

空调器室外风机 IPM 模块热阻测试

毕晓猛，冯宇翔，江雪晨，张土明，苏宇泉

(广东美的制冷设备有限公司，广东佛山 528311)

(Tel: 0757-23272197, Email: xiaomeng.bi@midea.com)

摘要: 本文利用结构函数理论,对空调器室外风机 IPM 模块的结壳热阻进行测试,测得 IPM 模块上桥 U 相 IGBT 处结壳热阻为 12.38K/W。为了改善 IPM 热阻,本文通过增加 IGBT 贴片区域铜箔布线面积的方法,实现了对 IPM 热阻的降低,实验发现,当布线面积由 2.5x2.5mm² 增大至 2.8x2.8mm² 过程, IPM 模块热阻可以由 12.38 K/W 降低至 9.22 K/W, 降低 25%, 证明了该方法的有效性。

关键字: 智能功率模块(IPM)、热阻、结构函数

THERMAL RESISTANCE MEASUREMENT OF IPM IN THE OUTDOOR AIR-CONDITIONER FAN

Xiaomeng Bi, Yuxiang Feng, Xuecheng Jiang, Tumeng Zhang, Yuquan Su

(GD. Midea Air-Conditioner Equipment Co.,Ltd. Foshan Guangdong, 528311)

Abstract: The theory of structure function was used to measure the IPM junction-to-case thermal resistance in the outdoor air-conditioner fan in this paper. A value of 12.38K/W is obtained for the upper-arm U phase IGBT. In order to reduce the IPM thermal resistance, the copper area under the IGBT was enlarged. With the copper area increased from 2.5x2.5mm² to 2.8x2.8mm², the thermal resistance decreased by 25% from 12.38 K/W to 9.22 K/W. By this way, it was an effective method to reduce the IPM junction-to-case thermal resistance.

In order to improve the design efficiency of capillary tubes, capillary tube models are developed. The approximate integral model is a promising.....

Keywords: intelligent power module (IPM), thermal resistance, structure function

1 前言

智能功率模块 (IPM) 作为变频技术的核心器件, 内部集成了功率器件、HVIC、过流过温、欠压保护等电路, 在家电产品中被广泛应用, 如变频空调、冰箱、洗衣机。IPM 模块对于降低家电产品功耗、实现变频家电产品安全可靠运行至关重要。由于 IPM 内部集成度较高, 功率器件导通、关断过程中发热严重, 造成 IPM 模块内部温升过高, 温度过高会降低 IPM 模块性能, 损害 IPM 模块的可靠性。IPM 模块结壳热阻作为模块散热性的一个重要指标, 标志着热量由 IPM 内部功率器件 pn 结发热源至封装外壳传递过程中所受到的阻碍作用, 为提高 IPM 模块散热能力, 应当尽可能降低模块结壳热阻。IPM 模块的结壳热阻与封装架构、基板结构、封装材料热导率、内部功率模块焊接质量等因素有关[1][2]。

本文以变频空调室外机散热器风扇用 IPM 驱动模块 (3A/600V) 为研究对象, 利用结构函数法对 IPM 模块热阻进行测试, 并研究了 IPM 模块内部铝基板铜箔布线面积对结壳热阻的影响。

2 基本原理

对 IPM 模块内部功率器件施加单位加热功率时, 加热功率持续一定时间后, 停止加热, IPM 模块内部功率器件结温的温度响应如下[3~5]:

$$a(t) = \int_0^{\infty} R(\xi) [1 - \exp(-t/\xi)] d\xi \quad (1)$$

其中, $R(\xi)$ 为时间常数谱, 如果作 $z=\ln(t)$ 变换, 则温度响应(1)式可以表示成 z 的函数 $a(z)$, 并且令:

$$w(z) = \exp[z - \exp(z)] \quad (2)$$

作者简介: 毕晓猛, (1986-), 男, 工程师, 从事智能功率模块封装工艺研究

则将函数 $a(z)$ 对 z 的导数，可以由下式表示为：

$$\frac{d}{dz}a(z) = R(z) \otimes w(z) \quad (3)$$

即 $a(z)$ 对 z 的导数可用 $R(z)$ 与 $w(z)$ 的卷积表示，对(3)式进行反卷积，即可以获得时间常数谱 $R(z)$ 。

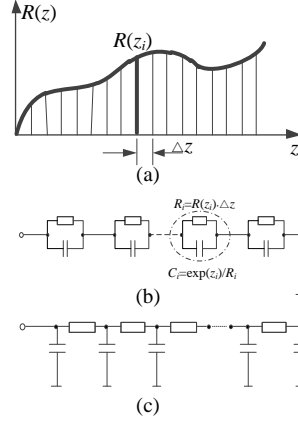


图 1 时间常数谱曲线(a)，Foster(b)与 Cauer(c)热学网络模型

如果将时间常数谱以 Δz 进行离散(如图 1a 所示)，可以将离散后的时间常数谱用 Foster 热学网络模型进行等效，如图 1b 所示，其中，每个单元所包含热阻 $R_i = R(z_i) \cdot \Delta z$ ，热容为 $C_i = \exp(z_i)/R_i$ 。由于 Foster 热学网络模型包含了结点与结点间的热容，与实际不符，所以需要改进 Foster 模块，转换为 Cauer 模型[3]，如图 1c。由 Cauer 模型，可以得到表示系统累积热容 C_Σ 与累积热阻 R_Σ 的函数关系：

$$C_\Sigma = f(R_\Sigma) \quad (4)$$

该函数即为积分结构函数，简称结构函数，其中， $C_\Sigma = \int_0^x \frac{1}{\mu(\xi) \cdot A(\xi)} d\xi$ ， $R_\Sigma = \int_0^x c(\xi) \cdot A(\xi) d\xi$ ， $\mu(\xi)$ 表示热导率， $A(\xi)$ 为横截面积， $c(\xi)$ 为单位体积热容。在实际封装的功率模块中，式(4)所述结构函数在实际应用中表现为从功率模块封装体内部 pn 结至外部环境的过程，系统热阻与热容的变化关系，如图 2 所示，我们可以从结构函数曲线上获得待测样品的结壳热阻 R_{jc} 。

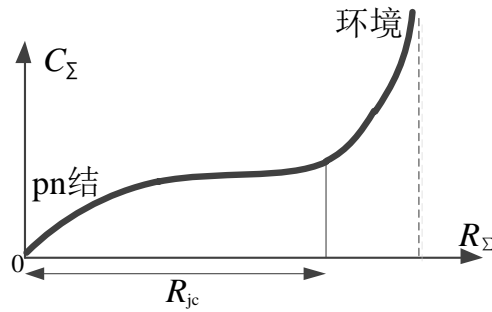


图 2 结构函数示意图

3 测试实验

本文利用 MicReD 1500A 功率测试仪对空调室外机散热器风扇用 IPM 驱动模块（3A/600V）内部 IGBT 处热阻进行测试，该测试仪所搭载的 T3ster 系统可以根据采集的数据由内部软件完成上述理论计算，最终得出模块的结构函数，图 3 为待测 IPM 模块样品。为能在结构函数曲线上获得所测模块的结壳热阻，通过将模块分别与恒温散热冷板在干接触与湿接触条件下测试[3]，如图 4 所示，IPM 模块上桥 U 相处 IGBT 热阻测试曲线如图 5 所示。

