

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003360

基于全局响应面法的有限空间散热结构多目标优化*

胡亚凡¹ 姜永正¹ 彭延峰¹ 廖贵文¹ 李泽沛¹ 何宽芳²
(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭 411201;
2. 佛山科学技术学院 机电工程学院 佛山 528000)

摘 要:针对直流电能检定仪器内部空间有限导致无法增大散热器尺寸的难题,采用全局响应面法对基板和肋片厚度、肋片数目及风量进行多目标优化。首先,建立 1 kW 开关电源的有限元模型,以基板厚度 H_2 、肋片厚度 H_3 、肋片数目 N 、风扇风量 V 为变量因子,功率芯片和开关电源最高温度作为目标,设计正交试验;其次,基于试验结果,利用全局响应面法对变量因子进行多目标优化,结果表明,当 $H_2=3.0\text{ mm}$ 、 $H_3=1.0\text{ mm}$ 、 $N=10$ 、 $V=24.00\text{ CFM}$ 时,目标最高温度分别降至 $91.61\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $62.73\text{ }^\circ\text{C}$ 。最后,利用最优参数开展实验,实验与优化结果十分吻合,误差仅为 $-2.53\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $3.70\text{ }^\circ\text{C}$,优化参数可用,优化后最高温度降低了近 30%,优化效果明显。

关键词: 矩形肋片散热器;全局响应面法;散热特性;有限元;开关电源

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Multi-objective optimization of heat dissipation structure in limited space based on global response surface method

Hu Yafan¹ Jiang Yongzheng¹ Peng Yanfeng¹ Liao Guiwen¹ Li Zepei¹ He Kuanfang²
(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: Aiming to solve the problem that the increase of the size of the radiator is limited by the internal space of the direct-current (DC) power verification instrument, the global response surface method (GRSM) is used to optimize multi-objectives of the thickness of the substrate and the fins, the number of fins and the airflow. Firstly, a finite element model (FEM) of 1 kW switching power supply is proposed and the orthogonal experiment is designed, with variable factors of substrate thickness H_2 , fin thickness H_3 , number of fins N , and fan airflow V , and the objective of the maximum temperature of the power chip and switching power supply. Secondly, based on the experimental results, the multi-objective optimization of the variable factors is conducted by using the GRSM. The results show that the maximal temperature can be decreased to $91.61\text{ }^\circ\text{C}$ and $62.73\text{ }^\circ\text{C}$, respectively, under the conditions of $H_2=3.0\text{ mm}$, $H_3=1.0\text{ mm}$, $N=10$ and $V=24.00\text{ CFM}$. Finally, the experiment is carried out with the optimized parameters, and the experimental results agree well with the optimization ones with marginal errors of $-2.53\text{ }^\circ\text{C}$ and $3.70\text{ }^\circ\text{C}$, respectively. Our scheme presents a significant achievement since the maximum temperature is reduced by nearly 30%, and the obtained optimized parameters are useful.

Keywords: rectangular fin radiator; GRSM; heat dissipation characteristics; finite element; switching mode power supply

0 引 言

直流电能因易存储、高压传输损耗少,在工业生产和

置在进行检定过程中,由于检定仪器内部功率芯片的热流密度高、热损耗大,若不及时散热,易导致仪器局部温度升高,影响检定仪器的输出信号质量^[1-4]。检定仪器内部温度分布不均匀,还会引起被检定计量装置参数不统一、测量误差范围大,导致计量装置在使用过程中计量不准,

收费偏差大,严重阻碍着直流电推广使用^[5-7]。因此,对于要求具有高准确度、高精密度和高可靠性的直流电能计量检定仪器,分析和优化其内部温度场就显得极为重要。

矩形肋片散热器因尺寸小、易加工及散热效果好等特点,配合风扇强迫制冷,成为检定仪器常用的散热方式^[8-10]。但是检定仪器内部用于安装散热器及风扇的空间极其有限,不合理的散热结构反而会导致检定仪器局部温度进一步升高,严重影响计量装置的标定过程,甚至烧毁仪器^[11-12]。国内外学者针对肋片散热器进行了大量研究。陈家浩等^[13]利用插值拟合的方法对压裂车液压油散中不同隔板间距、不同翅片厚度和节距的翅片散热进行优化,提出了一种提高压裂车油散散热效率的结构。Shen 等^[14]研究了应用于大功率 LED 芯片散热的矩形肋片散热器在自然对流条件下不同方向的散热性能,得出了散热效果最优的散热器安装角度。白保东等^[15]基于自定义热路模型,利用迭代算法提出了 IGBT 结温、壳温及散热器温度曲线,在此基础上设计了一款中压变频调速系统用水冷散热系统。裘腾威等^[16]搭建多孔铜微通道热沉散热性能测试平台进行实验研究,研究结果表明增加冷却工质流量和减小孔径有利于提高多孔铜微通道热沉的散热性能,当多孔铜孔隙率为 30.8% 时,多孔铜微通道热沉散热性能最佳,入口截面斜率角对多孔铜微通道热沉散热性能的影响较小。王锦荣等^[17]提出一种 CPU 用的非对称 U 型热管嵌入式散热器,并从总热阻和放置角度对不同的加热功率及气体流速下的强迫风冷的传热性能进行了研究,得出了一组散热效果较好的参数。温英科等^[18]对比研究了强迫风冷与全浸式蒸发冷却在开关电源中的应用,说明了全浸式蒸发冷的可行性及技术优势。现有文献大多是针对热源,根据经验公式对其进行散热设计,增强其散热性能,通常未限制散热结构的外形尺寸,但是部分装置存在空间狭小、热流密度高,根据经验公式对其进行热设计难以满足散热标准的难题。因此,针对有限空间内的散热结构,对其尺寸进行优化设计,提高其散热能力非常重要。

