材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023111603

LED投光灯叉翅散热器热分析及优化

刘 伟，陆 欣*，林 俊

（南京理工大学 能源与动力工程学院，南京 210094）

摘 要： 为探究叉翅散热器在某100 W LED舞台投光灯上的散热强化作用并进行优化设计，通过数值模拟与实验验证的方法，对影响叉翅散热器散热性能的主要几何因素及其机理进行了分析。以LED芯片最高温度和散热器质量为优化目标，对短翅长度与间距进行了单因素分析，然后通过NSGA-Ⅱ算法进行双目标优化，并进行模糊C均值聚类，得到了不同应用场景下散热器配置。结果表明：叉翅散热器可有效增强散热性能，其结构可增加翅片表面平均对流换热系数，短翅长度和间距对单位质量散热性能影响均存在最优值，短翅过长或间距过小均会使翅片表面对流换热系数下降。双目标优化后的叉翅散热器可在几乎不改变散热器质量时，降低LED芯片最高温度2.33 ℃。

关键词： 光学器件；自然对流；双目标优化；交叉翅片；强化散热；模糊聚类

中图分类号： TN312 **文章编号：** 1001－5868(2024)02－0234－08

Thermal Analysis of LED Floodlight Crossed-fin Heat Sink and Optimization

LIU Wei, LU Xin, LIN Jun

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, CHN)

Abstract: To examine the enhanced heat dissipation effect of a crossed-fin heat sink on a 100 W LED stage spotlight and optimize the design, we analyzed the main geometric factors and mechanisms that affect the heat dissipation performance of the heat sink. To this end, numerical simulation and experimental verification were performed. The optimization objectives were set as the highest temperature of the LED chip and mass of the heat sink. A single-factor analysis was performed on the length and spacing of the short fins, followed by a dual-objective optimization using the NSGA-Ⅱ algorithm. Fuzzy C-means clustering was then applied to obtain different heat sink configurations for different application scenarios. The results indicate that the crossed-fin heat sink effectively enhanced the heat dissipation performance by increasing the average convective heat transfer coefficient of the fin surface. Both the length and spacing of the short fins exhibited optimal values that influenced the heat dissipation performance per unit mass. With excessively long short fins or excessively small spacing, the convective heat transfer coefficient on the fin surface decreased. After dual-objective optimization, the crossed-fin heat sink reduced the highest temperature of the LED chip by 2.33 ℃ with almost no change in its mass.

Key words: optical devices; natural convection ; bi-objective optimization; crossed fins; enhanced heat dissipation; fuzzy clustering

收稿日期：2023－11－16.

* **通信作者：**陆 欣

0　引言

针对 LED 灯具散热问题，国内外学者已经进行了大量研究工作，主要集中于自然对流散热。大致工作可以分为芯片级、板卡级和系统级。张先伟[1]对 LED 芯片内部进行散热优化设计，讨论了固晶胶热导率和气孔对散热的影响，发现高导热率固晶胶中气孔对结温影响更小。彭程等[2]数值仿真研究了 LED 芯片矩形排列和三角形排列的排列顺序对温度的影响，发现矩形排列时内部交错排列散热效果更好。Ben 等[3]对多芯片 LED 散热问题进行了数值分析，发现多基板相较于单个基板可以有效降低 LED 芯片结温。赵万东等[4]对某 200 W 工业 LED 灯设计了镂空分型肋片结构，利用烟囱效应强化自然对流，可以将散热器重量由 1.99 kg 降低到 1.56 kg，且相较于原散热器可降低结温 7.86 ℃。Song 等[5]研究了空心圆柱 LED 散热器外缘增加针翅对散热的影响，发现针翅高度和数量增加可使散热增强，不过均存在极限值，过大则会影响空气进入散热器中心。Byun 等[6]在 LED 径向散热器安装导流片对散热效果进行优化设计，通过实验和仿真确定了导流片的优化效果。Feng 等[7]设计了 LED 球灯内部新散热结构，通过结构传统铝块散热和烟囱散热模式，充分利用铝块和灯罩的散热能力，最终设计结构散热能力提升了 1.57 倍。李文铨等[8]针对 LED 平板肋片散热器散热性能不足，提出在散热器顶部增加圆筒，利用烟囱效应增强散热，使其综合散热性能提升了 43.9%。唐帆等[9]基于烟囱效应在太阳花散热器外侧加装圆筒壁，并研究了各项几何因素对散热的影响，经几何优化后可降低芯片温度 6.44 ℃。

文献[10]对典型高功率集成面光源(Chip on Board Light，COB Light)平板翅片散热器自然对流过程中各环节热阻进行计算，发现散热器热阻占整体热阻的 81.46%。因此，自然对流下 LED 散热器的设计尤为关键。不同于前人通过添加烟囱、导流片等增加额外设备设计或是镂空、开缝等减材需要额外打孔开槽工艺设计，本文使用的叉翅散热器基本不改变散热器质量并在加工环节无需增加额外工艺。此外对叉翅散热器短翅的长度和间距进行深入分析，研究不同短翅长度和间距时翅片间散热情况，以 LED 芯片最高温度和散热器质量为优化目标进行了双目标优化设计，并通过聚类分析得到了不同应用场景下的最优设计参数。

