

DOI: 10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2023.03.035

# 弹上大功率伺服驱动器散热设计与仿真

刘若愚,陶键,徐志伟,赵睿,马成成

(上海航天控制技术研究所,上海 201109)

**摘要:**针对弹上大功率伺服驱动器功率模块的散热问题,提出一种采用相变材料储热的温控方案。通过对功率模块的发热量和所需相变储热材料体积的理论计算,分析该方案的可行性;利用仿真软件对驱动器进行建模并对相变材料储热方案进行仿真,对比分析驱动器自然散热和采用相变材料储热的效果。结果证明:该方案对于大功率伺服驱动器的温控效果显著,能够将功率模块温度控制在正常工作范围内。

**关键词:**伺服驱动器;IGBT 模块;散热;相变材料;热仿真

**中图分类号:**TJ765.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0149-03

## Heat Dissipation Design and Simulation of High-power Servo Driver on Missile

LIU Ruoyu, TAO Jian, XU Zhiwei, ZHAO Rui, MA Chengcheng

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Aimed at the heat dissipation problem of the high-power servo driver's power module on the missile, this paper proposes a temperature control scheme using phase change material to store heat. The feasibility of the scheme was analyzed by theoretical calculation of the heat generation of the power module and the volume of the required phase change material. By simulation software, the driver was modeled and the scheme of thermal storage using phase change material was simulated, and comparison on the effects between the natural heat dissipation and phase change material heat storage was performed. The results show that the proposed scheme has a significant effect for the high power servo driver's temperature control, and the temperature of the power module can be controlled within the normal working range.

**Keywords:** servo driver; IGBT module; heat dissipation; phase change material; thermal simulation

## 0 引言

随着导弹电动伺服机构技术的不断成熟,对弹上伺服驱动器的产品性能要求也越来越高,目前弹上伺服驱动器体积要求越来越小,功率需求越来越高<sup>[1]</sup>。IGBT 即绝缘栅双极晶体管凭借集成度高、速度快、稳定性好、高电压大电流等优势在伺服驱动器领域的应用得到迅速发展。IGBT 模块在开关瞬间会产生较大的开关损耗,对整个系统来说会产生瞬时的热冲击,如果不能及时将产生的热量散掉,严重时可能造成内部焊点因热应力脱落导致模块失效<sup>[2]</sup>。因此 IGBT 模块的散热问题成为了伺服驱动器设计的关键问题。

目前 IGBT 模块的散热方式有主动散热和被动散热两种形式<sup>[3]</sup>。被动散热是利用驱动器金属壳体的热容以及增加与空气自然对流的散热面积来实现散热<sup>[4]</sup>,该方式随着驱动器体积减小、功率增大的设计要求逐渐无法满足系统散热要求。主动散热根据冷却介质分为风冷和水冷两种形式。其中风冷散热主要通过风扇强迫空气流动进行对流换热<sup>[5]</sup>,风冷散热能力强,但对于驱动器来说在有限的体积内需要安装风扇并提供所需能源,对驱动器的小型化设计造成困难;水冷是目前应用最广的冷却方式,即通过水泵带动水在冷却箱内循环流动带走 IGBT 模块

产生的热量<sup>[6]</sup>。目前水冷散热主要通过改进流道的结构使水流经流道时充分换热以实现最佳冷却效率。MOROZUMI A 等设计了一种栅格流道<sup>[7]</sup>;WANG Y G 等设计了一种探针型流道<sup>[8]</sup>;张新鹏等设计了一种螺旋流道<sup>[9]</sup>;宋郭蒙等设计了一种双面冷却流道<sup>[10]</sup>。水冷散热技术虽然已经十分成熟,但泵和水箱的空间体积和能源需求限制了水冷技术在弹上伺服驱动器的应用,同时水冷流道的密封设计也增加了系统的复杂度。

本文以一种弹上伺服驱动器为例,驱动器中共包含 4 组 IGBT 模块,工作电压 150 V,稳态工作电流 25 A,工作时长 1 000 s,开关频率 8 kHz,要求在工作过程中将驱动器温度控制在 IGBT 最高工作温度以下。结合热设计需求提出了一种采用相变石蜡对 IGBT 模块进行被动散热的结构形式。研究 IGBT 内部结构并针对模块在长航时飞行状态下的发热量以及相变材料的体积需求进行计算,建立伺服驱动器的仿真模型并进行热仿真,通过对比有无相变材料的仿真结果来论证该方案的可行性和有效性。