优化散热结构时,以温度作为评价指标,无法直接获得自变量与因变量间的显示函数关系,往往需要大量实验或者仅能优化单一自变量,未达到全局优化的目的。全局响应面法(global response surface method, GRSM)相比其他优化方法,可以省去实验设计及单独的响应面建立过程,优化过程中无需变量与结果之间的函数关系式,可进行多变量多目标优化,具有高效、实用的优点^[19-20]。因此,本文采用全局响应面法对检定类仪器等有限空间内的散热结构进行多目标优化,以此来提高其散热能力和可靠性。以 1 kW 开关电源为例,首先,建立其有限元耦合模型;其次,以基板厚度、肋片厚度、肋片数目、风扇风量为变量因子,功率芯片和开关电源最高温度作为目

标,设计正交试验;最后,基于试验结果,利用全局响应面法对变量因子进行多目标优化并设计实验对优化参数进行验证。

1 开关电源热分析基本理论

开关电源利用 MOS 管的开通和关断将交流电(单相或三相)或直流电转化为直流电能,主要由输入整流电路、高频 DC/AC 逆变电路、输出整流滤波电路、控制电路、保护电路等几部分组成^[21]。输入开关电源的电能,一部分以电能形式输出,另一部分以热能形式散失到周围环境中。开关电源常见的散热方式是将功率芯片贴装于矩形肋片散热器的基板,增加散热面积,并配合风扇强迫制冷。

1.1 散热理论分析

热源主要以热传导、对流换热和热辐射 3 种方式与周围环境实现热量交换。开关电源内部器件与散热器之间主要以热传导换热为主,散热器与空气、芯片与空气之间主要以对流换热为主^[22]。热辐射传递的热量占比小,因此可忽略不计。

1) 矩形肋片散热器散热分析

功率芯片与散热器的安装方式如图 1 所示。散热器可分为基板和肋片两部分。基板长为 L_2 、宽为 W_2 ,厚度为 H_2 ;肋片长为 L_3 、宽为 W_3 ,厚度为 H_3 。

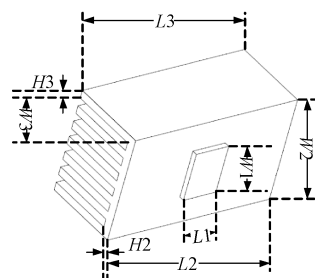


图 1 功率芯片安装示意图

Fig. 1 The installation schematic of the power chips

将基板与功率芯片间的热交换等效为平板的稳态导热,根据傅里叶定律^[23],其传热量可表示为:

$$Q = kA_1 \frac{T_1 - T_2}{H_2} \quad (1)$$

式中: k 为基板的导热系数,与基板材质有关; A_1 为功率芯片与基板接触面积; T_1 为功率芯片与基板接触面的温度值; T_2 为肋片根部的温度值; H_2 为基板厚度。热量 Q 可分为 Q_1 和 Q_2 , Q_1 通过对流换热直接传递至空气, Q_2 传递至肋片后再传递至空气。

肋片传热部分 Q_2 , 可等效为沿肋高方向进行的一维稳态导热问题^[24]。单片肋片的导热率 Q'_2 可表示为

$$Q'_2 = \sqrt{hP_3kA_3} (T_2 - T_\infty) \tanh(mW_3) \tag{2}$$

式中： h 为空气的对流换热系数，与流体的流速、粘滞系数等有关； P_3 为肋片截面周长； A_3 为肋片截面面积； T_∞ 为肋片周围空气温度；由于 $H_3 \ll L_3$ ， m 可近似表示为 $\sqrt{2h/(k \cdot H_3)}$ 。

肋片传热部分 Q_2 可表示为：
$$Q_2 = Q'_2 \cdot N \tag{3}$$
式中： N 为肋片数目。

2) 风扇散热分析

风道中的肋片与空气之间的传热问题可等效为平板湍流强迫对流换热^[25]。肋片表面空气平均对流换热系数与空气流量的关系式可表示为：

$$\bar{h} = 0.0375\lambda \sqrt[5]{\left(\frac{q}{\nu S}\right)^4 \frac{1}{L_3}} \cdot Pr^{1/3} \tag{4}$$

式中： λ 为空气的导热系数，为 $30.0 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； q 为肋片之间的空气流量； ν 为空气的运动粘度，为 $20.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ； S 为肋片间的截面积； Pr 为空气的普朗特数，为 0.700。

