

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.08.003

基于 ICEPAK 的 EPS 控制器的散热优化研究^{*}

刘振华, 谢伟东^{*}, 李 芳

(浙江工业大学 车辆工程研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对 EPS 控制器中 MOSFET 管过热而造成控制器失效的问题,对 EPS 控制器的散热性能进行了分析。基于传热学理论,计算 MOSFET 的功率损耗并系统分析了控制器的散热路径,初步选择了散热器的参数并利用三维设计软件建立了控制器的仿真模型,运用热分析软件 ICEPAK 对控制器的仿真模型进行了数值模拟,得到了控制器稳态工作条件下的温度场。同时结合影响散热器散热性能的因素,分别以散热器热阻、质量和 MOSFET 温度为优化目标对散热器结构参数进行了优化。最后利用高低温交变试验箱和温度传感器,对控制器在高温、负载下的散热器底板温度进行了测量并记录试验数据。实验结果表明,控制器温度场的仿真是准确的,两者最大误差在 15% 以内,证明优化后的散热器结构是合理的,同时也验证了模拟仿真对控制器散热设计的可行性和有效性。

关键词:EPS 控制器;MOSFET;散热器;ICEPAK

中图分类号:U464.138⁺.2;TH122;TK124

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)08-0928-06

Heat dissipation optimization of EPS controller based on ICEPAK

LIU Zhen-hua, XIE Wei-dong, LI Fang

(Institute of Vehicle Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of controller failure caused by overheat of MOSFET tube in EPS controller, the heat dissipation performance of EPS controller was analyzed. Based on heat transfer theory, the power loss of the MOSFET was calculated and the thermal dissipation path of the controller was analyzed, the initial parameters of the radiator was choiced and the simulation model of the controller was established with the 3D design software. Then the thermal analysis software ICEPAK was used to numerical simulate the temperature field of the controller under steady state operate. Combining with the factors that affect the radiation performance of the radiator, the quality and the thermal resistance and the temperature of the MOSFET was choiced as the optimization object to optimize the radiator structure parameters of the EPS controller. At last, the high and low temperature alternating test box and the temperature sensor was used to test the bottom board temperature of the radiator as the controller operate in high temperature and load, the test data was recorded and compared with the simulation results. This results indicate that the simulation is right, the maximum error is within 15%, the optimized structure of the radiator is reasonable and verify the feasibility and the effective of the simulation to the thermal design.

Key words: EPS controller; MOSFET; heat dissipation; ICEPAK

0 引 言

EPS 控制器安装在汽车仪表盘下方,通电后处于长期工作状态,为保证控制器的性能,要求控制器中的电子元器件和安装结构的温度保持稳定。EPS 控制器

中的主要发热元器件是控制无刷直流电机的 MOSFET,在原地转向等大负载工况下,电机控制器中的脉冲电流会引起 MOSFET 温度在短时间内急剧上升,超过 MOSFET 的最大允许结温将导致 MOSFET 失效,影响控制器的工作。针对 EPS 控制器的散热研究,高峰

收稿日期:2016-01-12

基金项目:浙江省科技计划资助项目(2014C31101);浙江省重点实验室计划资助项目(2013E10031)

作者简介:刘振华(1988-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事电子设备热设计及分析技术方面的研究。E-mail:lzhvehicle@163.com

通信联系人:谢伟东,男,教授。E-mail:xwd@zjut.edu.cn

等^[1]运用 Flotherm 软件仿真分析了典型工况下控制器的动态温升,并进行了实验验证,表明控制器的温升有非单调变化的现象;程寿国^[2]分析了控制器在室温工作条件下,不同结构参数时同一节点的温度值,优化了控制器的散热结构,优化后的节点温度比最初的温度降 3 ℃,提高了控制器的散热能力;Rüdiger B 团队^[3]指出了 EPS 控制器的散热设计是影响其寿命和可靠性的关键因素,并分析和对比了 MOS 管散热所采取的设计在成本、热循环、组装和集成的耐用性的优缺点;Kiep A 团队^[4]分析了电机驱动电路中的 MOSFET 及 MOSFET 管驱动器 IC 需要满足的散热条件,以及成本和空间的限制等因素,并介绍了 EPS 控制器对半导体材料的选择。

