面为定位基准面的一种支撑方式. 反射镜放置在周边相对封闭的镜座内, 保证反射镜的底面及某一个长边的侧面与镜座接触良好. 反射镜的 3 个非定位面与镜座间留有一定的间隙. 反射镜的工作面端部采用压板方式固定, 通过修研压板保证压板与反射镜接合面间为零间隙. 为提高反射镜可靠性, 在反射镜与镜座间的间隙处灌注硅橡胶. 周边支撑结构简单, 无装配应力, 适用于小尺寸的反射镜和温度相对稳定的工作环境.

某复合型IRST系统上所采用的扫描反射镜的外形尺寸为 $200\text{mm} \times 100\text{mm}$, 工作环境为地面高价值作战平台的导弹告警. 考虑到该型装备并不比卫星预警等空间预警装备的使用环境恶劣, 设计时主要考虑反射镜的低惯量运动, 同时为保证反射镜的成像质量, 选用优化的周边支撑结构; 并对周边支撑方式进行了不同于传统支撑方式的改进, 有效解决了传统支撑方式存在的材料匹配热应力和系统遮光等问题.

1.2 反射镜支架结构设计

本系统采用镜框的摆动来带动反射镜实现整个系统在俯仰方向的跟踪运动. 设计中采用三维建模与分析同时进行^[3-5]; 镜框采用改进式周边支撑的外框架, 使轴头与反射镜框连接; 通过驱动电机带动反射镜座从而带动反射镜进行摆动; 反射镜与支撑镜框间既可采用斜面接触进行固定, 增加定位的精确性, 也可以通过镜框上的均布弹性压片来对反射镜进行压紧固定, 通过调节螺钉, 可调节压紧力; 选用均布弹簧片压紧模式. 整个复合型IRST系统及支撑架结构如图2所示.

为解决传统周边支撑带来的镜面遮挡、弹簧片背部固定困难等问题, 设计过程中采用了周边支撑和侧面支撑相结合的方式. 在镜面支撑架背面进行开口的手段实现弹簧片的背部压紧和镜面相对于支撑架的悬空. 这种设计一方面能使反射镜组件的装配简单易行, 使装配应力很小; 另一方面能保证弹簧压紧紧密压紧反射镜, 保证良好的紧固性.

1.3 对于原始支架结构的有限元分析

为验证整个反射镜组件在IRST系统运动过程中承受动载荷的能力, 往往需要对其进行动态响应分析^[6]. 模态分析用于抽取结构的固有频率和振型, 其目的是为了系统在工作时发生共振和出现有害的振型; 同时也可作为其他更详细的动力学分析的起点, 如瞬态动力学分析、谐振响应分析、谱分析^[7-9]. 模态分析的结果一方面可显示系统的动态性能; 另一方面可为系统结构的优化提供支持. 随着新

材料金属基复合材料的出现,我们采用了铝基复合材料,铝基复合材料特点是轻质、高强、高韧性,导热性能好,易于塑性加工,工艺灵活性大,制造成本低,其材料属性如表 1 所示。



图 2 复合式 IRST 系统和反射镜组件结构图

表 1 框架材料属性表

材料名称	牌号	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ
铝基复合材料	SiC/AL-HK8	2700	180000	0.33

反射镜支架的质量和一阶频率是设计过程中需重点考虑的因素,我们主要做了支架的静力学和动力学初步分析。从分析结果看,支撑架结构的总质量初始为 0.68kg,转动惯量为 $0.0098\text{kg}\cdot\text{m}^2$,一阶频率为 58Hz,最大变形量为 0.082mm。经过分析可知,支架的模式值与地面设备的频率值相差较大,不会发生共振,可完全满足系统要求。但其质量和转动惯量比较大,在力矩电机的选择及系统的响应速度方面有较大影响。因此需要对整个支撑架结构进行基于质量和转动惯量的优化。经过分析,当系统完成结构优化、IRST 系统处于启动与减速状态时,该结构受到的冲击力最大,这时该反射镜支架组件的变形也最大。该变形量的最大值位于反射镜支撑架离转动轴最远的位置,最大变形值为 0.098mm。这种变形属于小变形,且支撑架在对反射镜进行支撑的过程中采用的是弹性连接,因此支架的这种变形对反射镜的影响是可以忽略的。

