

大型太阳模拟器的散热器参数优化设计

段洁¹ 安志勇¹ 孙向阳^{1,2} 张国玉¹

(¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)
(²长春大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 针对大型太阳模拟器光源过热造成光学系统特性不稳定或者丧失的实际问题,以大型太阳模拟器中的散热器为研究对象,通过其热传导分析,建立其三维立体模型,并构建出气工作状态下的数学模型,运用有限元分析方法,设定优化区域值,对散热量、结构与质量构成的多目标参数进行优化设计。优化结果实现了散热器质量不大于16 kg时,散热量不小于11000 W的优化目标,所研究方案为大型高温工作的光学设备研制提供了一种有效设计方法。

关键词 太阳模拟器;光学积分器;散热器;结构优化

中图分类号 V249.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.122301

Parameter Optimization Design for the Radiator of Large Solar Simulator

Duan Jie¹ An Zhiyong¹ Sun Xiangyang^{1,2} Zhang Guoyu¹

(¹ College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
(² School of Electronics and Information Engineering, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract In order to solve the practical problems about the characteristics instability or loss to the optical system of the large solar simulator because of the overheating source, the radiator of the large solar simulator is studied. Through heat conduction analysis and the establishment of three-dimensional model, we established the radiator mathematical optimization model in working large solar simulator. Multi-objective parameters consisting of heat dissipating capacity, structure and solid mass of radiator were optimized based on the finite element analysis and the optimize regional value setting, and the final results of optimization show that heat dissipating capacity is not less than 11000 W when radiator mass is not greater than 16 kg. This scheme provides an effective design method for the optical equipment with the large size and the high working temperature.

Key words solar simulator; optical integrator; radiator; optimized structure

OCIS codes 230.1150; 230.3120; 130.3120; 130.6750

1 引言

太阳模拟器是地面上模拟太阳光辐照特性的设备,其光学系统多采用氙灯作为光源并结合光学积分器来提供高均匀度的照明。随着太阳能光伏产业的快速发展,太阳模拟器的应用已从航天器地面标定试验、气象分析测试试验等军用平台扩展到太阳能电池和光电材料的特性测试、环境研究等民用领域,其规格与性能指标也从小尺寸、低太阳常数 S_0 (1368 W/m^2)过渡到了大尺寸、高太阳常数^[1]。

为满足大型太阳模拟器的辐照度指标,光源就必须采用大功率氙灯,通常高达4 kW,为防止太阳模拟器工作时,光学积分器因高温变形引起的光学系统误差和结构破坏,光学积分器配有散热器,提供有效散热。

收稿日期: 2012-07-01; **收到修改稿日期**: 2012-08-01; **网络出版日期**: 2012-10-24

作者简介: 段洁(1979—),女,讲师,博士研究生,主要从事航天器地面模拟技术与光电检测技术等方面的研究。

E-mail: dj0321@126.com

导师简介: 安志勇(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测与航天器模拟设备等方面的研究。

E-mail: an_zhiyong@126.com(通信联系人)

针对在散热器设计时其结构和质量与其散热量之间能合理、有效设计的难题,本文将通过理论分析,构建其在工作状态下的数学模型,并应用 Ansys 软件对其进行参数设计及优化,给出最优结果。

2 太阳模拟器工作原理与散热机构

2.1 太阳模拟器的工作原理

太阳模拟器的光学系统以高功率短弧氙灯为光源,其位于椭球面聚光镜第一焦点处会聚并反射后通过光学积分器、光阑和准直镜,以平行光射出,其原理如图 1 所示。设计时为消弱因氙灯电极遮拦、氙灯加工工艺缺陷等因素所引起的在不同方向上亮度分布不均的问题,在光路中位于光源的第二焦点处放置光学积分器来叠加和平均光束,以保证出射平行光线的均匀性^[2]。积分器前端配有散热器,光阑出口处设置有光学调制盘,其上安装有不同型号的衰减片,以调节出射光束光强。

