

# 基于ESO的反射镜拓扑优化设计

薛育, 孙志远

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 针对目前反射镜拓扑优化存在的局限性和渐进结构优化的优点, 提出了用渐进结构优化的方法对镜体进行拓扑寻优。分析了渐进结构优化的原理并进行了改进, 同时对比了不同模型和删除参数的影响, 对镜体在竖直和水平两种工况下分别进行分析, 得到了在复合工况下材料的最佳分布(载荷传递路径), 分析了这个结果与现有镜体结构形式的异同, 给出了改进建议, 根据上述最佳材料分布加以整理, 提出了一种多点支撑下的镜体结构形式, 对以后相关设计具有一定的参考价值。

**关键词:** 渐进结构优化; 反射镜; 拓扑优化; 有限元

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9870(2011)03-0019-04

## The Topology Optimization Design of Mirror Body Based on Eos

XUE Yu, SUN Zhiyuan

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

**Abstract:** In order to obtain a light weight, optimized and high-stiffness mirror body, the application of topology optimization is undisputed. By means of ansys software, evolutionary structure optimization method (ESO) is modified to superintend the spatial material distribution among the body. Various parameters in ESO and finite element modal are took into consideration to post the difference effect in the loop. Subsequently both perpendicular and horizontal load case analysis are carried out respectively, and the intersection of result is the non-effective section which will be deleted, complex conditions load-carrying path is the residual. A 3-D modal in multi-point support style is construed based on smoothed elements contour. There is some diversity combined with consistent in compared to regular topology outcome. Finally some advice can be drawn from above which provides a certain value of reference for later design.

**Key words:** evolutionary structure optimization; mirror; topology optimization; finite element

ESO (Evolutionary Structure Optimization) 是谢忆民、Steven 等人<sup>[1-5]</sup>在 1993 年提出的渐进结构优化方法。ESO 认为根据当前应力分布(或其他原则)不断循环, 逐渐去除结构中承载低效或无效的单元, 找到一条最佳的载荷传递路径, 进而实现对材料的优化配置。

大口径反射镜要求在重量最小即体积最小的状态下, 保持良好的面形精度和结构刚度。为实现这一目标, 采用拓扑优化从更高层面上了解结构设计的方向, 不仅通过参数化设计实现对镜体减重孔、加强筋等的优化布置, 并利用变密度方法对镜体背部

孔进行了优化设计。

利用 ANSYS 的单元生死特性及 APDL 优势实现了 ESO, 按照 ESO 的自然进化特性, 修改 ESO 的关键参数在一定程度上克服了其本身内在的不足, 并用这种方法对镜体设计区域进行拓扑优化, 寻找镜体结构在空间材料的最佳分布和轻量化形式。针对多点支撑的优化结果提出了一种新的镜体结构设计形式。

### 1 镜体拓扑优化的问题

大型望远镜的主反射镜的载荷为自重, 光轴在

收稿日期: 2011-05-19

作者简介: 薛育 (1960-), 女, 副研究员, 主要从事光电测控方面的研究, E-mail: xueyu0229@163.com。

水平和竖直两种极限工况范围工作,这是一个多工况的优化问题。根据反射镜口径的不同,其支撑方式不同。对应的约束形式也不尽相同。对于较小口径,镜体通过中心孔胶结在心轴上,这就是中心支撑方式;较大口径的镜体自重施加在底板和下侧边缘分布的支撑点上,这些支撑点之间通过杠杆机构实现均匀承载,这就是多点支撑。

ESO方法即:初始模型把所有可用的材料都用上,逐步去除不用的材料得到结果。因此镜体模型应当尽可能的大,以覆盖所有可能的初始设计区域。结合反射镜的实际,镜面面板区域不能作为设计区域。

具体步骤如下:

初始设计阶段:在已知结构的荷载和边界的条件下,定义设计区域,并用有限元网格离散该区域;

静力分析离散后的该结构;

按强度理论,对该结构各单元进行应力划分,删除处于低于应力状态的单元;

反复进行上述工作,直到将低于应力状态的单元全部删除,满足设计要求的强度;