## 1 相变储能散热方案

### 1.1 相变储能技术

相变储能技术是指利用相变材料发生相变进行能量

第一作者简介:刘若愚(1994—),男,山东济宁人,工程师,硕士研究生,研究方向为伺服系统结构设计。

存储从而实现温度控制,当被冷却物体的温度升高到接近相变材料的相变温度时,相变材料开始发生相变过程,这一过程中相变材料会迅速吸收大量热量从而将被冷却物体温度控制在一定温度。由于石蜡具有相变潜热高,融化时蒸汽压力低、没有过冷现象、不易发生化学反应且化学稳定性好、没有相分离和腐蚀性等特点成为主流应用的相变材料<sup>[11]</sup>。相变石蜡的主要参数指标如表 1 所示。

表 1 相变石蜡主要参数指标

| 熔点/℃ | 焓值/(kJ/kg) | 比热/(kJ/(kg·℃)) | 导热系数/(W/(m·℃)) | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|------------|----------------|----------------|-------------------------|
| 72   | 290        | 3.22           | 0.21           | 800                     |

## 1.2 散热方案设计

本文以一种大功率伺服驱动器为例,将驱动器壳体分解成结构框架和 IGBT 安装板,IGBT 安装板设计成中空板,安装板空腔中装有相变石蜡,IGBT 模块通过导热硅脂紧贴在安装板上,如图 1 所示。这种结构形式将相变材料嵌入驱动器壳体,能够在满足散热需求的情况下最大限度实现驱动器小型化设计,同时相变石蜡紧贴 IGBT 模块底部,能够及时吸收 IGBT 模块产生的热量,防止模块散热不及时使热量堆积导致模块损坏。

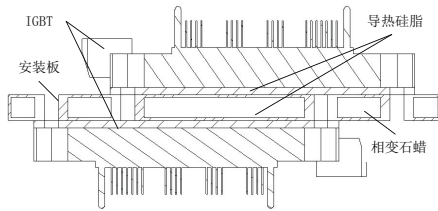


图 1 相变散热结构

## 2 IGBT 结构与热计算

IGBT 工作过程中发热主要来自于内部芯片,为了准确估计 IGBT 的发热量用以计算所需相变石蜡的体积使仿真结果更加精确,需要对 IGBT 内部结构进行分析。

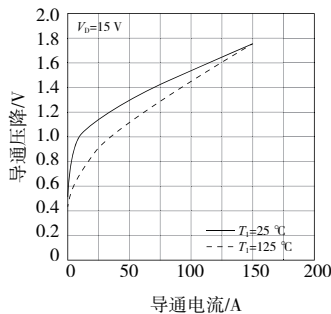


图 3 IGBT 导通压降与电流曲线

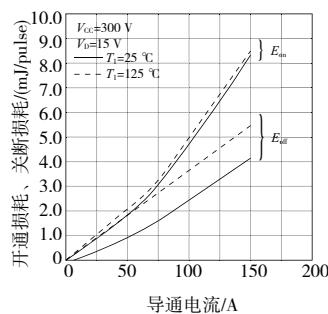


图 4 开通损耗、关断损耗与电流曲线

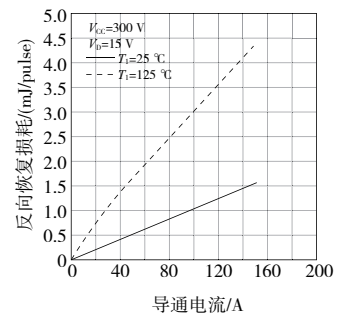


图 5 反向恢复损耗与电流曲线

伺服驱动器内部采用四组 IGBT 模块,单模块实际工作电压 150 V,稳态电流 25 A,开关频率 8 kHz,工作时长 1 000 s,根据式(3)估算驱动器中 IGBT 模块总工作损耗  $P=200$  W。假设模块所有热损耗发热均被相变石蜡吸收,

## 2.1 IGBT 内部结构

IGBT 模块内部结构如图 2 所示,主要集成了 6 块功率芯片和一块泄放芯片,其中主要发热芯片为功率芯片。功率芯片共同焊接在一块表面覆铜的陶瓷板上,陶瓷板在提供良好导热性能的同时提供相对于散热基板的电气绝缘作用。陶瓷板焊接在散热基板上,芯片和陶瓷板的外围灌封硅胶保护。

