

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.04.013

小功率车载逆变器的热仿真与实验研究

张 建¹, 崔晓钰¹, 倪 笠¹, 张春霞²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 山东淄博万昌化工设备有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要:为探究小功率车载逆变器的散热性能,利用 CFD 软件对车载逆变器建立有限元三维模型,用笛卡尔网格划分系统对重点部位进行网格加密处理,通过在不同工况下的数值仿真计算,得出逆变器整体及各个元器件的发热情况。在数值仿真结果的基础上,设计相关实验,在不同环境温度的工作条件下,对车载逆变器中各个元器件的工作温度进行实验测试。测试表明各个元器件在不同环境温度、外部负载的工况下,工作温度都控制在 100℃ 左右,分析实验值与模拟值的误差,其最大误差在 3.4% 以内。数值仿真计算结果有较高的精确度。

关 键 词:车载逆变器;热仿真;有限元三维模型;工作温度

中图分类号:TM464 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)04-0060-05

Thermal Analysis and Test of Small Power Car Inverter

ZHANG Jian¹, CUI Xiaoyu¹, NI Li¹, ZHANG Chunxia²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Wanchang Chemical Equipment Co. Ltd., Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: In order to explore the cooling performance of small power car inverter, a finite element 3D model was developed based on CFD simulation software. Then the heating situations of the whole and individual components of the inverter had been obtained through the numerical simulation calculation under different working conditions. On the basis of the numerical simulation results, the related experiments had been done under the same specifications of the numerical simulation. The test results showed the thermal characteristics of the components and the working temperature of the components was controlled around 100℃. Furthermore, the comparison between the experimental and numerical results showed that a quite accurate result could be received through the CFD simulation. The deviation from the experimental results was within 3.4%. Numerical simulation had high accuracy.

Keywords: vehicle inverter; thermal analysis; three-dimensional finite element model; working temperature

随着汽车的普及,人们将汽车作为一种集办公、娱乐于一体的综合交通工具。车主们常用的电子设备需要 220 V 交流的市电才能进行工作,而车用的电池或者蓄电池通常只能提供低压直流电,为解决这一问题,车载电源转换器无意是最佳的解决方法。

车载逆变器是一种能够将 DC12 V 直流电转化 AC220 V/50 Hz 的交流市电的电源转化设备。输入电压在经过逆变器转化后,电子设备能够在车上正常地使用。车载逆变器在设计过程中安全位列第一位,而

要确保逆变器的正常运作,散热系统的设计是要重点考虑的问题。逆变器内部的结构是由众多集成电路, MOSFET 开关,二极管,芯片等组成^[14]。这些电子器件,随着电子技术的发展,变得越来越高频化。不仅器件的效率在不断提高,而且单位面积的功率输出也在不断上升,而空间大小的限制使得所有电子器件的外形尺寸越发紧凑。这种高集成、功率集中的工作条件使得散热系统的设计变得尤为重要^[5]。

电子元器件失效的原因其实有许多:元器件设计

收稿日期:2016-11-18;修回日期:2017-02-10

基金项目:上海市自然科学基金项目(14ZR1429100)。

第一作者简介:张建(1993),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为强化传热。通信作者:崔晓钰(1964),女,山西太原人,博士,教授,主要研究方向为强化传热。E-mail:xyecui2001@yahoo.com

不良、自身材料问题、工作环境的温度及湿度的影响等等。但是由温度影响造成的电子设备的失效,即热失效是最主要的失效形式。在电子领域中,有一个“10℃法则”。随着温度的上升,电子器件的失效率是以指数形式增长。当电子器件周围环境温度每上升 10℃,其失效率将增加一个数量级。温升达到 50℃时,电子器件的寿命将只有 25℃时的 $1/6^{[6]}$ 。这足以说明温度的波动会直接影响设备系统的运行速度、输出功率及可靠性。此外,温度的变化也会导致电流的变化,这将会促进电子元器件自身发热更加剧烈并使漏电现象更加严重,从而导致整个设备无法发挥出最佳的运行状态,降低电子设备的使用寿命^[7]。

