

镜体结构轻量化的多目标优化和多属性决策研究

林冠宇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 对空间成像光谱仪非球面镜使用多目标优化遗传算法, 结合多属性决策方法建立了对空间成像仪器中光学镜体轻量化优化的算法。以镜体的面形精度、重量和固有频率为 3 个优化目标函数, 通过优化影响三者的参数达到获得最优轻量化效果。对优化模型进行了动力学和温度载荷的有限元分析, 并按照优化模型进行了试制和相关的实验。模拟与实验结果表明, 优化后的镜体受惯性和温度载荷所引起的应力小于材料本身的屈服强度, 变形满足面形精度要求, 且有理想的精度和动态刚度。

关键词: 轻量化; 多目标遗传算法; 多目标优化; 多属性决策; 有限元分析

中图分类号: TH703

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102712.0093

Multi-objective Optimization and Multi-attribute Decision Making Study of the Lightweight Mirror Structure

LIN Guan-yu

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

Abstract: The multi-objective optimization genetic algorithm and multi-attribute decision making are used to generate an algorithm, which is to the light weight mirror optimum in the space imaging instrument. The three optimization object functions are the surface roughness, weight and free-frequency. The optimum structure is got by modifying the structure parameters impacting these functions. The algorithm is used for an even aspheric mirror which is used in a space limb imaging spectrometer. A group of optimum Pareto solutions are got on the basis of the multi-objective genetic algorithm. Then the optimum solution is obtained by ranking these solutions from best to worst. The differ-

ences are little between the solution and another solution gained by the Patran&Nastran optimization algorithm. It improves that the algorithm is available. The dynamic and temperature load finite element methods(FEM) are applied to the model and the mirror produced as the model is under correlation experiments. By the contrast of the analogue and the experiment results, it shows that the inertia stress under the inertia and temperature loads is far less than the material yield strength and the deformation meets the surface figure. The results indicate that the structure obtained by the algorithm satisfies the requirements. The method can be used in more applications by changing the parameters and the limited conditions. The work is still in proceeding.

Keywords: light-weight; multi-objective genetic algorithm; multi-objective optimization; multi-attribute decision making; finite element analysis (FEA)

1 引言

镜体的轻量化研究一直是光学研究的焦点。随着空间光学仪器的发展,光学系统中的镜片体积越来越大,稳定性要求越来越高,这就对镜体结构提出了更高的要求。一般包括:(1)最大限度限制静态载荷的作用;(2)提高系统的动力学特性;(3)提高系统的固有模态频率;(4)减轻重量。而合理的轻量化正是达到以上目的的最好途径^[1]。通过对镜体的轻量化优化,可以减小载荷对镜体面型的影响,并有效提升仪器的固有频率带宽,从而提高整个结构的力学和热学性能。目前,很多空间光学仪器都对镜片进行了轻量化处理,如JWST, LAMOST^[2]等,针对目标主要是扫描镜、大直径反射镜以及一些有特殊要求的非球面镜等。

本文从另一个角度对轻量化方法做出了研究。通过引入多目标遗传优化和多属性决策方法对镜体初始结构进行分析,优化结构参数,从而满足面型形变、重量和固有频率3个目标函数。以空间临边成像光谱仪中的一片非球面镜为例进行了分析,首先获得了Pareto最优解集,然后经由排序得到了最终优化结果。对这种优化结果进行了有限元分析和实验验证,证明这种优化思想是可行的,并具有一定的推广应用潜力。

2 轻量化优化算法理论

2.1 多目标优化和求解理论

多目标优化问题可以表述为如下形式^[3]:

$$\begin{aligned} \min F(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] & h_i(x) &= 0, i=1, 2, \dots, I \\ x &= [x_1, x_2, \dots, x_l] & g_j(x) &\leq 0, j=1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad , s.t. \quad (1)$$