国内外学者多侧重于分析影响散热器散热性能的因素,本研究采用有限单元法,运用理论设计和仿真相结合的方式,设计 EPS 控制器的散热机构,并通过实验对其进行验证,可为 EPS 控制器的散热设计提供参考。

1 EPS 控制器的散热分析

根据《汽车电动助力转向装置用控制器技术要求和试验方法》,EPS 控制器必须具有防水、防尘的功能,因此其采用密封的结构。控制器工作时,电路板上的 MOSFET 在有限的密闭空间产生极高的热流密度,影响 MOSFET 工作的稳定性,因此本研究在需要精确计算 MOSFET 功率的基础上,采取合适的散热方式,使 MOSFET 的温度稳定在结温以下,保证控制器工作的稳定性和可靠性。

1.1 MOSFET 的功率

无刷直流电机的控制器采用三相六状态的导通方式,控制器 MOSFET 工作方式示意图如图 1 所示。

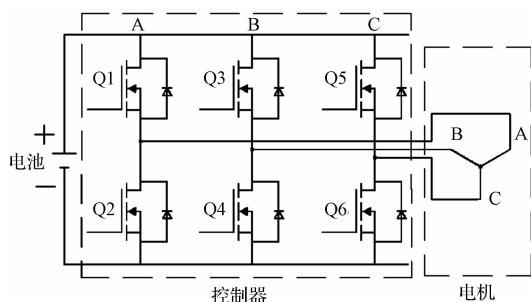


图 1 控制器 MOSFET 工作方式示意图

控制器的功率模块采用由 6 个 MOSFET 管构成的三相桥式逆变电路构成,分为上管和下管,采用 H_PWM-L_ON 的调制方式控制 A/B/C 三相电流输出为

转向器提供动力,MOSFET 管的导通顺序为:Q5Q2→Q3Q2→Q3Q6→Q1Q6→Q1Q4→Q5Q4→Q5Q2。

控制器功率损耗主要集中在功率区域的 MOSFET 上,器件的损耗包括通态损耗和开关损耗^[5]。

通态损耗:

$$P_{sc} = I_s^2 R_{ds} d \quad (1)$$

式中: I_s —电流幅值, d —mos 管输出时最大占空比, R_{ds} —通态电阻。

开关损耗:

$$P_{sw} = \frac{1}{2} V_s I_s f_c t_s \quad (2)$$

式中: V_s —电压幅值; t_s —总开关时间,包括开通时间和关断时间; f_c —开关频率。

由控制器的工作原理可知,在 H_PWM-L_ON 的调制方式下,每相导通 120°,在 120°导通区间,上桥臂开关采用 PWM 调制,下桥臂保持恒通,导通过程占整个电机工作周期的 1/3,计算 MOSFET 管的上、下管的功耗分别为:

上管功耗:

$$P_1 = (P_{sc} + P_{sw})/3 \quad (3)$$

下管功耗:

$$P_2 = I_s^2 R_{ds}/3 \quad (4)$$

MOSFET 型号采用 IR 公司的 AUIRFS8403 专用汽车级 MOSFET,其最大允许结温是 175 ℃,高温是对晶体管破坏性最强的因素,因此晶体管的结温需要降额,晶体管最高结温按第三等级降额使用,故 MOSFET 降额后的最高结温是 145 ℃。晶体管的通态电阻随温度的升高逐渐升高,为保证晶体管的安全使用,本研究采用降额后的最高结温 145 ℃时的通态电阻,查表可知,此时晶体管的通态电阻近似为 5.6 mΩ,无刷直流电机 V_s 为 12 V, I_s 为 45 A,电机转矩输出最大时 PWM 频率是 10 kHz,占空比 d 为 90%,计算得控制器的上管功耗为 3.6 W,下管功耗为 3.8 W。