课题组以小功率车载逆变器为研究对象,利用 CFD 软件对车载逆变器建立有限元三维模型,用笛卡尔网格划分系统并对重点部位进行网格加密处理,通过数值计算得到不同环境温度下车载逆变器内的温度场分布。并通过搭建试验台系统进行实验,验证仿真结果的准确性。

1 车载逆变器结构

车载逆变器中主要有 10 个发热的元器件:MOS 管 6 个、电容 2 个、变压器 1 个及电感 1 个。为了增加散热性能,我们将车载逆变器中的 10 个主要发热元器件分别布置在 PCB 板的上、下 2 面,PCB 板布局情况如图 1 所示。除此之外,其他发热量较小的热源已经被简化,因此不再在图中加以显示。各元器件发热参数如表 1 所示。该车载逆变器的额定工作条件如表 2 所示。

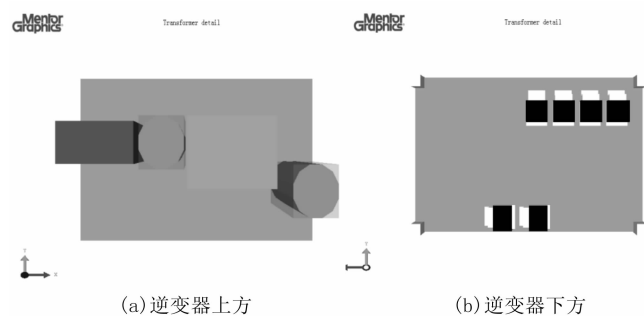


图 1 各个元器件的布局

Figure 1 Component layout

表 1 主要发热元器件的功率参数

Table 1 Power parameters of main heating elements

序号	名称	发热功率/W	序号	名称	发热功率/W
MOS4.1	MOS 管	0.8	MOS2.2	MOS 管	1.0
MOS4.2	MOS 管	0.8	T1	变压器	2.5
MOS4.3	MOS 管	0.8	I1	电感	2.5
MOS4.4	MOS 管	0.8	C1	电容	0.5
MOS2.1	MOS 管	1.0	C2	电容	0.5

表 2 逆变器工作条件

Table 2 Working condition of inverter

输入 电压/V	输入 功率/W	逆变器 工作效率/%	外部工作 温度范围/℃
120 ± 5	120	> 90	- 50 ~ 50

2 热仿真分析

2.1 仿真模型

在 CFD 分析软件中直接进行热仿真建模。由于 CFD 软件中已经自带了许多的智能元件模块和许多元器件的特性参数,能对各个元器件做较精确的建模,因此选择直接在软件中建立热仿真模型^[8-10]。

对电源模块进行数值计算之前,需要先进行热仿真分析中的重要环节,网格划分。通常 CFD 热分析软件中网格的划分主要分为 3 步:①系统网格的划分;②重点区域的划分;③网格质量的调整。

为了确保数值分析中模型的计算精确度,首先将系统网格设置为网格尺寸比较高的模式。除此之外,对 MOS 管、电容、电感、变压器这些主要的发热元器件将进行重点考虑。MOS 管、电容、电感、变压器这些都是热分析中的关键区域,因此对这些区域中的网格划分需要加密。运用 CFD 软件中笛卡尔网格划分系统,对每一个需要进行网格加密的部件通过添加一个 REGION 的模块,进一步对网格进行约束加密。而对于外壳,导热垫片、PCB 板,这些不发热的部分则无需加密,网格数量也相对比较稀疏。在对车载逆变器中每个部件网格局部处理之后,使得网格加密约束只出现在需要加密的区域,避免不必要的地方出现多余的网格,从而节省计算时间。

2.2 仿真结果

在仿真计算中,将环境温度设定为常温 30℃,以此作为车载逆变器仿真的边界条件。由于逆变器功率较小,采用自然对流的冷却方式。经过对车载逆变器的模型求解之后,可以得到所设定的各个部件的温度及整个逆变器的稳态温度场分布。图 2 为逆变器横截面的温度分布。PCB 板上、下方的各个功率元器件为车载逆变器的发热源,单位体积上的发热量较均匀。从图 2 中可以得出,在常温的工作环境下,温度较高的区域主要分布在在元器件较集中的位置。虽然 2 种不同的 MOS 管发热功率(0.8 W 的 4 个、1 W 的 2 个)要小于变压器和电感的发热功率(都为 2.5 W),图中温度的差距并不明显。这是由于 MOS 管发热面积较小,这使得热流密度要大于发热功率较大的变压器和电感。由此可见,热流密度是影响发热元器件温升的重