根据牛顿冷却公式^[26]，单片肋片表面传递给空气的热量 Q''_2 可表示为：

$$Q''_2 = \bar{h}(T_3 - T_\infty)A_3 \tag{5}$$

式中： T_3 为肋片表面温度； A_3 为肋片表面与空气接触面积。

根据式(1)~(5)可知，当矩形肋片散热器处于强迫冷却并且外形尺寸不变时，其导热量与散热器基板厚度、肋片厚度、肋片数目和风扇风量有关。

1.2 开关电源主电路结构

本文以一款 1 kW 开关电源为研究对象。电路结构如图 2 所示。其输入整流采用两片整流桥；高频逆变部分采用半桥逆变电路，且选用大电流低饱和压降的金属-氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 和续流二极管组成；输出整流采用全波整流电路。

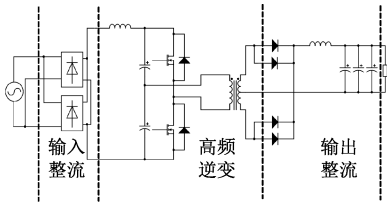


图 2 开关电源主电路

Fig. 2 The circuit diagram of a switching power supply

2 开关电源有限元仿真及实验验证

2.1 有限元多场耦合散热控制方程

处于流场中的直流开关电源，同时遵守质量守恒定

律、动量守恒定律和能量守恒定律，其三维稳态散热控制方程的通用形式可表示为^[27]：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \varphi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + S \tag{6}$$

式中： u 、 v 、 w 分别为场变量 φ 在 x 、 y 、 z 方向的流动速度； Γ 为扩散系数； S 为源项。

2.2 开关电源有限元模型及网格划分

Icepak 是由美国 Fluent 公司开发的一款专业的、面向工程师的电子产品热分析软件，采用 FLUENT 计算流体动力学 (CFD) 求解引擎，能够完成灵活的网格划分和求解多物理场模型。根据研究对象的实物尺寸及材料，利用 Icepak 软件建立图 3 所示的有限元热耦合模型，表 1 为各元器件名称和仿真参数。

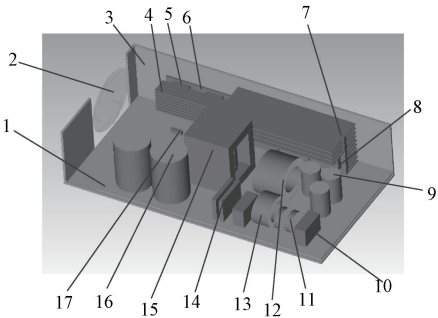


图 3 开关电源有限元模型

Fig. 3 The FEM model of the switching power supply

表 1 开关电源有限元散热模型仿真参数

Table 1 The simulation parameters of FEM model of the switching power supply

编号	元器件	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	发热功率/W
1	PCB 板	0.35	0.0
2	风扇	0.00	0.0
3	铝质外壳	240.00	0.0
4	N 散热器	240.00	0.0
5	MOSFET	170.00	16.5
6	N 散热板	240.00	0.0
7	M 散热器	240.00	0.0
8	输出整流二极管	170.00	14.4
9	输出整流滤波电容	91.74	0.1
10	安规电容	91.74	0.0
11	NTC	46.00	5.0
12	输出整流滤波电感	130.00	3.0
13	共模电感	130.00	0.2
14	输入整流桥	91.74	1.5
15	高频变压器	154.00	4.0
16	逆变电容	91.74	0.1
17	续流二极管	170.00	0.4

为保证计算准确性，使用非结构化网格划分网格单

元。网格单元总数为 3 925 224,节点数为 3 718 853。初始条件设定为 25.00 ℃,忽略辐射换热,考虑重力的影响。由于各元器件外形对空气流动影响较大,空气流经各元器件表面时易形成湍流,因此,仿真模型使用 Spalart-Allmaras 方程进行求解。

2.3 计算结果及实验验证

如图 4 所示,图 4(a)为开关电源满负荷工作时的温度场云图,最高温度为 93.40 ℃,最低温度为 28.93 ℃。图 4(b)为仿真计算的温度场云图,最高温度为 95.93 ℃,最低温度为 29.75 ℃。图 4(a)和(b)中,NTC 的温度最高,其次是输入整流桥、输出整流二极管和续流二极管,靠近风扇和逆变电容部位的温度最低。从表 2 可以看出,实验与仿真结果相比,各主要热源最高温度的绝对误差小于 3.00 ℃,相对误差低于 4.00%。按表 1 的设置参数对此开关电源进行散热仿真,仿真结果与实验的温度场云图基本一致。

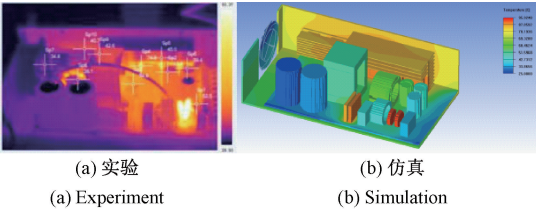


图 4 实验与仿真对比

Fig. 4 The comparison between experiment and simulation

表 2 实验与仿真结果中各主要热源最高温度对比分析

Table 2 Comparative analysis of the maximum temperature of the main heat sources in the experiment and simulation					
序号	元件	实验结果/℃	仿真结果/℃	绝对误差/℃	相对误差/%
1	输入整流桥	86.30	87.74	1.44	1.67
2	输出整流二极管-1	89.40	90.56	1.16	1.30
3	输出整流二极管-2	91.30	90.84	0.46	0.50
4	输出整流二极管-3	91.70	90.90	0.80	0.87
5	输出整流二极管-4	92.80	93.56	0.76	0.82
6	续流二极管	91.30	93.54	2.24	2.54
7	MOSFET -1	86.03	87.34	1.31	1.52
8	MOSFET -2	87.07	89.70	2.63	3.02
9	共模电感	46.60	48.18	1.58	3.39
10	NTC	93.40	95.93	2.53	2.71

