

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.002

基于响应面的伺服驱动单元散热器优化研究*

金 健,王 勇,张航军,刘文杰,梅 钦
(华中科技大学 机械科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:针对某型号伺服驱动单元工作过程中 IPM 温升过高的问题,将数值仿真技术应用到伺服驱动单元散热器优化中。开展了散热器几何参数对 IPM 温升的影响分析,通过均匀设计和多项式拟合相结合的方法建立了关于散热器基板厚度、翅片数和翅片厚度的 IPM 温升二阶响应面模型,提出了一种基于响应面的散热器优化方法。利用方差分析和拟合优度检验对响应面模型的准确度进行了评价,并在 CFD 软件上对优化后的散热器方案进行了数值仿真试验。研究表明,二阶响应面模型的误差范围不超过 2.88%,可以准确地拟合 IPM 温升与散热器几何参数之间的数学关系;在优化后的方案中 IPM 温升降低了 5.48 °C,有效地提高了设备的可靠性,为其他型号伺服驱动单元散热器及类似结构优化提供了参考。

关键词:伺服驱动单元;散热器;均匀设计;响应面法;热仿真

中图分类号:TH122;TK3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1295-07

Optimization of the heat sink in servo drive unit using response surface method

JIN Jian, WANG Yong, ZHANG Hang-jun, LIU Wen-jie, MEI Qin

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at reducing the IPM temperature rise of the servo drive unit during the operation process, the numerical simulation technique was investigated. After the analysis of the influence of the geometric parameters of heat sink on the IPM temperature rise, a second-order response surface model of the IPM temperature rise about the base height of the heat sink, number of fins and fin thickness was established by the combination of uniform design of experiments and polynomial fitting. A method was presented to optimize the heat sink based on the response surface. The accuracy of the model was evaluated by the analysis of variance and goodness of fit test, and the optimized scheme of the heat sink was tested by the numerical simulation in the CFD software. The results indicate that the error margin of the model is less than 2.88% which means the mathematic relation between the IPM temperature rise and the geometric parameters of heat sink can be accurately fitted by the model, and in the optimized scheme, the IPM temperature rise is reduced by 5.48 °C, which can effectively increase the reliability of the products and provide reference for the optimization of the heat sinks in the servo drive units or other similar structures.

Key words: servo drive unit; heat sink; uniform design; response surface methodology; thermal simulation

0 引 言

伺服驱动单元是电机的驱动和控制装置,其性能的优劣直接影响电机的运动性能和可靠性。伺服驱动单元主要由半导体功率开关等元器件构成,工作过程

中会产生大量的热量,致使机体温度上升,个别器件温度超过 90 °C,增加了失效概率。研究表明电子设备的失效有超过 55% 是温度过高所引起的^[1]。伺服驱动单元的功耗主要集中在以智能功率模块(intelligent power module, IPM)为核心的主回路,其中 IPM 内部

收稿日期:2016-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575210);质检公益性行业科研专项经费资助项目(201510202)

作者简介:金 健(1964-),女,湖南株洲人,硕士,副教授,硕士生导师,主要从事数控系统可靠性技术方面的研究。E-mail: 471721538@qq.com

的绝缘栅双极型晶体管芯片 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 和续流二极管芯片 (freewheeling diode, FWD) 是最主要的热量来源。IPM 工作时产生的热量绝大部分通过 IPM 底部基板经散热器散失, 从而在内部芯片与散热器之间形成由高到低的温度分布。散热器的散热特性直接影响着 IPM 的温升。在实际应用中, 由于散热器散热性能欠佳, 致使 IPM 温度过高引起的故障频频发生。为了提高伺服驱动单元的可靠性, 更好地发挥其控制和驱动性能, 有必要研究散热器的散热特性并对其存在的缺点和不足进行优化。

针对伺服驱动单元及散热器热性能相关的优化问题国内外研究学者进行了一系列的研究工作。Liu P 等^[2]利用电测法获取 IPM 的热阻及工作时的边界条件, 用于矫正 IPM 的有限元仿真模型, 并利用仿真的方式评估 IPM 的热性能。史贤忠等^[3]利用数值仿真与工程经验相结合的方法选取优化参数对伺服驱动单元的散热器参数及翅片的几何形状进行优化。Rao R V、郝晓红及赵宁等^[4-7]分别利用 TLBO 算法和遗传算法对散热器进行参数优化, 并对优化后的方案进行了计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 仿真验证。Arularasan 和 Velraj^[8]对平板散热器的建模和热仿真进行探索, 应用 CFD 工具和试验设计方法研究了翅片数、翅片高度、翅片长度和基板高度对散热器热阻的影响。Manivanna 等^[9]利用正交设计与灰色关联分析相结合的方法, 以提高散热性能和降低电磁干扰为目标, 对散热器基板长度、宽度和厚度以及翅片高度、厚度和翅片数等结构参数进行优化。