要因素之一。此外,也可以看出,虽然这2组MOS管每组中的发热功率相同,但是各个MOS管的温度最高处并不处于各个元器件的中心位置。尤其是4个一组的MOS管,由于安装距离比较接近,中间的2个MOS管的表面和中心温度高于两侧的MOS管。发生这种现象的原因主要为:多个热源的位置相对比较接近,使各个元器件之间产生了热耦合现象,这比单一热源的热传递方式更加复杂,多个热源相互影响,使得温度分布不再像单一热源的发热情况。

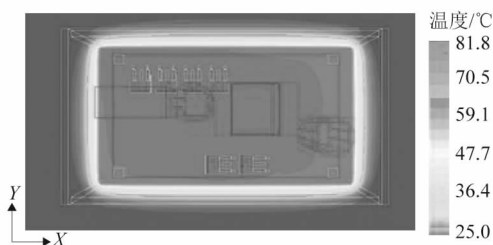


图2 横截面温度云图

Figure 2 Temperature contour of cross section

利用CFD热分析软件进行热仿真的结果不仅可以显示截面的温度云图,同时可以显示整个车载逆变器内部及外部的粒子流动的状态,图3中所显示的即为逆变器内外部流动的状态(图中为便于显示整体粒子流已将四周壁面隐藏)。

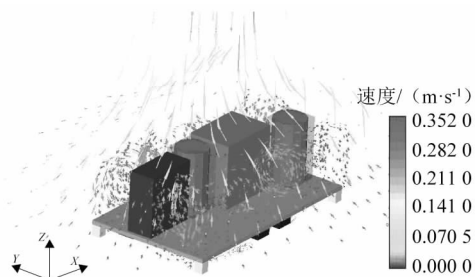


图3 车载逆变器粒子流

Figure 3 Car inverter particle flow

在车载这一特殊的运行条件下,外部工作环境温度的变化会比较普遍、剧烈。因此,逆变器在不同的外部工作温度的情况下,对其内部各个电子元器件热场的影响应该还是比较显著的。因此,对散热设计的数值仿真需要在不同的环境温度下进行计算。为了了解环境温度对元器件温度的具体影响情况,在负载保持120 W不变的条件下,逐渐升高逆变器工作温度,从而对其进行仿真计算,得到外部环境温度对主要发热器件的影响。其环境温度的变化范围,从室温30℃

起每10℃为一个增量,一直增加到环境温度为50℃。设定50℃为最高温度的原因:在该工况条件下,已经有元器件的温度超过正常工作的温度100℃。因此,不再进一步增加温度进行计算。表3为各个元器件在不同工况下的仿真结果。其中 T_{die} 为MOS管内核心温度。设定120 W,30℃为工况1;120 W,40℃为工况2;120 W,50℃为工况3。

表3 不同工况下各测点模拟值

Table 3 Simulation values of measured points

under different working conditions							℃
工况	$T_{MOS4.3}$	$T_{die4.3}$	$T_{MOS2.1}$	$T_{die2.1}$	T_{T1}	T_{C1}	T_{H1}
工况1	79.6	83.7	78.9	80.0	82.3	80.9	83.5
工况2	88.6	91.7	87.7	89.0	91.4	89.8	92.2
工况3	99.5	103.6	98.9	99.9	102.3	100.9	103.1