将上述步骤重复进行,使该结构的重量或最大应力达到给定值,保持稳定状态。

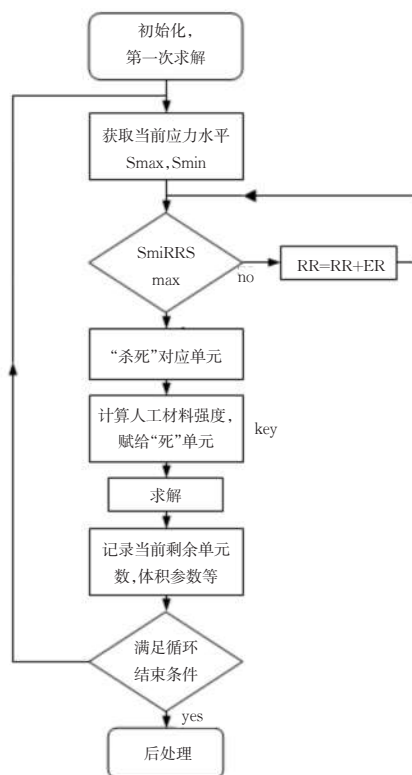


图1 ESO流程图及其改进措施

Fig.1 The flow chart and its amelioration means

## 2 ESO的实现和改进

ESO常用的删除准则有应力、应变、应变能等。对于各向同性材料常用Von Mises应力准则为删除依据,实现结构的最佳刚度分布。其实现流程如图1所示。

删除单元实际上还存在,只是暂时使其失去作用,相当于加上了删除标记,必要时候还能恢复,这在ANSYS是用单元的生死特性实现的。

其中在标记Key处需要进行修改,增加了新的处理办法,即:根据当前删除单元的比例,计算出人工材料的强度 $E_a$ ,其中

$$E_a = (V_{kill} / V_{all})^2 \times E_0 \times 10^{-4}$$

镜体在竖直和水平两种工况拓扑优化时,需要分别对同一个模型在水平和竖直状态下进行优化,得到两个不同的删除单元集合,对这两个集合求交集的结果,就是在两种工况下都能删除的单元。为了避免参数依赖,并且能对比不同进化率ER参数的影响,设置了两种进化率ER,如表1所示。由于初始最大应力和最小应力之间的比值较大,通常初始删除率RR=0.5%,在此基础上增长。

表1 单元参数和删除进化参数

Tab.1 Elem's parameter and evolution parameter

删除率RR=0.5%	进化率ER	ER=0.5%	ER=0.1%
单元数目Elem mun	1219	2860	5631

根据图1和改进措施,在ANSYS平台上,利用APDL方便和ANSYS接口,借助ANSYS中单元生死的概念进行程序开发,调试完善程序,并在每次循环之后增加图片输出,以反映当前的进化状态。

## 3 实例分析

在UG中建立三维模型,偏置镜面、分割镜体,所得的三维形体即是初始设计区域,导入有限元软件进行网格划分。如图2所示,原始镜体模型数据: $\Phi=1000$ ,厚度 $H=150$ ,球面半径 $R=2000$ ,材料定义为微晶。

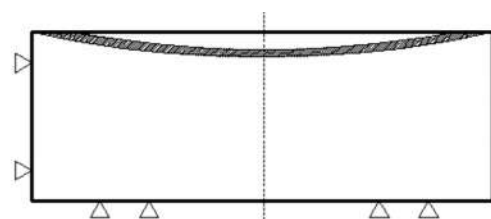


图2 镜体拓扑优化区域

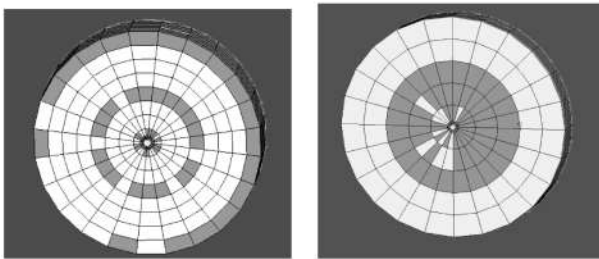
Fig.2 The region of topology optimization

初始设计区域是上端面为球冠截切得到的圆柱体,如图 2 所示。扫掠划分得到六面体网格,便于求解;同时为了对比单元形状的影响,最后也需要用自由划分的四面体网格进行分析。

