

巡飞弹载光电风冷散热系统参数化优化方法研究

李智 朱镭 刘虎 李佳佳 张衡 张桂玮

Parametric optimization method of optoelectronic air-cooling system on loitering missile

LI Zhi, ZHU Lei, LIU Hu, LI Jiajia, ZHANG Heng, ZHANG Guiwei

引用本文:

李智, 朱镭, 刘虎, 等. 巡飞弹载光电风冷散热系统参数化优化方法研究[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 563-570. DOI: 10.5768/JAO202546.0301003

LI Zhi, ZHU Lei, LIU Hu, et al. Parametric optimization method of optoelectronic air-cooling system on loitering missile[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 563-570. DOI: 10.5768/JAO202546.0301003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巡飞弹载光电对地扫描方案研究

Research on ground scanning scheme of electro-optic payload for loitering missile

应用光学. 2025, 46(1): 49-54 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101003>

巡飞弹目标定位精度分析

Target location accuracy analysis on loitering missile platform

应用光学. 2022, 43(4): 592-598 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401002>

机载光电系统外置被动隔振平台设计与分析

Design and analysis of external passive vibration isolation platform for airborne optoelectronic system

应用光学. 2024, 45(6): 1125-1131 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601003>

涉氢装备氢气泄漏激光遥测系统光电参数优化分析

Optimization analysis of optoelectronic parameters of laser telemetry systems for hydrogen leakage detection in hydrogen-involved equipment

应用光学. 2024, 45(6): 1219-1227 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603002>

探测器像元尺寸对航空光电系统成像性能影响分析

Influence of detector pixel size on imaging performance of airborne optoelectronic system

应用光学. 2022, 43(4): 583-591 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401001>

多失效模式光电系统可靠性建模分析方法

Reliability modeling and analysis method for electro-optical system with multiple failure modes

应用光学. 2022, 43(4): 635-640 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0563-08

引用格式: 李智, 朱镭, 刘虎, 等. 巡飞弹载光电风冷散热系统参数化优化方法研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 563-570.

LI Zhi, ZHU Lei, LIU Hu, et al. Parametric optimization method of optoelectronic air-cooling system on loitering missile[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 563-570.



在线阅读

巡飞弹载光电风冷散热系统参数化优化方法研究

李智, 朱镭, 刘虎, 李佳佳, 张衡, 张桂玮

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 随着巡飞弹武器系统的发展, 巡飞弹载光电载荷小型化、多功能、高集成度要求越来越高, 伴随而来的散热问题也日益突出。为了解决巡飞弹载光电系统散热性能差的问题, 建立了一种基于参数化建模的风冷散热系统优化设计方法。首先确定风冷散热系统的可设计参数, 然后基于拉丁超立方采样方法选取多组样本点, 并通过 ICEPAK 仿真计算得到每个样本点对应输入参数的输出响应, 进而建立风冷散热器 Kriging 代理模型; 之后基于代理模型, 通过 ASA(adaptive simulation annealing) 自适应模拟退火算法对风冷散热器进行优化设计; 最后将优化结果代入热仿真模型, 验证其准确性。以某小型巡飞弹载光电系统为例, 对经验设计下的风冷散热器进行热仿真分析, 以热源芯片温度最小化为目标进行优化。仿真结果表明: 优化后的风冷散热器相比经验设计, 可使热源温升降低 28.5%, 有效提高了巡飞弹载光电系统的散热水平, 满足系统设计要求。

关键词: 巡飞弹载光电系统; 风冷散热器; 参数化; Kriging 代理模型; 优化设计

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0301003

Parametric optimization method of optoelectronic air-cooling system on loitering missile

LI Zhi, ZHU Lei, LIU Hu, LI Jiajia, ZHANG Heng, ZHANG Guiwei

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the development of the loitering missile weapon system, the requirements of miniaturization, multi-function and high integration of the optoelectronic load on the loitering missile are getting higher and higher, and the accompanying heat dissipation problem is becoming increasingly prominent. In order to solve the problem of poor heat dissipation performance of the optoelectronic system on loitering missile, an optimization design method of air-cooling system based on parametric modeling was established. The designable parameters of the air-cooling system were firstly determined, then the several groups of sample points based on the Latin hypercube sampling method were selected, and the output response of each sample point corresponding to the input parameters through ICEPAK simulation calculation was obtained, thereby establishing the air-cooling radiator Kriging proxy model. Then, based on the proxy model, the adaptive simulation annealing (ASA) algorithm was used to optimize the air-cooling system. Finally, the optimization results were substituted into the thermal simulation model to verify its accuracy. Taking a small missile-borne optoelectronic system as an example, the thermal simulation analysis of the air-cooling radiator under

