

文章编号 1004-924X(2003)05-0466-06

# 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用

吴清彬,陈时锦,董 申

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**介绍了一种对反射镜轻量化结构进行优化设计的方法。利用 ANSYS 软件对采用扇形开口孔轻量化的某传感器主反射镜建立参数化结构模型,将对反射镜力学性能影响较大的某些结构参数如镜体厚度、扇形孔的位置、尺寸等指定为优化设计变量,根据反射镜的加工和装配工艺合理地确定这些结构设计变量的可行域,运用 ANSYS 优化设计模块提供的零阶优化方法对镜体结构进行了优化设计。力学分析表明,经过优化后的反射镜结构相比于原设计方案轻量化程度更高,静力学性能更好。

**关键词:**非球面反射镜;轻量化;参数优化

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Optimization of parameters structural design of light weight reflector

WU Qing-bin, CHEN Shi-jin, DONG Shen

(School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A parametric structure model has been established using FEA software ANSYS for an aspherical primary reflector with lightening sector holes. With some structural parameters having significant effect on mechanical properties of reflector, such as thickness of reflector, and location and size of sector hole, used as design variables, and feasible domains established in accordance with reflector machining and assembly processes for these design variables, an optimal design is done for the structure of a reflector using the zero-order optimization method provided in the Design Opt module of ANSYS. Mechanic analyses show that the optimized structure of the reflector is much lighter and stronger than the original design.

**Key words:** aspherical primary reflector; lightening; parameter optimization

## 1 引言

随着现代光学技术的发展,各种样式的非球面反射镜在空间光学观测领域中得到了广泛应用,它们的结构设计工作也日益受到人们的关注。作为空间光学观测仪器的关键部件之一,反射镜体结构设计的焦点集中于如何在保持高的面形精

度的前提下尽可能地降低其质量,即镜体的轻量化设计。目前国内的研究主要针对各种轻量化型式的对比和选择<sup>[1-3]</sup>,而在选定了某种轻量化型式之后,反射镜体的具体结构参数的确定仍采用比较传统的根据经验选定尺寸并进行强度、刚度等性能校核的模式,显然,这样的设计结果仍然有较大的优化空间。

收稿日期:2003-01-16;修订日期:2003-08-19.

基金项目:国家“863”重点资助项目(No. 2002AA716014)

计算能力的提高使得各种结构优化技术逐渐被应用于工业领域中,并产生了巨大的效益,而作为优化技术中最基本的参数优化技术,也已经十分成熟。本文结合某型空间光学遥感器主镜的实际特点,在镜体的轻量化结构设计中引入参数优化技术,以期得到更加合理的设计结果。

该光学遥感器主镜为一种小型圆形非球面反射镜,焦距 1 600 mm,口径 276 mm,镜体中心有直径为 64 mm 的通光孔,镜体材料采用熔石英。设计要求在自重作用下反射面法向变形 RMS 值不大于 1/40, PV 值不大于 1/10 ( $\lambda = 0.632 \mu\text{m}$ ),镜体质量不大于 3 kg。为验证优化设计后镜体结构性能的改善,文中将预研阶段镜体的初始设计方案与本文设计结果相比较。

## 2 镜体的轻量化形式

目前通常采用两种途径对圆形反射镜体进行轻量化:一种是在反射镜体背部挖开口孔,这种方案工艺性好,既能通过机械加工的方法来实现,也可在镜体浇注过程中一次成型;另一种方法是采用夹芯式结构,即镜体的前后面板和圆周均为实体,而在它们中间夹有一层蜂窝结构。相比于前一种方案,夹芯式结构在相同的刚度和强度要求下能够做到更高的轻量化率,然而其要求的加工工艺比较复杂,多年前国内一些单位就已经开展了这方面的研究<sup>[4-5]</sup>,虽然试制出了多种夹芯式的反射镜,但在实际工程项目中应用很少。

从理论上讲,反射镜体的轻量化孔可以采用的截面形式是很多的,既包含三角形、矩形等基本几何形状,也可以是圆形或者其他闭合的高次曲线,甚至是各种形状的组合。但镜体的结构优化设计不能是不惜代价地提高镜体的力学性能,还要考虑结构的加工工艺性,显然,过于复杂的轻量化孔结构将显著增加反射镜的加工成本。