3 开关电源散热影响因素分析

3.1 正交实验设计

对开关电源的散热结构进行调整,将功率芯片贴装于同一散热器基板表面,如图 5 所示。以基板厚度、肋片厚度、肋片数目和风扇风量为变量设计正交仿真实验,以开关电源和功率芯片表面的最高温度值作为评价指标,

仿真结果如表 3 所示。

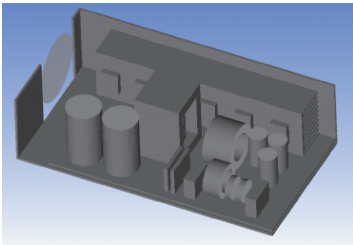


图 5 重建模型
Fig. 5 The new model

表 3 正交仿真实验结果

Table 3 The experimental results of orthogonal simulation

序号	基板厚度 H_2/mm	肋片厚度 H_3/mm	肋片数 目 N	风扇风量 V/CFM	开关电源最功率芯片表面 高温度/℃	最高温度/℃
	H_2/mm	H_3/mm	目 N	V/CFM	高温度/℃	最高温度/℃
1	1.8	0.9	15	16.32	96.10	74.07
2	2.6	1.3	13	16.64	95.93	73.15
3	3.4	0.7	18	16.96	96.82	75.03
4	4.2	1.0	11	17.28	95.25	70.22
5	1.2	1.4	16	17.6	97.00	76.77
6	2.0	0.8	14	17.92	95.10	70.83
7	2.8	1.2	19	18.24	97.48	77.17
8	3.6	1.5	11	18.56	94.85	69.70
9	4.4	0.6	16	18.88	95.45	71.26
10	1.3	1.0	13	19.20	94.35	69.22
11	2.1	1.3	18	19.52	96.89	76.44
12	2.9	0.7	12	19.84	94.11	67.55
13	3.7	1.1	17	20.16	95.70	73.26
14	4.5	1.4	14	20.48	94.90	71.82
15	1.5	0.9	19	20.80	95.76	73.55
16	2.3	1.2	10	21.12	93.37	65.78
17	3.1	1.5	15	21.44	94.99	72.59
18	3.9	0.7	13	21.76	93.46	66.06
19	4.7	1.0	18	22.08	95.13	72.09
20	1.6	1.3	12	22.4	93.09	66.04
21	2.4	0.8	17	22.72	93.67	68.62
22	3.2	1.1	14	23.04	93.19	66.97
23	4.0	1.5	19	23.36	96.61	75.67
24	4.8	0.9	11	23.68	92.54	64.28
25	1.0	1.2	16	24.00	94.88	70.05

3.2 散热性能随单一物理参数的变化规律

基于表 3 的数据,使用滑动最小二乘法拟合出开关电源和功率芯片表面的最高温度与基板厚度、肋片厚度、肋片数目和风扇风量的关系曲线,如图 6 和 7 所示。

由图 6 可知,基板厚度在 1.0~2.2 mm 范围时,随着基板厚度增加,开关电源最高温度减小;基板厚度在 2.2~5.0 mm 范围时,开关电源的最高温度随基板厚度增加而升高;基板厚度对开关电源的最高温度影响值为 0.41 ℃。肋片厚度和肋片数目对开关电源最高温度的影响曲线的开始阶段斜率较小,影响较小,随着肋片厚度或肋片数目逐渐增加,开关电源的最高温度升高速率增加。肋片厚度在 0.6~1.5 mm 范围变化时,对开关电源