上式表示了 n 个优化属性准则, l 个优化变向量, I 个等式约束和 J 个不等式约束的多目标最小化优化问题。在多目标优化中,由于目标之间的相互冲突,实际上很难找到一个最优解,而只能找到一系列可以满足要求的解,这些解的特点是至少存在一个目标优于其它的解,这样的解组成的集合称之为非支配解集(即Pareto最优解集)。目标优化算法实际上就是求得该优化问题的Pareto最优解集^[4]。

多目标遗传算法(NSGA)是以NSGA为基础进行改进的非支配排序遗传算法,采用快速非支配排序过程、精英保留策略和无参数小生境操作算子^[5-6],是一种求解Pareto最优解集的有效算法。其原理及操作步骤如下:

(1) 快速非支配排序

在选择运算前根据个体的非劣解水平对种群分级。首先将所有非劣解个体划分为同一等级,令其等级为1;然后将这些个体从种群中移出,在剩余个体中找出新的非劣解,令其等级为2;重复以上过程

直至所有个体均被设定为相应的等级。

(2) 虚拟适应度

为了保持个体的多样性、防止个体在局部堆积,提出了虚拟适应度的概念。它指目标空间上的每一点与同级相邻两点之间的局部拥挤距离,即目标空间第 i 点的拥挤距离等于其在同一等级相邻的点 $i-1$ 和 $i+1$ 组成的矩形两边长之和。引入虚拟适应度的好处是可以使计算结果在目标空间比较均匀地散布,从而具有较好的鲁棒性。具体计算步骤如下:(a)对同层的个体初始化距离: $L[i]_0=0$;(b)对同层的个体按第 m 个目标函数值升序排列: $L=\text{sort}(L, m)$, 使得排序边缘上的个体具有选择优势,给定一个大数 $L[0]_m=L[l]_m=M$;(c)对排序中间的个体求拥挤距离;(d) $L[i]_m=L[i]_{m-1}+(L[i+1]_m-L[i-1]_m)$, 其中, $L[i]_m$ 为第 i 个个体的第 m 个目标函数值;(e)对不同的目标函数,重复 (b) ~ (d) 操作。

(3) 选择运算

选择运算使优化朝最优解的方向进行并使解均匀分布。经过排序和拥挤距离计算,群体中的每个个体 i 得到非支配序 i_{rank} 和拥挤距离 i_d 两个属性。当 $i_{\text{rank}} < j_{\text{rank}}$ 或 $i_{\text{rank}} = j_{\text{rank}}$ 且 $i_d > j_d$ 时, i 优于 j 。其意义为:如果两个个体的非支配排序不同,取序号低的个体(分级排序时,先被分离出来的个体);如果两个个体在同一级,则取周围不拥挤的个体。

2.2 多属性决策理论

在多目标优化后获得一组解后,还需要对解集做出决策以挑选出基于方案的最优解。Hwang 和 Yoon 开发了逼近理想解的排序方法^[7-8] (TOPSIS),其原理是令所选择的方案与理想方案差距最小,且和负理想方案差距最大。利用 Vague 集,可以获得更为完善的 TOPSIS。简要流程描述如下:

(1) 构成加权规范矩阵

设 E 为整个域, E 上的多属性决策问题备选方案集记为 (A_1, A_2, \dots, A_m) ; 评价指标集为 (C_1, C_2, \dots, C_m) ; 记 $f_j = \{ \langle A_i, u_j(A_i), v_j(A_i) \rangle | A_i \in E \}$ 为方案 A_i 在 j 指标下评价集的相应元素,设定权重向量 $w_j = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}^T$, 利用 W 和 C_j 可以构成加权规范矩阵,对 $f_i(A_i)$, 其

加权规范评价集的相应元素记为: $f_i(A_i) = \langle A_i, a_j u_j(A_i), b_j + v_j(A_i) - b_j v_j(A_i) \rangle$ 。