2.2 散热机构

散热器设计为管体,体上均布有散热片,其安装于光学积分器前端,结构如图 2 所示,构成光学积分器的投影镜和场镜分别置于独立镜筒中,其上设计有通风口,与散热器的中空相通。散热器与积分器整体固定在模拟器壳体上。

太阳模拟器工作时,光学积分器会长时间处于高温环境中,通过散热器与积分器上通风口形成的风冷通道,能实现局部散热,可有效去除高温会聚造成的光学积分器热变形和结构破坏,同时保证光学调制盘上衰减片的安全使用(防止高温爆裂)^[3]。

在设计散热器时,重点应考虑其散热效率,但同时需注意其结构、质量(重量过大会引起结构变形)等多个限制条件,所以如何能在散热器设计过程中同时实现结构、质量与散热量的综合要求是实际设计的一个难点。

3 散热器传热模型与有限元分析

3.1 散热器传热分析

针对实际结构形状与工作原理,以定长为 L 的散热器为研究对象,建立其微观热传导模型,如图 3 所示。图中 ① 区域表示热流与散热器内表面的热交换,② 区域表示散热器外表面与空气之间的热交换。假设热传导处于稳态, Q_0 为聚焦光束的入射热总量, Q_t 为经过散热器散热后的出口热量,散热器的散热由 Q_{R_c} 、 Q_{H_c} 、 Q_{D_c} 、 Q_{W_c} 几部分组成^[4]。