李登万等^[10]利用均匀设计法设计试验方案建立车削参数优化模型进行相应优化。周杰等^[11]针对封头冲压成型工艺中出现的工艺问题, 设计中心复合试验方案并通过回归模型的响应面分析 (response surface methodology, RSM) 获取凸凹模间隙、凹模圆角半径、拉延筋高度以及拉延筋相对位置的参数优化组合。

为降低 IPM 工作过程中的温升, 提高伺服驱动单元工作的可靠性, 本研究在不改变散热器类型与材质的基础上制定伺服驱动单元散热器的优化方案: 以散热器的截面几何参数为优化因子, IPM 温升为优化目标, 通过均匀设计法设计散热器的试验方案, 利用 Flotherm 对试验方案进行 CFD 数值仿真获取 IPM 温升的响应值, 用响应面法对试验响应数据进行二次多项式拟合, 得到 IPM 温升与散热器参数之间的数学模型, 最后通过对方程的分析寻找参数变量空间内的优化解。

1 伺服驱动单元建模与仿真

目前, CFD 数值仿真已经成为了电子设备研发阶段重要的试验手段。本研究利用 Flotherm 对伺服驱动单元的设计方案进行建模、数值仿真试验, 获取不同方案下伺服驱动单元的温度分布。

1.1 建模与仿真

本次研究对象为华中数控股份有限公司研发设计的某型号交流伺服驱动单元, 其结构如图 1 所示。

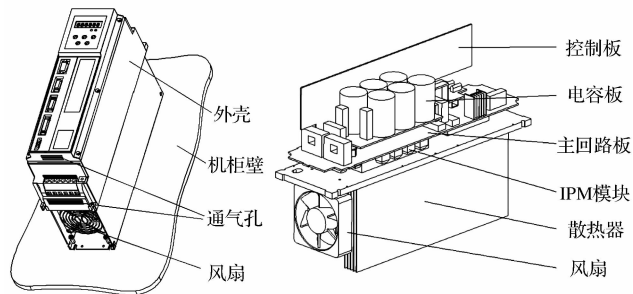


图 1 伺服驱动单元的结构示意图

本研究根据元器件手册以及参考实物测量, 在 Flotherm 11.0 中建立伺服驱动单元数值仿真模型, 设置计算域边界为 opening, 环境温度为 35 °C。求解域大小为 200 mm × 500 mm × 1 000 mm, 对 IPM、风扇及散热器设置局部网格加密; 散热器翅片间网格数为 4, 翅片厚度方向网格数为 2, 基板厚度方向网格数为 5, 散热器进出口方向膨胀网格距离设置为散热器长度的 10%, 系统求解域内网格总数为 283 052 个。

散热器的截面结构尺寸示意图如图 2 所示。

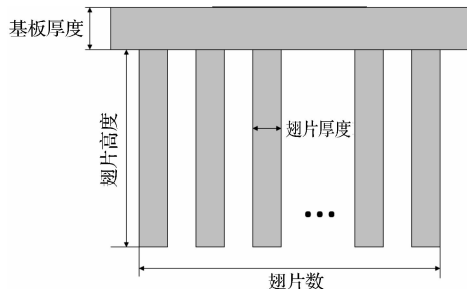


图 2 散热器的截面结构尺寸示意图

IPM 规格参照出厂文件, 建立包含芯片、绝缘基板、铜基板等结构的详细数值模型, 参考 IPM 元件使用手册, 通过在 IPM 与散热器之间设置一层热阻为 0.038 °C/W 的热界面材料来代替实际应用中的导热硅脂。根据数值仿真运算结果, 设备最高温度出现在 IPM 内部的 IGBT 芯片上, 温度为 92.2 °C。