(2) 确定理想解 x^+ 和负理想解 x^-

理想解 PIS (Positive ideal solution) 是针对某一个方案集 $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的最佳方案, 它的每个属性值都是决策矩阵中该属性的最优值; 而负理想解 NIS (Negative ideal solution) 则是一个最差方案, 它的每个属性值都是决策矩阵中该属性的最差值。根据函数公式确定理想解 P_j 和负理想解 N_j 为:

$$P_j = \{ \langle A_i, u_j^+, v_j^+ \rangle | A_i \in E \},$$

$$\begin{cases} u_j^+ = \max(a_j u_j(A_i) | i=1, 2, \dots, m) \\ v_j^+ = \min(b_j + v_j(A_i) - b_j v_j(A_i) | i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

$$N_j = \{ \langle A_i, u_j^-, v_j^- \rangle | A_i \in E \},$$

$$\begin{cases} u_j^- = \min(a_j u_j(A_i) | i=1, 2, \dots, m) \\ v_j^- = \max(b_j + v_j(A_i) - b_j v_j(A_i) | i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

二者均为 Vague 解。

(3) 计算各方案到理想点和负理想点的距离到理想点的距离:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n \max(|a_j u_j(A_i) - u_j^+|, |b_j + v_j(A_i) - b_j v_j^+|) \quad (4)$$

到负理想点的距离:

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n \max(|a_j u_j(A_i) - u_j^-|, |b_j + v_j(A_i) - b_j v_j^-|) \quad (5)$$

(4) 计算各方案综合评价指数

由理想解和负理想解计算综合评价指数 D_i , 计算公式为:

$$D_i = d_i^+ / (d_i^+ + d_i^-) \quad (6)$$

(5) 根据 D_i 进行排序排优, D_i 越大, 方案 i 越优。

3 反射镜数值算例

3.1 镜体结构优化参数和目标函数

以一面应用于光谱仪中的扁椭球镜为例来使用上述算法。结合加工工艺和镜体本身放置位置考虑, 决定采用如图 1 所示背部开放型的扇形轻量化方式^[9]。安装方式为开孔面四边胶接镜框固支, 材料为碳化硅。

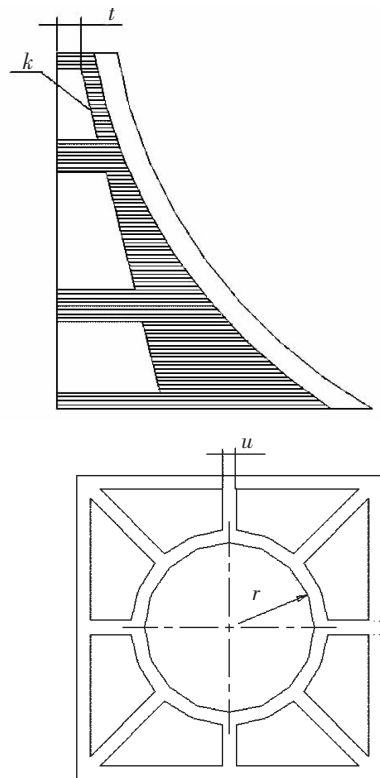


图1 反射镜结构图

镜体顶部宽度为 8 mm, 背部正方形为 90 mm×90 mm, 由图 3 得到镜体的各个参数: u 为壁厚, k 为斜率, t 为顶边深度, r 为盲孔半径。根据几何关系和总体结构可以确定各参数的范围:

u : 2~5 mm, t : 2~8 mm, k : 0~6.2, r : 46~53 mm

我们所关心的主要目标有 3 个, 分别为镜体的面型形变、重量和固有频率。

镜体的面型变化实际上就是重力作用下的结构内部形变量, 将实际结构离散为单元组合体, 对其中的任意一个单元体, 由最小势能原理^[10]有:

$$U = \frac{1}{2} \{\delta\}^T \left(\iiint [B]^T [D] [B] dx dy dz \right) \{\delta\}^e \quad (7)$$