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2024-12-27

基金项目: 2022 年度某航空装备预研专用技术项目 (LZY20230503121)

作者简介: 李智 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电结构总体设计研究。E-mail: 2537403487@qq.com

通信作者: 朱镭 (1980—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光电总体设计研究。E-mail: zhulei_cc@163.com

empirical design was carried out to optimize the temperature minimization of heat source chip. The results show that compared with the empirical design, the optimized air-cooling radiator can reduce the temperature rise of the heat source by 28.5%, which effectively improves the heat dissipation level of the missile-borne optoelectronic system, and meets the requirements of system design.

Key words: optoelectronic system on loitering missile; air-cooling radiator; parameterization; Kriging proxy model; optimal design

引言

俄乌战争以来,为应对更加复杂的战场环境,小型化、轻型化、高集成度已成为巡飞弹载光电载荷研发工作的重要方向^[1,2]。对于这种结构要求紧凑、功能要求复杂的光电集成系统而言,其内部元器件发热量大,热源集中,若系统散热能力不足,容易使系统内部温度过高,造成电子元器件失效,降低设备可靠性。

近年来,国内外学者关于提高散热器散热效率做了大量实验探究,ONOROH F等人^[3]以高效散热为目标,优化了散热器模型的翅片间距、厚度、高度和数量等参数,得到了一组散热性能良好的参数组合;BILIRGEN H等人^[4]通过ANSYS FLUENT对环形管翅散热器进行了研究,发现随着翅片间距的增加,压降会随翅片间距增幅的增加而增加;王祥等人^[5]针对LED灯空气导流的散热方法,通过仿真和灵敏度分析,探究了有、无空气导流对散热的影响;王志斌等人^[6-9]利用ANSYS ICEPAK对不同电子设备进行了精确的热仿真模拟计算,提高了设计阶段散热分析的有效性;刘平等人^[10]和李健等人^[11,12]针对微通道翅片结构研究了多种不同翅型的散热器,评估了流场分布与散热性能的关系;封蔚健等人^[13]和李书培等人^[14]通过设计正交试验的方式对散热器结构进行了优化;张春成等人^[15]对比了带风机的散热器和不带风机的散热器的散热效果,明确了风机对散热性能的影响。对于多变量的单目标优化问题,少量实验组别只能对比出现有试验组别的优劣,为得到设计域内散热器的最优性能,需要通过DOE实验设计合理增加实验组数。李元等人^[16]利用Isight软件进行DOE实验设计,简化了实验设计流程。

受限于巡飞弹载光电载荷高冲击、强振动、体积小等设计约束,系统通常无法采取液冷、热管等复杂散热措施,因此,本文选取可靠性较高的翅片与风扇组合的风冷散热系统进行优化设计。利用ICEPAK对散热系统模型进行数值仿真计算,通过建立代理模型对风冷散热器结构进行参数化设

计,并利用自适应模拟退火算法自动寻优,得到散热性能最优的风冷散热器方案,提升了巡飞弹载光电系统热设计水平。

1 流动与传热理论

风冷散热系统的热仿真模型涉及流-固两相的热量传递,对于大部分流体传热和流动问题,可以用以下控制方程表述^[17]。

1) 连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} \mathbf{u}) - \frac{\partial p}{\partial n} + S_n \quad (2)$$

3) 能量方程:

$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} I) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) - p \cdot \text{div}(\mathbf{u}) + \Phi + S_T \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u} = ui + vj + wk$; u 、 v 、 w 为流体流速在 x 、 y 、 z 方向的分量; ρ 为流体密度; μ 为流体粘度系数; I 为流体内能; λ 为导热系数; p 为流体压力; Φ 为表征流体在空间内流动和传热状态的复合项; S_n 为流体在各个方向的源; S_T 为热量源。