圆形反射镜常用的轻量化孔的形式主要有圆

形、扇形、六角形和三角形。圆形孔虽然工艺性最佳,但材料去除率却最低,目前已很少采用;三角形孔轻量化结构的刚度最高,但材料去除率也较低,且温度特性不好,在顶点处容易形成较严重的热结,因而大多用在热控精度较高且结构刚度要求很严格的系统中;六角形孔和扇形孔的材料去除率较高,结构刚度和热稳定性也比较好,在实际工程设计中应用最为广泛。

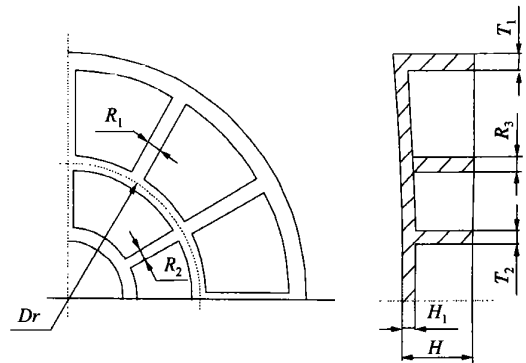


图 1 扇形孔轻量化的圆形反射镜及其主要结构参数  
Fig. 1 Primary reflector lightened by sector hole and the parameters of its main structures

该反射镜的初始结构设计采用在镜体背部挖扇形开口孔的轻量化方式,这样镜体背部可相似为肋辐结构,通过对径向放射状肋板的数目、各肋之间的夹角、环形肋的径向位置以及各肋的厚度进行优化设计能够基本确定反射镜体的结构。在空间环境下圆形镜体的装配载荷一般将均匀分布在镜体外圆周,所以各径向肋被设计成关于镜体中心对称,这样同时也减少了一类设计变量,即各径向肋之间的夹角。在镜体中部有一圈环形的加强肋,由于扇形孔的结构特点,镜体外圈的扇形孔的尺寸要远大于靠近镜体中心的扇形孔的尺寸,因此外层径向肋的数目取为内层的 2 倍,当镜体尺寸较大时,环形加强肋和外层径向肋的数目可以酌情增加。各主要结构参数及在初始设计方案中的取值见图 1 与表 1,初始结构的质量及主要结构性能见表 2。

表 1 初始镜体结构参数 单位:mm

Tab. 1 Structure parameters of the unoptimized reflector (unit: mm)

镜体厚度 $H$	镜面板厚度 $H_1$	镜体外框厚度 $T_1$	镜体内框厚度 $T_2$
30	8	10	8
外圈径向肋厚度 $R_1$	内圈径向肋厚度 $R_2$	环形肋厚度 $R_3$	环形肋直径 $D_r$
8	6	8	152

注:镜体厚度指反射镜体的最小厚度。

表 2 初始镜体质量及主要结构性能

Tab. 2 Mass and structure performance of the un-optimized reflector

镜体质量	重力作用下镜面法向变形 RMS 值	重力作用下镜面法向变形 PV 值	主镜组件最低自然频率
2.1 kg	0.013 6 $\mu\text{m}$	0.052 4 $\mu\text{m}$	784 Hz

镜体支撑方式的选择也是反射镜结构设计的一个重要内容,对于中小型的圆形反射镜,通常有背部三点或多点支撑,外圆周三点或多点支撑,外圆周全柔性支撑等方式<sup>[6-8]</sup>。在该反射镜的初始设计方案中采用了外圆周全柔性支撑,这种支撑方式对镜体所施加的装配载荷比较均匀,有利于保证反射面的工作精度。

采用与初始方案相同的镜体轻量化方式和支撑方式,但将采用参数优化手段对镜体的主要结构尺寸进行优化设计。

### 3 影响镜体结构设计的因素

确定反射镜结构的参数较多,但各参数对于结构性能的影响程度是不同的,同时也受目前光学加工技术水平的限制以及出于镜体装配的需要。某些结构参数并不能取其理论上的最优值,因此在反射镜体的结构设计中,并没有必要对每一类结构参数都进行优化计算。对于某些对镜体质量、力学性能影响较小的参数,可以根据经验或工艺性要求对某些参数预先确定一个粗略的初始值,以方便反射镜整体的建模和优化。当然,为了获得较准确的优化结果,在主要的结构参数确定以后,也可以重新以这些参数作为设计变量进行优化。

镜体结构设计的限制因素主要体现在以下几个方面:

(1) 镜体局部结构最小厚度的限制。如反射镜各肋的厚度受加工工艺的限制,一般要大于 3 mm;与其相似,在采用六角形或其他形状的轻量化孔时,相邻孔间壁厚同样要大于 3 mm。

(2) 单个轻量化孔的最大直径或跨度的限制。这是因为镜体加工时的“格子效应”,即在加工压力作用下产生的镜面弹性变形的影响。虽然这种弹性变形引起的面型误差可以在反射镜抛光阶段予以消除,但需要耗费很高的人力和工时。在一

定加工压力下产生的镜面弹性变形通常随镜面厚度尺寸的增大而降低,为保证反射镜的加工质量同时提高加工效率,应确保足够的镜面板厚度以及与该厚度相对应的单个轻量化孔的最大直径或跨度。

(3) 镜体支撑方式的限制。尤其是对于采用周边三点或多点支撑方案的反射镜,镜体外边框必须保留一定的厚度以满足镜体装夹的需要。

对于所研究的反射镜,各项参数的取值限制见表 3。

表 3 各项参数的取值限制

Tab. 3 Limit to the structure parameters of the reflector

$H_1$	$T_1$	$T_2$	$R_1, R_2, R_3$	$D_r$
6 mm	8 mm	5 mm	5 mm	146 $D_r$ 190

注:其中环形肋直径  $D_r$  的取值范围由单个扇形轻量化孔的最大允许跨度决定,而后者是根据镜面板厚度通过有限元分析模拟镜面加工变形得出的,约为 10.5  $H_1$ 。

## 4 镜体结构的优化方法

### 4.1 镜体结构参数优化的数学模型

镜体结构的优化设计需要首先对其建立参数化的有限元模型,即是将待优化的各主要尺寸以可变化的参数即优化设计变量来表示,并对这些参数赋予较合理的初始值来生成可分析的有限元模型,所采用的初始值一般并不会影响优化设计的结果。采用初始设计方案中的尺寸数据来对这些参数赋值。

该镜体的结构参数优化的数学模型可以表示为

$$M_{\min} = f(H, H_1, T_1, T_2, R_1, R_2, R_3, D_r)$$

$$s. t. \quad \begin{matrix} \text{RMS} & 1/50 \\ \text{PV} & 1/15 \\ \text{max} & [ ] \end{matrix}$$

式中  $M$  为镜体的质量,  $\text{max}$  为镜体在承受发射过载时的最大应力,  $[ ]$  为镜体材料的安全应力。

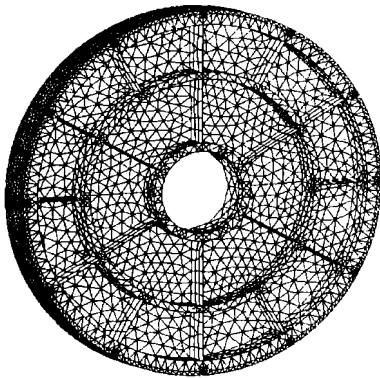


图 2 反射镜体有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the reflector

利用有限元软件 ANSYS 可以建立反射镜体结构的参数化有限元模型,如图 2 所示。模型经有限元分析后得到的各项应力、变形等数据可以在通过一定处理后被赋予某些参数,这些参数将在 ANSYS 的优化设计模块中被作为状态变量或目标变量。

#### 4.2 各结构参数对镜体变形的影响

如果将上式所包含的全部镜体结构参数集中在一个优化文件中进行分析,则由于设计变量较多,致使优化迭代次数很多,而每次迭代后都要重新进行有限元分析,显然这将带来很大的计算耗费。为此,采用了对优化问题降维处理的方法,首先分别对初始设计结构的各参数执行单变量优化分析,观察各参数的变化对于镜体质量和变形的影响趋势和程度,选择影响较小的参数根据加工及装配等限制条件予以预先确定,然后对剩余的参数同时进行多变量优化。

分析各参数的优化历程和结果时,主要考虑参数的变化对镜体质量以及镜面法向变形 RMS 值的影响,图 3、图 4 分别为镜体各参数与自重作用下镜面变形、镜体质量之间的关系。

经上述分析可以看到,在镜体所有结构参数中,镜体厚度  $H$  和镜面板厚度  $H_1$  相对于其他结构参数,对镜体的质量以及镜面的变形影响较大。在所考察的尺寸范围内,镜面变形随着这两个参数的增大而增大,因镜面板厚度  $H_1$  受加工工艺限制较大,在此可以预先确定,取其值为 6 mm,而镜体厚度  $H$  将参与后续的多变量优化过程。