式中, $\{\delta\}^e$ 为单元结点位移, $\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\}^e$ 为单元应变, $[D]$ 为弹性矩阵。由此导出各单元应力与应变。镜体的重量由体积决定, 其几何关系表示为:

$$V_{\text{save}}(u, k, t, r) = \frac{1}{2} \pi \int_0^u \int_0^{\gamma} d\sigma dx + \int_0^u \int_0^a d\sigma dx + \int_0^u \int_0^{a-2u} d\sigma dx +$$

$$\int_0^u \int_{\frac{u}{k}+t}^{\frac{a-r+u}{k}+t} d(\sigma_1 + \sigma_3) dx + \int_0^u \int_0^{\frac{a}{2k}+t} d(\sigma_2 + \sigma_4) dx \quad (8)$$

其中, $V_{\text{save}}(u, k, t, r)$ 表示镜体总体积。

求解结构的固有频率实际上就是求解无阻尼和无外载情况下运动方程的特征值和特征向量^[11]。结构的特征方程可以表示为如式的一般形式:

$$([K] - w^2 [M]) \{\phi\} = 0 \quad (9)$$

其中, $[K]$ 为刚度矩阵; $[M]$ 为质量矩阵; $\{\phi\}$ 为特征向量, 即振型; w 为频率。根据矩阵代数求解特征值的方法可以求得结构的固有频率。

3.2 结构解算结果

NSGA 方法的参数设定为: 种群 100, 进化代数 500, 交叉概率 0.9, 变异率 0.1。图 2 给出了 3 个目标之间的 Pareto 解分布图, 共 145 个解。

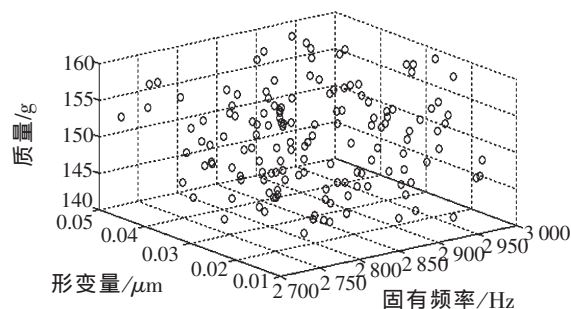


图2 Pareto解的分布图

经过 NSGA 方法获得 Pareto 最优解集可以构造决策矩阵, 决策属性定义为所考虑的 3 个目标函数, 因此决策矩阵的大小为 145×3。采用信息熵方法得到 3 个属性的权重值如表 1。可知面型精度的权值最大, 其次是重量, 固有频率的权值最小。

表1 属性权重值

属性	固有频率(Hz)	形变量(μm)	质量(g)
权重	0.067	0.582	0.351

按照 TOPSIS 方法对 Pareto 解进行排序, 表 2 给出相似度从大到小的前 3 个方案。

以相似度最大的方案为最终的优化解, 得到:

$u=4.032$ mm, $k=5.143$, $t=5.084$ mm, $r=49.845$ mm

将最优模型输入 Patran&Nastran 进行分析, 获

表2 TOPSIS排序结果

u (mm)	k	t (mm)	r (mm)	固有频率 (Hz)	形变量 (μm)	质量 (g)	相似程度	排序
4.032	5.143	5.084	49.845	2 956.1	0.028 6	146	0.968	1
4.032	5.143	5.355	47.625	2 864.4	0.041 9	171	0.965	2
3.904	5.143	5.128	50.204	3 018.2	0.031 1	147	0.964	3