1　基本原理

1.1　模型介绍

本文对某 100 W LED 舞台投光灯进行研究，将投光灯向上打光，LED 芯片发热后热量传递到背部紧贴的散热器，散热器在空气中进行自然对流冷却。所研究的投光灯几何爆炸图如图 1 所示，由上到下分别为石英玻璃灯罩、导光板、LED 芯片与铝基板、压铸铝散热器。在建立模型时，去掉电源，实验测试时亦将电源外置，以避免电源产热影响对 LED 产热的分析。

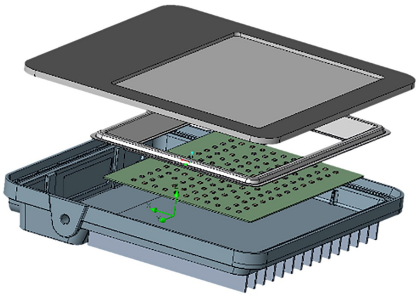
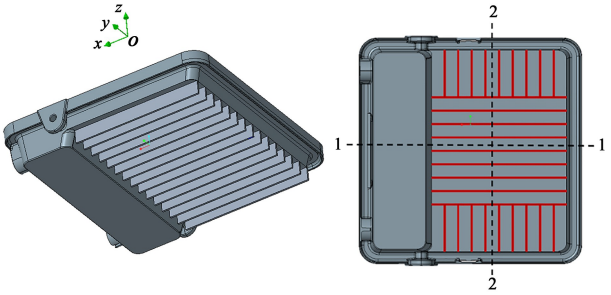


图 1　LED 投光灯几何爆炸示意图

图 2(a)为仿真模型中散热器几何示意图，散热器带翅片区域尺寸为 218 mm×143.5 mm×16.1 mm，其中基板厚度为 1.6 mm，翅片高度为 14.5 mm，厚度为 2 mm，间距 14.5 mm 接近文献[11]中的最佳间距。图 2(b)为所要研究的叉翅散热器几何示意图，叉翅散热器通过将平行直翅散热器两端翅片替换为与原翅片垂直方向上的短翅片，从而形成交叉翅片散热器，短翅片长度初始取值为 50.13 mm，短翅间距与原翅片间距一致，即 14.5 mm。图中红色标记处为翅片，截面 1-1 和截面 2-2 分别为长翅片间截面和短翅片间截面。平行直翅散热器因只有长翅片，故对其分析时采用叉翅散热器截面 1-1 相同位置截面进行分析，具体场分析内容和叉翅散热器强化散热原理在第 3 节中进行介绍。



(a) 平行翅片散热器　　(b) 叉翅散热器

图 2　LED 投光灯散热器几何示意图

1.2 理论基础

上述物理模型在空气中的自然对流为流固耦合过程，传热方式包含热传导、热对流和热辐射。在该计算模型中，空气的三维稳态自然对流过程涉及质量守恒方程(连续性方程)、动量守恒方程和能量守恒方程，固体域只涉及能量守恒方程。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial \omega}{\partial z}=0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

x 方向：

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+\omega\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \tag{2}$$

y 方向：

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+\omega\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{3}$$

z 方向(重力方向)：

$$\rho\left(u\frac{\partial \omega}{\partial x}+v\frac{\partial \omega}{\partial y}+\omega\frac{\partial \omega}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}\right)+\rho g\beta(T-T_\infty) \tag{4}$$

能量守恒方程：

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+\omega\frac{\partial T}{\partial z}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+S_T \tag{5}$$

式中，u 为空气在 x 方向的速度，v 为空气在 y 方向的速度，ω 为空气在 z 方向的速度，ρ 为空气的密度，μ 为空气的黏性系数，g 为重力加速度，β 为空气体积膨胀系数，T 为温度，T_∞ 为环境温度，α 为热扩散率，S_T 为源项。

1.3 仿真及实验

采用数值仿真软件 FLOEFD 对数值仿真模型公式(1)～(5)进行求解，为消除计算域边界对仿真的影响，设置常用的自然对流边界如图 3，即以散热器最大几何尺寸为特征长度，计算域向重力方向扩展 1 倍，反重力方向扩展 2 倍，前后左右各扩展 1/2 倍，以保证自然对流计算精度。