2 IRST 系统反射镜支架结构的优化设计及分析

2.1 结构有限元分析与优化的方法

在结构的优化设计过程中主要考虑目标函数、设计变量、约束条件 3 方面的因素^[10-12]。目标函数是设计过程中希望得到的最重要的参数,在结构优化过程中往往把结构质量、结构转动惯量等作为目标函数;设计变量既可以是结构件的面积、截面尺寸等几何参数,也可以是结构件的弹性模量、热膨胀系数等材料参数;约束条件指的是通过设计变量得到目标函数的过程中需要限制的诸如边界约束、变量关系等制约条件。结构的优化问题是数学规划范畴,且复杂的结构优化问题一般属于非线性规划问题。优化过程中的状态方程如式(1)所示,其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为优化过程的设计向量, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 为优化过程中的状态向量。又因为我们所研究的是结构的线弹性优化问题,所以式中的状态变量 Y 就是有限元节点的位移 U ,且有结构优化的平衡方程 $KU = R$,式(1)中 $k = (1, 2, \dots, m)$, R 为载荷阵列, K 为整体刚度矩阵。本结构设计的优化目标为使系统在满足支撑刚度与强度最低要求的情况下其质量最小,通过求导式(2)与取对数得到状态的极值。

$$f_k(X, Y) = KY - R = 0, \quad (1)$$

$$\varphi'(X, Y) = 0. \quad (2)$$

优化过程是一个不断循环迭代的过程,通过设置迭代步长和迭代条件来得到最终的迭代效果。首先

要对需要优化的结构进行基于有限元的简化,以利于拓扑结构的分划,这种简化必须以不改变结构的主体性能为基础,去掉一些关系不大的小结构如小细孔等;然后对结构进行非等参单元划分,保证重要位置处有足够精度,在非重要的部分则要适当降低精度,这样能节省计算量^[13].各种约束条件的模拟与简化是优化过程中重要的步骤,其模拟的近似程度直接影响模型的准确性.对整体结构进行完这些计算前的准备工作后,就可以对节点进行相应的迭代运算.下面以节点 X^0 为例说明优化的迭代过程,其具体的优化过程可用下面 3 个式子描述.

$$X^1 = X^0 + \delta X^0 \quad (3)$$

$$h_i(X, Y) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

$$\Delta\varphi'(X, Y) = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial X}\right)^0 \delta X^0 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial Y}\right)^0 \delta Y^0 = \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial X}\right)^0 - \left(\frac{\partial\varphi}{\partial Y}\right)^0 (K^{-1})^0 \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^0\right] \delta X^0. \quad (5)$$

通过式(1)代入 X^0 的节点值得到结构的状态变量 Y^0 ,然后对变量 X 进行基于步长的迭代,如式(3)所示.同样利用式(1)可得到迭代后的状态变量 Y^1 ,通过比较状态变量 Y 值是否满足条件来确定迭代的结束次数.在整个优化过程中必须满足变量 X 和状态变量 Y 均在式(4)的约束条件下.整个优化过程的最终条件为式(2),迭代过程中将迭代值代入式(2),则可得判断条件式(5).通过不断的判断与评估,进行过程修正,直到满足式(4)所示的所有约束条件.