其他各结构参数对于镜面在自重作用下的变

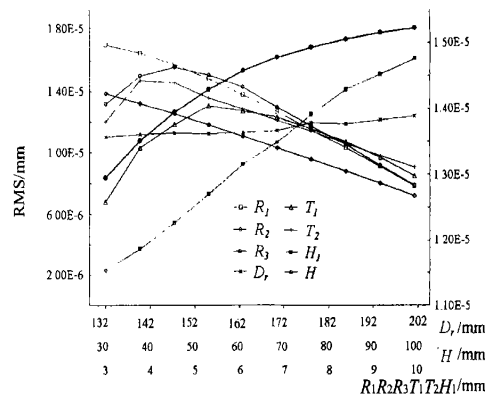


图 3 镜体各参数与自重作用下镜面变形的关系

Fig. 3 Relationship between the structure parameters and the deformation of the mirror surface under gravitation

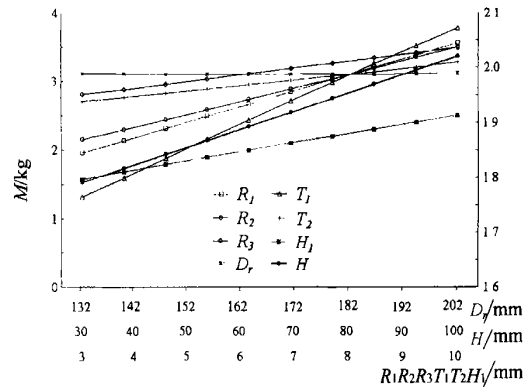


图 4 镜体各参数与镜体质量的关系

Fig. 4 Relationship between the reflector's mass and the structure parameters

形的影响较小,在考察范围内镜面变形 RMS 值变动基本都不超过  $0.0025 \mu\text{m}$ ,并且对镜体质量的影响相对也较小,但这些参数的变化对镜面变形的影响趋势是不尽相同的。外、内圈径向肋厚度尺寸  $R_1$  和  $R_2$  与镜面变形 RMS 值在所考察范围内基本保持线性关系,即随着这两个尺寸的增大,镜面变形 RMS 值呈线性降低;而镜体外、内框厚度  $T_1$  和  $T_2$  以及环形肋厚度  $R_3$  则在考察范围内与镜面变形 RMS 值呈上凸的曲线关系,峰值分布在  $4 \sim 5.5 \text{ mm}$  范围内;环形肋直径  $D_r$  对镜面变形的影响很小,可忽略不计。本文选择了这些参数中对反射镜体力学性能和镜体质量影响较大的 4 个尺寸参数:外、内圈径向肋厚度尺寸  $R_1$  和  $R_2$ ,镜体外框厚度  $T_1$ ,环形肋厚度  $R_3$  作为优化设计变量和镜体厚度  $H$  共同进行下一步的

多变量参数优化,其他参数可根据结构的加工工艺性选取合适的值,镜体内框厚度  $T_2$  取 6 mm,环形肋直径  $D_r$  取 172 mm。

### 4.3 镜体结构的多参数优化

通过对镜体各结构参数的单变量优化分析,选择镜面板厚度  $H_1$ 、镜体内框厚度  $T_2$  和环形肋直径  $D_r$  予以预先确定,而剩余的其他 5 个结构参数作为优化设计变量,对它们进行多参数优化。仍采用表 1 中的数据为这 5 个参数赋以初始值,在文中已经提到过,各参数的初始值并不会影响优化设计的结果。此外,各参数取值可行域的下界根据表 3 来确定,即在优化过程中要充分考虑镜体的加工工艺性能。

采用 ANSYS 软件提供的零阶优化方法对该模型进行优化分析,经过 16 轮迭代,得到各参数的优化结果见表 4,优化迭代历程见图 5。

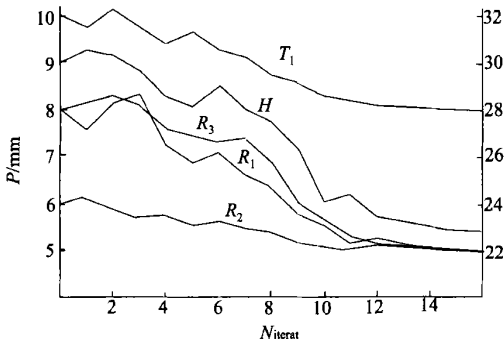


图 5 多参数优化迭代历程

Fig. 5 History curve of multi-parameters optimization

表 4 各参数的优化迭代收敛值 单位: mm

Tab. 4 Optimal value of the design variables (unit: mm)