求解边界条件设置如下：环境温度为 25 ℃，压力为 101 325 N·m^{-2}，自然对流过程计算域各边界均设置为开口条件；此外，流体密度变化不大，故对于密度变化采用 Boussinesq 假设。根据此投光灯规格书知 LED 芯片功率占整体功耗 90%，而 LED 发光功率为 45.8%，故 LED 发热功率为 48.78 W。此外因为主要讨论 LED 芯片结温及散热器散热效果，需要对散热器模型进行简化，避免电源器件对散热影响，将 10 W 电源器件不考虑在仿真计算中，且在计算之前去除散热器上对散热影响较小的倒角、螺孔等。各部件默认辐射系数为 0.9，散热器阳极氧化后辐射系数为 0.87。铝基板与散热器之间通过螺丝固定，两者之间存在接触热阻，将其设定为 0.3 mm 厚度的 0.3 W/(m·K)导热率的界面材料，投光灯各部件材料导热率见表 1。

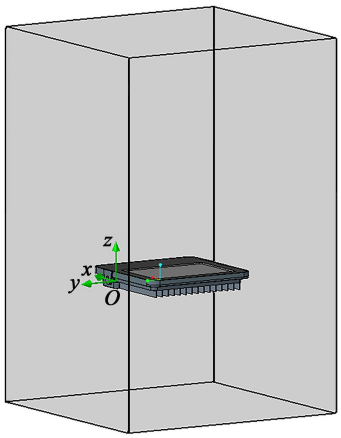


图 3 仿真模型计算域示意图

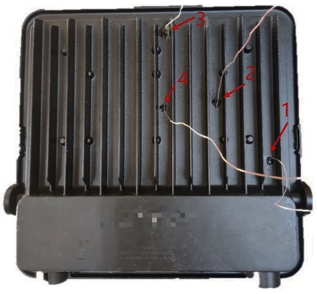
表 1 LED 投光灯部件热物性参数

部件名称	材料	导热率/(W·m^{-1}·K^{-1})
灯罩	石英玻璃	1.4
导光板	尼龙-6	0.27
铝基板	多层材料	平面 138
		法向 3
LED 芯片	铜	400

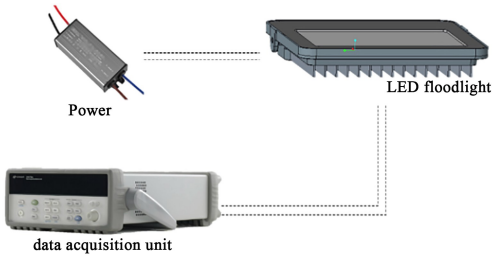
计算中网格数为 204 937，保证了网格贴体，且翅片间网格数大于 4 个，因 FLOEFD 一起划分网格为流固网格，网格独立性试验并非必要，故不进行单独独立性网格验证，通过实验验证仿真结果准确性。

对实际 100 W LED 投光灯进行测温实验，共在散热器上布置四个热电偶测温点，并将实验结果与数值模拟结果进行了对比分析以验证本文所采用计算模型的可靠性。其中，散热器实物图及布置热电偶点位图如图 4(a)所示。图 4(b)为实验系统结构示意图，测试中使用空调以控制环境温度在 25 ℃，并且为避免空调送风对散热影响，将投光灯置于由亚克力板构建的不受外界干扰的防风箱内部。投光灯由自带电源转换器将 220 V交流电转换为LED灯所

需的直流电，为 LED 灯珠提供所需电功率，此时电源作用相当于直流稳压电源。使用温度数字采集器 Agilent 34970A 记录热电偶温度，将 LED 投光灯向上打光布置后在额定工作电压下不间断点亮 2 h 至温度基本不再变化。



(a) 散热器及热电偶点位



(b) 实验流程

图 4　实验示意

如图 5 为实验测温与仿真计算温度直方图。从图中可以看出实验测试点温度变化与仿真温度变化趋势一致，最大的温度误差为 0.8 ℃，最大相对误差为 1.17%，在允许范围内，验证了所建立模型的有效性和仿真结果的准确性。

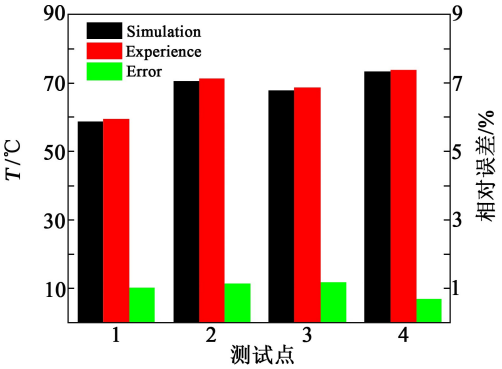


图 5　实验与仿真模拟结果对比

2　分析与讨论

2.1　叉翅强化散热原理分析

图 6 为两种散热器翅片部分的最高温度和表面换热系数参数直方图，此时叉翅散热器采取初始配置，发现叉翅结构可以降低翅片温度 2.42 K，并提高翅片区域平均表面换热系数 0.563 W/(m^2 · K)。为分析其强化散热原理，以下对这两种散热器的温度场和速度场进行分析。