规格如表 1 所示。

表 1 散热器的几何参数

参数名称/单位	值
基板长度/mm	360
基板宽度/mm	100
基板厚度/mm	8
翅片高度/mm	117
翅片厚度/mm	1
翅片数	16

伺服驱动单元初始方案热仿真结果如图 3 所示(已隐藏驱动单元外壳等结构特征)。

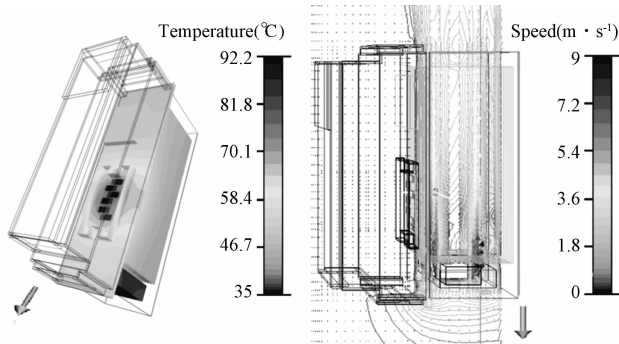


图 3 伺服驱动单元初始方案热仿真结果

1.2 仿真模型的验证

仿真模型利用三菱公司的损耗计算软件 Melcosim 进行验证。本研究在该软件中设定直流母线电压、三相正弦电流峰值、PWM 载波频率、散热器表面温度等参数后,即可计算出该 IPM 内部芯片的损耗以及工作温度参考值。本研究通过 Flotherm 与 Melcosim 的结果对比,验证数值模型的有效性。

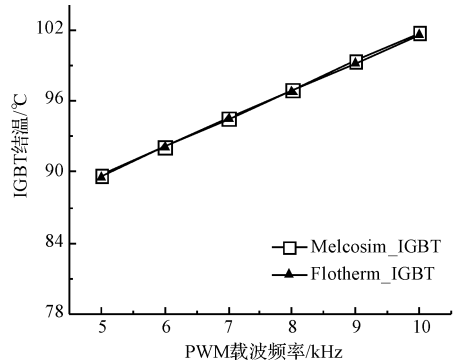
$$R_{Jc} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{(T_j - T_c)}{Q} \quad (1)$$

式中: R_{Jc} —IPM 内部芯片的结壳热阻, ΔT —芯片工作时相对于外壳的温升, T_j —芯片的结温, T_c —IPM 模块的外壳温度, Q —芯片的功耗。

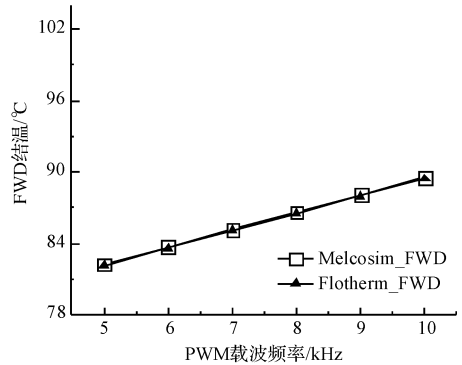
由公式(1)可知,在热阻恒定的情况下,芯片的温升与功耗呈正比。为验证数值仿真模型能否有效地拟合 IPM 的工作温升,本研究在相同的散热器表面温度条件下,通过设定不同的 PWM 载波频率来改变芯片的损耗,对比 Melcosim 和 Flotherm 中 IPM 的芯片的结温的变化。Flotherm 中的数值仿真模型准确地还原了 IPM 的实际结壳热阻,在不同的功耗条件下能很好地拟合 IPM 模块工作温度。结果如图 4 所示。

2 散热器参数的响应面回归

响应面法是采用多元二次方程来拟合因素与响应值之间复杂的未知函数关系,通过分析拟合后的响应面模型,解决多变量问题的统计方法。进行响应面优化



(a) IGBT 芯片结温值对比



(b) FWD 芯片结温值对比

图 4 Melcosim 与 Flotherm 中 IPM 的芯片结温值对比

前,应保证试验范围包含最佳的试验条件,因此在响应面回归之前应确定合理的参数与优化区间。

2.1 参数及优化区间选取

IPM 内部结构及散热路径示意图如图 5 所示。

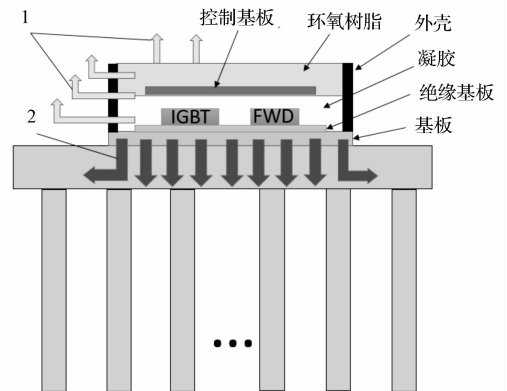


图 5 IPM 内部结构及散热路径示意图

IPM 工作时,内部的芯片热传导有两条路径:①IGBT/FWD 芯片 - 外壳 - 空气;②IGBT/FWD 芯片 - 基板 - 散热器。由于内部材料的传热性能的不同,芯片产生的绝大部分热量传导给底部基板,经散热器散失。