由于是从空间细啃模型,逐渐删除低效单元,得到的是空间分布模型,这样的结果在图上表现不明确。对比 ER=0.5%的分析方案,在迭代后期删除单元过多过快,下面显示的结果都是 ER=0.1%的结果,其删除速率较为恒定,迭代次数约为 100~150。列出了前 50 次的 RR 和剩余单元数的变化趋势,图中黑色单元即为迭代后期标记删除的单元。

### 3.1 多点支撑背部

#### a) 竖直



(背部) (前面)

图 3 竖直工况下去除单元和剩余单元

Fig.3 The deleted and residual elem at vertical state

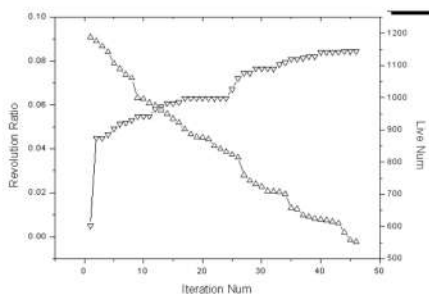
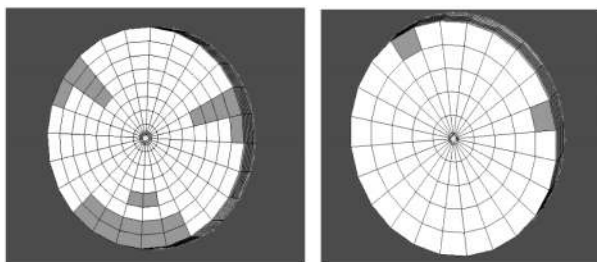


图 4 单元删除率, 剩余单元数量变化趋势

Fig.4 The deleted rate and trend of residual elem

#### b) 水平



(背部) (前面)

图 5 背部侧支撑水平工况下剩余单元分布

Fig.5 The distributing of residual elem at horizontal state with back side-support

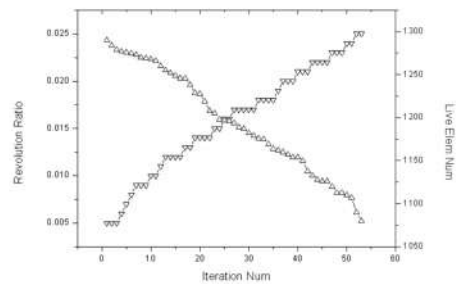
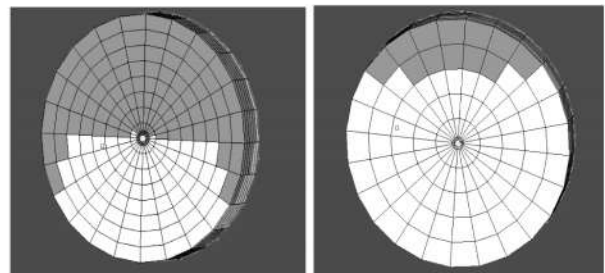


图 6 单元删除率, 剩余单元数量变化趋势

Fig.6 The deleted rate and trend of residual elem

#### c) 水平



(背部) (前面)

图 7 水平工况下边三个侧支撑剩余单元分布

Fig.7 The distributing of residual elem at horizontal state with three below side-support