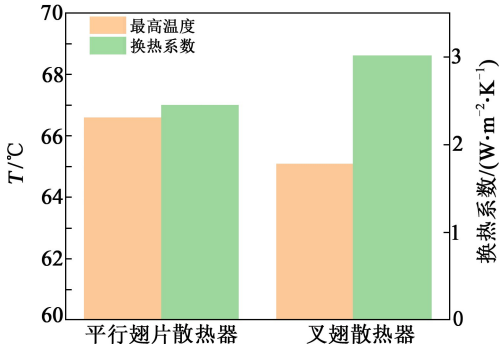
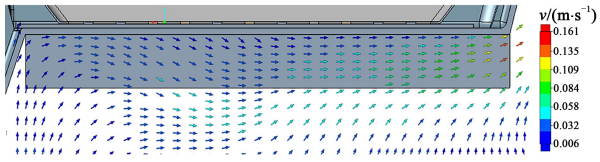
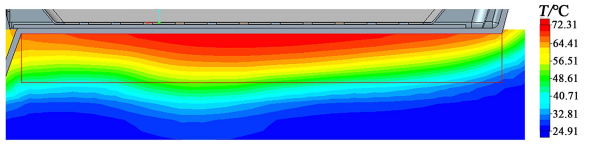


图 6　散热器翅片部分散热性能对比

首先对平行直翅散热器进行分析，取与叉翅散热器 1-1 截面同样位置的截面进行分析，此处翅片间流体速度场如图 7(a)。翅片端部流体受热密度降低而向上流出翅片区域，因此使得散热器内部区域受热流体获得向右的水平分量速度，从而向翅片端部移动，散热器下方冷空气则不断向上涌入以补充向翅片端部流出的空气。由图中看出，散热器翅片中部区域冷却流体大部分都是自左侧电源盒处补充而来，而原本位于此中间区域底部的冷空气难以进入翅片区域，仅能被上方受热空气携带着向翅片端部移动。此外，散热器内部近一半翅片段的空气流速均小于 0.05 m/s，速度较高的空气均位于翅片端部区域，而空气流速在一定程度上影响着对流换热系数，这意味翅片端部的散热效率更高。从图 7(b)所示温度场中也可以看出，翅片中间段因为底部冷空气流体难以进入，热边界层在此处不断变厚，翅片端部边界层较薄。



(a) 速度场



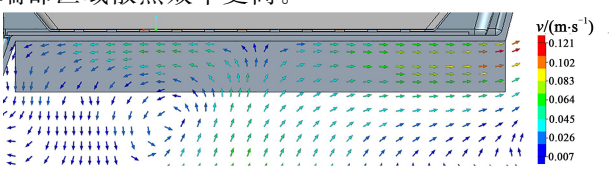
(b) 温度场

图 7　平行翅片间散热性能

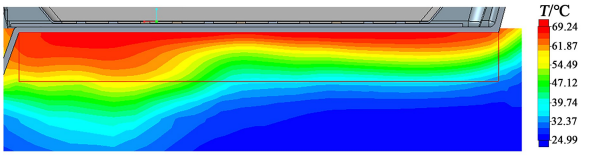
针对这种长翅片存在的气流难以补充、边界层较厚的现象，本文提出使用叉翅散热器替代的方法以提升散热效果。在以下讨论中，长翅片间流体速

度场和温度场均位于 1-1 截面，短翅片间流体速度场和温度场均位于 2-2 截面。叉翅散热器长翅片间流体速度场如图 8(a)，与原平行翅片间流体行为所不同的是此时底部冷空气从散热器下方中部补充，并向两侧流动。这是因为叉翅散热器短翅的存在使得底部冷空气不仅向长翅片间流道补充，亦有部分向短翅间流道补充，使得散热器内部空气缺乏，从而散热器中间段底部冷空气得以进入长翅片间流道，并向两侧发展。

叉翅散热器长翅间流体行为如下：流体受热密度减小向上，而散热器基板挡住其移动，故而气流向两侧流动；而左侧电源盒挡住空气流动迫使空气向下流动，外部冷流体被此处热流体阻碍，难以进入这块区域，可以看到在散热器中心部位左侧形成了局部热涡流阻碍区域。而相较于这块气流停滞区，翅片端部靠近外侧部分的外部冷流体可以顺畅冲刷散热器，并在被加热后沿散热器边缘向上流出，从而使得底部冷空气可以不断涌入这块区域进行高效散热。另外，从流体温度场图中也可以看出，如图 8(b)，在散热器中心左侧部位，热边界层在此处更厚，表示此处散热效率较差，这也是由热空气停滞所致，而翅片边缘温度边界层较薄也验证了此处散热效率更高，这一结论与平行直翅散热器相同，即翅片端部区域散热效率更高。



