

红外灯阵热流仿真及优化设计

刘守文^{1,2}, 裴一飞², 孙来燕¹, 蒋凡¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 100191 北京, sleigh@tsinghua.org.cn;

2. 中国空间技术研究院 总装与环境工程部, 100094 北京)

摘要: 为了提高红外灯阵热流分布均匀度, 应用单灯热流分布计算模型生成单灯热流分布数据库, 解决了反光板反射热流问题, 建立了红外灯阵热流分布仿真计算方法以及基于遗传算法的红外灯阵热流优化设计方法. 对某卫星试验用红外灯阵进行优化设计的结果表明, 热流分布不均匀度由优化前的 24.61% 降低到优化后的 8.96%. 对红外灯阵热流分布均匀度进行了测试, 结果表明仿真计算值与实测值吻合良好, 建立的红外灯阵热流分布仿真计算方法准确, 优化方法可以有效提高热流分布均匀度.

关键词: 热流分布; 均匀度; 红外灯阵; 遗传算法; 优化

中图分类号: V416.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)09-0144-05

Simulation and optimization for heat flux distribution of infrared lamp array

LIU Shou-wen^{1,2}, PEI Yi-fei², SUN Lai-yan¹, JIANG Fan¹

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 100191 Beijing, China, sleigh@tsinghua.org.cn; 2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, 100094 Beijing, China)

Abstract: This article aimed at establishing the simulation methods of heat flux distribution and optimization for infrared lamp array to improve the uniformity of heat flux distribution. The heat flux distribution database was generated by the application of heat flux distribution calculating method of single lamp. The reflex heat flux of reflective baffles was resolved. The infrared lamp array heat flux simulation method was established on the basis of these models. Optimization method of infrared lamp array was set up based on genetic algorithm. One infrared lamp array for a satellite thermal test was optimized, and the heat flux nonuniformity decreased from 24.61% to 8.96%. The simulation results were identical with the measurement values. The simulation method offers a good accuracy and the optimization method can effectively increase the uniformity.

Key words: heat flux distribution; uniformity; infrared lamp array; genetic algorithm; optimization

热平衡试验是航天器研制过程中的关键项目之一, 红外灯阵外热流模拟技术被广泛应用于国内外航天器的热平衡试验^[1-3]. 红外灯阵热流分布均匀度是热流模拟的主要技术指标, 直接影响到外热流模拟的准确性和热平衡试验的有效性. 国内外的航天机构针对提高红外灯阵热流分布均匀度的研究工作始终没有停止过. 1988年, 欧空

局(ESA)的 Sanger 等^[4]提出了采用将红外灯垂直和水平交叉排布的方法来提高红外灯阵热流分布的均匀度. 上世纪90年代, NASA的 Turner 等^[5]采用蒙特卡罗方法计算红外灯的热流分布, 并以此作为优化分析的基础. 2004年, NASA Ziemke 等^[1]采用有限元方法计算红外灯阵的热流分布并进行灯阵优化设计. 我国在红外灯阵热流仿真计算方面已经开展了探索性的工作. 本课题组对红外灯阵外热流模拟技术进行了多年的研究, 基于蒙特卡罗法建立了较精确的红外灯单灯热流分布数学模型^[6-7]. 在红外灯阵优化设计方

收稿日期: 2010-04-11.

作者简介: 刘守文(1975—), 男, 博士研究生;

孙来燕(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

面国内仅仅开展了初步探索性研究^[8].我国红外灯阵的研制目前采取的方法是在灯阵加工完成后进行均匀性测试,在测试过程中通过调整红外灯的位置使热流分布均匀度满足指标要求.

本文在文献[6]、[7]基础上建立了红外灯阵热流仿真计算方法,开展了基于遗传算法的优化设计研究.

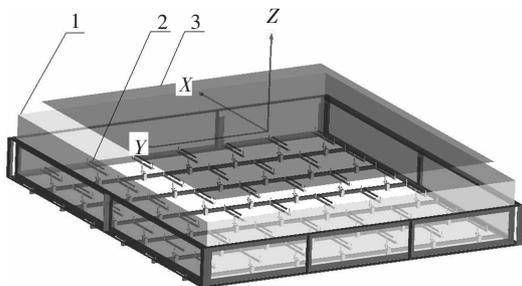
1 红外灯阵热流分布仿真计算

1.1 红外灯单灯热流仿真

为实现红外灯阵热流分布仿真计算及其优化分析,首先需要建立红外灯单灯热流分布计算模型.作者在文献[6]和[7]中详细论述了基于蒙特卡罗法的红外单灯热流仿真方法,本文不做详细阐述.