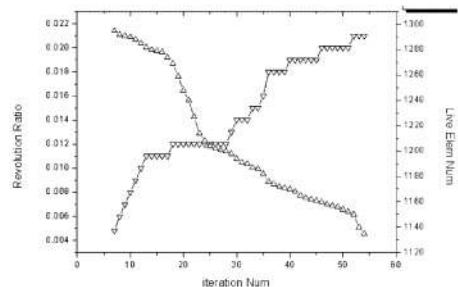


图 8 单元删除率, 剩余单元数量变化趋势

Fig.8 The deleted rate and trend of residual elem

### 3.2 中心支撑

#### a) 水平—重力与光轴同向

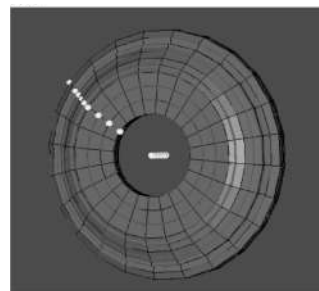


图 9 中心支撑竖直工况下剩余单元分布

Fig.9 The distributing of residual elem at vertical state with center -support

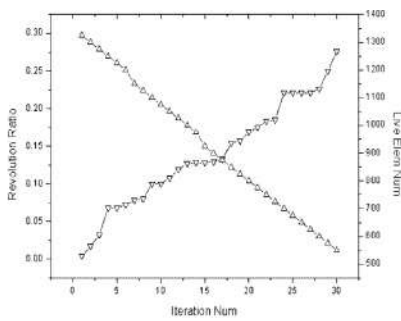


图10 单元删除率,剩余单元数量变化趋势

Fig.10 The deleted rate and trend of residual elem

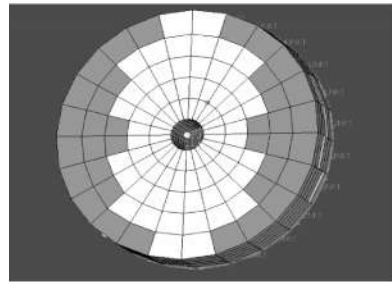


图11 中心支撑水平工况下剩余单元分布

Fig.11 The distributing of residual elem at horizontal state with center-support

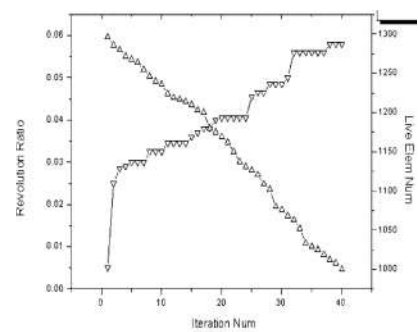


图12 单元删除率,剩余单元数量变化趋势

Fig.12 The deleted rate and trend of residual elem

b) 竖直—重力与光轴垂直

这些单元啃掉的结果,只是产生了大致的材料分布轮廓。由于ESO是以有限单元作为最小设计变量,人工对优化结果进行判读,以避免有限单元的局限,抽象出材料的最佳分布。

通过以上分析可以看出:

1)设想的是通过密集网格逐渐细啃,但实际分析,网格密度为5600、1200两种模型对比,5600这个收敛极为缓慢,且在迭代初期局部很容易出现一定的棋盘网格、孤立单元等导致求解失败,参考文献中也说明了这一点,因此在实际应用中,网格数量不宜过多;

2)ESO的细啃模型的中心部位并没有出现通孔,这样有利于保存载荷传递路径的连续,因此建议在以后的设计中,如果没有必要,反射镜的中心不应设计通孔,应从背部做盲孔,这样既不会破坏镜体的传载路径,也能减少一定的加工量;

3)在镜面以下底板以上的部位出现了均匀分布的空心区域,证明了封闭性空心结构的合理性,例如Hubble上使用的封闭背板六边形结构,但实际因加工困难而应用并不多,在国内尚无实现,但是也有变通的措施;

4)通常的做法是在背部上开设三角形、扇形、六边形等形式的减重孔,支撑点布置在这些孔之间,虽然减轻了重量,但对边缘质量产生的载荷的传递路径有损伤。参考ESO的结果,应在支撑点之间区域设置均匀分布的阶梯盲孔,与下面的措施等效实现了,同时对底板强度损伤较小;

5) 侧边出现的删除区域,表明了【新型轻量化

反射镜结构】侧边打孔的合理性,但是作者提出的打穿孔并不完全合理,通孔在中心部位分割了镜体,从ESO的结果上并没有出现这样的趋势,通孔损伤了镜面面板和基体之间的载荷传递路径,并且深孔的加工也较为困难。综合以上分析对比,提出在侧边设置均匀分布阶梯孔,这些孔的轴线和支撑点相互错开,具体位置应在高度中线偏上;

6)综合以上分析对比并参考文献的对比,提出了一种反射镜体轻量化的结构形式,充分利用了ESO得到最佳材料分布(载荷路径)的信息,其具体形式如图13所示。



图13 一种新的结构形式

Fig.13 A new structure of mirror

7)对镜体的各尺寸赋予一定的初始值,并对这些尺寸和位置进行优化;