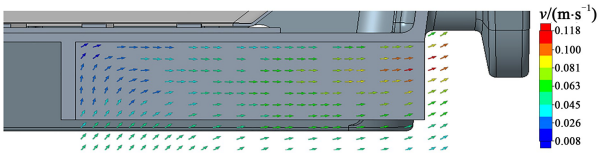
(a) 速度场



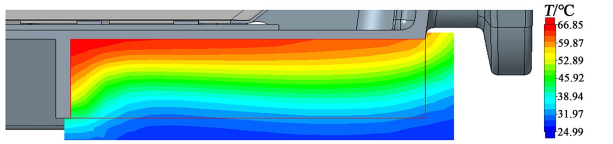
(b) 温度场

图 8 交叉翅片长翅间散热性能

短翅片间流体的速度场分布如图 9(a)，这部分区域流体可以顺畅冲刷散热器，大部分流体速度大于 0.05 m/s。从如图 9(b)所示温度场亦可以看出，此处并无局部热滞留区域，热边界层较薄。



(a) 速度场



(b) 温度场

图 9 交叉翅片短翅间散热性能

2.2 短翅几何单因素分析

如上文所述，叉翅散热器性能提升主要来自于短翅片处的高效散热，而短翅片在一定程度上又影响着长翅片，如短翅片增长时，长翅片数目则会减少。此外许多研究都表明，翅片间距在很大程度上影响整体散热器的散热效果[12-13]，故为具体分析短翅片对叉翅散热器性能的影响，本文以短翅片长度和间距为设计变量，分析其散热效果。同时，短翅片几何因素改变会导致散热器质量变化，从而使制造成本发生变化。为有效控制散热器成本，亦以散热器整体质量 m 为目标进行分析，散热器质量为散热器体积与压铸铝密度乘积求得，压铸铝密度为 2 700 kg/m^3。仿真过程中为方便单独分析短翅对整体散热性能的影响，需保持长翅片长度和间距不变。

为分析短翅片间距对散热器散热性能的影响，在保证短翅长度为初始值(l=50.13 mm)情况下，计算了不同翅片间距下(s=6.00～20.00 mm)LED 芯片的最高温度，以此评价散热效果。图 10 为短翅间距 s 对散热性能的影响点线图。

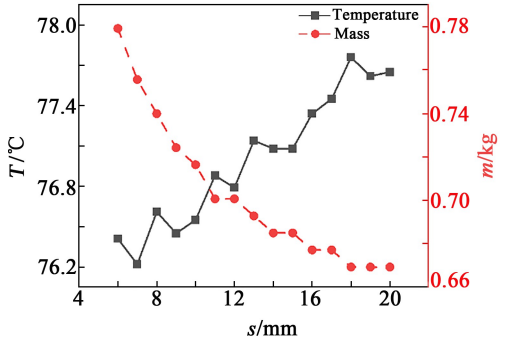
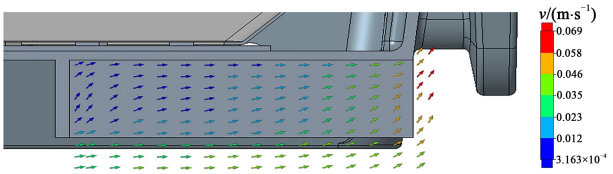


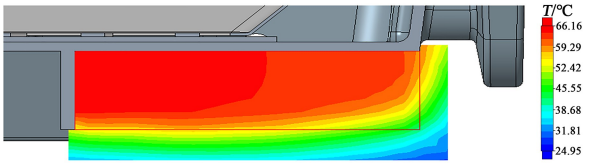
图 10 LED 芯片最高温度和散热器质量随短翅间距的变化

可以看到随着翅片间距增加，芯片最高温度增加，说明散热效果变差。这是因为随翅片间距增加，短翅个数会减少从而散热面积减少，同时散热器质量也会下降。当翅片间距较小时，尽管整体散热能力强，但是随间距减小质量增加较快，单位质量散热性能也急速下降。这是因为翅片间距过小会导致外部空气难以进入翅片之间，导致单个短翅散热效率变差。如图 11(a)、(b)分别为 s=6 mm 时短翅间流体的速度场和温度场，可以看到空气最高流速下降到

0.069 m/s，大部分区域空气流速小于 0.05 m/s，温度场中热区几乎覆盖整个短翅区域，表明此时短翅散热效率极差。



（a）速度场



（b）温度场

图 11　较小间距短翅间散热性能

为分析短翅长度对散热的影响，在短翅间距为 14.5 mm 时，计算不同短翅长度下（l＝0～109.18 mm）LED 芯片最高温度，如图 12 为短翅长度对散热性能的影响点线图。