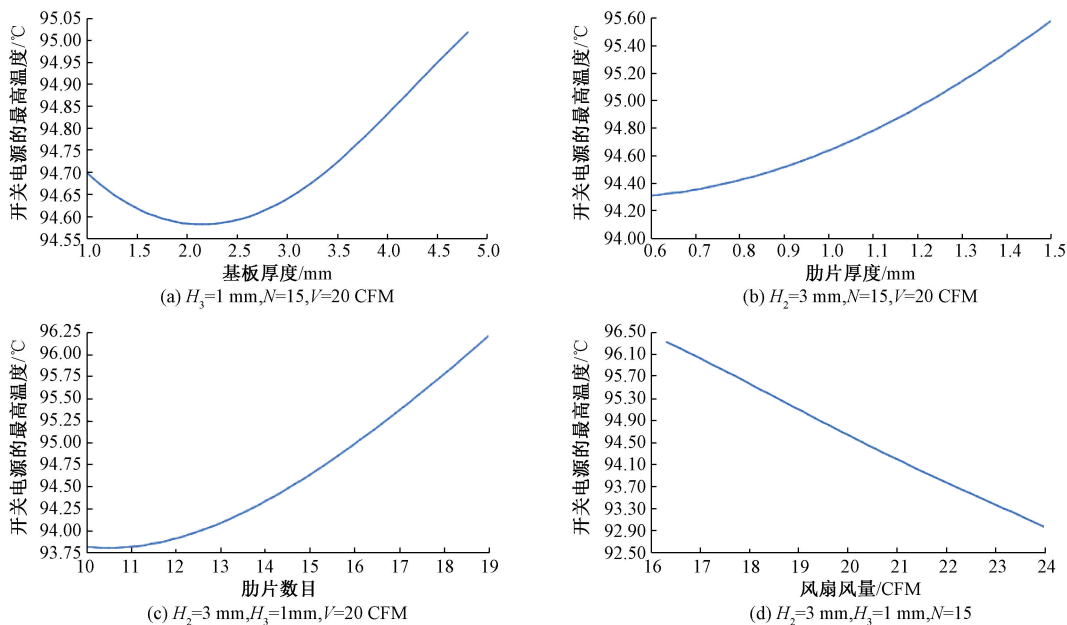


图 6 开关电源的最高温度随单一物理参量变化规律

Fig. 6 The maximum temperature of switching power supply varies with a single physical parameter

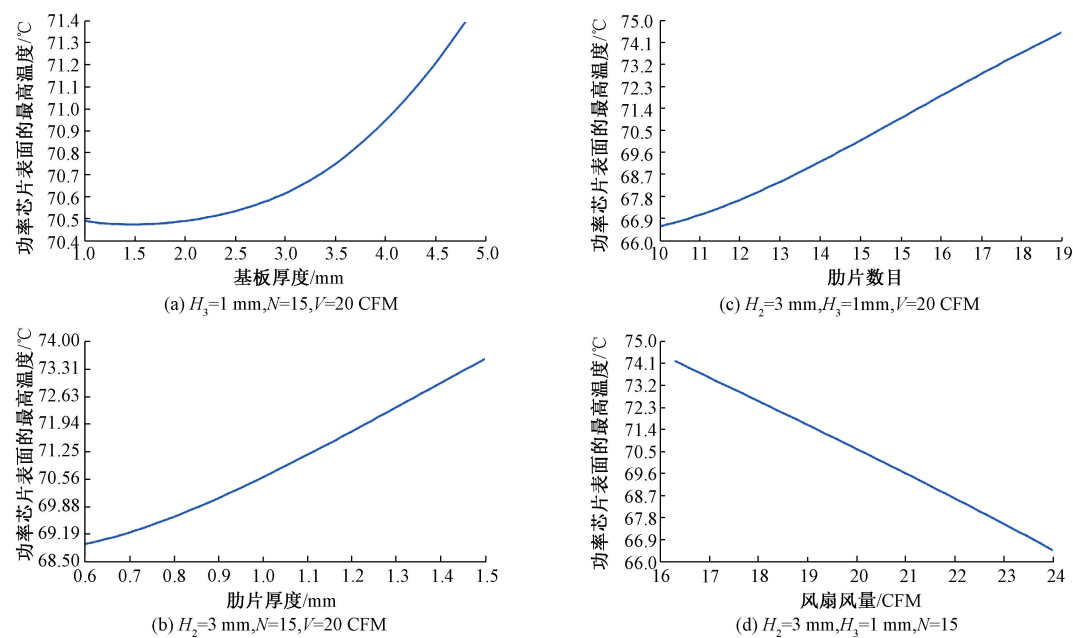


图 7 功率芯片表面的最高温度随单一物理参量变化规律

Fig. 7 The maximum temperature of power chip surface varies with a single physical parameter

的最高温度影响值为 1.13 °C; 肋片数目在 10~20 范围变化时, 对开关电源的最高温度影响值为 2.59 °C。开关电源的最高温度与风扇风量成反比关系, 风扇风量在 16.00~24.00 CFM 范围变化时, 对开关电源的最高温度影响值为 3.31 °C。

从图 7 可知, 基板厚度在 1.0~2.0 mm 变化时, 曲线斜率近似为 0, 当基板厚度在 2.0~5.0 mm 时, 基板厚度越小, 功率芯片表面的温度越低; 但是基板厚度对功率芯

片表面的最高温度影响仅为 1.03 °C。肋片厚度和肋片数目值越小, 功率芯片表面的最高温度值越小, 在本次试验中, 相比于肋片数目, 肋片厚度对功率芯片表面的最高温度影响更大, 达到了 8.30 °C, 而肋片数目的影响仅为 4.45 °C。当风量从 16.00 CFM 变化到 24.00 CFM 时, 功率芯片表面的最高温度下降了 7.74 °C。在本次实验的变量变化范围内, 各因素对功率芯片表面的最高温度影响从大到小分别是肋片厚度、风扇风量、肋片数目、基板

厚度,影响值分别为 8.30 ℃、7.74 ℃、4.45 ℃、1.03 ℃。

综合图 6 和 7 分析可知,风扇风量、肋片数目对电源和芯片最高温度影响较大。主要原因是风量增加,散热器表面空气流速增加,单位时间内从散热器表面带走的热量增多,所以温度降低;但随着肋片数目增加,散热器周围湍流增强,空气流动阻力增大,热空气无法及时排出,导致温度升高。肋片厚度与基板厚度对开关电源和功率芯片表面的最高温度影响较小,主要是因为其散热方式属于固体热传导范畴,小范围内改变其厚度对散热性能的影响不大。