针对固体相与流体相传导换热问题中的热量传递过程,可使用热传导表达式表示为

$$Q = (T_h - T_c) / [d_{hc} / (\lambda A)] \quad (4)$$

式中: Q 表示传递总热量; T_h 表示高温位置温度; T_c 表示低温位置温度; d_{hc} 为高温点和低温点距离; A 表示换热面积。其中 $d_{hc} / (\lambda A)$ 表示热量从高温位置向低温位置传递过程中的阻碍,用热阻 $R_{th}(\text{℃}/\text{W})$ 表示^[18]。

翅片间空气流动的对流热阻可表示为

$$R_{th} = \frac{1}{h_c A} \quad (5)$$

式中: h_c 表示对流换热系数。一般情况下,空气对流换热系数可表示为

$$h_c = \lambda_{\text{空气}} \cdot \left(\frac{v}{d}\right)^{0.2} \quad (6)$$

式中: v 为冷却空气流速; d 为出风面与换热面距离。

对于风冷散热系统, 可通过改变翅片与流动空气之间接触部分的结构参数来研究其散热性能的变化, 以指导后续优化。

2 散热系统经验设计

本文研究对象为某巡飞弹载光电载荷, 光学舱内包含 1 个红外热像仪、2 个定焦电视、1 个陀螺和 1 个图像处理板。简化图像处理板上的图像处理芯片为主要热源, 光电载荷结构如图 1 所示。

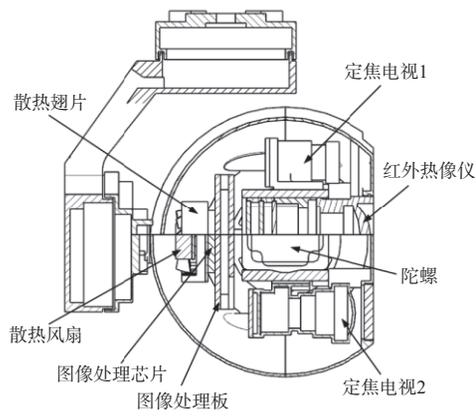


图 1 弹载光电系统结构

Fig. 1 Structure of missile-borne photoelectric system

散热翅片采用导热性良好的铝 6063, 将热量传导到空气或其他低温区域, 通过扩大与空气的接触面积, 减小面热流密度, 从而提高热源导热效率。由于散热翅片采用的是被动散热方式, 散热效率受散热翅片材料导热率以及翅片到空气的传热阻限制, 一般需要借助风扇将翅片之间的高温气体散出。在狭小空间内, 风扇不便于单独布置, 可在翅片上嵌套一个小型风扇, 使空气从翅片内部散出, 带走翅片表面的热量, 并将冷空气不断补充到高温区, 从而达到更好的散热效果。

散热器结构模型和剖面结构尺寸如图 2 和图 3 所示。

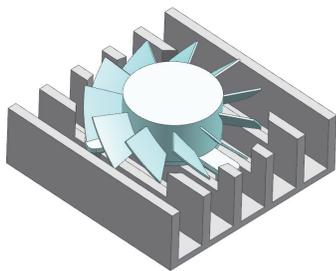


图 2 风冷散热系统

Fig. 2 Air-cooling system

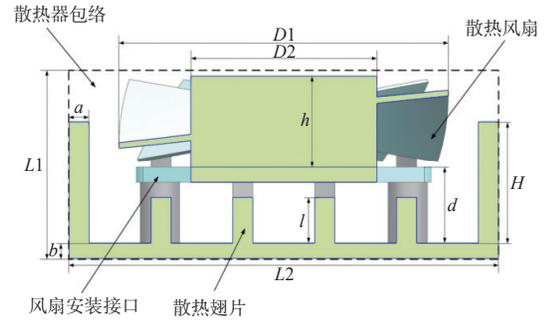


图 3 风冷散热系统结构参数

Fig. 3 Structural parameters of air-cooling system

本文研究的巡飞弹载光电系统中, 散热器的最大包络尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。通过对市面上小型散热风扇选型, 选取风扇外形尺寸为直径 23 mm , 厚度 6 mm , 根据安装需要, 确定风扇出风面到翅片顶部距离不小于 1.5 mm 。根据系统空间包络尺寸和加工工艺要求, 散热系统结构参数及变量取值范围如表 1 所示。