1.2 选择散热方式

电子设备机箱的自然冷却包括传导、自然对流和辐射换热,自然冷却有安全、可靠的优点,因此在选择电子设备的冷却方式时,在满足温升要求的前提下优先采用。AUIRFS8403 型号的 MOSFET 采用贴片式封装,焊接在印制电路板上,其耗散功率经 MOSFET 的散热基板传至印制电路板,为了使 MOSFET 温度不超过结温,需要采取措施及时带走 MOSFET 传至印制电路板的热量。故本研究在印制电路板下方加装散热器,在印制电路板和散热器之间加装导热硅胶垫实现绝缘,MOSFET 产生的热量以导热方式经印制电路板

和导热硅胶垫传至散热器,传导至散热器的热量通过散热器和空气对流和辐射换热。

MOSFET 安装模型如图 2 所示。

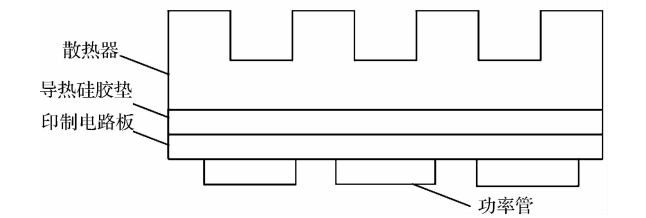


图 2 MOSFET 安装模型

此时电子设备内部在热源和终端散热器之间建立了热流路径,电子元件的热增益等于热耗散,控制器工作在热平衡状态。

2 ECU 散热器选型

在电子设备热设计中,为了强化电子元器件的散热能力,本研究采用了各种形式的肋片散热器以增大元器件的散热面积,在设备的总尺寸、质量、和所耗材料增加不多的情况下,采用肋片式散热器的散热量可增加一个数量级,考虑加工工艺和制造成本,散热器的肋片采用矩形截面纵向肋。散热器是由铝合金板料经冲压工艺及表面处理而成,一般是标准件,也可提供型材,根据需求切割成一定长度而制成非标准的散热器。在初步设计时,根据控制器的体积和散热器允许的最大热阻值选择散热器的型号,然后结合具体要求对散热器的具体参数进行优化。

2.1 计算热阻

由 MOSFET 的安装模型以及热流路径可以对功率器件到散热器结构之间的热阻进行简化,故安装散热器的热阻网络图如图 3 所示^[6]。

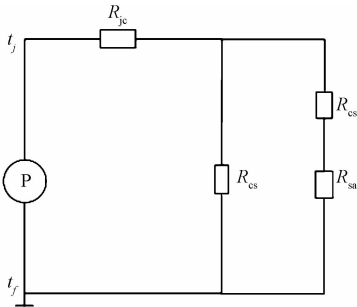


图 3 安装散热器的热阻网络图

由于晶体管外壳太小,只有很少热量可以通过壳体排走,故忽略这条散热路径,由热阻网络图可知:

$$R_t = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa} \tag{5}$$

式中: R_{jc} —内热阻即结点至元件壳体的热阻; R_{cs} —安

装热阻,元件壳体至散热器的热阻,通常包括垫片热阻和接触热阻; R_{sa} —散热器热阻即散热器至环境的热阻。

查表可知,AUIRFS8403 的 R_{jc} 为 $1.52\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,MOSFET 在 PCB 法向上的热流通路是并联回路,因此在法向上其并联等效热阻约为 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

2.1.1 计算安装热阻

MOSFET 固定在 PCB 上,通过导热硅胶垫与散热器接触,故 R_{cs} 还包括 PCB 热阻,假设元器件壳体与散热器之间接触良好,忽略接触热阻,故安装热阻包括 PCB 热阻和导热硅胶垫热阻。