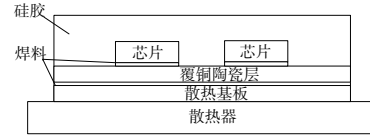


图 2 IGBT 内部结构

## 2.2 工作损耗估算

IGBT 模块工作过程中的热损耗主要包括导通损耗和开关损耗两种。导通损耗为功率管导通时流过集电极和发射极的电流在功率管内阻上产生的损耗。

$$P_1 = 2 I_c V_{ce} \quad (1)$$

式中: $P_1$ 为导通损耗; $I_c$ 为导通电流; $V_{ce}$ 为导通压降。

开关损耗为 IGBT 在硬开关模式下工作时开通和关断瞬间的损耗。当开关工作频率较高时开关损耗会造成模块内部温度升高,对模块的正常工作产生影响甚至导致模块失效。

$$P_2 = \frac{V_{ce1}}{V_{ce}} (E_{on} + E_{off} + E_{rr}) f \quad (2)$$

式中: $P_2$ 为开关损耗; $V_{ce1}$ 为实际工作电压; $V_{ce}$ 为标准电压; $E_{on}$ 为开通损耗; $E_{off}$ 为关断损耗; $E_{rr}$ 为反向恢复损耗; $f$ 为开关工作频率。

因此 IGBT 模块的总工作损耗为

$$P = P_1 + P_2 = 2 I_c V_{ce} + \frac{V_{ce1}}{V_{ce}} (E_{on} + E_{off} + E_{rr}) f \quad (3)$$

式中:导通压降  $V_{ce}$  与电流  $I_c$  的关系如图 3 所示;开通损耗  $E_{on}$ 、关断损耗  $E_{off}$  与电流  $I_c$  的关系如图 4 所示;反向恢复损耗与电流  $I_c$  的关系如图 5 所示。

将温度控制在 IGBT 最高工作温度 150 °C,估算冷却所需相变石蜡最大体积为

$$V = \frac{Pt}{[\Delta H + (T_1 - T_2) C_v] \rho} \quad (4)$$

式中: $P$ 为 IGBT 工作损耗; $t$ 为总工作时长; $\Delta H$ 为焓值; $T_1$ 为最高温度; $T_2$ 为初始温度; $C_v$ 为相变石蜡比热容; $\rho$ 为密度。

根据表 1 中相变石蜡相关性能参数和 IGBT 模块总工作损耗估算石蜡体积为  $V=0.4\times 10^{-3}\text{m}^3$ ,根据图 1 计算安装板空腔体积为  $0.5\times 10^{-3}\text{m}^3$ ,安装板空腔填充石蜡体积大于理论计算所需石蜡体积,能够将 IGBT 模块最高温度控制在  $150\text{ }^\circ\text{C}$  以下,确保模块正常工作。

### 3 相变储能散热仿真

#### 3.1 系统建模与边界条件

建立 IGBT 模块及伺服驱动器有限元分析模型并进行网格划分,网格划分结果如图 6 所示。对 IGBT 各层结构及驱动器零部件赋予的材料属性如表 2 所示。在空气自然对流条件下根据驱动器实际工作要求对仿真参数进行以下设置:

- 1) 将 IGBT 芯片设为热源,添加体发热功率,发热功率为 IGBT 模块总工作损耗  $200\text{ W}$ ;
- 2) 设置仿真总时长为  $1\ 000\text{ s}$ ;
- 3) 设置环境温度为  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 4) 选取驱动器外壳外表面为自然对流面,空气对流换热系数为  $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ 。

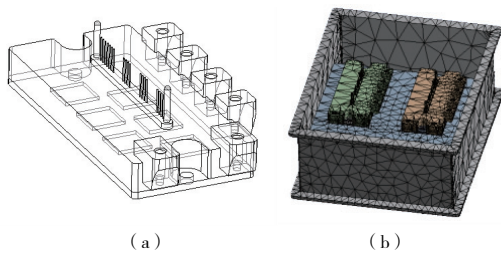


图 6 IGBT 模型及伺服驱动器网格

表 2 零部件材料特性

| 名称     | 材料 | 密度/<br>( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 导热系数/<br>( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ ) | 比热容/<br>( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ ) | 焓值/<br>( $\text{kJ}/\text{kg}$ ) |
|--------|----|-----------------------------------|---|---|----------------------------------|
| 框架、安装板 | 铝  | 2 770                             | 150   | 875   | —                                |
| 散热基板   | 铜  | 8 300                             | 401   | 385   | —                                |
| 陶瓷板    | 陶瓷 | 2 200                             | 24  | 900   | —                                |
| 芯片     | 硅  | 2 300                             | 148   | 700   | —                                |
| 焊料     | 锡  | 8 900                             | 394   | 383   | —                                |
| 保护胶    | 硅胶 | 970                               | 0.2   | 1 500   | —                                |
| 冷却介质   | 石蜡 | 800                               | 0.21  | 3 220   | 290                              |