因此,不计路径 1 的热量损失,IPM 与环境之间的总热阻如下式所示:

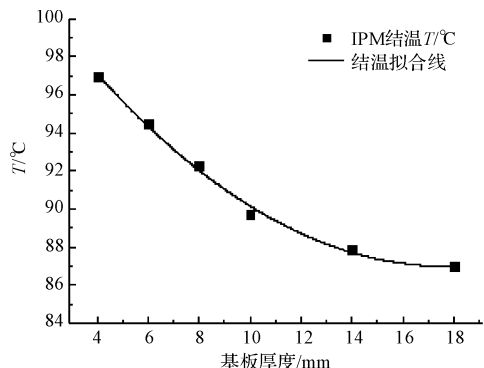
$$R_{Total} = R_{Jc} + R_{c-HS} + R_{HS} \quad (2)$$

式中: R_{Total} —总热阻, R_{Jc} —IPM 的结壳热阻, R_{c-HS} —IPM

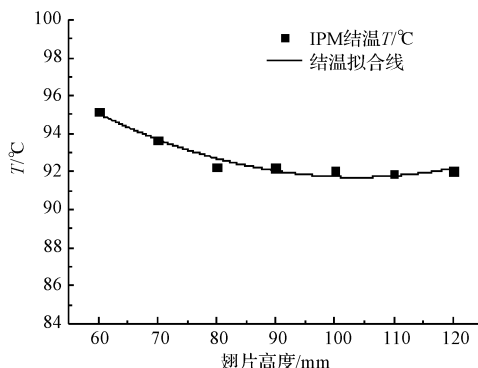
与散热器界面之间的热阻, R_{HS} — 散热器的热阻。

R_{Jc} 在元件出厂时已固定; 界面热阻 R_{c-HS} 除界面接触热阻外还包含 IPM 与散热器之间的扩散热阻, 由文献[12]可知, 扩散热阻与 IPM 基板面积、散热器基板面积、散热器基板厚度以及 IPM 在散热器上的位置有关; 散热器热阻 R_{HS} 与散热器自身材质、几何结构有关。

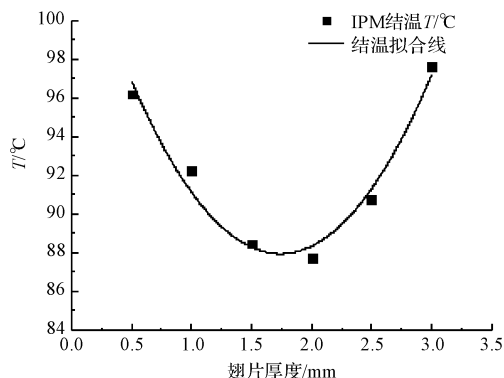
其中, 由于 R_{Jc} 为恒定值, 降低总热阻 R_{Total} 应从



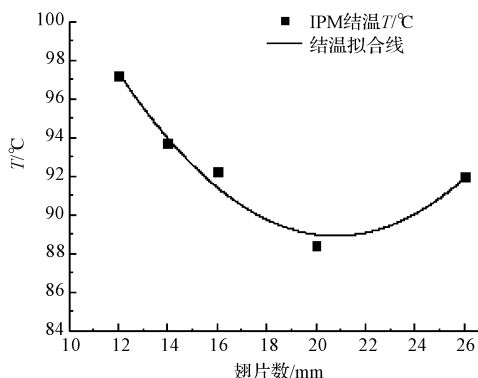
(a) 不同基板厚度对IPM结温的影响



(b) 不同翅片高度对IPM结温的影响



(c) 不同翅片厚度对IPM结温的影响



(d) 不同翅片数对IPM结温的影响

图 6 散热器几何参数变化对 IPM 结温的影响

不同的基板厚度对 IPM 结温的影响如图 6(a) 所示, IPM 结温随着基板厚度的增加而呈指数下降。当基板厚度超过 12 mm 后, IPM 结温下降速度明显降低。