1.2 红外灯阵热流仿真计算

红外灯阵由一定数量的红外灯按照一定的规则排列而成,为提高红外灯阵热流分布均匀度,在灯阵四周安装高反射率反光板.红外灯阵与被照面结构如图1所示.由于灯阵热流优化需要进行大量的计算,为了缩短优化时间,利用单灯热流分布模型建立所需空间热流分布数据库,数据库中数值单位为粒子数,在仿真计算过程中调用数据库进行插值和叠加,进而快速获得不同结构红外灯阵的热流分布.



1—反光板; 2—红外单灯; 3—被照面

图1 红外灯阵示意图

以平面矩形被照面为例,任意红外灯对于被照面上目标点的反射热流可认为是该红外灯通过灯阵周边4个反光板产生的4股反射热流的叠加,如图2所示.反光板的反射热流等于红外灯射向镜像点的直射热流与挡板反射率的乘积.

假设红外灯阵包括 N 个红外单灯,则红外灯阵对被照面某一目标点 (X_{des}, Y_{des}) 的总辐射热流为

$$q = \sum_{i=1}^N F(X_i, Y_i, Z_i, X_{des}, Y_{des})_{dir} + \sum_{i=1}^N F(X_i, Y_i, Z_i, X_{des}, Y_{des}, \beta)_{ref}$$

式中: X_i, Y_i, Z_i 是任意红外灯的三维坐标,下标

dir 和 ref 分别表示直接照射的热流和经过反光板反射后的热流, β 为反光板反射率.

在工程上,提高红外灯阵热流分布均匀度的目标通常以降低热流分布不均匀度体现.我国现行标准规定的红外灯阵热流分布不均匀度计算公式为^[9]

$$\delta = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{max} + q_{min}} \times 100\%$$

式中 q_{max}, q_{min} 分别表示被照面上的最大热流和最小热流, W/m^2 .

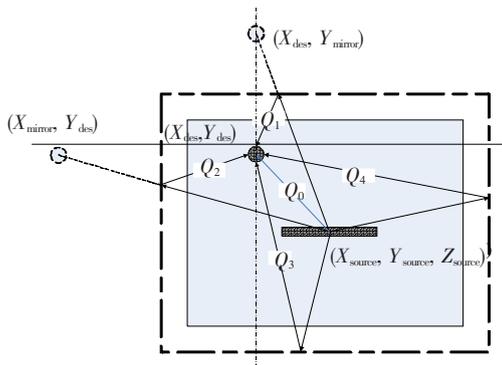


图2 直射热流与反射热流

1.3 红外灯阵热流分布算例

本文以某型卫星热试验 + Z 向红外灯阵为例进行了热流分布计算.首先通过试验测定了反光板的反射率为 0.61.灯阵尺寸为 $2\ 100\ mm \times 2\ 000\ mm$,共有红外灯 42 支,按 6 列 \times 7 行方式排列,未优化时为均匀分布,红外灯距离被照面均为 450 mm.

计算得到如图3所示的热流分布结果,图中数值单位为粒子数.热流分布不均匀度为 24.61%,计算时间为 6 s.

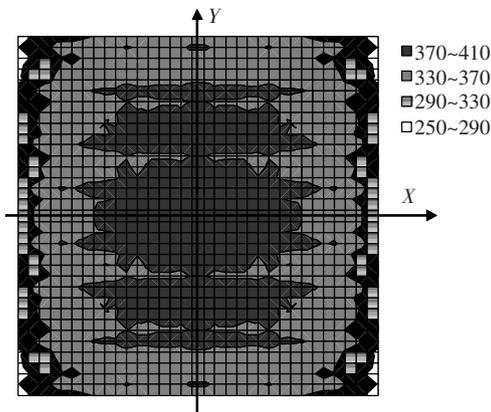


图3 热流分布计算结果

2 红外灯阵热流优化研究

2.1 算法选择

对于红外灯阵热流分布优化而言,目标函数

是灯阵热流分布不均匀度,优化参数是各红外单灯的空间坐标.由于红外灯数量较多,很难直接采用传统的无约束优化算法和约束优化算法.遗传算法是一种自适应生物进化算法,具有并行优化和全局优化特性,可同时跟踪优化多个参数,对目标函数梯度特性、连续性和单调性均无特殊要求,具有很强的鲁棒性^[10].基于上述特点,本研究决定采用遗传算法对红外灯阵热流进行优化分析.