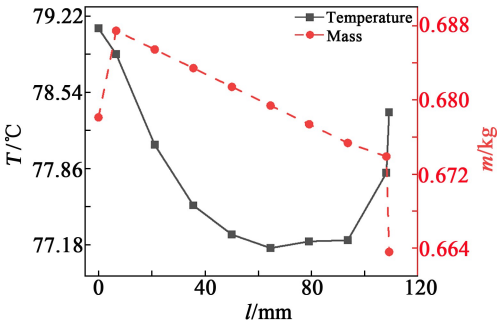
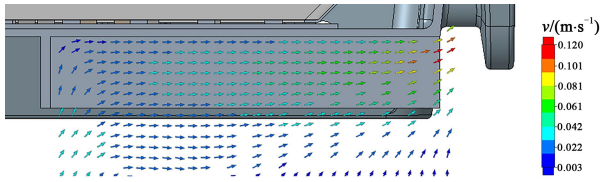


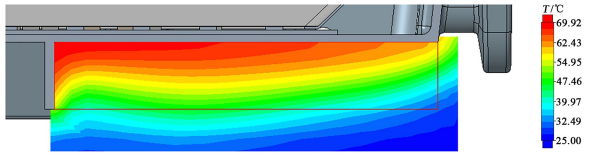
图 12　LED 芯片最高温度和散热器质量随短翅长度的变化

图中存在两种极限情况，最左侧点（l＝0 mm）为不添加短翅结构即原平行直翅散热器；最右侧点（l＝109.18 mm）为横向平行直翅结构，此时无长翅片。在两极限值之间可以看到随短翅长度增加，LED 芯片最高温度不断下降，直到 l＝64.63 mm 时温度达到最小值，此后再增加短翅长度，温度反而上升。这是因为当短翅长度较小时，短翅间空气流动如上文所述，相当于长翅外端间空气流动，此处空气流通顺畅，散热效率较高。当 l＞64.63 mm 后，“短翅”已经失去了短翅的优势，进而转换为“长翅”。

图 13(a)、(b)为 l＝79.13 mm 时短翅间的速度矢量图和温度云图，此时在“短翅”内部仅有部分区域冷空气可以进入，而中间区域底部冷空气被阻碍进入，这一点是与上文短翅显著不同的地方；从温度云图亦可以看出此处热区占比较大，整体散热效果变差。散热器质量除两种极限情况外，均随着短翅长度增加而线性减小，这是因为短翅长度增加所导致的质量增加不抵长翅个数减少导致的质量减小。



（a）速度场



（b）温度场

图 13　较长短翅间散热性能

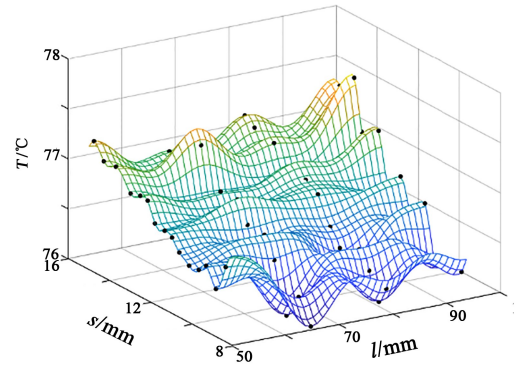
2.3　叉翅散热器双目标优化设计

2.3.1　缩减样本空间

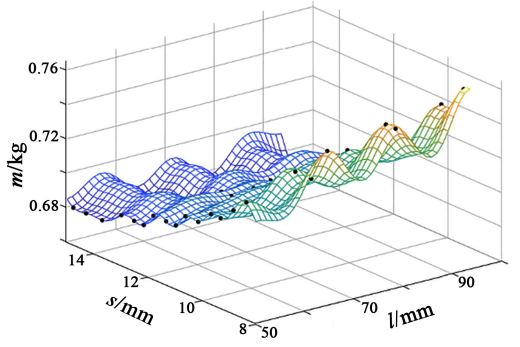
为综合考量散热器质量与散热性能，接下来以短翅间距和长度为变量，LED 芯片最高温度和散热器质量为双目标进行优化分析。进行优化之前需要分别得到温度和质量关于间距和长度之间的代理模型。为更好拟合出准确模型，先根据上文单因素分析对变量区间进行缩减，找到芯片温度和散热器质量相交点作为均衡值最优点。根据这一点重新确定了变量取值范围：s 取值范围为 8～16 mm，l 取值范围为 50.13～93.63 mm。需注意的是，由于叉翅散热器短翅与长翅之间相互接触，且长翅间距保持不变，故短翅长度的变化与长翅个数之间存在关系，短翅长度变化为离散值。

2.3.2　Kriging 代理拟合模型

Kriging 是一种在数据拟合和代理模型构建中广泛应用的方法。它基于空间插值技术，通过对已知数据点之间的关系进行建模，能够准确地估计未知位置的数值。Kriging 方法结合了局部插值和全局趋势分析，能够充分利用数据的空间相关性，从而提高了拟合精度[14-15]。在新的取值范围内进行了均匀抽样对样本空间抽取 60 个数据点，并且进行仿真计算得到 LED 芯片最高温度和散热器质量。将得到的 60 组样本进行 Kingrig 拟合分别得到短翅间距和长度为变量，LED 芯片最高温度及散热器质量的拟合分布，如图 14(a)、(b)。