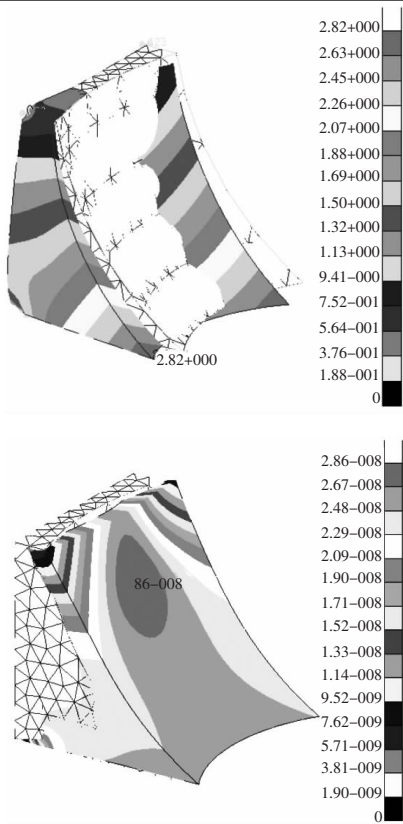


图3 算法优化模型的一阶固有频率与内载荷变形得的结果如图 3。

利用文中算法得到的参数使用软件模拟得到其一阶固有频率为 2 956.1 Hz，自重作用下 PV 值为 2.86×10^{-5} mm，RMS 值为 0.85×10^{-5} mm，满足 $PV\leq\lambda/10$ ， $RMS\leq\lambda/40$ 的要求。

利用 Patran&Nastran 软件优化算法得到一阶固有频率为 2 891.2 Hz，自重作用下 PV 值为 2.95×10^{-5} mm，RMS 值为 0.90×10^{-5} mm，总质量为 148 g。可见两种算法的优化能力基本相同，文中算法略优。

对优化参数进行限定并修改算法中的一些条件可以使算法使用范围得到拓展：将 k 设定为 0，则算法可以处理均匀去除材料厚度的镜体结构；将 r 设定为 0，添加背部轻量化孔的边长为优化参数，并以孔

的边数为限定参数，例如，三角形孔限定参数为 3，蜂窝孔限定参数为 6，依此类推，并可结合具体镜体结构参数进行优化条件更改。

4 仿真分析与实验结果分析

4.1 惯性载荷影响

由于实验条件所限，对惯性载荷所带来的影响难以通过实验来验证。在这里我们使用 Patran&Nastran 软件对其进行仿真分析，通过对结构施加 3 个方向上的不同加速度载荷进行分析，获得表 3。

表3 固有频率分析结果

阶数	1	2	3	4	5	6
仿真结果/Hz	2 956.1	3 180.4	3 338 4	0 52.9 4	2 41.3 4	9 57.9

表4 各向载荷分析结果

惯性载荷 (m/s^2)	等效应力/Pa		最大变形量 (mm)	变形量RMS 值 (mm)
	最大	最小		
1 g (x向)	3.3×10^5	2.53×10	2.87×10^{-5}	0.85×10^{-5}
10 g (x向)	3.3×10^6	2.53×10^2	2.87×10^{-4}	0.89×10^{-4}
20 g(x向)	6.6×10^6	5.06×10^2	5.73×10^{-4}	1.71×10^{-4}
1 g (y向)	2.18×10^5	2.84×10	3.11×10^{-5}	0.93×10^{-5}
10 g(y向)	2.18×10^6	2.84×10^2	3.11×10^{-4}	0.93×10^{-4}
20 g(y向)	4.37×10^6	5.67×10^2	6.22×10^{-4}	1.86×10^{-4}
1 g(z向)	3.37×10^5	3.35×10	3.69×10^{-5}	1.1×10^{-5}
10 g(z向)	3.37×10^6	3.35×10^2	3.69×10^{-4}	1.1×10^{-4}
20 g(z向)	6.74×10^6	6.69×10^2	7.37×10^{-4}	2.2×10^{-4}