PCB 是复杂的多层结构,铜和 FR4 的导热系数差别较大,PCB 整体的导热系数具有很强的各向异性。为了增加 PCB 在法线方向上的导热系数,在 PCB 上设计热通孔,热通孔提高了 PCB 板厚度方向的传热效果,因此在计算 PCB 的法向导热率时,需要考虑热通孔的作用^[7],相关参数如表 1 所示。

表 1 研究对象参数值

名称	符号	数值
过孔外圆直径/mm	D	0.35
过孔内圆直径/mm	d	0.3
PCB 板的厚度/mm	t	1.6
PCB 板的宽度/mm	L	73
PCB 板的长度/mm	W	66
过孔的数量	N	135
锡的导热率/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^{\circ}\text{C})^{-1})$	K	67
PCB 铜层导热率/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^{\circ}\text{C})^{-1})$	K_{Cu}	390
PCB 板的导热率/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^{\circ}\text{C})^{-1})$	K_{FR4}	0.29
镀铜的导热率/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^{\circ}\text{C})^{-1})$	K_{Cu}	390
PCB 板铜层的厚度/ μm	t_e	35
PCB 板 FR4 的厚度	t_c	2
PCB 板铜层的数量	n	2

单个热通孔热阻:

$$R_{\text{via}} = \frac{t}{k_{\text{cu}} \pi (D^2 - d^2) + k_f \pi d^2} \tag{6}$$

式中: R_{via} —单个热通孔的热阻; t —PCB 的厚度,也是热通孔的长度; k_{cu} —铜的导热系数; k_f —填充孔材料焊料的导热系数; D, d —镀铜层是通孔镀铜层的外径和内径。

假设带热通孔的 PCB 在法向上的热传递是一维的,则含热通孔的印制电路板的法向热阻等效于 N 个热通孔的热阻与 PCB 不含通孔区域的热阻的并联:

$$\frac{1}{R} = \frac{N}{R_{\text{via}}} + \frac{k_n (A - \pi d^2)}{t} \tag{7}$$

式中: R —含热通孔的 PCB 的热阻, N —热通孔个数, k_n —不含热通孔部分的 PCB 的导热率, A —印制电路板面积。

假设带热通孔的 PCB 在法向上的热传递是一维的,则不含热通孔部分的热阻是铜层的热阻和 FR4 热阻的串联,其等效导热率为:

$$k_n = \frac{t}{t_e/k_{CU} + t_c/k_{FR4}}$$

(8)

式中: t_e —铜层总厚度, t_c —FR4 厚度, k_{FR4} —FR4 导热率。

代入表 1 中的参数数值,PCB 法向热阻为 0.16 °C/W。

为了实现散热器与元器件壳体之间的电隔离,笔者在散热器与 PCB 之间安装导热硅胶垫,采用导热系数为 3 的 MSP 系列的导热硅胶垫,厚度 0.2 mm,垫片热阻为 0.02 °C/W。

2.1.2 计算散热器热阻

AUIRFS8403 型号 MOSFET 管的最高结温为 145 °C,即 $T_{jmax} = 145\text{ °C}$,设计使用时环境温度为 85 °C,即 $T_a = 85\text{ °C}$,则总热阻:

$$R_{sa} = (T_{jmax} - T_a) / P$$

(9)

式中: T_{jmax} —MOSFET 最高结温, $T_{jmax} = 145\text{ °C}$; T_a —MOSFET 使用时环境温度, $T_a = 85\text{ °C}$; P —MOSFET 管总功率。