2.2 对某 IRST 系统反射镜支架结构进行基于有限元的仿真优化

某型反射镜支架在系统工作过程中,影响性能的主要因素为支架的质量和转动惯量.在设计优化过程中,此 2 因素为优化的目标函数,分别为 $\varphi_1(X, Y)$, $\varphi_2(X, Y)$.考虑到本系统的镜面材料和支撑结构材料采用性能接近的铝合金,约束条件 h 可以达到铝合金的加工极限,但为保证支撑结构的强度,镜面背后的支撑板厚度最低不得低于 3.5mm.为减少系统的转动惯量值,在优化过程中设置支撑板后的开口位置向 2 侧移动,同时为使支撑架的强度不受大的影响,后板开口侧边与支撑板侧边的距离最小为 15mm.整个支撑架的优化过程是提交给 MSC/NASTRAN 软件进行的,将得到目标函数的各类约束条件提交给 PATRAN 软件,得到各种工况下的分析体,将分析体导入计算软件 NASTRAN,可以得到仿真校核后的最终结果.通过结构的动力学、静力学分析结果,可以校核质量与转动惯量的优化效果.在结构模态频率变化和最大静态变形量极小的前提下,支架质量由原来的 0.62kg 减小到 0.38kg,其转动惯量由原来的 $0.0098\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 减小为 $0.0056\text{kg} \cdot \text{m}^2$.支架质量的优化率为 39%,转动惯量的优化率为 43%.从效果上看,优化前后支架的低阶模态频率和最大变形量基本没有太大变化,而优化率却非常高.从优化的具体内容上看,本优化主要对精密背后的支撑板进行了轻量化,其原来的厚度为 5mm,优化后的厚度变为 3.8mm,完全满足厚度为 3.5mm 以上的结构强度要求.对固定反射镜的压块也进行了较大的结构优化,其结构尺寸也有一定的减小,经过校核,这种优化完全满足支撑条件要求.可见这一优化完全满足结构的各项条件,其结果是有效的.另外为对系统优化后的动态性能进行校核,我们进行了基于整个支架的结构动力学模态分析,表 2 为支架优化前后结构的动力学分析对比结果.

表 2 支架优化前后的模态分析频率值

模态阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
优化前结构频率值/Hz	58	62	119	124	186	192
优化后结构频率值/Hz	52	66	130	134	164	218

对优化后的支撑架结构进行了基于静力分析和动力学模态分析的校核.优化后支架在自重与惯性力作用下的最大变形为 0.094mm,表明支撑架的结构强度在优化后并未受到太大影响,完全可满足最大变形量 0.12mm 的系统设计约束条件.在进行动力学模态分析时,我们加载的是随机振动模式,从结果上看,结构的 1 阶振动频率在优化前后分别为 58Hz 与 52Hz,这样地面其他重要设备的固有频率差的比较大,具有较强的抵抗外部震颤的能力,能较好地满足设计要求.

3 结束语

摆镜式 IRST 系统的响应速度和探测定位精度在很大程度上受摆镜组件的整体质量和转动惯量的影响,在摆镜的结构、尺寸等参数无法改变的条件下,要最大限度地减小组件质量和转动惯量只能从镜子的支撑架入手.本文依据某复合型 IRST 的设计要求,对反射镜组件的材料、结构、固定方式等因素进行了探讨,并综合考虑实际要求设计了基于改进式侧边支撑的反射镜支撑结构.然后对反射镜支撑架结构进行了基于 MSC/NASTRAN 有限元软件的仿真校核优化,在优化过程中以支撑架结构的质量和转动惯量为目标函数,以结构的轴向尺寸和背板开口位置为约束条件.优化的结果是支撑架质量的优化率为 39%,转动惯量的优化率为 43%,具有明显的优化效果.结构优化前后,我们均做了支撑架的静力学分析和动力学模态分析,通过前后分析结果的校核对比,发现优化前后支撑架结构的最大变形量和低阶模态值变化均不明显,其结构强度和随机振动模态值可以满足该复合型 IRST 系统的设计要求.这就证明支撑架结构的设计和优化是可行的.