表 1 风冷散热系统结构参数

Table 1 Definition of structural parameters of air-cooling system

结构参数	符号	尺寸	取值范围
扇叶直径	D_1/mm	23	—
风扇轴径	D_2/mm	14	—
风扇厚度	h/mm	6	—
包络高度	L_1/mm	12	—
包络长度及宽度(相等)	L_2/mm	30	—
风扇到基板距离	D/mm	5	—
基板厚度	b/mm	1	—
翅片厚度	a/mm	(变量)	[0.3, 1.5]
翅片高度	H/mm	(变量)	[1, 11]
内部翅片高度	l/mm	(变量)	[0, 4]
翅片数量	$N/\text{个}$	(变量)	[5, 14]
风扇转速	R/rpm	(变量)	[6000, 12000]

设计变量为翅片厚度 a 、翅片高度 H 、内部翅片高度 l 、翅片数量 N 和风扇转速 R 等 5 个参数。根据工程经验进行初始设计, 选择翅片数量 $N=6$ 个, 翅片厚度 $a=1.4\text{ mm}$, 翅片高度 $H=8\text{ mm}$, 内部翅片高度 $l=3\text{ mm}$ 。

3 数值仿真计算

3.1 仿真条件设置

ANSYS ICEPAK 基于有限体积法进行 CFD 仿真计算, 使用 ICEPAK 中自带的风扇模块代替风扇模型, 可以很大程度地简化计算, 并针对风扇物理参数进行参数化设置。

计算域 (cabinet) 边界设为 opening, 模拟开放的空气环境, 环境温度为 55℃。由于散热器翅片厚度尺寸和光电载荷系统壳体在厚度方向上尺寸较小, 且系统中异形曲面较多, 对模型中相应几何体创建 assembly, 划分非连续性网格可以减少网格数量, 保证网格质量。将光电载荷系统创建为 assembly1, 散热器和芯片创建为 assembly2, 选择六面体占优网格 (Mesher-HD) 划分非连续性网格, 如图 4 所示, 保证模型中固体网格的贴体性。

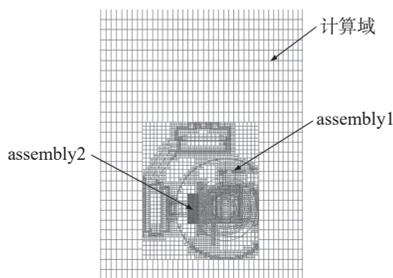


图 4 光电载荷网格划分

Fig. 4 Photoelectric load grid division

散热器材料采用铝 6063, 导热率为 209 W/(m·K)。软件自动计算仿真模型雷诺数为 2619.69, 在数值计算中将流体类型设置为湍流。

3.2 网格无关性验证

对热仿真模型计算前进行网格无关性验证。空气流动和热交换主要发生在光电载荷系统 assembly1 中, 通过改变 assembly1 最大网格尺寸改变网格数量, 分别计算后的结果如表 2 所示。

表 2 不同网格数下芯片温度

Table 2 Chip temperature under different grid number

assembly1最大网格尺寸/mm	网格数量	芯片温度/℃
8	302 410	83.13
7	327 913	81.3
6	392 988	78.93
5	445 400	80.01
4	644 691	79.9
3	905 719	79.31

通过对比可知, 网格最大尺寸为 4 mm 时, 与相邻两组实验的计算结果偏差都在 0.7℃ 以内, 网格无关性得以验证, 之后的模型中 assembly1 设置最大网格尺寸均为 4 mm。