不同的翅片高度对 IPM 结温的影响如图 6(b) 所示, 起初 IPM 结温随着翅片高度的增加而降低; 当翅片高度高于 80 mm 时, 结温不再出现明显下降。

不同的翅片厚度对 IPM 结温的影响如图 6(c) 所示, IPM 结温随着翅片厚度的增加呈抛物线形状变化, 先下降后上升。

不同的翅片数对 IPM 结温的影响如图 6(d) 所示, IPM 结温随着翅片数的增加呈抛物线形状变化, 先下降后上升。

与其他 3 种情况相比, 翅片高度的变化对 IPM 结温影响最小, 且 117 mm 的翅片高度出现冗余。出于减小散热器重量和包络体积的目的, 本研究将散热器翅

降低 R_{c-HS} 和 R_{HS} 两方面入手, 本次研究对象的散热器长度和宽度与 PCB 板以及设备外壳的长度和宽度相对应, 从降低调整成本的角度出发, 仅考虑调整散热器的基板厚度、翅片高度、翅片厚度及翅片数 4 个参数。

调整数值仿真模型中的散热器的相应参数, 求解 IPM 结温随几何参数调整的变化趋势, 结果如图 6 所示。

片高度降低为 80 mm。翅片厚度、翅片数以及基板厚度为总热阻 R_{Total} 主要影响因素, 为进一步地研究基板厚度、翅片数及翅片厚度对 IPM 温升的影响, 笔者结合图 6 中的结果, 选取优化参数及区间如表 2 所示。

表 2 散热器的参数优化区间

参数名称	优化区间
基板厚度 /mm	[7, 12]
翅片数 / 个	[16, 23]
翅片厚度 /mm	[1, 2.5]

2.2 试验方案设计

根据之前的单因素试验结果, 最后笔者选取基板厚度 x_1 、翅片数 x_2 和翅片厚度 x_3 这 3 个散热器几何参数作为优化变量参数, 进行以 IPM 温升为响应值的试验设计。由于 3 个因素对热阻的影响均为非线性, 增加各个因子的试验水平数有利于获取更多的信息。结合

参数的优化区间,初步定为 8 水平。如果进行全因子试验设计,需要 512(8³) 次,如果做正交试验设计,即使不考虑因素之间的交互作用,利用 L₆₄(8⁹) 安排试验,依然需要 64 次。针对多因素高水平的试验设计,均匀设计法可以有效减少试验次数且保证试验点的在参数空间内均匀分布,对于 3 因素 8 水平,只须利用 U₈(8³) 安排 8 次试验即可:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

式中:β₀—常数项;β_i—线性项系数;β_{ii}—平方项系数;β_{ij}—交互项系数;k—变量个数;x_i,x_j—试验的设计变量;y—响应目标值。

由式(3)可知,参数回归的二阶响应模型中有 10 个项系数,因此试验次数不应小于 10。本研究增加翅片厚度为 16 水平,利用 U₁₆(16³) 均匀设计表进行混合水平的方案设计,并在 Flotherm 中进行热仿真数值模拟获取各试验点的温升响应值,试验因素水平、试验方案以及数值仿真结果如表 3 所示。

表 3 试验因素水平及试验方案、结果

方案	基板厚度 x ₁ /mm	翅片数 x ₂ /mm	翅片厚度 x ₃ /mm	结温 T/°C	温升 y/°C
0	8	16	1	92.25	57.25
1	7(1)	18(3)	1.7(8)	89.31	54.31
2	7(1)	20(5)	2.5(16)	99.02	64.02
3	7.7(2)	23(8)	1.6(7)	91.18	56.18
4	7.7(2)	17(2)	2.4(15)	90.13	55.13
5	8.4(3)	19(4)	1.5(6)	88.6	53.6
6	8.4(3)	22(7)	2.3(14)	99.73	64.73
7	9.1(4)	16(1)	1.4(5)	88.05	53.05
8	9.1(4)	18(3)	2.2(13)	88.82	53.82
9	9.8(5)	21(6)	1.3(4)	86.89	51.89
10	9.8(5)	23(8)	2.1(12)	96.71	61.71
11	10.5(6)	17(2)	1.2(3)	87.8	52.8
12	10.5(6)	20(5)	2(11)	89.65	54.65
13	11.2(7)	22(7)	1.1(2)	86.48	51.48
14	11.2(7)	16(1)	1.9(10)	86.52	51.52
15	11.9(8)	19(4)	1(1)	87.51	52.51
16	11.9(8)	21(6)	1.8(9)	88.78	53.78

