

文章编号:1001-5078(2024)06-0951-07

· 光电技术与系统 ·

某机载光电系统风冷散热翅片优化设计及仿真

李书培, 孙冬明, 张 赛, 胡建飞, 石 彰
(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要:针对机载密闭空间电子组件散热问题,对被动风冷翅片散热器进行了设计优化及仿真分析。首先基于正交实验设计方法以翅片厚度、翅片间距以及翅片高度为分析因素设计了三因素四水平正交实验;基于CFD数值仿真方法对不同翅片形式的散热器进行了仿真分析;最后基于极值分析对各因素对散热器散热性能的影响显著程度进行了分析。结果表明,翅片高度对散热器性能影响最大,翅片间距次之,翅片厚度影响最小,并得到了最优的翅片形式。

关键词:翅片散热器;数值分析;正交试验

中图分类号:TP391.9;TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.017

Optimized design and simulation of air-cooled heat dissipation fins for an airborne optoelectronic system

LI Shu-pei, SUN Dong-ming, ZHANG Sai, HU Jian-fei, SHI Zhang
(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract:In this paper, the design optimization and simulation analysis on passive air-cooled finned heat sinks is carried-out for the heat dissipation issue of electronic components in the enclosed spaces of airborne. Firstly, a three-factor, four-level orthogonal experiment is designed based on the orthogonal experimental design method, which takes fin thickness, fin spacing and fin height into account. Then, CFD numerical simulation method is used to simulate and analyze heat sinks with different fin forms. Finally, the significance of the influence of various factors on the heat dissipation performance of the radiator is analyzed based on the extreme value analysis. The results show that the fin height has the greatest impact on the performance of the radiator, followed by the fin spacing and the fin thickness, and the optimal fin form is obtained.

Keywords: finned radiator; numerical simulation; orthogonal test

1 引 言

机载设备由于受重量和体积控制较为严格,其结构一般较为紧凑,尤其对于光电集成系统而言,其内部空间有限且元器件集成度高,热源集中且发热量大,温度较高,严重损害元器件寿命,降低设备可靠性,因此需要具备良好的散热条件才能保证工作稳定可靠。如何在这种相对于外界密闭且空间狭小紧凑的系统中实现良好的散热条件成为机载设备研发的一个重要方向。

散热方式主要有辐射、传导、对流以及蒸发四种

形式,对于内部密闭的环境而言,辐射和传导并不能完全满足系统内部电子组件的散热要求。通常在辐射和传导散热的基础上采用对流散热来提高散热效率,对流传热又分自然对流传热和强迫对流传热,而密闭空间基本不存在自然对流,因此一般采用强迫对流进行散热。单纯地强迫对流换热效率较低,为了提高换热效率,翅片散热器成为较为有效的解决方式。由于机载设备的风道体积固定,因此需要对翅片进行针对性设计优化才能达到最优的散热性能。Onoroh^[1]等以翅片高度、翅片厚度以及翅片间

距为优化目标对翅片进行优化设计研究,得到了较为理想的散热效果。Cortes^[2]提出了一种无量纲方程减少了独立参数的数量,分析研究了翅片间距和翅片厚度对散热器散热性能的影响。对于多因素多水平优化问题而言,直接进行试验无疑会耗费大量的时间及金钱成本,随着数值仿真的发展,采用数值仿真来寻找最优解成为一种更为经济的方式。Bil-irgen^[3]等采用 CFD 数值仿真的方法研究了翅片高度、翅片厚度以及翅片间距对散热器换热能力的影响,发现翅片间距和翅片高度的比值大于 1.5 时,翅片换热能力迅速下降。Mon and Gross^[4-5]等使用 Fluent 研究了翅片间距对四排环形翅片的影响,计算了不同翅片间距下的传热和压降。李健^[6]等提出均匀波纹和渐增波纹两种形式的散热器,并利用 Icepak 进行热仿真分析,结果表明渐增波纹翅片综合换热性能最优。王任远^[7]等对散热器空气侧的百叶窗翅片运用 Laminar 方法进行数值模拟,分别研究了翅片高度、窗翅高度、翅片厚度和翅片节距等结构参数对传热系数和压降的影响,得到了一组综合性能较好的百叶窗翅片结构参数。