基于经验设计的弹载光电载荷热仿真结果如图 5~图 7 所示。图 5 为截面温度分布云图, 图 6 为流场分布迹线图, 图 7 为载荷内部各部件温度分布云图。

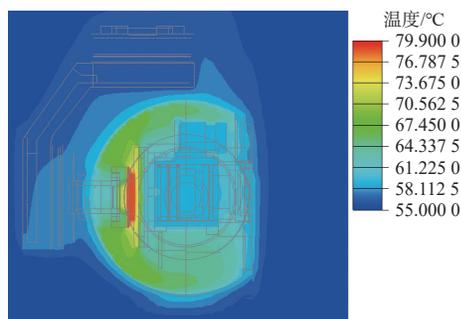


图 5 弹载光电载荷截面温度云图

Fig. 5 Cross section temperature cloud image of missile-borne photoelectric load

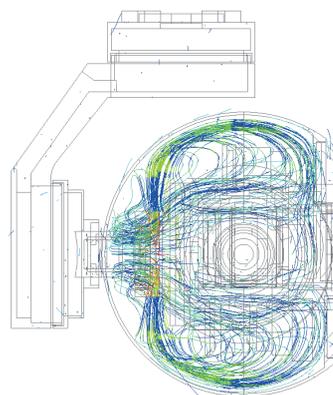


图 6 流场分布图

Fig. 6 Flow field distribution image

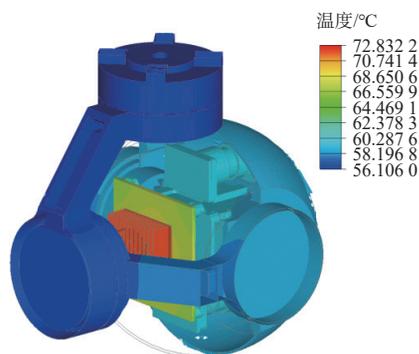


图 7 部件温度分布云图

Fig. 7 Component temperature distribution cloud image

仿真结果表明, 风扇气流可以将散热翅片导出的热量传递到周围空气中, 使光电载荷内部温度分布更加均匀。在添加散热系统情况下, 系统产生的热量依然集中在热源附近。光学系统本身温升较低, 由于该小型弹载光电载荷尺寸小, 系统工作过程中产生的热量和光学系统的温度分布并不会显著影响光学系统性能, 因此, 本文仅对主要发热元件的温升情况进行分析。

4 风冷系统结构优化

4.1 拉丁超立方采样

影响散热系统整体散热效果的因素很多,对所有因素进行全因子实验分析需要大量时间成本。拉丁超立方采样是一种从多元参数分布中近似随机抽样的方法,通过将每个变量的取值范围均分为相同区间,并在每个区间内均匀采样,确保采样点在各个变量的采样区间内均匀分布,以减少输入变量之间的相关性,降低模型计算量的同时提高预测精度。

由于各个变量的量纲和变化尺度大小不同,需要对所有变量取值进行归一化处理,即:

$$\sigma_{xi} = \frac{x_i - \bar{x}_{\min}}{\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min}} \quad (7)$$

式中: x_i 为 x 变量在第 i 个采样点上的值; \bar{x}_{\min} 为变量采样范围的最小值; \bar{x}_{\max} 为变量采样范围的最大值; σ_{xi} 为第 i 个采样点的 x 变量归一化后的取值。归一化后变量分别为 σ_a 、 σ_H 、 σ_l 、 σ_N 、 σ_R , 定义域均为 $[0,1]$ 。当存在 n 个变量时, Isight 中采用拉丁超立方采样法获取的样本点个数, 通常根据经验公式 $2(n+1)(n+2)$ 确定, 因此本文选取 84 个采样点。任意选取 3 个变量查看采样点的空间分布散点图, 如图 8 所示。由图 8 可知, 所选样本点在采样空间内的分布均匀性较好。

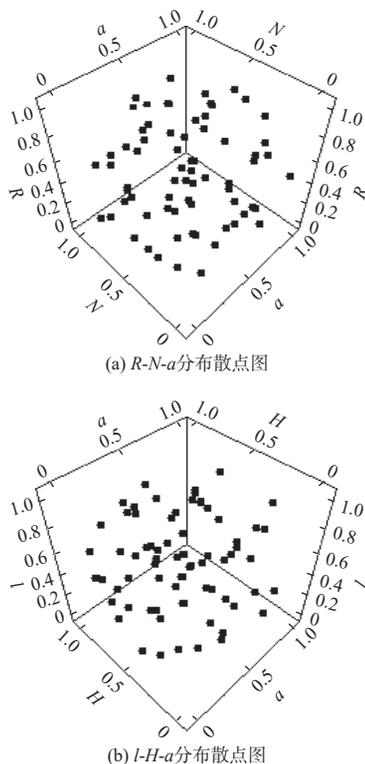


图 8 样本点分布散点图

Fig. 8 Scatter diagram of sample point distribution

4.2 灵敏度分析

对以上选取的 84 个采样点分别进行数值仿真计算, 得到不同参数下散热系统对应芯片的最高温度。将 5 个参数作为输入变量, 芯片温度作为输出响应, 通过灵敏度分析可获得各输入变量对输出响应的影响关系, 进而找出影响散热系统性能的敏感因素。统计学中广泛采用 Pareto 法则分析原因对结果的贡献率, 从而衡量某种原因与结果的相关程度。本文基于 Pareto 贡献值分析热源温度对相关因素的依赖程度, 分析以上 70 组试验数据, 计算出基于 Pareto 贡献值的参数灵敏度, 如图 9 所示。