2.3 响应面回归与检验

本研究利用 Design-Expert 对试验数据进行二次多项式回归运算处理,可得基板厚度 x₁、翅片数 x₂ 和翅片厚度 x₃ 3 个自变量与 IPM 温升之间响应面数学模型如下式所示:

$$y = +158.79224 - 1.96338x_1 - 5.91047x_2 - 54.93938x_3 -$$

$$0.038269x_1x_2 - 0.14681x_1x_3 + 2.09080x_2x_3 + 0.12571x_1^2 + 0.087405x_2^2 + 5.87088x_3^2 \quad (4)$$

试验数据和数学模型预测值的对比如图 7 所示。

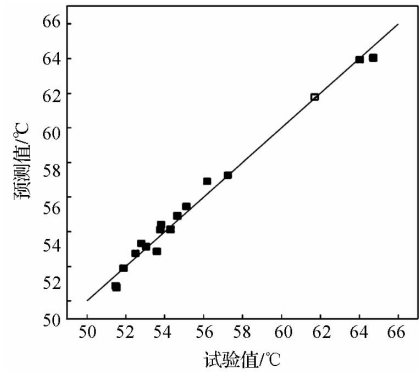


图 7 试验值与预测值关系图

为验证数学模型是否能真实反应响应面与设计因素间的统计规律,本研究对模型进行方差分析,当 P 的值小于 0.05 时,即认为该指标是显著的;当 P 的值小于 0.01 时,即认为该指标是高度显著的^[13]。方差分析如表 4 所示。

表 4 方差分析

来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P
x ₁	3.73	1	3.73	7.44	0.0295
x ₂	19.12	1	19.12	38.15	0.0005
x ₃	91.61	1	91.61	182.83	< 0.0001
x ₁ x ₂	0.19	1	0.19	0.38	0.5553
x ₁ x ₃	0.047	1	0.047	0.094	0.7676
x ₂ x ₃	54.28	1	54.28	108.32	< 0.0001
x ₁ ²	0.98	1	0.98	1.95	0.2056
x ₂ ²	1.92	1	1.92	3.82	0.0914
x ₃ ²	6.62	1	6.62	13.21	0.0083
模型	275.23	9	30.58	61.03	< 0.0001
残差	3.51	7	0.5	—	—
总模型	278.74	16	—	—	—

本次预测模型 P 值小于 0.0001,为高度显著。从系数项的 P 值来分析,x₁ 达到显著水平,x₂、x₃ 及 x₂x₃ 达到高度显著水平,即基板厚度 x₁ 对温升 y 产生了显著的影响,翅片数 x₂、翅片厚度 x₃ 以及两者的交互作用对温升 y 有高度显著的影响。

本研究采用拟合优度检验对模型进一步分析,可决系数 R² 为 0.9874,说明预测值和试验值有高度的相关性,模型拟合程度良好,误差小。调整可决系数 R²_{adj} 为 0.9712,说明该模型能解释 97.12% 响应值的变化,有总变异的 2.88% 不能用该模型来解释。