2.2 参数简化处理

虽然遗传算法具备同时优化多个参数的优势,但若待优化参数很多(若 42 支灯,则有 126 个坐标待优化),则染色体长度过长,对遗传速度和收敛性都有很大影响.目前,我国航天器热平衡试验用红外灯阵均为矩形灯阵,灯阵内红外灯以行列形式排列,每列红外灯安装在同一个灯柱上.

如图 1 所示,灯阵内的红外灯以对称方式排布有利于提高热流分布均匀度,因此对优化参数进行如下简化:

- 1) 灯阵中每列红外灯的 X 坐标均相同;
- 2) 灯阵以 X 轴、Y 轴分为的 4 个象限,每个象限内红外灯的 X、Y、Z 坐标是对称的.

按照上述规则,42 支红外灯的灯阵待优化变量由 126 个缩减为 28 个.

考虑到工程实际,以 5 mm 为步长进行优化.

2.3 灯阵优化方法

2.3.1 初始群体建立

以随机正交变换方式得出一定群体规模的红外灯空间位置.采用格雷编码方式构成染色体串,每 1 个染色体串对应 1 组优化参数,以所有染色体串作为遗传优化的第一代初始群体.

2.3.2 适应值函数

采用下列方式构造适应值函数:

$$F(X) = \begin{cases} f_0 - f(x), & f(x) < f_0; \\ 0, & f(x) \geq f_0. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为优化目标函数,即红外灯阵热流分布不均匀度. f_0 为红外灯阵热流分布不均匀度的阈值上限,是一个适当的相对较大的数,可以通过试算或者工程经验确定,本文取 0.2.

2.3.3 建立配子池

计算当代群体中所有染色体串(即当前代的所有红外单灯空间位置组合方式)的适应值后,可根据个体的适应度大小采用概率性选择策略和最优保存策略对染色体串进行筛选,进而构成配子池.

2.3.4 遗传计算

在红外灯热流分布优化设计中,复制操作是

将热流分布均匀性较好的红外灯空间位置组合不加改变地复制到下一代群体中.生成配子池后,即可按照设定的复制概率随机选取染色体串以进行复制运算.

在红外灯热流分布优化设计中,变异操作是将一个红外灯空间位置组合中的某个空间坐标采用在其取值范围内的随机数替代.实际优化中,采用基本位变异算子进行变异运算.

在红外灯热流分布优化设计中,杂交操作是将两组红外单灯空间位置组合方式中的某些部分进行互换,进而形成两组全新的红外单灯空间位置组合,进入到下一代群体中.实际优化中,采用单点交叉算子进行杂交运算.

2.4 优化流程

综上所述,本文提出了红外灯阵热流仿真及优化设计的通用方法,其具体流程如图 4 所示.

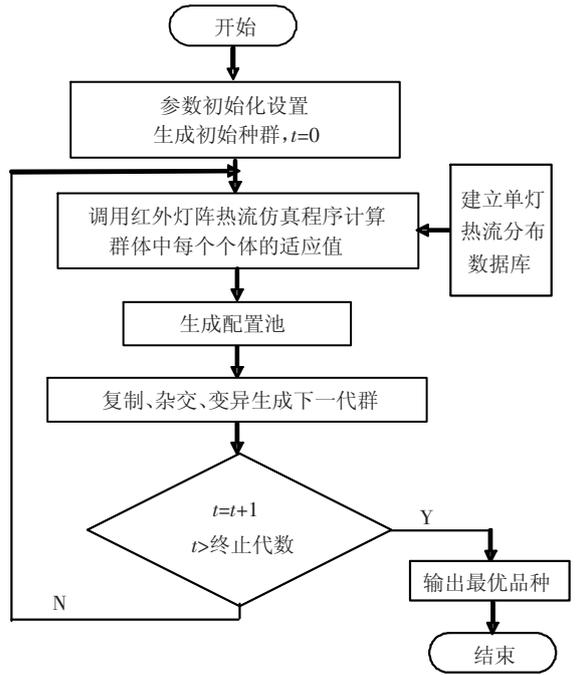


图 4 优化流程

根据图 4 所示的流程,本文基于 VB 程序开发了红外灯阵热流仿真及优化设计软件.