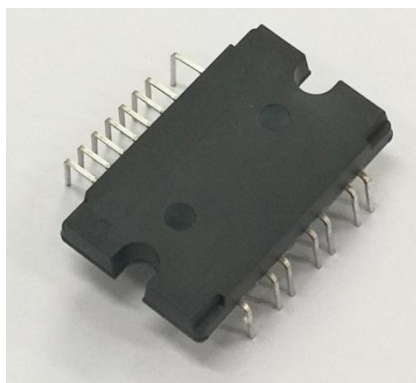


图 3 IPM 模块

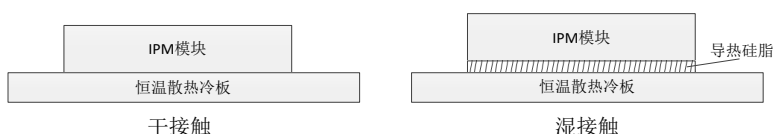


图 4 IPM 模块干接触湿接触测试示意图

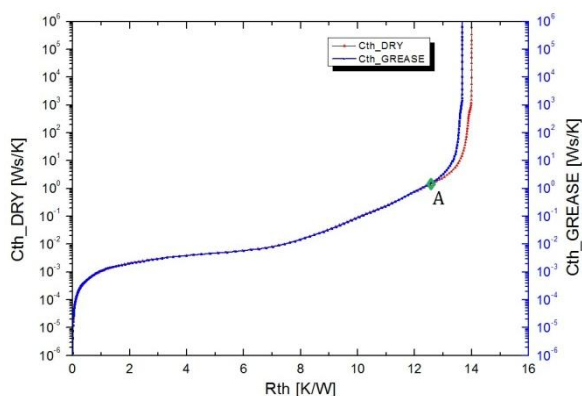


图 5 IPM 模块内部

当 IPM 模块在干湿接触下进行热阻测试时，由于热量由 IPM 模块内部 pn 结至外部环境传递过程中，热阻在模块内部经历的传播路径相同，当热量流出模块封装壳体后，模块与散热冷板之间因接触方式不同，造成热阻在接触面处发生变化，反应在结构函数曲线上(图 5)，两种接触方式的结构函数曲线发生分离，分离点处热阻数值即可以认为是功率模块的结壳热阻 R_{jc} ，如图 5 中 A 点所示。为减小测试误差，本文对五个不同模块进行测试，测试结果如表 1 所示 IPM 模块热阻测试结果。由上述测试方法，可以得知，该 IPM 模块上桥 U 相处 IGBT 处结壳热阻的平均值为 12.38K/W。

为降低 IPM 模块热阻，本文通过合理增大 IPM 模块铝基板 IGBT 贴片区域铜箔布线面积，将 IGBT 处铜箔布线面积由 $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 增大至 $2.8 \times 2.8 \text{ mm}^2$ ，然后根据前述结构函数测试方法，对增加铜箔布线面积的 IPM 模块进行热阻测试，测试结构函数如图 6 所示，测试结果详见表 1 改善后热阻测试结果。

表 1 热阻测试结果(单位: K/W)

| 测试样品编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 均值 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| IPM 模块热阻 | 12.54 | 12.39 | 12.35 | 12.23 | 12.42 | 12.38 |
| 改善后热阻 | 9.46 | 9.25 | 8.91 | 9.36 | 9.12 | 9.22 |

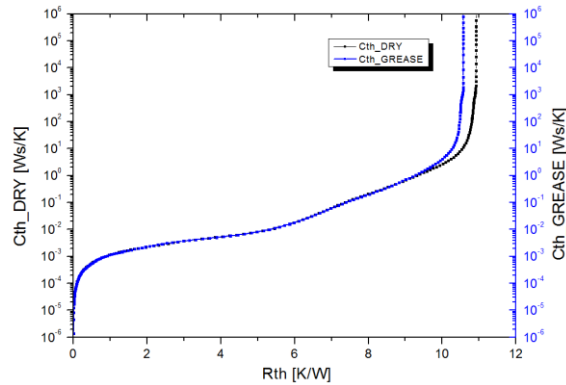


图6 增加基板铜箔布线面积后模块热阻

通过对比增加铝基板铜箔布线面积前后，IPM 模块热阻测试结果，可以知道，增大 IPM 模块内部 IGBT 贴片处铜箔布线面积时，可以降低 IPM 模块热阻，当布线面积由 $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 增大至 $2.8 \times 2.8 \text{ mm}^2$ ，IPM 模块内部上桥 U 相 IGBT 处热阻由 12.38 K/W 降低至 9.22 K/W ，降低 25%。我们可以利用材料热阻 $R = d/(\lambda A)$ 对上述实验结果进行分析，其中， d 为材料厚度， λ 为材料热导率， A 为材料截面积。当布线面积由 $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 增大至 $2.8 \times 2.8 \text{ mm}^2$ 时，由材料材料热阻公式可知，当面积由 $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 增大至 $2.8 \times 2.8 \text{ mm}^2$ ，模块热阻理论上会降低 20%，与测试实验结果基本吻合，而测试数值偏大部分主要因铜箔横向散热引起。

结论

本文利用积分结构函数对空调室外机散热器风扇用 IPM 驱动模块热阻进行测试，测得 IPM 模块上桥 U 相 IGBT 处热阻为 12.38 K/W 。除此之外，本文通过增大 IPM 模块内部 IGBT 贴片处铜箔布线面积，降低了 IPM 模块热阻，为合理改善 IPM 热阻提供了依据。

参考文献

- [1] 夏燕飞 罗毅飞 汪波 刘宾礼 焊料层空洞对 IGBT 芯片温度分布影响分析 船电技术 2015.12 Vol.35 No.12
- [2] 郑钢涛 陈素鹏 胡俊 李国元 焊料层空洞面积对功率器件电阻和热阻的影响 半导体技术 2010.11 Vol.35 No.11
- [3] Electronic Industries Association. JESD51-14 Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Trough a Single Path, 2010.11
- [4] 李汝冠 基于结构函数的大功率整流管封装内部分析 电子元件与材料 2016.1 Vol.35 No.1
- [5] 奉琴 基于结构函数的大功率 IGBT 热阻测量方法 大功率变流技术 2015 年第 3 期