8)针对中心支撑形式,由于其竖直和水平两种工况相差较大,且水平工况无所谓,得到其最佳载荷传递形式是阶梯的锥背,如图14所示。

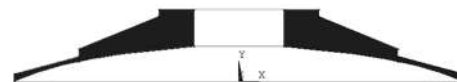


图14 中心支撑的结构形式

Fig.14 The structure of center-support

4 结论

通过对渐进结构优化方法的分析,利用它实现

(下转第27页)



性,他们从两个方面影响了粘结层的等效刚度。从材料力学的角度考虑,定义等效刚度为 $F/\Delta L$ ,则 $F/\Delta L=E*A/L$ 。即等效刚度和材料模量与受力面积乘积成正比与厚度成反比,在本文的情况下,受力面积即粘结面积为固定值,所以等效刚度由材料的模量和厚度决定,即与材料模量成正比,与厚度成反比。

在实际应用中选择粘结层的厚度还要分析在不同工况下粘结层的受力情况,例如当主镜指向水平时,粘结层主要承受剪切力作用,此时要求粘结层的应力最大值不能超过粘结层的承受情况,且位移不能太大。而且粘结层厚度增加后,粘结层的粘结强度会降低,为了保证主镜连接安全,粘结层厚度不应过大。

### 3 结论

本文主要研究了硅橡胶粘结层的应力分散效应,参考了MMT中对粘结层的分析,确定了使用有限元分析的单元和模型,并在静力学范围内支撑受压缩情况下,对粘结层材料模量和粘结层厚度进行了初步分析,分析发现在相同情况下粘结层材料模

量越小,粘结层厚度越大,粘结层与玻璃连接处的应力分布越缓和,粘结层的应力分散情况越好。

本文的分析主要是对粘结层的静力学分析,有些问题有待于进一步研究。例如对粘结层对于热应力的分散情况,粘结层对于振动冲击的缓冲作用。这些都是下一步研究中需要考虑的问题。

### 参考文献

- [1] 施翔春,陈卫标,候霞.全固态激光技术在航天领域的应用[J].红外与激光工程,2005,34(2):127-131.
- [2] Opto-Mechanical Systems design. Paul R. Y, PP: 418-420.
- [3] Selke L A. Theroretical elastic deflection of a thick horizontal circular mirror on a ring support [J]. Appl. Opt.,1970,9(1):149-153.
- [4] Shawn Callahan.MMT Conversion Technical Memorandum #93-1. Analysis and Design of the Glue Joint, Pucks, and Loadspreader Used in the 6.5m Mirror Support System,November 1993.PP:1-19.
- [5] 郑明军,谢基龙.压缩状态下橡胶件大变形有限元分析[J].北方交通大学学报,2001,25(1):76-79.

(上接第22页)

了对反射镜最佳传递路径的分析,证明了封闭性减重孔的优越性,并且支持了关于侧边布置减重孔的观点,提出了镜体中心通孔的不足。根据ESO细啃模型的结果,综合上面的分析,提出了一种新的镜体结构形式,具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] XIE Y M, STEVEN G P.A simple evolutionary procedure for structural optimization [J].Computers & Structures,1999,49(5):885-896.
- [2] 谢亿民,杨晓英,G P Steven,等,渐进结构优化法的基本理论及应用[J].工程力学,1999,16(6):69-81.
- [3] 罗志凡,卢耀祖,荣见华,等.基于一种新的应力准则的渐进结构优化方法[J].同济大学学报,2005,33(3):372-375.
- [4] 荣建华.渐进结构优化方法及其应用研究[D].长沙:国防科技大学博士学位论文,2006.
- [5] 刘寅东,卞钢.基于ANSYS的结构拓扑优化及其二次开发[J].船舶力学,2006,10(2):120-125.
- [6] 兰倩,杜永峰,李慧.基于拓扑优化的筏形基础传力途径仿真[J].计算机仿真,2007,24(11):163-165.
- [7] 沙巍,陈长征,张兴祥,等.空间主反射镜轻量化及柔性支撑设计与分析[J].光电工程,2009,36(4):35-39.