多因素多水平问题的另一个难点在于其需要进行大量的实验来分析各因素的贡献,进而得到最优解,这将耗费大量的时间和经济成本,而正交实验是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,是分析多因素多水平问题的一种高效、快速、经济的实验设计方法。施渺^[8]等以平直翅片热管散热器为研究对象,采用正交实验设计方法并利用 CFD 数值模拟方法研究了翅片厚度、翅片间距、翅片高度、翅片宽度和热管直径 5 个结构参数对翅片换热性能和阻力特性的影响。封蔚健^[9]等通过正交试验和数值模拟相结合的方法研究平直翅片管式换热器的换热和流阻特性,以换热系数和压降作为评价指标,对换热器风机风量、翅片间距、厚度和管纵向间距的进行优化。结果表明翅片间距对压降影响最大,管纵向间距对空气侧换热系数影响最大。然而,风道风速等输入条件的不同必然需要对翅片的结构形式进行针对性的优化设计研究,才能得到最优的翅片结构形式,实现最佳的散热效果。

本文采用 CFD 数值仿真方法,基于正交实验设计方法分析研究了翅片厚度、翅片间距以及翅片高

度对被动风冷翅片散热器散热性能的影响,得到翅片厚度、翅片间距以及翅片高度的最佳组合形式,使散热性能最大化,对机载密闭空间散热问题具有重要的指导作用。

2 风冷散热器翅片设计

2.1 环控组件结构

本文的研究对象为某机载光电系统内部电子舱的环控散热组件,其结构形式如图 1 所示。电子舱组件由四个电路板封装盒组成,环控舱组件由环控风道以及被动式风冷散热器(图 2)组成。

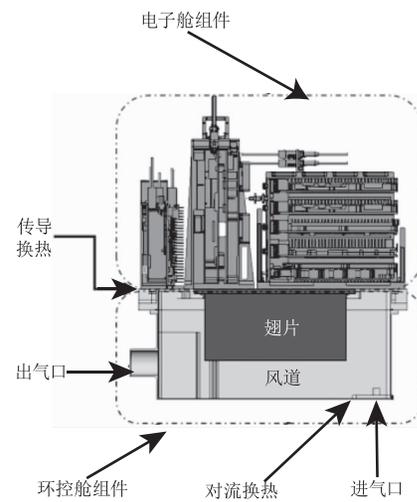


图 1 环控组件结构

Fig. 1 Structure of environmental control components

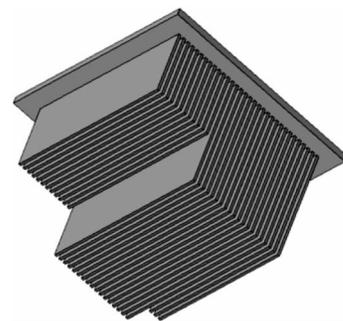


图 2 被动式风冷翅片散热器

Fig. 2 Passive air-cooled fin radiator

出于系统内部须于外界环境独立的要求,系统内部无法和外界进行直接的气体交换,因此需要采用独立的环控舱来将内部热量传递到外界,实现对系统内部温度调控的作用。而电子舱组件发热量大且功能对温度较为敏感,因此将其集中布置,以便热量的集中导出,减小内部空间占用。整个散热设计由三级组成:1) 电路板卡主要发热位置和封装盒采用贴壁传导散热形式传递热量到封装盒上;2) 封装盒和环控舱组件通过高导热材

料进行传导换热将热量传递到环控舱组件,并传导至散热翅片;3)环控风和散热翅片进行对流换热,将热量带到环境中。通过以上三级传热设计将系统内部热量传递到外界环境,实现对内部的温度调控。根据总体设计输入,风道的形状、空间位置均固定,且环控供风的风量固定,若要将散热性能最大化,需要进行进一步优化,而前两级的传导换热属于固-固换热,主要受材料导热系数的影响,属于材料固有属性,无法从结构上进行优化提升;第三级属于对流换热,是流体和固体之间的热传导,其换热效率既受流体温度、流速的影响,也受流体和固体之间换热面积的影响,而散热翅片可以在有限的空间内成几何倍数的增大流体和固体之间的接触面积,因此对散热翅片做出针对性的优化设计,以期将环控散热效率最大化。