#### 3.2 仿真结果

为了验证相变石蜡对 IGBT 模块的冷却效果,对比采用相变石蜡的被动冷却方式和采用不采用额外隔热手段仅靠

驱动器壳体散热的仿真结果,监测 IGBT 模块温度最高点,驱动器工作  $1\ 000\text{ s}$  的仿真结果如图 7—图 9 所示。

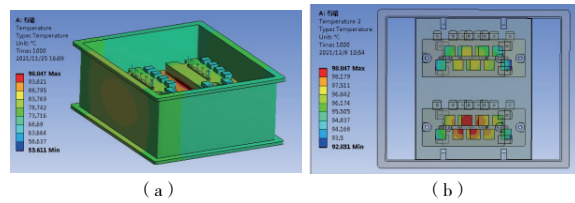


图 7 驱动器整体温度和 IGBT 芯片温度(相变储热)

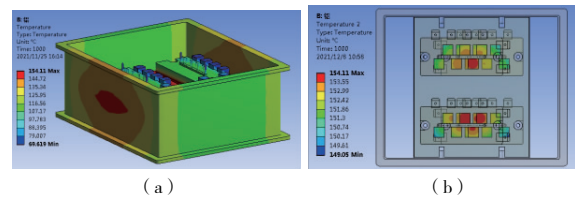


图 8 驱动器整体温度和 IGBT 芯片温度(自然散热)

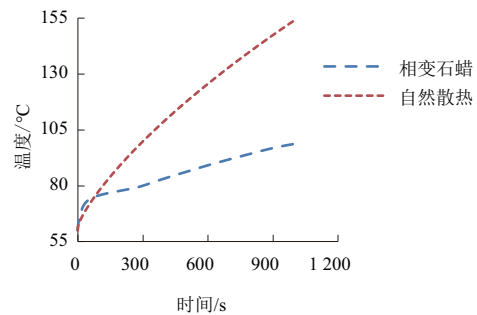


图 9 IGBT 最高温度

通过对比采用相变石蜡冷却和自然散热的仿真结果可以看出,伺服驱动器在没有相变石蜡的情况下单纯依靠壳体散热效率较低,IGBT 由于工作损耗产生的热量无法及时传递出去造成温度迅速升高,在工作  $1\ 000\text{ s}$  后最高温度达到  $154\text{ }^\circ\text{C}$ ,超过正常工作的最高温度  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,会导致模块工作异常或失效。采用相变石蜡进行冷却后,由于相变石蜡紧贴 IGBT 模块散热基底,同时相变石蜡具有高焓值和高比热容的特性,可以将 IGBT 模块工作损耗产生的热量快速吸收从而控制 IGBT 最高温度在  $98\text{ }^\circ\text{C}$ ,有效防止 IGBT 模块快速升温。

### 4 结语

针对一种大功率伺服驱动器 IGBT 模块工作损耗大,空间限制受限的情况,提出了一种采用相变石蜡材料进行被动冷却的散热结构形式。通过理论计算 IGBT 模块的发热量和用于散热的石蜡体积并结合热仿真分析结果表明,采用相变石蜡冷却能够在  $1\ 000\text{ s}$  的工作时间内将 IGBT 模块的最高温升控制在  $38\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对于自然散热的仿真结果最高温升降低  $56\text{ }^\circ\text{C}$ ,证明该方案的可靠性和可行性。

(下转第 179 页)