根据能量守恒有

$$Q_0 = Q_{R_c} + Q_{H_c} + Q_{D_c} + Q_{W_c} + Q_t, \quad (1)$$

令 $Q_c = Q_{R_c} + Q_{H_c} + Q_{D_c} + Q_{W_c}$, 则有能量公式

$$Q_0 = Q_c + Q_t, \quad (2)$$

式中 Q_c 为散热器的散热量。

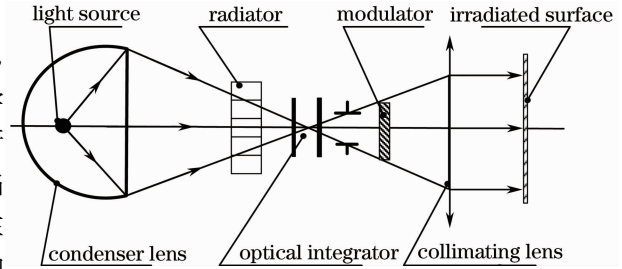


图 1 太阳模拟器光学系统

Fig. 1 Optical system of solar simulator

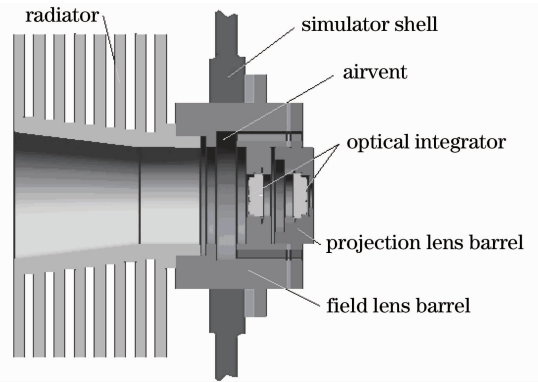


图 2 散热器与积分器结构

Fig. 2 Structure of radiator and optical integrator

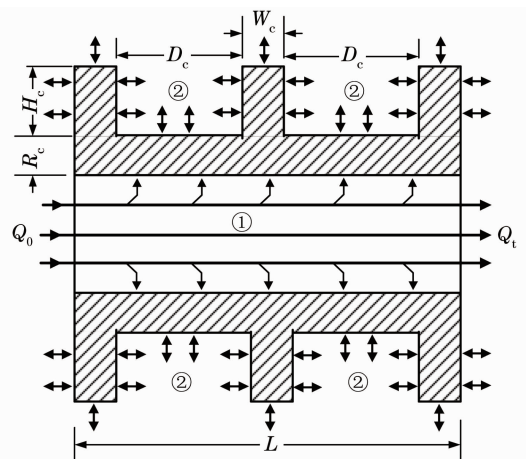


图 3 热传导模型

Fig. 3 Model of heat transfer

根据质量与能量公式有

$$Q = kmh, \quad (3)$$

式中 Q 为热量(单位为 kW), k 为物质传热系数, m 为物质质量(单位为 kg), h 为物质焓值(单位为 kW/kg)。

联立(2)、(3)式可得

$$Q_0 = Q_c + Q_t = kmh + Q_t = kf_M(R, H, D, W)h + Q_t, \quad (4)$$

式中 $f_M(R, H, D, W)$ 表示以散热器结构参数 R, H, D, W 为变量的整体质量。

由以上分析可以看出,散热器最优设计的目标就是在初始热量 Q_0 值一定的条件下,能取得较高的 Q_c 值。

3.2 创建模型及有限元分析

初步分别选取散热器的管厚 R 、片高 H 、片厚 W 、片间距 D 分别为 5、60、10、20 mm,整体长度 400 mm。材料选用铝合金,其弹性模量 $E=7.1 \times 10^4$ MPa,泊松比为 0.33,密度为 2.77 g/cm^3 。在建立散热器的有限元分析模型时,根据其工作环境和安装特点(与光学积分器螺纹配合),热传递方式中的热传导可忽略不计,只考虑热对流。根据现场测试,散热器管内有高温气体流过,在氙灯工作 0.5 h 后可达 $(315 \pm 5)^\circ\text{C}$ (分析时取温度极值)^[5]。

设定模拟器工作环境为 20°C ,内表面与外表面的空气对流系数分别为 0.294 W/mm^2 、 $4.1 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2$,分析温度分布,求解完成后结果如图 4(a)所示。可以看出,散热器在工作时,其温度最高部位为 320.19°C ,最低为 258.17°C ,散热器散热量与整体质量值见表 1(a),分别为 14210 W 、 19.876 kg 。由于所研究的太阳模拟器实际指标限制,初步设计方案无法满足,故需对初始设计参数进行优化,以实现最佳结果。

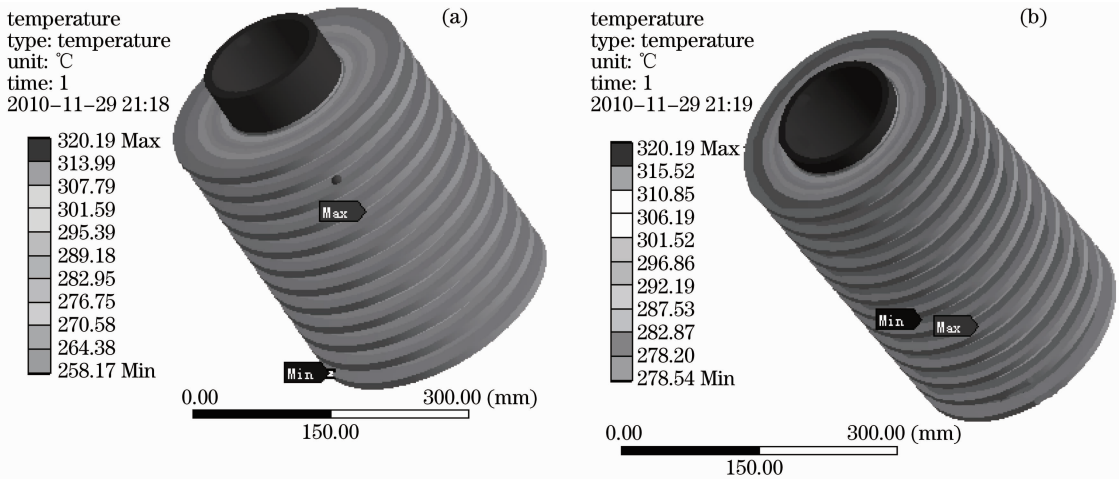


图 4 散热器温度分析结果。(a)初始结构温度分析;(b)优化结构温度分析

Fig. 4 Analysis of radiator temperature. (a) Temperature analysis of initial structure;