3 结果分析

3.1 遗传参数选取

遗传参数设置是否合理将直接关系到优化的速度和结果,本文对这些遗传参数进行了寻优.通过反复计算,对于红外灯数量小于 50 的红外灯阵,遗传参数可按下面的范围选取:群体规模 M 取 100,复制概率 P_r 取 0.60 ~ 0.65,杂交概率 P_c 取 0.3 ~ 0.4,变异概率 P_m 取 0.01 ~ 0.02,终止代数为 200 代.

3.2 应用实例及分析

以1.3节提到的红外灯阵为例进行热流分布优化设计. 试验对红外灯阵热流不均匀度的指标要求为优于10%. 本文分别按照3种排列方式对红外灯阵热流分布不均匀度进行优化计算, 结果如表1所示.

表1 不同灯密度优化结果

排列方式	红外灯密度(支·m ⁻²)	优化后均匀度/%
6列×6行	9.0	12.60
6列×7行	10.5	8.96
6列×8行	12.0	5.59

从表1可以看出,对于6列×7行排布的红外灯,热流不均匀度由优化前的24.61%降低到优化后的8.96%,优化后热流分布均匀度明显提高,达到均匀度优于10%的指标要求. 图5为42支灯优化后空间位置分布,图6为42支灯优化后热流分布计算值,图中数值单位为粒子数.

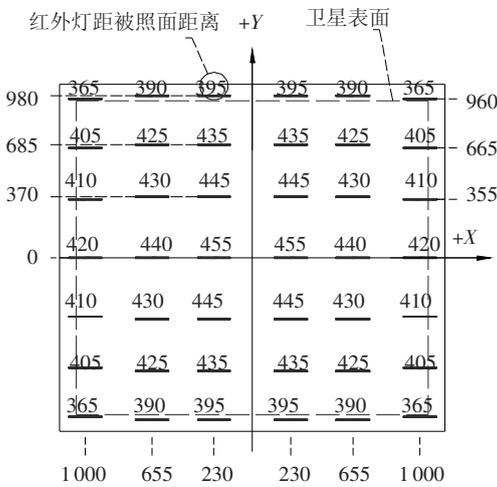


图5 42支灯优化后位置分布(mm)

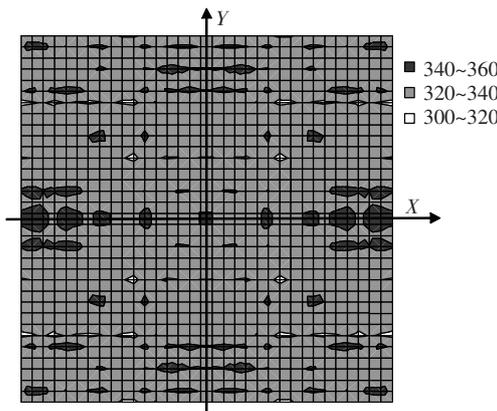


图6 42支灯阵热流分布计算值

由表1结果可以看出,6列×8行排布方式热流分布均匀度最好,但6列×8行排布与6列×7行排布方式相比,对热沉的遮挡系数大,不利于低温背景热流的实现,6列×7行排布方式热流分布均匀度已经能够满足试验指标要求,因此本文以6列×7行共42支灯的方案进行了红外灯阵的设计,红外灯按图5所示位置进行排布. 采用硅光电池片作为传感器对该红外灯阵热流分布进行了测试,测试中利用电池片输出电压值表征相应的热流分布^[9],经过计算,红外灯阵的热流分布不均匀度为9.2%,与表2中的仿真结果8.96%吻合良好. 硅光电池片的输出电压值不能直接折算为热流值,但电压值与热流值成正比. 同样蒙特卡罗法仿真计算的结果也不是热流值,而是达到被照面某点的能量粒子数,粒子数同样与热流值成正比. 输出电压值的分布和粒子数的分布都能反映被照面上热流的分布情况. 图7为被照面上沿着Y轴(X=0)的若干点的电压测试值与粒子数计算值的分布情况. 从图中可以看出两者的分布特性具有较好的符合性.