根据获取的温升回归模型可以绘制出函数关于自变量的响应曲面如图 8 所示,分别为翅片厚度 x₃ 等于

1 mm, 1.5 mm, 2 mm 时的温升响应面及对应的温升等温线图。

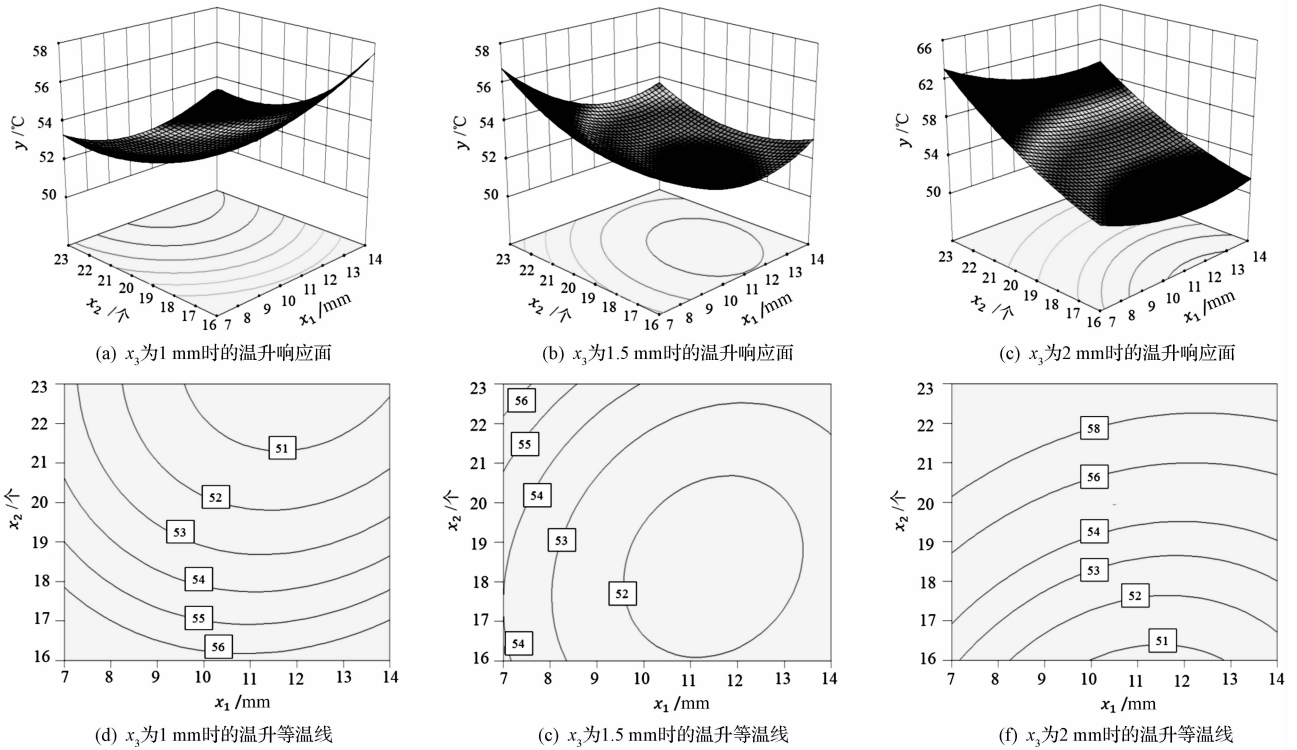


图 8 不同翅片厚度时数学模型的温升响应面及等温线图

3 结果分析

散热器的优化应考虑质量的变化。在散热器长度不变的情况下,散热器质量与散热器横截面面积的关系如下式所示,可知质量与横截面面积呈正相关:

$$m = V\rho = LS \times 10^{-9} \times \rho = L(Wx_1 + Hx_2x_3) \times 10^{-9} \times \rho \quad (5)$$

优化后与优化前散热器质量比如下式所示:

$$y_m = \frac{m}{m_0} = \frac{S}{S_0} = \frac{100x_1 + 80x_2x_3}{100 \times 8 + 117 \times 16 \times 1} = \frac{100x_1 + 80x_2x_3}{2\ 672} \quad (6)$$

式中: m —散热器质量, V —散热器体积, ρ —散热器材料密度, L —散热器基板长度, S —散热器横截面面积, W —散热器基板宽度, H —散热器翅片高度, y_m —优化后与优化前散热器质量比, m_0 —优化前的散热器质量, S_0 —优化前的散热器横截面面积。

设置如下约束:

$$\begin{cases} 7 \leq x_1 \leq 12 \\ 16 \leq x_2 \leq 23 \\ 1 \leq x_3 \leq 2.5 \\ y_m \leq C \end{cases} \quad (7)$$

其中, C 取值如表 5 所示。

利用 Design-Expert 可得优化解如表 5 所示。

表 5 优化解集

参数名	C		
	1	1.1	∞
基板厚度 x_1 /mm	9.92	11.56	11.4
翅片数 x_2	21	21	16
翅片厚度 x_3 /mm	1.00	1.06	1.97
重量比 y_m	1.00	1.10	1.37
模型预测温升 y /°C	51.52	51.13	50.73
CFD 仿真温升/°C	52.17	51.56	51.53
误差 e /(%)	1.26	0.84	1.57
结温降幅/°C	5.03	5.64	5.67

参见表 5,在不增加重量即 $y_m \leq 1$ 的条件下,温升最高降低 5.03 °C;在允许重量增加不超过 10% 即 $y_m \leq 1.1$ 的条件下,温升最高降低 5.64 °C;在不限制增加重量的条件下,温升最高降低 5.67°C;此时重量增加 37%;表明随着质量增加,温升并未出现大幅度下降。模型预测温升与 CFD 仿真温升的误差分别为 1.26%、0.84%、1.57%,表明响应面模型较为准确地拟合了 IPM 温升与散热器参数之间的数学关系。综合图表,质量增加 3.2%,响应面模型预测误差为 0.07%,结温降幅为 5.48 °C,较优化前的方案,IPM 温升得到有效降低。调整参数后的优化方案及优化效果对比如表 6 所示。