(b) temperature analysis of optimized structure

4 散热器结构优化设计

4.1 散热器的优化数学模型

根据散热器的优化思想建立优化数学模型,考虑到散热器所处的光学系统位置,根据实际结构变形分析,其值应不大于 16 kg ,则在数学模型中散热器的质量[设为 $f_M(\mathbf{x})$]目标最小,可表示为

$$\max_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n} f_M(\mathbf{x}) = \max_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n} f_M[\rho, v(\mathbf{x})] \leq 16 \text{ kg}, \quad (5)$$

式中 $f_M(\mathbf{x})$ 是关于散热器密度 ρ 和体积变量 $v(\mathbf{x})$ 的函数。

通过实际计算,要求散热器的最小散热量[设为 $Q_c(\mathbf{x})$]大于等于 11000 W ,可表示为

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n} Q_c(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n} Q_c[k(\mathbf{x}), c_i, m(\mathbf{x})] \geq 11000 \text{ W}, \quad (6)$$

式中, $Q_c(\mathbf{x})$ 、 $f_M(\mathbf{x})$ 为目标函数, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为 n 个优化变量组成的向量组, $k(\mathbf{x})$ 为传热系数, c_i 表示①、②区域的热交换系数。

从(6)式中可以看出热量 $Q_c(x)$ 的极值是关于质量 $f_M(x)$ 的函数,而由 3.1 节的理论推导可以看出,对散热的优化问题可表述为一定约束条件下以小的 $f_M(x)$ 值得到最大 Q_c 值,而质量轻与散热量高本身是相互矛盾的,所以散热器优化目的就是在满足设计指标的迭代计算中,求得 $f_M(x)$ 最优值的条件下,如何使 Q_c 值也达到最优,即如何合理分配散热器结构中 R_c 、 H_c 、 D_c 、 W_c 参数值来取得目标函数 $f_M(x)$ 、 $Q_c(x)$ 的最优值,同时实现相互矛盾的目标,以满足系统的整体要求^[6,7]。

对模型进行优化时,常对优化变量给予限制即附加约束条件,约束条件越详细其优化结果越接近实际结果,所以优化运算中约束条件的施加应与实际工作条件保持一致。本文优化目标函数中包含有 4 个目标参数,即:管体厚度 R 、片高 H 、片厚 W 和片间距 D ,参考散热器的初步设计参数,提出优化参数的约束条件,由以下关系给出

$$g_j = |[x_R, x_H, x_W, x_D]| \leq |g_{aj}|, \quad (7)$$

式中 g_j 为优化参数约束条件; g_{aj} 为约束上下限值。

确定以初始设计值 4 个优化参数以为目标,并给定约束条件

$$4 \text{ mm} \leq x_R \leq 16 \text{ mm}, \quad (8)$$

$$40 \text{ mm} \leq x_H \leq 100 \text{ mm}, \quad (9)$$

$$4.5 \text{ mm} \leq x_W \leq 16 \text{ mm}, \quad (10)$$

$$9 \text{ mm} \leq x_D \leq 35 \text{ mm}. \quad (11)$$

4.2 散热器参数优化设计及结果

由所建数学模型可知,对散热器的优化为多目标优化设计问题,是在选择 4 个优化参数的基础上实现最终的目标参数 $\min f_M(x)$ 和 $\max Q_c(x)$ 。首先,在建立三维模型时的草图标注中设定优化参数 R_{opt} 、 H_{opt} 、 W_{opt} 、 D_{opt} 即管体厚度 R 、片高 H 、片厚 W 和片间距 D ;通过稳态热分析求得温度分析结果如 3(a) 所示,再设定分析结果中的散热量 $Q_c(x)$ 和质量 $f_M(x)$ 为目标参数;使用 Ansys 软件的 DesignXplorer 模块进行优化设计,选择 Six-Sigma 分析类型,进行 run 运算。

根据所建立的立体模型来看,所研究的散热器结构中的参数 R 、 H 、 W 以及 D 每一个参数的变化都会影响到散热器整体质量的变化,同时造成散热效果的改变,所以优化的最终目的就是找到一个最佳的配比,使各个参数既能满足散热器整体重量所造成的变形对光学系统的最小影响要求,也实现热量散发最大。