$H$	$T_1$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
22.74	8.04	5.02	5.07	5.01

注:镜体厚度值  $H$  的取值参照右坐标轴

### 参考文献:

[1] 郭喜庆,王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(6): 518-521.  
 GUO X Q, WANG Y Y. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 518-521. (in Chinese)

[2] 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(6): 69-80.  
 WU Q W. Light weight technology and its application of primary mirror in space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(6): 69-80. (in Chinese)

[3] 宋友贵,陈玲,田守信,等. 反射镜体轻量化结构设计的对比研究[J]. 兵工学报, 2000, 21(2): 137-139.  
 SONG Y G, CHEN L, TIAN SH X, et al. A comparative study on lightweighted mirror structure design[J]. *Acta*

优化结果显示除镜体厚度  $H$  外,其他参数均分别收敛于其优化可行域的下限,说明存在这样的可能,即更轻更薄的结构仍可能满足镜体的刚度和强度要求,但受光学元件加工能力的限制,目前尚无法采用。

经优化后该反射镜体质量及主要力学性能见表 5。与表 2 对比,可以看到镜体质量明显降低,与初始设计结构比较减重达 31%,虽在自重作用下镜面变形有所增加,但仍能满足光学系统设计的要求。安装后主镜组件的最低自然频率虽稍有降低,但幅度很小,说明优化设计是卓有成效的。

表 5 优化后反射镜体的质量和主要结构性能

Tab. 5 Mass and structure performance of the optimal reflector

镜体质量	重力作用	重力作用	主镜组件最低自然频率
	下镜面法向变形 RMS 值	下镜面法向变形 PV 值	
1.44 kg	0.014 9 $\mu\text{m}$	0.050 7 $\mu\text{m}$	778 Hz

## 5 结 论

在反射镜体结构的轻量化设计工作中,通过对基本结构形式已确定的镜体进行参数化建模,并合理地选择某些结构参数作为优化设计变量,利用目前已经比较成熟的参数优化技术和有限元分析手段,对镜体轻量化结构的具体尺寸参数进行优化设计是可行的。通过计算机仿真分析,证明该优化设计方案的静力学性能优于初始结构。本文仅描述了采用扇形孔轻量化方案的反射镜体的优化设计方法,其他结构形式的反射镜同样可采用该方法,只是在有限元模型的建立和优化变量的种类、数目方面有所差别。

- Armanentarii*, 2000,21(2):137-139. (in Chinese)
- [4] 齐亚范,方敬忠. 轻型反射镜研究与发展[J]. 光学技术,1998,(3):49-52.  
QI Y F, FANGJ ZH. Investigated and development of lightweight mirror[J]. *Optical Technology*, 1998,(3):49-52. (in Chinese)
- [5] 齐亚范,方敬忠. 410 mm 轻型熔石英反射镜[J]. 光电工程,1999,26(1):27-35.  
QI Y F, FANGJ ZH. Lightweight fused silica mirror[J]. *Optoelectronic Engineering*, 1999,26(1):27-35. (in Chinese)
- [6] 吴清文,卢锷. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. 光学精密工程,1996,4(4):23-28.  
WU Q W, LU E. Study on the surface figure changes of primary mirror centrally supported under gravity load[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996,4(4):23-28. (in Chinese)
- [7] 丁福建,李英才. 反射镜浮动支撑的应力与变形分析及支撑参数的优化[J]. 光子学报,1998,27(11):1041-1045.  
DING F J, LI Y C. The stress and strain analysis of main reflector with uniform pressure support and support angle optimization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998,27(11):1041-1045. (in Chinese)
- [8] 叶露,王肇勋. 大口径长焦距平行光管主反射镜支撑与调整机构的研究[J]. 光学精密工程,2000,8(5):462-465.  
YE L, WANG ZH X. Supporting and adjusting for collimator primary with large-aperture and long-focal length[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000,8(5):462-465. (in Chinese)

作者简介:吴清彬(1974-),男,山东临沭人,哈尔滨工业大学机电工程学院博士研究生,主要从事航天器结构设计及有限元与优化设计等方面的研究工作。Tel:0451-6410323 E-mail:wqb2000@0451.com