按照之前计算方式对评估点进行疲劳寿命计算,得到疲劳寿命对比(图5)。

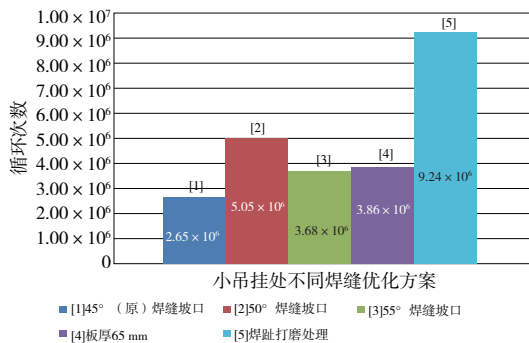


图5 不同优化方案焊缝寿命对比图

通过图5可以发现,增大板厚可以使焊缝处的疲劳寿命增加,板厚60mm时焊缝5的疲劳寿命为 $2.65 \times 10^6$ 次循环;而增大板厚后,焊缝5的疲劳寿命增大到 $3.86 \times 10^6$ 次循环;效果较为明显,但板厚增大5mm对于电机减重有较大影响。而优化焊缝坡口角度方案可以看出随着焊缝坡口角度的增大,小吊挂处的焊缝疲劳寿命有较大的提高,从数据可以看出随着焊接坡口角度的增大,焊接根部熔深相应增大,可以有效减少应力集中,降低焊接缺陷,但坡口角度过大,反而也会使焊接缺陷增大,且坡口角度过大,实际焊接过程中,由于根部熔深过大,需要对焊接位置进行扣槽清根处理,会增大工作量,也会造成焊接材料的浪费,增大焊接成本。所以达到较好焊缝质量要求的恰到好处的坡口角度为 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。而方案三中进行焊缝焊趾打磨效果最为明显,焊缝疲劳寿命达到了 $9.24 \times 10^6$ ,是原方案

的3倍寿命,但进行焊缝打磨同样会增大工作量,增大焊接成本,且打磨焊缝对加工工艺要求较高,不同的打磨效果对焊缝寿命影响较大。

## 5 结语

本文通过对该型牵引电机的静强度、疲劳强度的仿真计算评估,得出该型牵引电机结构强度满足标准的要求,对疲劳损伤大的焊缝提出了不同的优化处理方式,几种优化方式都有效提高了电机小吊挂处焊缝的疲劳寿命,可以根据实际需求选择不同的焊缝优化处理方法,进而提高电机的使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 王腾飞,肖维雄,肖茂. 基于BS 7608标准及利用结构对称性对转向架构架疲劳试验的强度评估[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(5): 43-46, 116.
- [2] 郭珍江,刘厚林,刘丰芹. 基于有限元法的动车组行李架仿真分析与结构优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(3): 47-51.
- [3] 李朋,朱涛,王超,等. 重载货车车钩强度非线性有限元仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 90-94.
- [4] 谢素明,苑忠华,张相宁. 基于英国标准的碳钢客车车体结构疲劳寿命评估[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(2): 29-32.
- [5] 许喆,李永华,盛自强,等. 地铁车车体结构性能仿真分析[J]. 安阳工学院学报, 2021, 20(4): 31-34, 51.
- [6] 黄晓青,吴才香,刘余龙,等. 基于BS 7608标准转向架构架疲劳强度评估[J]. 装备制造技术, 2021(3): 113-115.

收稿日期: 2022-01-05

(上接第151页)

### 参考文献:

- [1] 许茗宸. 应用于IGBT冷却的相变换热实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017, 2-5.
- [2] 林灵娇,连文磊,牛文敬. 机电作动器产热与传热特性实验研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(3): 33-36.
- [3] 胡翔宇,王尧尧,周阳,等. 一种运载火箭用大功率电动伺服驱动器的散热设计[J]. 飞控与探测, 2019, 2(2): 71-75.
- [4] 李超,陈庆浩,王珊. 大功率伺服控制驱动器热管温控仿真设计[J]. 电子技术与软件工程, 2019(23): 205-206.
- [5] 于荣,张秀秀. 变频器中的IGBT模块损耗计算及散热设计[J]. 科学技术创新, 2021(35): 51-53.
- [6] 董莉莉,丁永根,李星明. 车用电机控制器散热结构及热仿真分析[J]. 微特电机, 2021, 49(11): 30-33, 37.
- [7] MOROZUMI A, COHARA H, MOMOSE F, et al. Next-generation IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation [C]//2014

International Power Electronics Conference (IPEC - Hiroshima 2014 - ECCE ASIA). Hiroshima, Japan; IEEE, 671-676.

- [8] WANG Y G, DAI X P, LIU G Y, et al. Integrated liquid cooling automotive IGBT module for high temperatures coolant application[C]// Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: VDE, 1-7.
- [9] 张新鹏,张广泰,张辉亮,等. 螺旋水道水冷IGBT散热器数值模拟及试验研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(2): 71-73.
- [10] 宋郭蒙,王雄,王幸智,等. 基于高效扰流技术的IGBT双面冷却散热器性能优化研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 22-27.
- [11] 周慧琳,邱燕. 矩形蓄热单元内石蜡的相变换热特性[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(4): 99-107.

收稿日期: 2021-12-15