(a) LED 最高温度拟合分布



(b) 散热器质量拟合分布

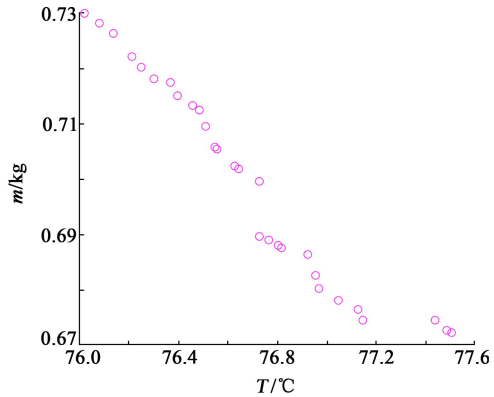
图 14 Kriging 拟合结果

2.3.3 NSGA-Ⅱ双目标优化与模糊 C 均值聚类

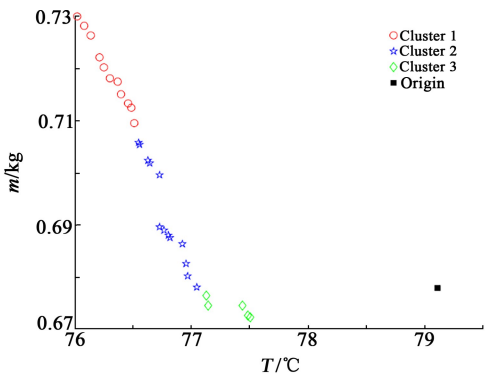
NSGA-Ⅱ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ)是一种多目标优化算法,其通过非支配排序、拥挤度距离和锦标赛选择等机制,能够在多目标优化问题中有效地搜索和保留优秀的解,并具有快速收敛性和较好的多样性[16-17]。将拟合后的两个代理函数使用 NSGA-Ⅱ双目标优化算法进行双目标优化,在 NSGA-Ⅱ算法中,设置初始种群数为 100 个,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,最优个体分数为 0.3。最大进化代数为 200,停止代数也为 200,输出 30 个 pareto 最优解。

图 15(a)显示了 pareto 最优前沿解的结果。从图中可以看出 LED 芯片内最高温度 T 与散热器质量 m 之间存在冲突,降低 T 会造成 m 的增加,Pareto 最优前沿解中的每个解理论上都是某种情况下的最优解,一般需要按照实际情况进行选取。

模糊 C 均值聚类分析(Fuzzy C-Means Clustering)是一种经典的聚类算法,通过对样本点进行聚类,可以识别出具有相似特征和行为模式的样本群体,从而为工程设计提供有价值的信息和指导[18-19]。本文将优化后得到的 pareto 前沿解,使用模糊 C 均值聚类进行分析,给出不同应用情况下的最优选择参数。根据每个对象对聚类中心的距离,将优化结果分为三类,聚类结果如图 15(b)所示。



(a) 帕累托前沿解



(b) 模糊 C 均值聚类划分

图 15 双目标优化与聚类结果

图中 Cluster1 代表更重视温度 T 取小值的优化结果,此时,T 为最小值 76.02 ℃;Cluster2 代表均衡质量 m 和温度 T 的优化结果;而 Cluster3 代表更重视质量 m 的优化结果,此时 m 为最小值 0.672 kg。Origin 则表示原平行翅片散热器的散热性能。可以看出双目标优化后的叉翅散热器下的 LED 芯片最高温度均优于原散热器,而 Cluster3 可以在有效控制散热器质量的情况下降低 LED 芯片最高温度,Cluster2 可在轻微增加散热器质量情况下,进一步降低温度,Cluster1 则可以通过增加散热器质量实现极限散热。三个聚类中心与原始散热器目标值如表 2 所示,分别代表三种不同的应用场景,即极致散热能力(Center 1)、综合散热效果(Center 2)和极致轻量化(Center 3)。相较于原始数据点 Origin 可以看出最优散热效果可以降低 LED 芯片最高温度 2.83 ℃,而极致轻量化时可保证散热器质量情况下,依然降低 LED 芯片最高温度 1.71 ℃。在综合散热效果和质量,可在仅增加散热器质量 0.014 kg 情况下,降低 LED 芯片最高温度 2.33 ℃。

表 2　聚类中心与初始点目标

Point	s/mm	l/mm	m/kg	T/℃
Center 1	14.44	93.46	0.674	77.4
Center 2	10.09	79.92	0.720	76.28
Center 3	11.01	65.39	0.692	76.78
Origin	—	—	0.678	79.11