3.3 散热性能随多物理参数的变化规律

图 8 和 9 所示分别为两因素耦合对开关电源和功率芯片表面的最高温度影响的曲面。在本次实验中,风量与肋片数目、风量与肋片厚度、肋片数目与肋片厚度对开

关电源的最高温度影响值分别为 5.66 ℃、4.69 ℃ 和 4.09 ℃,对功率芯片表面的最高温度影响值分别为 15.06 ℃、11.17 ℃ 和 11.76 ℃。对比图 8(a) 和 9(a),当 $H_2=3.0\text{ mm}$, $H_3=1.0\text{ mm}$ 时,风量越大,肋片数目越少,则最高温度值越小,而且风量和肋片数目同时变化时,相比对开关电源最高温度的影响,两者对功率芯片表面的最高温度值影响更大。图 8(b) 和 9(b) 中,当 $H_2=3.0\text{ mm}$, $N=15$,风量 16.00~18.00 CFM 时,肋片越厚,开关电源和功率芯片表面的最高温度越高,随着风量增加,且肋片变薄时,开关电源和功率芯片表面的最高温度明显下降。图 8(c) 和 9(c) 中,肋片数目越多,肋片越厚,开关电源和功率芯片表面的最高温度越高。由分析结果可知,风扇风量与肋片数目的变化能显著影响功率芯片表面的最高温度值,但对开关电源的最高温度影响较小。

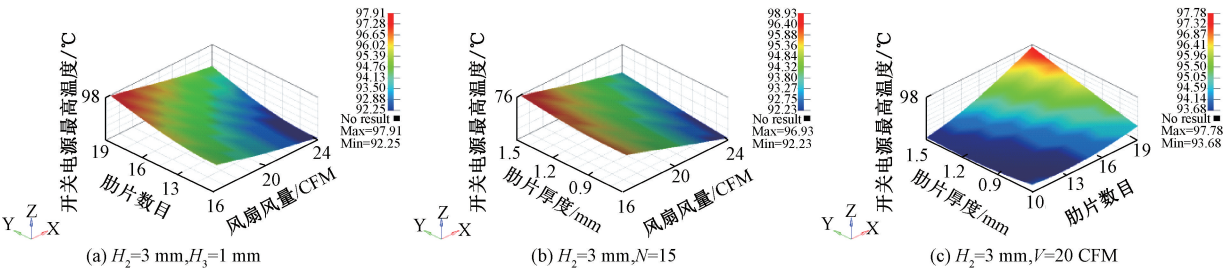


图 8 开关电源的最高温度随多物理参量变化规律

Fig. 8 The maximum temperature of switching power supply varies with many physical parameters

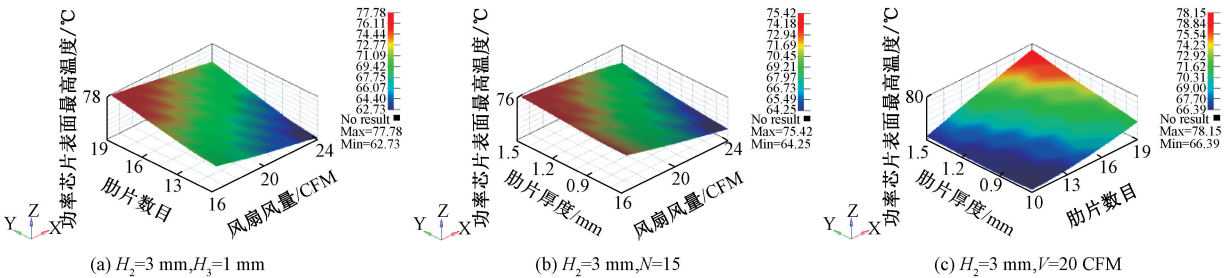


图 9 肋片表面的最高温度随多物理参量变化规律

Fig. 9 The maximum temperature of the fin surface varies with two physical parameters

4 基于全局响应面法优化散热器参数及验证

4.1 散热物理参数优化

根据表 3 的仿真数据可知,采用全局响应面法对散热器的基板厚度、肋片厚度、肋片数目和风扇风量进行多目标优化,使开关电源和功率芯片表面的最高温度同时达到较低值。优化结果显示,当基板厚度 $H_2=3.0\text{ mm}$,肋片厚度 $H_3=1.0\text{ mm}$,肋片数目 $N=10$,风扇风量 $V=24.00\text{ CFM}$ 时,开关电源和功率芯片表面的最高温度同时收敛于 91.61 ℃ 和 62.73 ℃。

4.2 优化结果验证

以优化参数作为实验依据,当 $H_2=3.0\text{ mm}$, $H_3=1.0\text{ mm}$, $N=10$, $V=24.00\text{ CFM}$ 时,实验结果表明,开关电源的最高温度为 89.08 ℃,功率芯片表面的最高温度为 66.43 ℃,与优化收敛结果分别相差 -2.53 ℃ 和 3.70 ℃,优化参数具有较高的可信度。从表 4 的数据分析可知,对散热器和风扇参数进行优化后,功率芯片表面的最高温度相比优化前,降低了 30%。开关电源的最高温度变化不明显,主要原因是开关电源内部最高温度区域与散热器尺寸和风扇耦合不强,优化对开关电源的最高温度影响不大。