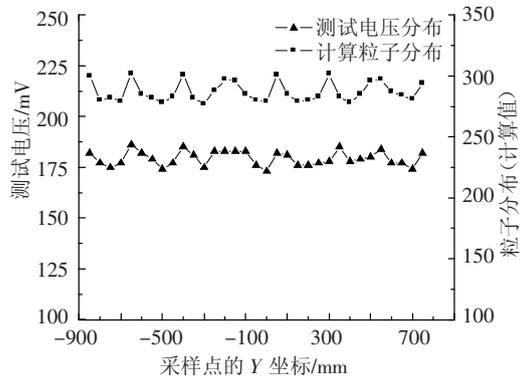


图7 测试结果与计算结果对比

表2的数据表明,红外灯阵的热流分布不均匀度与红外灯密度密切相关. 随着红外灯密度的增加红外灯阵热流分布均匀性变好. 但红外灯密度的增加会增大灯阵对热沉的遮挡,不利于低背景热流的实现. 目前国内外航天器热平衡试验对热流不均匀度的要求通常为10%^[9,11]. 根据本文的研究,常规矩形灯阵的红外灯密度以10~12支/m²为宜.

3.3 反光板反射率对优化结果的影响

反光板的反射率对红外灯阵热流分布不均匀度具有至关重要的影响. 本文对上述42支灯红外灯阵在不同反射率情况下进行了优化计算,反射率的取值范围为0.1~0.9,优化后红外灯阵热流分布不均匀度结果如图8所示.

图8的结果说明,通过提高反光板的反射率可以有效降低红外灯阵热流分布不均匀度,采用

镀膜等技术提高反射率是进一步提高红外灯阵热流分布均匀度的可行方案。

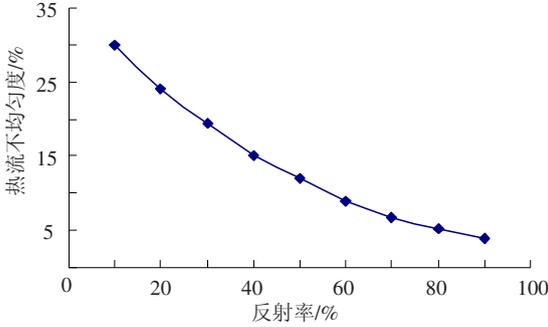


图8 热流分布不均匀度与反光板反射率之间的关系

4 结 论

1) 建立了红外灯阵热流分布仿真计算方法,实例与仿真结果的对比表明该方法具有较高的计算精度,能够满足工程应用需求。

2) 建立了基于遗传算法的红外灯阵热流优化方法,该优化方法能够有效提高红外灯阵热流分布均匀度。

参考文献:

[1] ZIEMKE R A. Infrared heater used in qualification testing of international space station radiators[R]. Ohio; NASA,2004.

[2] WEI Chuanfeng F, QIE Dianfu. Deep space environment's effect on the lunar explorer's thermal control and its ground simulation[C]//Proceedings of International Lunar Conference 2005, 7th ILEWG Conference on Exploration and Utilisation of the Moon (ICEUM7). Toronto;ESA,2005:201 - 205.

[3] LIU Shouwen, PEI Yifei. Application of infrared lamp array in the thermal balance test of SINOSAT-2[C]//Proceedings of International Conference on Space Information Technology 2009. BEIJING;CAST,2009:675 - 679.

[4] SANGER G. A new type of lamp and reflector for I. R. simulation[R]. California;NASA, 1988.

[5] TURNER T L. Numerical and experimental analyses of the radiant heat flux produced by quartz heating systems [R]. California;NASA,1994.

[6] 刘守文,裴一飞,孙来燕. 航天器真空热试验用红外灯光谱分布研究[J]. 宇航学报,2010,31(1):254 - 258.

[7] 刘守文,尹晓芳,裴一飞,等. 基于蒙特卡罗方法的红外灯热流分布研究[J]. 宇航学报,2010,31(2):608 - 614.

[8] 万强,贾阳,刘敏. 调节红外灯高度改善不均匀度的方法研究[J]. 航天器环境工程, 2005,20(1):31 - 35.

[9] 袁伟峰,郗殿福,裴一飞,等. 红外灯阵热流不均匀度测试原理分析[J]. 航天器环境工程, 2004,21(1):13 - 20.

[10] BAG S, DEBROY TA. A Genetic algorithm-assisted inverse convective heat transfer model for tailoring weld geometry[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2009, 24(3):384 - 397.

[11] SIEBES G. The development and integration of infrared environmental simulation techniques into a test routine at JPL[C]//Proceedings of 18th AIAA Aerospace Ground Testing Conference. Colorado; AIAA, 1994: 2614 - 2623.

(编辑 杨 波)