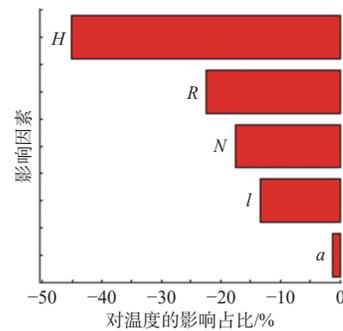


图 9 Pareto 贡献值

Fig. 9 Pareto contribution values

由图 9 可知, 翅片高度 H 对散热器性能影响最明显, 而翅片厚度 a 的灵敏度最小, 后续优化设计中可以将翅片厚度 a 作为定值, 取 $a=1$ mm, 不参与后续优化过程。

为得到设计域内更准确的局部最优值, 可在已有采样点的基础上建立代理模型, 利用目标优化算法搜索设计域内的全局最优解。

4.3 风冷系统优化模型

根据风冷系统散热设计要求, 本文以芯片温度最低为目标函数, 以散热器包络及工艺限制下所有参数取值区间为约束, 建立风冷散热系统优化模型, 即:

$$\begin{aligned} \min : & T(H, l, N, R) \\ \text{s.t.} & 1 \leq H \leq 11 \\ & 0 \leq l \leq 4 \\ & 5 \leq N \leq 14 \\ & 6000 \leq R \leq 12000 \end{aligned} \quad (8)$$

为反映芯片温度与风冷系统参变量之间的响应关系, 建立风冷系统结构代理模型。Kriging 模型是源于地质统计学的代理模型方法^[19], 通过插值和统计假设来趋近复杂函数。该模型假设中, 未

知函数被看做某高斯静态随机过程, 定义为

$$y(x) = \beta + z(x) \quad (9)$$

式中: β 为常数, 代表 $y(x)$ 的数学期望, 通过已知的响应值进行估计; $z(x)$ 是均值为0、方差为 σ^2 的静态随机过程。

模型最终插值结果为已知样本响应值的线性加权, 即模型对 $y(x)$ 的估计值 $\hat{y}(x)$ 可用加权函数表示为

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i y_i \quad (10)$$

式中: y_i 为第 i 个样本点响应值; ω_i 为加权系数。基于上述假设, Kriging 模型通过寻找最优加权系数 ω_i 建立近似代理模型。

在已有84个样本点中选取70个样本作为模型训练集, 另外14个作为验证集, 用验证集样本进行代理模型预测值与实际值的误差分析, 如图10所示, 图10中斜线代表预测值与实际值相等。模型各项误差统计数值如表3所示。从表3可以看出, 该代理模型近似准确度较高, 验证了模型的准确性和有效性。

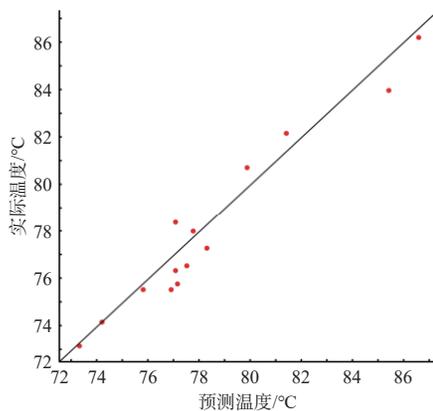


图10 模型预测值与实际值误差对比

Fig. 10 Comparison of errors between model predicted values and actual values

表3 统计误差

Table 3 Statistical errors

统计误差类别	误差值
平均误差	0.058 82
最大误差	0.107 43
均方根误差	0.068 87
R^2 误差	0.939 72

基于以上 Kriging 代理模型, 通过 ASA 自适应模拟退火算法对模型进行优化迭代, 优化过程中目标函数迭代曲线如图11所示, 归一化变量优化结果如表4所示。