最后根据所设定优化参数的目标值大小,选取最合理的 3 组候选参数列,如表 1 所示,可看出序列 Candidate B 为满足优化目标的最佳结果。

选择 Candidate B 的一组参数,取整数尺寸建立优化模型后再次分析,其结果如图 3(b) 和表 2(b) 所示。

从表 2 中看出,散热器的整体质量由初始设计的 19.876 kg 降低到优化后的 13.504 kg;虽然最小散热量由 14210 W 减少为 11888 W,但满足了系统对散热量 11000 W 的指标,证明对散热器结构参数的优化合理、正确。

表 1 结构优化参数

Table 1 Optimized parameters of optimization structure

(a) 输入的参数目标

(a) Goals of input parameter

Name	Lower bound	Upper bound
R_{opt}/mm	4	16
H_{opt}/mm	40	100
W_{opt}/mm	4.5	16
D_{opt}/mm	9	35

(b) 优化目标的期望值

(b) Expected values of optimized parameter

Name	Target	Expected value
Mass /kg	15.0	Less than target
Heat /W	11000	Greater than target

(c) 设计结果候选项

(c) Candidate designs

Parameter	Candidate A	Candidate B	Candidate C
R_{opt}/mm	10.267	7.707	7.067
H_{opt}/mm	52.799	55.294	65.276
W_{opt}/mm	11.528	8.4472	10.245
D_{opt}/mm	18.325	22.395	21.378
Mass /kg	16.329	15.208	17.883
Heat /W	11916	12070	13937

表 2 初始设计与优化参数对照

Table 2 Comparison of initial design and optimized parameters

(a) 初始设计参数

(a) Parameters of initial structure

Object name	R	H	W	D
Design value /mm	5	60	10	20
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	258, 17~320, 19			
Mass /kg	19.876			
Heat /W	14210			

(b) 优化设计参数

(b) Parameters of optimized structure

Object name	R	H	W	D
Design value /mm	8	55	8	22
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	273, 54~320, 18			
Mass /kg	13.504			
Heat /W	11888			

5 结 论

针对大型太阳模拟器的散热器设计过程中关于其结构、质量与散热量之间的最优设计难点,本文在分析其工作原理后建立了数学模型,并应用 Ansys 软件,以散热器的结构参数与散热量、质量分别为优化参数和目标参数,进行有限元分析与参数优化,达到了优化后的质量 $f_M(\mathbf{x}) \leq 16 \text{ kg}$, 散热量 $Q_c(\mathbf{x}) \geq 11000 \text{ W}$ 的优化目标,同时本文的研究也为解决此类问题提供了一种实用、有效的方法。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhiming, Gong Zhenbang, Wei Guangpu *et al.*. For solar cell test of solar simulation technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1542~1547
王志明, 龚振邦, 魏光谱 等. 用于太阳能电池测试的太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1542~1547
- 2 Pang Hewei, Huang Bencheng *et al.*. Design of KM6 solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, **23**(3): 125~133
- 3 Zhong Jigong. The several question of the solar simulator optic system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1983, **4**(3): 187~193
- 4 Liu Xiaobo, Liao Daxiong, Zhang Qiaoyun. A review of heat exchanger study for large-scale continuous transonic wind tunnels[J]. *J. Experiments and Measure in Fluid Mechanics*, 2009, **23**(1): 99~103
刘晓波, 廖达雄, 张巧云. 大型连续式跨声速风洞热交换器概述[J]. *实验流体力学*, 2009, **23**(1): 99~103
- 5 Wang Xianhui, Xu Gang, Li Shoucheng *et al.*. Research of topology optimization in the design of the chassis frame of special vehicles[J]. *Journal of China Ordnance*, 2007, **28**(8): 903~908
- 6 Zhang Qunyan, Zhou Zheng, Feng Lishuang *et al.*. Research on optical structure of the novel micron-grating accelerometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1796~1799
张群雁, 周震, 冯丽爽 等. 新型微米光栅加速度计光学结构研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1796~1799
- 7 Miao Jianyu, Zhang Liping *et al.*. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1648~1653
苗健宇, 张立平等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1648~1653