代入数据,计算 R_{sa} 为 2.7 °C/W,则散热器的热阻为 2.27 °C/W。

2.2 选择散热器

散热器是以对流和辐射散热为主,在自然对流情况下,要考虑辐射散热的影响,散热器厂家对不同型号的散热器给出热阻值或给出有关曲线,并且给出在不同散热条件下的不同热阻值,按照散热器的工作条件,查所选散热器的散热曲线,曲线上查出的值小于计算值时,就找到了合适的散热器。根据散热器允许的最大热阻,笔者初步选择散热器的型号为 SRX-YEE,如图 4 所示。

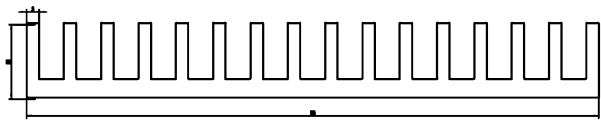


图 4 SRX-YEE 散热器

散热器的高度为 15 mm,基座厚度为 4.5 mm,肋片数目为 16,肋片厚度为 2 mm。

3 控制器热仿真

计算机辅助热分析是以计算流体力学和数值传热学为基础的一项技术,设计人员在电子设备热设计中

可以对各种方案进行热分析、计算和比较,优选出热特性较好的设计方案,缩短了设计周期并提高了电子设备的热可靠性。目前,热分析的软件种类繁多,ICE-PAK 软件使用的求解器是来自 FLUENT 软件,是建模、网格生成、求解和后处理汇集于一体的分析软件,能够计算各种不同的物理模型,为电子产品的冷却提供快速、精确的热分析结果。

3.1 建立控制器三维模型

本研究在用 UG 建立控制器的热模型时,忽略安装螺钉等局部细节,以及发热不明显的芯片和电阻,根据 MOSFET 的具体尺寸,所建立 MOSFET 的详细模型如图 5 所示,并通过 ANSYS 将简化后的模型导入 ICE-PAK 中。

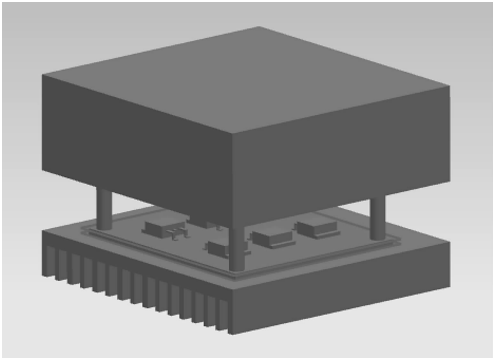


图 5 控制器的三维模型

3.2 热仿真计算结果

通过仿真控制器在最大功率时候,在 85 °C 时候的温度状况,控制器的温度云图如图 6 所示。

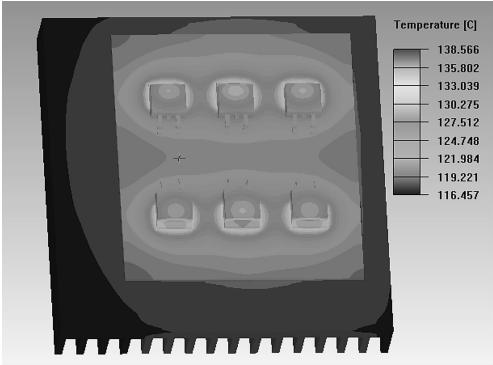


图 6 散热器的温度云图

MOSFET 结点的最高温度是 138.566 °C,小于 MOSFET 的结温要求的极限值 145 °C,此时散热器的温度云图如图 6 所示。

3.3 散热器的优化分析

散热器的结构参数影响 MOSFET 的散热效果,合理的散热器结构可以使控制器整体的温度分布更加的

均匀,提高控制器工作的可靠性。因此本研究在初步满足 MOSFET 散热需求的基础上,适当考虑散热器的成本和加工方式,对散热器的结构参数进行优化,得到更合理的散热器结构。