依据表 3 数据对比熔石英物理性能可知，镜体内部最大主应力均小于材料的弹性强度，说明熔石英可以承受以上加速载荷并不会被破坏和产生残余变形。同时可以看到，在 x 方向和 z 方向上，镜体所受应力大小相近，并均大于 y 方向上所受应力，发生最大变形量的方向位于 z 方向上。

4.2 热载荷影响

温度场下温度分布表达式^[12]：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q = 0 \quad (10)$$

边界条件为: $T = T_B(t)$

其中, λ 为材料导热系数, α 为膨胀系数, T_B 为介质在镜片表面附近温度。求得温度后, 通过有限元分析, 可由变分原理推导出温度载荷导致的总体变形及内部的应力分布。

镜体所受温度场范围由通常太空情况可设为 $-30 \sim 40^\circ\text{C}$, 并为稳态温度场, 采用的实验装置为仿真结果和实验结果对比如表 5。

可以看到, 当镜体受温度载荷影响时, 反射镜

表 5 热载荷分析结果

温度载荷/ $^\circ\text{C}$	等效应力 Pa Max	面形变化/ mm Max	变形量RMS 值/mm	实验结果 (变形最大值) /mm
-30	1.85×10^6	1.60×10^{-4}	5.10×10^{-5}	1.77×10^{-4}
-10	0.62×10^6	0.53×10^{-4}	1.61×10^{-5}	0.71×10^{-4}
0	2.00×10^5	1.74×10^{-5}	5.25×10^{-6}	1.88×10^{-5}
10	0.66×10^6	0.57×10^{-4}	1.70×10^{-5}	0.69×10^{-4}
30	1.97×10^6	1.71×10^{-4}	5.08×10^{-5}	1.58×10^{-4}
40	2.63×10^6	2.29×10^{-4}	6.78×10^{-5}	2.03×10^{-4}

参考文献

- [1] 吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(5): 69-80.
- [2] Nordt A, Jacoby M, Biggs B, et al. NIRCcam fold mirror and mount designs[J]. SPIE, 2007, 6692: 66920F-1-66920F-9.
- [3] Fox R L. *Optimization Methods for Engineering Design*[M]. Addison-Wesley Publishing Company, 1971: 1-18.
- [4] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 120-140.
- [5] Deb K, Pratap A, Agrawal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans. Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [6] 李学斌. 吸力吸振器的多目标优化和多属性决策研究[J]. 振动工程学报, 2009, 22(3): 319-324.
- [7] Hwang C L, Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making-Methods and Applications: A State-of-Art Survey*[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [8] 张建胜, 吴祈宗. TOPSIS 方法在 Vague 集中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(10): 937-940.
- [9] 张舸, 赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 48-53.
- [10] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 9.
- [11] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 34-37.
- [12] Daryl L. Logan. *A First Course in the Finite Element Method* [M]. Thomson Learning, 2002: 133-138.

作者简介: 林冠宇 (1976-), 男, 汉族, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 2007年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事紫外遥感仪器设计及研究。E-mail: linguanyu760726@sohu.com。

内部最大主应力小于材料弹性强度, 不会影响结构参数, 且相对于惯性载荷来说, 热载荷的等效应力对镜体的影响较小。

5 结 论

本文将多目标遗传理论与多属性决策理论融合使用, 对镜体轻量化进行了研究。以面型精度、重量和固有频率为目标函数, 以一个非球面镜为例讨论了镜体的优化问题。这种算法是一种尝试性的应用, 有限元分析结果和实验结果表明, 采用这种方法得到的结果是可行的。

通过修改算法中的参数, 文中所采用的方法也能够用于其他类型的轻量化设计研究中。但是, 由于镜体结构参数千变万化, 镜面所处环境情况十分复杂, 实际应用中的限定条件必然会增多, 需要优化的目标函数也会增多, 这些都会大大提高这种方法的复杂度; 相应地, 也就很难找到一种可以通用的轻量化方法, 必须要结合实际情况进行全盘的考虑。本文为镜体的轻量化方法提供了一种思路 and 参考。