2.2 被动式风冷散热器优化设计

流体在两平板之间流动时服从广义牛顿粘性定律,即流体在两个固定平板间流动时,其流动时所受到的阻力与两个平板之间的距离成反比,和平板面积以及流体在两平板之间的流速成正比,这是因为流体在流动时和固体壁面接触的区域流速远小于远离平板壁面的区域,因此翅片的间距并不是越小越好。然而翅片的间距也不能过大,因为过大的间距会导致气体的流动阻力过小,流速过快,冷空气来不及和翅片进行有效的热交换,无法实现良好的散热性能。若要将翅片散热器的散热效率最大化,必须在保证翅片和冷空气具有较大接触面积的同时优化翅片之间的间距以及翅片的厚度。因此,本文从翅片高度、翅片厚度以及翅片间距三个因素入手来进行该风冷散热翅片的优化设计。

对该类多因素多水平共同作用的优化问题而言,其排列组合方式过多,从时间和经济效益上来说,可以采用正交实验方法来进行研究,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,正交试验设计是分析因式设计的主要方法,是一种高效率、快速、经济的实验设计方法。

从以上三个因素出发,每个因素取四个水平设计三因素四水平正交实验,共16组实验,远小于排列组合的64种实验,大大减少了时间及经济成本,如表1、2所示。

表1 正交实验设计参数

Tab.1 Orthogonal experimental design parameters

因素	水平
翅片厚度/mm	1,1.5,2,2.5
翅片间距/mm	2,4,6,8
翅片高度/mm	50,80,100,120

表2 正交实验设计

Tab.2 Orthogonal experimental design

编号	翅片厚度/ μm	翅片间距/mm	翅片高度/mm
1	1	2	50
2	1	4	80
3	1	6	100
4	1	8	120
5	1.5	2	80
6	1.5	4	50
7	1.5	6	120
8	1.5	8	100
9	2	2	100
10	2	4	120
11	2	6	50
12	2	8	80
13	2.5	2	120
14	2.5	4	100
15	2.5	6	80
16	2.5	8	50

3 数值仿真分析

3.1 数值模型

采用数值分析的方式来进行该类多因素多水平共同作用的优化设计问题来说是一种经济高效的研究方法。对于该类强迫对流散热问题而言,热量的传递涉及到从固体相到流体相的传递,因此需要对冷空气在翅片间的流动及传热特性进行分析。

对流体相,其控制方程如下:

3.1.1 连续方程

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}) = 0 \tag{1}$$

3.1.2 动量方程

$$\rho(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \tag{2}$$

$$\rho(\frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) + g(\rho - \rho_0) \tag{3}$$

$$\rho(\frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \tag{4}$$

式中 ρ 为环境温度下空气密度。

3.1.3 能量方程

$$\rho\left(\frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z}\right) = \frac{k}{C_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

对于固体相,其连续性方程如下:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

3.2 计算域和边界条件设定

由于该模型较为复杂,需要对模型进行一定的简化来提高计算速度。由于电路板的主要发热位置均采用贴壁方式接触到封装盒侧壁,封装盒侧壁厚2 mm,因此将封装盒简化为200 mm × 120 mm × 4 mm的平板,风道主要特征尺寸为319 mm × 185 mm × 149 mm,封装盒和风道材料均为7075铝合金,热源简化为矩形块,发热功率为16 × 15 W/块共计240 W,模型简化如图3所示,仿真对比结果表明,模型简化前后误差不超过5%,证明该简化模型的有效性。

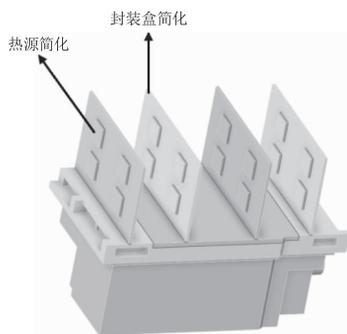


图3 模型前处理
Fig. 3 Model pretreatment

仿真前对模型做出如下基本假设:

- (1) 固体材料遵循均匀性假设,不考虑各向异性;
- (2) 不考虑辐射换热;
- (3) 空气连续且不可压缩,密度随温度变化。

数值计算基于Fluent平台,采用速度入口边界条件,按机上供风温度5℃,风量60 kg/h进行计算可以得到入口速度4.6 m/s,入口温度设为5摄氏度。出口采用大气压力出口边界条件,温度设为38℃。网格划分采用Fluent自带的多边形网格,并进行网格独立性验证,确保网格数量对相邻两次解的误差不超过10%进行求解,如图4所示。

3.3 仿真结果分析

根据表2所示条件,利用Fluent进行仿真,文中

列举翅片厚度2 mm时,不同翅片间距及翅片高度的温度场分布如图5~图8所示,图9为风道内部没有翅片时的温度场分布;流场分布如图10~图13所示。仿真最高温度结果如表3所示。

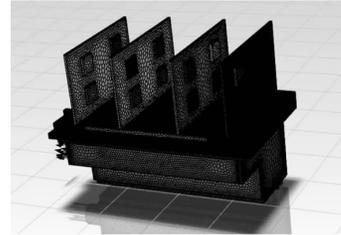


图4 网格划分
Fig. 4 Mesh division

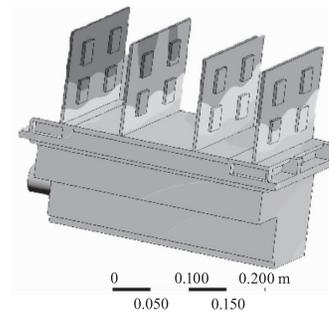


图5 厚度2 mm间距2 mm高度100 mm温度场结果
Fig. 5 Temperature field results of thickness of 2 mm, spacing of 2 mm and height of 100 mm

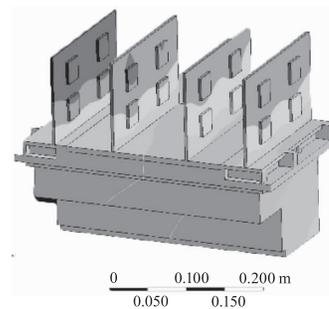


图6 厚度2 mm间距4 mm高度120 mm温度场结果
Fig. 6 Temperature field results of thickness of 2 mm, spacing of 4 mm and height of 120 mm

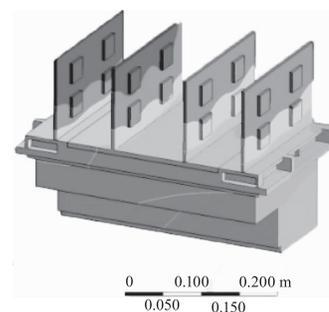


图7 厚度2 mm间距6 mm高度50 mm温度场结果
Fig. 7 Temperature field results of thickness of 2 mm, spacing of 6 mm and height of 50 mm

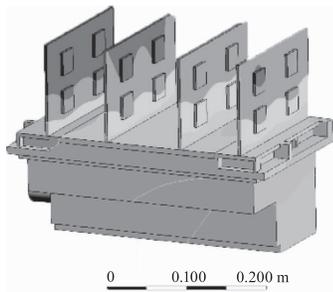


图8 厚度2 mm 间距8 mm 高度80 mm 温度场结果
Fig. 8 Temperature field results of thickness of 2 mm, spacing of 8 mm and height of 80 mm

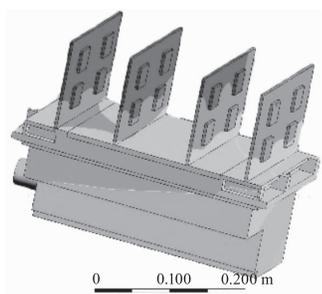


图9 无散热翅片温度场结果
Fig. 9 Temperature field results without fins

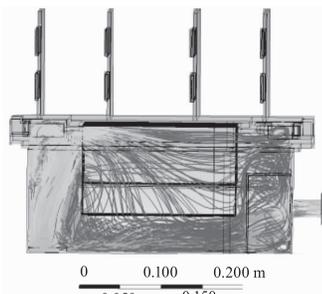


图10 厚度2 mm 间距2 mm 高度100 mm 流场结果
Fig. 10 Flow field results of thickness of 2 mm, spacing of 2 mm and height of 100 mm