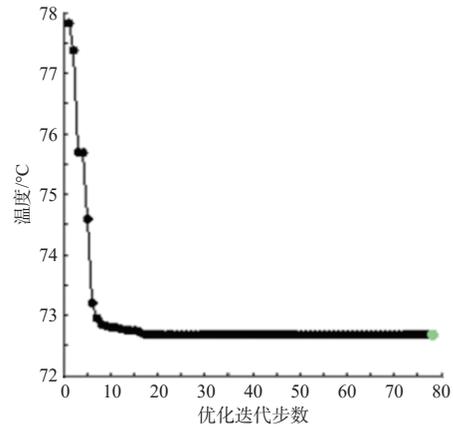


图11 芯片温度迭代收敛曲线

Fig. 11 Chip temperature iterative convergence curve

表4 优化结果

Table 4 Optimized results

σ_H	σ_l	σ_N	σ_R	$T/^\circ\text{C}$
0.777 14	0.824 95	0.830 11	0.783 33	72.689

将表4中归一化后的无量纲数值进行还原, 得到优化结果为: $H=8.77$ mm, $l=3.3$ mm, $N=12$ 个, $R=10700$ rpm, 输出响应 $T=72.689$ °C。

将以上数值代入弹载光电载荷热仿真模型中进行验证, 得到散热系统优化后的弹载光电载荷温度分布, 如图12所示。

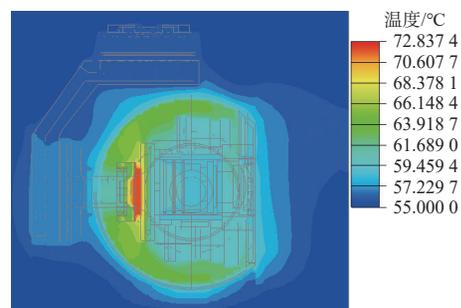


图12 基于优化设计的弹载光电载荷温度云图

Fig. 12 Temperature cloud image of missile-borne photoelectric load based on optimal design

对比实际计算结果与预测结果, 如表5所示。从表5可知, 基于 Kriging 代理模型的优化结果较为准确。

表5 优化结果预测值与实际计算结果对比

Table 5 Comparison between predicted values of optimization results and actual calculation results

优化模型预测值/°C	优化结果实际计算值/°C	偏差/%
72.689	72.837	2.03

将风冷散热系统的经验设计与优化设计仿真结果进行对比,如表6所示。从表6可知,优化结果对风冷散热系统性能提升作用明显,验证了本文优化方法在风冷散热系统结构优化中的有效性。

表6 经验设计与优化设计的光电载荷温度对比

Table 6 Comparison of photoelectric load temperature between empirical design and optimal design

经验设计 $\Delta T/^\circ\text{C}$	优化设计 $\Delta T/^\circ\text{C}$	提升效果/%
24.9	17.8	28.5

5 结论

为优化巡飞弹载光电载荷热设计,提高系统小型化、集成化设计后的可靠性,本文针对风扇与翅片组合的风冷散热系统,提出了一种基于参数化建模、灵敏度分析和Kriging代理模型的风冷散热系统优化设计方法,随后以某小型巡飞弹载光电系统为例,验证了所提方法的准确性和有效性。对比结果显示,代理模型能以少量样本点较为准确地描述实际复杂问题,模型预测输出响应与系统真实计算结果相差约2.03%。此外,优化结果表明,相较于经验设计,优化设计方案中系统的热源温升降低了28.5%,显著提高了巡飞弹载光电系统的散热性能,满足系统设计的要求。

参考文献:

- [1] 崔勇平, 邢清华. 从俄乌战争看无人机对野战防空的挑战和启示[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(4): 1-3.
CUI Yongping, XING Qinghua. The challenge and inspiration of UAVs to field air defense from the Russia-Ukraine war[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022, 38(4): 1-3.
- [2] 张静, 张科, 王靖宇, 等. 低空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 1-8.
ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Jingyu, et al. A survey on anti-UAV technology and its future trend[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 9(1): 1-8.
- [3] ONOROH F, ADEWUMI O O, OGBONNAYA M. Characterization of a finned heat sink for a power inverter[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1378(2): 022003.
- [4] BILIRGEN H, DUNBAR S, LEVY K E. Numerical modeling of finned heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 278-288.
- [5] 王祥, 吴清文, 杨献伟, 等. 导流散热型LED灯的热分析与试验研究[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 128-133.
WANG Xiang, WU Qingwen, YANG Xianwei, et al. Thermal analysis and test for convection-cooled LED lamp[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 128-133.
- [6] 王志斌, 张跃宾, 王忠东, 等. 基于热阻网络的大功率LED热管散热研究[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1014-1018.
WANG Zhibin, ZHANG Yuebin, WANG Zhongdong, et al. Heat pipe heat sink of high power LED based on thermal resistance network[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1014-1018.
- [7] 李卫洲. 基于ICEPAK软件电子方舱热设计[J]. 无线电工程, 2011, 41(8): 55-57.
LI Weizhou. Thermal design of electronic shelter using ICEPAK software[J]. Radio Engineering, 2011, 41(8): 55-57.
- [8] 程文虎, 杜昌堂, 谢金金. 基于Icepak分析某电子机箱散热[J]. 仪器仪表用户, 2023, 30(12): 38-41.
CHENG Wenhui, DU Changtang, XIE Jinjin, et al. Analysis of heat dissipation in an electronic chassis based on ICEPAK[J]. Instrumentation Customer, 2023, 30(12): 38-41.
- [9] 李健, 焦凯, 张恒, 等. 翅片换热器的数值模拟与结构优化[J]. 机械设计与制造, 2019(12): 81-83.
LI Jian, JIAO Kai, ZHANG Heng, et al. Numerical simulation and structural optimization of fin heat exchanger[J]. Machinery Design and Manufacture, 2019(12): 81-83.
- [10] 刘平, 李方, 唐瑞琪, 等. 不同散热翅片结构下的芯片散热性能分析[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2024(10): 1-11.
LIU Ping, LI Fang, TANG Ruiqi, et al. Analysis of chip thermal performance under different cooling fin structures[J]. Journal of Xiangtan University(Natural Science Edition), 2024(10): 1-11.
- [11] 李健, 萧维智, 葛鹰. 液冷冷板散热翅片形状与排布研究[J]. 流体机械, 2020, 48(8): 6-10.
LI Jian, XIAO Weizhi, GE Ying. Study of radiating fins of liquid-cooled cold-plate with different shapes and arrangement[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(8): 6-10.
- [12] 李健, 蒋宏邦, 王辉, 等. 某微通道液冷板的性能分析与

- 优化[J]. *机械设计与制造*, 2023(3): 102-105.
- LI Jian, JIANG Hongbang, WANG Hui, et al. Structure optimization and design of liquid cooling plate based on ICEPAK[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2023(3): 102-105.
- [13] 封蔚健, 石秀东, 姚晨明, 等. 基于正交试验和 Fluent 的管翅式换热器结构优化[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(1): 93-99.
- FENG Weijian, SHI Xiudong, YAO Chenming, et al. Structure optimization of a finned-tube heat exchanger based on orthogonal tests and Fluent[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science)*, 2020, 47(1): 93-99.
- [14] 李书培, 孙冬明, 张赛, 等. 某机载光电系统风冷散热翅片优化设计及仿真[J]. *激光与红外*, 2024, 54(6): 951-957.
- LI Shupe, SUN Dongming, ZHANG Sai, et al. Optimized design and simulation of air-cooled heat dissipation fins for an airborne optoelectronic system[J]. *Laser and Infrared*, 2024, 54(6): 951-957.
- [15] 张春成, 袁瑞明, 吕强, 等. 不同散热器结构对其散热特性影响的数值研究[J]. *环境技术*, 2024, 42(6): 152-156.
- ZHANG Chuncheng, YUAN Duanming, LYU Qiang, et al. Numerical investigation of the effect of different radiator structures on heat dissipation characteristics[J]. *Environmental Testing*, 2024, 42(6): 152-156.
- [16] 李元, 焦明印, 罗传伟, 等. 基于 Isight 的平面反射镜轻量优化设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(2): 194-197.
- LI Yuan, JIAO Mingyin, LUO Chuanwei, et al. Optimized design of lightweight flat mirror based on Isight[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(2): 194-197.
- [17] 陈丽萍. 计算流体力学: 有限体积法基础及其应用[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2016: 1-2.
- CHEN Liping. *Computational fluid dynamics: the foundation and application of finite volume method*[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2016: 1-2.
- [18] 张健. 电力电子器件及其装置的散热结构优化研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2015.
- ZHANG Jian. *Study on heat dissipation structure optimization of power electronic device and equipment*[D]. Shenzhen: Shenzhen Graduate School of Harbin Institute of Technology, 2015.
- [19] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. *航空学报*, 2016, 37(11): 3197-3225.
- HAN Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3197-3225.