参考文献

- [1] Chen Z B , Guo J , Jiang W W . Improvement of detecting distance of UV warning system by Lowtran package and Gabor matching [J]. Optics and Precision Engineering 2009 ,17(10) :2359-2364 (in Chinese).
陈兆兵,郭劲,姜伟伟.基于 Lowtran 软件包和 Gabor 匹配提高紫外告警系统探测距离[J].光学精密工程,2009,17(10):2359-2364.
- [2] Liu Y , Cong S . Research and implementation of a tool path optimization method based on mesh uniformization [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences ,2008 ,25(4) :560-568 (in Chinese).
刘宜,丛爽.一种基于网格均匀化的刀位轨迹优化方法及其实现[J].中国科学院研究生院学报,2008,25(4):560-568.
- [3] Gao Y G , Zhang Q , Shi Y L , et al . Structure design of precise displacement platform without guiding apparatus [J]. Optics and Precision Engineering ,2009 ,17(9) :2199-2205 (in Chinese).
高云国,张倩,史亚莉,等.无导轨高精度位移平台的结构设计[J].光学精密工程,2009,17(9):2199-2205.
- [4] Wang H S , Chen Y Y , Wang S Z , et al . Design of 3D precision displacement system [J]. Optics and Precision Engineering ,2010 ,1 :175-182 (in Chinese).
王怀生,陈育英,王淑珍,等.三维精密位移系统的设计[J].光学精密工程,2010,1:175-182.
- [5] Zhang L , Jia X Z . Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera [J]. Optics and Precision Engineering 2009 ,17(3) :603-608 (in Chinese).
张雷,贾学志.大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化[J].光学精密工程,2009,17(3):603-608.
- [6] Manson D , Richards M , Nicolson T , et al . Staring naval infrared search and track demonstrator [J]. SPIE 2005 ,5987:598706(1-12).
- [7] Song L Q , Yang S M , Chen Z Y . Study on lightweight beryllium mirror of space solar telescope [J]. Optics and Precision Engineering ,2009 ,17(1) :58-64 (in Chinese).
宋立强,杨世模,陈志远.空间太阳望远镜中的轻量化镀膜研究[J].光学精密工程,2009,17(1):58-64.
- [8] Wei Q , Ai X Q , Jiang H H , et al . Optimizing design of dome figure for supersonic seekers [J]. Optics and Precision Engineering ,2010 ,2 :384-389 (in Chinese).
魏群,艾兴乔,姜湖海,等.超音速光学导引头整流罩的形状优化[J].光学精密工程,2010,2:384-389.
- [9] Gong Y B , Yang S M , Chen Z Y . Robust optimization design of primary structures of long slit spectrometers [J]. Optics and Precision Engineering ,2009 ,17(11) :2638-2645 (in Chinese).
龚雨兵,杨世模,陈志远.长缝光谱仪主结构的稳健优化设计[J].光学精密工程,2009,17(11):2638-2645.
- [10] Hu Z Q , Ling N , Pan J H , et al . Optimization control of PZT actuated deformable aspheric polishing lap [J]. Optics and Precision Engineering ,2009 ,17(1) :1-7 (in Chinese).
胡自强,凌宁,潘君骅,等.基于 PZT 的非球面能动抛光盘的变形优化[J].光学精密工程,2009,17(1):1-7.
- [11] 杨剑,张璞.新编 MD Nastran 有限元实例教程[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [12] Zheng L M , Deng C P , Yang S H , et al . Dynamics simulations and experiments of asway mechanism for laser cutting head [J]. Optics and Precision Engineering ,2009 ,17(12) :3047-3054 (in Chinese).
郑黎明,邓春萍,杨慎华,等.激光切割头摆动机构的动力学仿真及试验[J].光学精密工程,2009,17(12):3047-3054.

- [13] Sun X M, Tao L Z. Deformation design of long-spherical hollow rotor of electrostatic suspended gyroscope [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2206-2211 (in Chinese).
孙新民, 陶丽芝. 静电陀螺仪长球形空心转子的径向变形设计 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2206-2211.

Design and optimization of reflector bracket for moving mirror IRST

CHEN Zhao-Bing, GUO Jin, WANG Bing, HAN Xu-Dong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract We designed a bracket structure by request of some complex IRST. The aim of the structure optimization was to minimize the mass and moment of inertia. We completed the optimization and analysis in which we took the plane axis thickness as a variable and imposed restrictions on the mode frequency and deadweight distortion. The results show that the bracket mass reduces from 0.62kg to 0.38kg and the moment of inertia reduces from $0.0098\text{kg}\cdot\text{m}^2$ to $0.0056\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

Key words IRST, reflector bracket, structure design, finite element analysis, structure optimization