表 4 优化前后功率芯片温度值对比

Table 4 The comparative analysis of the temperature value of power chips before and after optimization

序号	功率芯片	优化前 温度值/℃	优化后 温度值/℃	绝对 值/℃	相对 值/%
1	MOSFET-1	86.03	58.25	27.78	32.29
2	MOSFET-2	87.07	60.46	26.61	30.56
3	输出整流二极管-1	89.40	61.47	27.93	31.24
4	输出整流二极管-2	91.30	62.99	28.31	31.00
5	输出整流二极管-3	91.70	64.10	27.60	30.09
6	输出整流二极管-4	92.80	66.43	26.37	28.41

5 结 论

由于直流电能检定仪器体积小,其散热设计受到极大限制,因此在不改变散热器外形尺寸的条件下,优化散热器结构和风扇风量是一种提高检定仪器散热性能的有效方法。本文以一台 1 kW 的直流开关电源为研究对象,通过分析矩形肋片散热器的基板厚度、肋片厚度、肋片数目和风扇风量对开关电源散热性能的影响,得出如下结论。

1) 增加风扇风量、减少肋片数目,通过改善散热器肋片间空气流速,可显著降低直流开关电源和功率芯片表面的最高温度。在有限空间内强迫制冷条件下,减小空气流动阻力,是优化散热器散热性能的主要措施。

2) 在本文研究范围内,矩形肋片散热器的基板厚度、肋片厚度、肋片数目和风扇风量四个参数可同时进行优化,使开关电源和功率芯片的最高温度共同达到较低值。

3) 在本文研究范围内,当 $H_2=3.0\text{ mm}$ 、 $H_3=1.0\text{ mm}$ 、 $N=10$ 、 $V=24.00\text{ CFM}$ 时,实验得到开关电源和功率芯片表面的最高温度分别为 $89.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $66.43\text{ }^{\circ}\text{C}$,比优化前分别降低了 $4.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。功率芯片表面的最高温度相比优化前降低了近 30%,全局响应面法应用于有限空间内强迫制冷条件下的散热器优化问题,可以显著提升散热器散热能力。

本文只对开关电源内的矩形肋片散热器及风扇进行了优化设计,但未对电源内各元器件进行布局调整,实现对元器件的布局优化。因此,后期可在本文研究的基础上,从元器件布局的角度,在不改变散热器外形尺寸的条件下,使电子仪器的温度场更均匀,内部最高温度更低。

参考文献

[1] 党克,赵思敏,于盛祥,等. 消除直流分量影响和谐波干扰的并网同步方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10):1551-1557.
DANG K, ZHAO S M, YU SH X, et al. Grid synchronization method for eliminating DC component and

harmonics influence [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (10): 1551-1557.
[2] 杜蜀薇,成达,邱伟,等. 基于分层贝叶斯的电能表短期故障评估与预测[J]. 电子测量与仪器学报,2018, 32(12):178-184.
DU SH W, CHENG D, QIU W, et al. Short-term fault evaluation and prediction of energy meter based on hierarchical Bayesian [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12):178-184.
[3] LINDENTHALER D, OVE G B. AC power measurements of electric drives: A method incorporating calorimetry and DC measurements only [J]. Elektrotechnik Und Informationstechnik, 2017, 134(2):197-202.
[4] BAIRI A. Quantification of the natural convective heat transfer for the tilted and wire-bonded QFN32b-PCB electronic assembly[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 72:84-89.
[5] 曹靖,童朝南,周京华,等. 一种并网逆变器的新型复合控制设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1296-1303.
CAO J, TONG C, ZHOU J, LI H. New composite control design for grid-connected inverter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5):1296-1303.
[6] 徐伟,行鸿彦. 自动气象站采集器的温度通道检定仪[J]. 仪表技术与传感器,2014(10):40-43,71.
XU W, XING H. Design of calibration instrument for temperature channel of data-acquisition unit of automatic meteorological station [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(10):40-43,71.
[7] 邱伟,唐求,刘旭明,等. 基于 MBBS 的电能计量设备故障率预估[J]. 仪器仪表学报,2019, 40(1):43-51.
QIU W, TANG Q, LIU X, et al. Failure rate estimation of power metering equipment based on multilayered Bayesian B-spline method [J], Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):43-51.
[8] 李慧君,董楠,王炯. 水平肋片管外自然凝结传热特性研究[J]. 热科学与技术,2015, 14(2):94-100.
LI H J, DONG N, WANG J. Research on natural condensation heat transfer characteristics on horizontal finned tube [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015, 14(2):94-100.
[9] 诸凯,杨洋,魏杰,等. 散热器散热过程的场协同分析[J]. 制冷学报,2014, 35(4):88-92,118.
ZHU K, YANG Y, WEI J, et al. Analysis for fields synergy in heat dissipation process of heat sink [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(4):88-92,118.
[10] 徐鹏程,陶汉中,张红. IGBT 热管式整体翅片散热器