表 6 方案优化前、后对比

参数	优化前	优化后
翅片高度/mm	117	80
基板厚度/mm	8	10
翅片数	16	20
翅片厚度/mm	1	1.1
模型预测温升/°C	—	51.88
CFD 仿真温升/°C	57.2	51.72
结温降幅/°C	—	5.48
误差/(%)	—	0.07
重量	m_0	$1.032m_0$

4 结束语

针对伺服驱动单元 IPM 温升过高的问题,本研究利用均匀设计、多项式拟合及热仿真相结合的方式对散热器几何结构参数进行试验设计、结果分析和优化处理,获取 IPM 温升的响应回归模型并进行了验证。本研究在控制散热器质量的同时,得到了几何结构参数的优化解:翅片高度为 80 mm,基板厚度为 10 mm,翅片数为 20 个,翅片厚度为 1.1 mm,IPM 温升从 57.2 °C 降到 51.72 °C。最终的优化方案在 Flotherm 中进行仿真验证,结温降幅为 5.48 °C,失效率可降低约 20% ~ 30%,具有重要的工程应用价值。

本次优化方案中采用响应面分析法,通过均匀设计较少的试验次数即可获得小区域内响应值的多项式拟合模型,可以在优化区间内对各因子进行连续分析,计算方便,且更容易获取全局最优解。笔者研究的伺服驱动单元散热器在结构上具有通用性,因此本研究提出的模型和相关方法可以为类似结构散热器优化提供参考和借鉴。

参考文献 (References):

[1] 于慈远,于湘珍,杨为民. 电子设备热分析/热设计/热测试技术初步研究[J]. 微电子学,2000,30(5):334-337.

- [2] LIU P, TONG L, HUANG J, et al. Thermal Simulation and Analysis of Intelligent Power Module (IPM) Package[C]// International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. Guilin: IEEE,2012:556-559.
- [3] 史贤忠,杜佳星,刘纘阁,等. 伺服驱动单元散热器的热设计优化[J]. 机电工程,2014,31(4):473-476.
- [4] RAO R V, WAGHMARE G G. Multi-objective design optimization of a plate-fin heat sink using a teaching-learning-based optimization algorithm[J]. **Applied Thermal Engineering**,2015,76(2):521-529.
- [5] 郝晓红,胡争光,侯 琼,等. 基于多目标遗传算法的串联通道水冷散热器优化设计[J]. 机械工程学报,2013,49(10):151-155.
- [6] 赵 宁,王 磊. 基于遗传算法的直升机滑油散热器优化设计[J]. 机械科学与技术,2014,33(1):36-41.
- [7] 陈萨如,朱 丽,孙 勇. 高热流密度器件散热技术的研究进展[J]. 液体机械,2015,43(5):39-45.
- [8] ARULARASAN R, VELRAJ R. Modeling and simulation of a parallel plate heat sink using computational fluid dynamics [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2010,51(1-4):415-419.
- [9] MANIVANNAN S, DEVI S P, ARUMUGAM R, et al. Multi-objective optimization of flat plate heat sink using Taguchi-based Grey relational analysis[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2011,52(5):739-749.
- [10] 李登万,陈洪涛,冯锦春,等. 基于均匀设计法的精密车削参数优化[J]. 机械工程学报,2015,51(3):206-212.
- [11] 周 杰,罗 艳,王 珣,等. 基于响应面的封头冲压成形工艺多目标优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2016,46(1):205-212.
- [12] LEE S. Calculating Spreading Resistance in Heat Sink[J]. **Electronics Cooling**,1998,4(1):30-33.
- [13] ZHAO W, QIU Z. An efficient response surface method and its application to structural reliability and reliability-based optimization [J]. **Finite Elements in Analysis & Design**,2013,67(5):34-42.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

金 健,王 勇,张航军,等. 基于响应面的伺服驱动单元散热器优化研究[J]. 机电工程,2016,33(11):1295 - 1301.

JIN Jian, WANG Yong, ZHANG Hang-jun, et al. Optimization of the heat sink in servo drive unit using response surface method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(11):1295 - 1301.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>