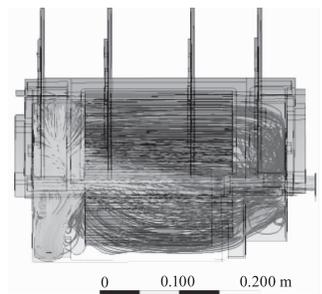


图11 厚度2 mm 间距4 mm 高度120 mm 流场结果
Fig. 11 Flow field results of thickness of 2 mm, spacing of 4 mm and height of 120 mm

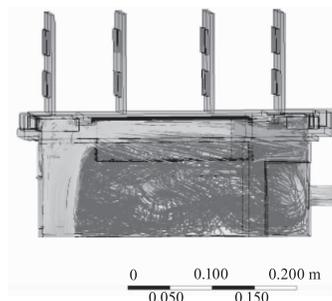


图12 厚度2 mm 间距6 mm 高度50 mm 流场结果
Fig. 12 Flow field results of thickness of 2 mm, spacing of 6 mm and height of 50 mm

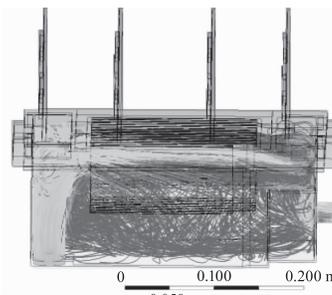


图13 厚度2 mm 间距8 mm 高度80 mm 流场结果
Fig. 13 Flow field results of thickness of 2 mm, spacing of 8 mm and height of 80 mm

表3 仿真最高温度结果

Tab. 3 Simulation maximum temperature results

编号	翅片厚度/ mm	翅片间距/ mm	翅片高度/ mm	最高温度/ ℃
1	1	2	50	96.67
2	1	4	80	83.15
3	1	6	100	85.50
4	1	8	120	88.25
5	1.5	2	80	89.25
6	1.5	4	50	91.30
7	1.5	6	120	84.01
8	1.5	8	100	87.56
9	2	2	100	87.88
10	2	4	120	80.68
11	2	6	50	92.54
12	2	8	80	88.05
13	2.5	2	120	84.33
14	2.5	4	100	82.56
15	2.5	6	80	85.24
16	2.5	8	50	94.43
无翅片				122.64

仿真结果表明,翅片间距、翅片高度以及翅片厚度对散热器的散热能力有着显著的影响。温度

场结果表明,靠近进风口的板卡温度较低,越靠近出风口温度越高,这因为冷风流过翅片带走翅片上的热量使自身温度升高,使得靠近出风口位置的温度相对高一些。

翅片高度为 50 mm 时,温度均在 90 °C 以上,从流场图可以看到,翅片高度较低导致冷空气大部分从翅片下方空间流向出气口,造成翅片处和冷空气热交换不足,散热效果较差。

翅片间距为 8 mm 时,散热效果也较差。根据流场结果可知,间距过大,冷空气在翅片间的流速过大,导致冷空气来不及带走翅片上的热量,使得散热效果不理想。

为了进一步分析翅片厚度、翅片间距以及翅片高度对散热性能的影响程度,对仿真结果进行均值及极差分析,以得到各因素对散热性能的贡献程度。正交实验的评价指标如表 4 所示,表中 K1, K2, K3 以及 K4 分别表示“水平 1”、“水平 2”、“水平 3”以及“水平 4”的指标均值。极差 R 则代表同一因素在不同水平下均值的变化幅度,其大小反映了各因素对散热器性能的贡献程度,数值越大贡献程度越高。