- 优化分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(5):101-104, 109.
- XU P CH, TAO H ZH, ZHANG H. Optimization and analysis of IGBT heat pipe heat sink with integral fin[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(5):101-104, 109.
- [11] 王德成, 杨勋勇, 杨发顺, 等. 高压大功率芯片封装的散热研究与优化设计[J]. 微电子学, 2018, 48(6): 850-854.
- WANG D CH, YANG X Y, YANG F SH, et al. Thermal research and optimization design of high voltage and high power chip package [J]. Microelectronics, 2018, 48(6):850-854.
- [12] 诸凯, 刘泽宽, 何为, 等. 数据中心服务器 CPU 水冷散热器的优化设计[J]. 制冷学报, 2019, 40(2):36-42.
- ZHU K, LIU Z K, HE W, et al. Optimal design of CPU water-cooled radiator in a data center server[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(2):36-42.
- [13] 陈家浩, 邓斌. 基于 Fluent 的压裂车液压油散的翅片散热优化[J]. 液压与气动, 2019(6):101-105.
- CHEN J H, DENG B. Optimization based on fluent for fin cooling of fracturing truck hydraulic oil radiator[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(6):101-105.
- [14] SHEN Q, SUN D, XU Y, et al. Orientation effects on natural convection heat dissipation of rectangular fin heat sinks mounted on LEDs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 75:462-469.
- [15] 白保东, 陈德志, 王鑫博. 逆变器 IGBT 损耗计算及冷却装置设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8):97-106.
- BAI B D, CHEN D ZH, WANG X B. Loss calculation of inverter IGBT and design of cooling device [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8):97-106.
- [16] 裘腾威, 刘敏, 刘源, 等. 新型多孔铜微通道热沉散热性能实验研究[J]. 热科学与技术, 2020, 19(4): 339-346.
- QIU T W, LIU M, LIU Y, et al. Experimental research on heat transfer performance of a novel porous copper micro-channel heat sink[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2020, 19(4):339-346.
- [17] 王锦荣, 王亚雄, 段建国, 等. 用于芯片冷却的双 U 型热管散热器换热特性实验研究[J]. 低温与超导, 2020, 48(8):96-100.
- WANG J R, WANG Y X, DUAN J G, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of double U-shaped heat pipe radiator for chip cooling[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(8):96-100.
- [18] 温英科, 阮琳. 全浸式蒸发冷却开关电源热分析及实验[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18):4295-4304.
- WEN Y K, RUAN L. Thermal analysis and experimental study of fully-immersed evaporative cooling switching mode power supply [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18):4295-4304.
- [19] FENG Y, ZHANG X F. Polysaccharide extracted from *huperzia serrata* using response surface methodology and its biological activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157:267-275.
- [20] 潘益明, 于兰峰, 张则强, 等. 基于响应面法的移动式架车机仿真优化研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 91-95.
- PAN Y M, YU L F, ZHANG Z Q, et al. Research on lightweight design of mobile car machine based on response surface method [J]. Computer Simulation, 2020, 37(5):91-95.
- [21] 马伏军, 罗安, 肖华根. 大功率高效简化型电解电镀高频开关电源[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21):71-78.
- MA F J, LUO AN, XIAO H G. High-power high-efficient and simplified high-frequency switching power supply for electrolytic plating [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21):71-78.
- [22] 黄毅, 彭可, 王文潮, 等. 大功率高压开关电源变压器的损耗分析及散热控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5):1089-1097.
- HUANG Y, PENG K, WANG W CH, et al. Loss analysis and thermal control of power transformers with high power and high voltage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1089-1097.
- [23] 李凯伟, 何怡刚, 李兵, 等. IGBT 功率模块热网络模型建立及其参数辨识方法综述和展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1):51-60.
- LI K W, HE Y G, LI B, et al. Review and prospect of IGBT power module thermal network model establishment and parameter extraction method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1):51-60.
- [24] 梁锋, 赵连玉, 张慧, 等. 基于平板微热管阵列的大功率 LED 路灯散热研究[J]. 照明工程学报, 2016, 27(5):107-111.
- LIANG F, ZHAO L Y, ZHANG H, et al. Study on thermal dissipation of high-power LED lamps based on flat micro-heat pipe arrays [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2016, 27(5):107-111.
- [25] MOTOKI S, KAWAHARA G, SHIMIZU M, et al. Maximal heat transfer between two parallel plates [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 851: R4.
- [26] SZALMAS L. Heat transfer in ternary rarefied gas mixtures between two parallel plates [J]. European Journal of Mechanics/B Fluids, 2016, 57:152-158.

[27] 王雅博, 诸凯, 崔卓, 等. 出水方式对水冷芯片散热器换热性能影响[J]. 制冷学报, 2017, 38(6): 46-51, 59.
WANG Y B, ZHU K, CUI ZH, et al. Effect of the water-outlet mode on the heat transfer performance of water-cooled chip heat sink [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(6): 46-51, 59.

作者简介



胡亚凡, 2013 年于中北大学获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电子装置可靠性。
E-mail: huyafan365@126.com

Hu Yafan received his B. Sc. degree from North University of China in 2013. Now

he is a M. Sc. candidate at Hunan University of Science and Technology. His main research interest includes reliability of electronic device.



姜永正 (通信作者), 2016 年于中南大学获得博士学位, 现为湖南科技大学副教授, 主要研究方向为有限元仿真、结构可靠性与拓扑优化。

E-mail: huyafan365@126.com

Jiang Yongzheng received his Ph. D. degree from the Central South University in 2016. Now he is a associate professor at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include the finite element simulation, structural reliability analysis and topology optimization.