散热器肋片的高度、厚度以及肋片的数目均会影响散热器的散热效果,因此不同优化目标的散热情况

如表(2~4)所示。本研究分别以以散热器基座的厚度、散热器的高度、肋片的间距以及肋片的厚度作为优化变量,以散热器的热阻和 MOSFET 温度作为优化目标^[8]。同时考虑散热器的重量对散热器成本的影响,在满足散热器性能的同时,应降低散热器的成本,因此优化目标包括散热器的重量。

表 2 以散热器热阻为优化目标的散热情况

序号	热阻/℃·W ⁻¹	质量/g	MOSFET 温度/℃	基座厚度/mm	肋片数目	肋片厚度/mm	肋片高度/mm
1	1.65	189.4	138.6	4.5	16	2	15
2	1.634	197.7	138.2	4.9	15	2.2	15
3	1.643	197	138.4	5	16	2	15
4	1.646	185.8	138.5	4.6	15	2	15
5	1.633	191.6	138.2	5	15	2	14

表 3 以 MOSFET 温度为优化目标的散热情况

序号	MOSFET 温度/℃	热阻/(℃·W ⁻¹)	质量/g	基座厚度/mm	肋片数目	肋片厚度/mm	肋片高度/mm
1	138.6	1.65	189.4	4.5	16	2	15
2	138.2	1.631	183.8	4.9	14	2	15
3	138.3	1.635	176.8	5	12	2	15
4	137.3	1.588	197.7	4.9	14	2	17
5	136.3	1.54	201.2	5	12	2	19

表 4 以散热器质量为优化目标的散热情况

序号	质量/g	热阻/(℃·W ⁻¹)	MOSFET 温度/℃	基座厚度/mm	肋片数目	肋片厚度/mm	肋片高度/mm
1	189.4	1.65	138.6	4.5	16	2	15
2	151.8	1.682	139.2	3.4	14	2	14
3	145.9	1.65	138.5	3.2	12	2	15
4	136	1.673	138.9	3	11	2	15
5	139.2	1.659	138.7	3.5	10	2	15

结合散热器的加工工艺、成本和控制器的散热效果,本研究选择散热器参数为以质量为优化目标的第五组数据:基座厚度为 3.5 mm,肋片数目为 10,散热器的高度为 15 m,肋片的厚度为 2 mm,此时 MOSFET 的温度低于 145 ℃,符合控制器散热需要。但优化后的散热器参数没有对应的型号且考虑与散热器壳体的连接,故散热器按优化后的参数加工。

优化后的散热器的温度云图如图 7 所示。

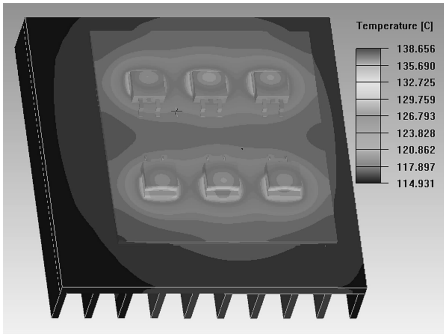


图 7 优化后的散热器温度云图

4 实验验证与分析

为了验证散热器优化后的散热性能,同时也为了

验证模拟仿真的准确性,根据《汽车电动助力转向装置用控制器技术要求和试验方法》中环境试验部分关于高温试验的要求,室内控制器在 85 ℃ 的温度下放置 96 h 后,直接在试验箱中进行功能实验。

实验设备如图 8 所示。



图 8 置于温箱中的控制器和实验设备

设备包括:高低温交变试验箱、贴片式温度传感器、温控仪、模拟负载电机,由于 MOSFET 贴装在 PCB 表面上,不能直接测量温度,笔者在散热器底板处设置测量点,用贴片式温度传感器固定在散热器的底板表面测量温度,待控制器在试验箱中放置 96 h 后,用模拟负载电机使控制器工作在满载状态,利用温度传感器和温控仪来显示控制器底板的温度,将散热器上 6 个 MOSFET 管安装正下方的位置以及散热器两边的铝基板侧面作为测量点,待温控仪表上显示的温度稳定时,记录下各测量点的温度,将记录的实验数据并与仿真数据进行对比。