根据表 4 可以看出,不同因素之间的极差 R 的大小顺序为 $R_{\text{翅片高度}} > R_{\text{翅片间距}} > R_{\text{翅片厚度}}$,这意味着对散热器性能影响最大的为翅片高度,其次是翅片间距,翅片厚度对散热器性能的影响程度相对小一些。基于最低温度为优化目标,最佳的组合形式为翅片厚度 2 mm,翅片间距 4 mm,翅片高度 120 mm,该翅片形式下温度为 80.6 °C,相较无翅片形式的 122.64 °C 散热效率提高了 34.3%,最高温度小于电路板安全温度阈值,满足使用要求。

表 4 正交实验评价指标及极差分析

Tab. 4 Evaluation index and range analysis of orthogonal experiment

指标均值	翅片厚度/mm	翅片间距/mm	翅片高度/mm
K1	88.4	89.5	93.7
K2	88.1	84.4	86.4
K3	87.3	86.8	85.9
K4	86.6	89.6	84.3
R	1.8	5.1	9.4

4 结 论

本文基于 Fluent 数值仿真软件,采用正交实验

的研究方法研究了翅片厚度、翅片间距以及翅片高度三因素四水平条件下对被动风冷翅片散热器的散热性能的影响,主要结论如下:

(1) 翅片高度对散热器性能有显著影响,翅片高度为 50 mm 时,冷空气绝大部分从翅片底部空间流出风道,导致冷空气无法和翅片进行有效的热交换,使得散热器散热性能较差;

(2) 翅片间距过大会使散热器性能变的很差,间距过大,空气在翅片间的流速过大,冷空气迅速流过翅片间隙,无法二者接触时间过短,无法进行有效的热交换,进而使散热性能变差;

(3) 对正交实验数据进行极差分析得到了对散热器散热性能影响的大小顺序为,翅片高度对散热器性能影响最大,翅片间距次之,翅片厚度的影响最小,通过极差分析得到了散热器形式的最优形式为翅片厚度 2 mm,翅片间距 4 mm,翅片高度 120 mm,散热效率相较无翅片形式提高 34.3%,该条件下电子组件的最高温度为 80.6 °C,小于其正常工作的安全阈值,满足使用要求。

参考文献:

- [1] Onoroh F, Adewumi O, Ogbonnaya M. Characterization of a finned heat sink for a power inverter [J]. Journal of physics: Conference Series, 2019, 1379(2): 022003.
- [2] Cortes Cristobal, Arauzo Inmaculada, Campo Antonio. Dimensionless parameters for the optimization of annular-finned tubes [C] // American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2000: 69 - 74.
- [3] Harun Bilirgen, Stephen Dunbar, Edward K. Levy. Numerical modeling of finned heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 278 - 288.
- [4] Mi Sandar, Gross. Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(8 - 9): 1953 - 1964.
- [5] M S Mon. Numerical investigation of air-side heat transfer and pressure drop in circular finned-tube heat exchangers [D]. Von der Fakultät für Maschinenbau; Verfahrens- und Energietechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Germany, 2003.
- [6] Li Jian, Jiao Kai, Zhang Heng, et al. Numerical simulation

- and structural optimization of finned heat exchanger[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019, 346 (12): 81 - 83, 88. (in Chinese)
- 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, 346 (12): 81 - 83, 88.
- [7] Wang Renyuan, Li Jianxiong, Wu Jinxing. Structural parameter optimization of air side louver fin of radiator[J]. Fluid Machinery, 2013, (6): 74 - 78. (in Chinese)
- 王任远, 李建雄, 吴金星. 散热器空气侧百叶窗翅片结构参数优化[J]. 流体机械, 2013, (6): 74 - 78.
- [8] Shi Miao, Du Jiangwei, Yu Xiaoling, et al. Orthogonal numerical simulation optimization of straight fin heat pipe radiator[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2020, 36 (2): 14 - 18. (in Chinese)
- 施渺, 杜江伟, 余小玲, 等. 平直翅片热管散热器的正交数值模拟优化[J]. 电子机械工程, 2020, 36 (2): 14 - 18.
- [9] Feng Weijian, Shi Xiudong, Yao Chenming, et al. Structure optimization of tube fin heat exchanger based on orthogonal test and fluent[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2020, 47(1): 93 - 99. (in Chinese)
- 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.