3　结论

本文针对 LED 向上打光工况，在验证了仿真精度的基础上，深入研究了叉翅散热器的强化散热原理，对其几何因素进行双目标优化分析，并通过聚类分析得到了不同场景下的散热器配置，可有效控制成本并强化散热。相较于传统强化自然对流散热措施，叉翅散热器结构简单，强化散热效果明显。且本文提供的优化流程简单通用，可以对其他类型散热器的优化提供参考。本文的研究结果对 LED 灯具散热器的设计及优化分析具有指导意义。

参考文献：

[1] 张先伟. 研究集成 LED 芯片的散热与结构优化[D]. 成都：电子科技大学，2018.
Zhang Xianwei. Research on heat dissipation and structure optimization of integrated LED chip[D]. Chengdu: School of Electronics Science and Engineering, 2018.

[2] 彭　程，雷允超，毛育青. 植物生长用多排阵列 LED 的散热结构[J]. 半导体技术，2022，47(4)：288-295，331.
Peng Cheng, Lei Yunchao, Mao Yuqing. Heat dissipation structure of multi-array LED for plant growth [J]. Semiconductor Materials and Devices, 2022, 47(4): 288-295, 331.

[3] Abdelmlek K, Araoud Z, Canale L, et al. Optimal substrate design for thermal management of high power multi-chip LEDs module[J]. Optik, 2021, 242(2): 167179.

[4] 赵万东，陈昌宜，于　博. 工业照明用发光二极管灯自然对流散热结构设计[J]. 制冷技术，2022，42(4)：74-79.
Zhao Wandong, Chen Changyi, Yu Bo. Design of natural convection heat dissipation structure for industrial light emitting diode lighting[J]. Chinese J. of Refrigeration Technol., 2022, 42(4): 74-79.

[5] Song G, Moon E S, Park J J, et al. Performance investigation of radial heat sink with pin fins placed normally on circular base edge[J]. Int. J. Therm. Sci., 2022, 171: 107187.

[6] Byun S, Hyeon S, Lee K. Guide vane for thermal enhancement of a LED heat sink[J]. Energies, 2022, 15(7): 2488.

[7] Feng S, Liu Z, Cheng B, et al. Design of a novel LED bulb with entire surface thermally activated for passive cooling[J]. Appl. Therm. Eng., 2021, 198: 117466.

[8] 李文铨，王海波. 对引入烟囱效应的 LED 平板散热器的优化及分析[J]. 光电子·激光，2017，28(12)：1302-1309.
Li Wenquan, Wang Haibo. Optimization and analysis of LED plate radiator with chimney effect[J]. J. of Optoelectronics·Laser, 2017, 28(12): 1302-1309.

[9] 唐　帆，郭震宁. LED 圆筒太阳花散热器设计与实验[J]. 激光与光电子学进展，2017，54(9)：342-349.
Tang Fan, Guo Zhenning. Design and experiment of LED cylindric sunflower radiator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 342-349.

[10] 冯　旭. COB 光源翅片散热器传热优化研究[D]. 济南：山东大学，2021.
Feng Xu. Investigation on the optimization of heat transfer of fin heat sink applied in COB light source[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[11] Yalcin H, Baskaya S, Sivrioglu M. Numerical analysis of natural convection heat transfer from rectangular shrouded fin arrays on a horizontal surface[J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 2008, 35(3): 299-311.

[12] Joo Y, Kim S. Comparison of thermal performance between plate-fin and pin-fin heat sinks in natural convection[J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 2015, 83: 345-356.

[13] Yazicioğlu B, Yüncü H. Optimum fin spacing of rectangular fins on a vertical base in free convection heat transfer[J]. Heat Mass Transfer, 2007, 44: 11-21.

[14] Jeong S, Mitsuhiro M, Yamamoto K. Efficient optimization design method using Kriging model[J]. J. of Aircraft, 2005, 42(2): 413-420.

[15] Park K, Oh P K, Lim H J. The application of the CFD and Kriging method to an optimization of heat sink [J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 2006, 49(19/20): 3439-3447.

[16] Zheng W, Liu Y, Doerr B. A first mathematical runtime analysis of the non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ)[C]// Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, 2022: 53-54.

[17] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-Ⅱ[J]. IEEE Trans. Evol. Comput., 2002, 6(2): 182-197.

[18] Lin W, Ren H, Ma Z, et al. Using fuzzy clustering and weighted cumulative probability distribution techniques for optimal design of phase change material thermal energy storage[J]. J. Cleaner Prod., 2019, 233: 1259-1268.

[19] Du S, Wang L. Aircraft design optimization with uncertainty based on fuzzy clustering analysis[J]. J. Aerosp. Eng., 2016, 29(1): 04015032.

作者简介：

刘　伟(1998—)，男，硕士研究生，主要研究方向为 LED 灯具等电子器件的散热优化设计；

陆　欣(1969—)，男，博士，研究员，主要研究方向为高温高压瞬态发射技术。