对比结果如图 9 所示。

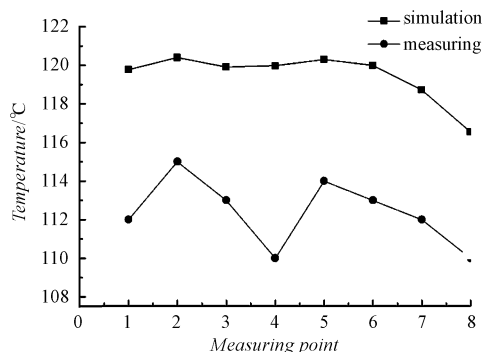


图9 各采集点温度测量结果和仿真结果

实际测量的温度低于模拟仿真的温度,初步分析是模型简化误差和传感器安装位置误差导致,实际测量的温度和模拟仿真的温度最大误差在 15% 以内^[9],验证了散热器模型简化和仿真的正确性, MOSFET 的实际温度在 145 °C 以下,通过该数据可知控制器散热结构合理,散热性能良好。

5 结束语

本研究运用传热学理论分析了 EPS 控制器的散热情况,选择了 EPS 控制器的散热器的型号,利用 ICEPAK 仿真了控制器的温度场并结合优化目标对散热器结构进行了优化,最终通过实验进行了验证,得出如下结论:

(1) EPS 控制器的主要发热单元是控制无刷直流电机的 MOSFET,针对优化后的散热器, MOSFET 的温度稳定在 145 °C 以下,证明在自然冷却条件下,该散热器满足控制器的正常工作要求。

(2) 仿真散热器的模拟仿真对散热器的选型和优化有着重要的指导作用,在额定工况下,仿真得到的散热器底板温度和实验测量的最高温度最大误差不超过 15%,符合要求;

(3) 散热器基座的厚度,肋片的间距、厚度和高度是影响散热器散热性能的关键因素,为进一步提高散热器的散热性能,在后期工作中可针对这些因素进一步优化散热器的参数,提高散热器的散热能力。

参考文献 (References):

- [1] 罗颖,陈慧,高峰,等. EPS 控制器散热片设计优化 [C]//2009 中国汽车工程学会年会论文集. 烟台:中国汽车工程学会,2009:6.
- [2] 程寿国. 汽车电动助力转向系统控制器热分析与结构优化设计 [J]. 机械设计,2012,29(12):54-57.
- [3] RÜDIGER B, KLAUS O, FRANK O, et al. Options for electric power steering modules a reliability challenge [J]. *Seigneurs DE Bl aim mobile*,2007(791):52-56.
- [4] KIEP A, KÖPPL B, PÜRSCHEL M, et al. Seamless solution for electronic power steering [R]. Detroit: SAE Technical Paper,2006.
- [5] KRISHNAN R. 永磁无刷电机及其驱动技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [6] 余建祖,高红霞,谢永奇. 电子设备热设计及分析技术 [M]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [7] SHABANY Y. 传热学:电力电子器件热管理 [M]. (美)余小玲,吴伟烽,刘飞龙,译. 北京:机械工业出版社,2013.
- [8] 付桂翠,高泽溪. 影响功率器件散热器散热性能的几何因素分析 [J]. 电子器件,2003,36(4):354-356+460.
- [9] 刘兆洪,庞传和. 飞行器设备热设计、试验验证方法探讨 [J]. 航天器环境工程,2009,26(S1):41-44.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

刘振华,谢伟东,李芳. 基于 ICEPAK 的 EPS 控制器的散热优化研究 [J]. 机电工程,2016,33(8):928-933.

LIU Zhen-hua, XIE Wei-dong, LI Fang. Heat dissipation optimization of EPS controller based on ICEPAK [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(8):928-933.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>