从表3可以看出,环境温度对各个元器件温度的影响是十分显著,随着工作环境温度的上升,元器件的工作温度也在不断上升,元器件工作温度的温度梯度随着环境温度的上升而逐渐增加。当环境温度从常温30℃上升至40℃时,元器件工作温度的温升约为9℃;然而当环境温度从40℃上升至50℃时,元器件工作温度的温升已经超过了10℃。由此可以说明外界环境温度的变化,对逆变器内部元器件的热场有显著的影响,其影响程度随着环境温度的上升变得更加显著。当环境温度达到50℃时,变压器及电感的温度已经超过了100℃,而MOS管及电容的温度也接近100℃。由于100℃法则的存在,便不再对环境温度继续提升进行仿真。

3 实验测量

3.1 实验装置

实验装置图如图4所示。



图4 实验装置简图

Figure 4 Experimental equipment

各个温度测点在实验中的布置位置如图5所示。

热电偶用点胶的方式紧密附着在温度检测位置,其测点位置尽量与仿真计算中的位置保持一致,另一端连接在数据采集仪中。然而,对于2组 MOSFET 的测点布置,由于数量较多,因此仅在仿真温度最高的 MOSFET 上布置。逆变器一端插头与作为负载的灯泡相连接(120 W 的情况由2个60 W 灯泡组成),另一端通过接插件与开关电源相连接,为逆变器提供稳定的电压输入。当需要模拟高温情况时,将逆变器放置在恒温箱中,其他的接线通过恒温箱顶部开设的引线孔中引出。为了便于之后对仿真和实验结果的分析、总结,对每个热电偶测点进行编号:测点1为 MOSFET4.3、测点2为 MOSFET2.2、测点3为变压器 T1、测点4为电容顶部 C1、测点5为电感内部 I1。在之后的数据整理中都将直接以元器件序号进行描述。

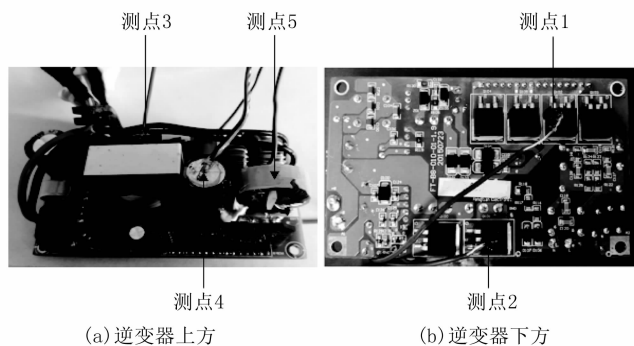


图5 热电偶测点温度布置图

Figure 5 Arrangement of thermocouple temperature

3.2 实验结果

在实验中,主要测量的是各个热电偶测点对应的元器件的温度,这些数据都可以直接从数据采集仪中直接读出。表4为各个热电偶测点在负载120 W,工作温度为30,40和50℃运行条件下所采集的各个测点温度值。

表4 不同工况下各测点实验数据

Table 4 Measuring point data under different working conditions

工况	$T'_{MOS4.3}$	$T'_{MOS2.1}$	T'_{T1}	T'_{C1}	T'_{I1}
工况1	79.1	76.3	82.1	80.3	85.9
工况2	86.6	84.8	91.8	87.6	91.1
工况3	99.4	96.4	103.6	100.4	104.3

对于 MOSFET,因无法在其内部布置热电偶,其核心温度 T'_{die} 无法直接获得,只能间接地测出塑封材料表面的温度。在对 MOS 管表面温度数据进行处理后,我们可以得到最终核心温度 T'_{die} [11],如表5所示。

表5 实验 die 核心温度

Table 5 Experimental die core temperature

工况	$T'_{MOS4.3}$	$T'_{die4.3}$	$T'_{MOS2.1}$	$T'_{die2.1}$
工况1	79.1	83.3	76.3	79.6
工况2	86.6	90.8	84.8	88.1
工况3	98.7	102.9	96.4	99.7

4 实验与仿真结果分析对比

通过对车载逆变器的实际测试,得到其内部元器件在不同工况下的工作温度。实验的目的不但要得出逆变器的实际工作情况,得到各个元器件实际的工作温度,而且也要对前面所述章节中利用 CFD 热分析软件计算出各个仿真结果进行验证。

经过对实验数据与仿真数据的整理,进一步分析数值模拟计算与实验测试之间的差距,并分析产生误差的主要原因。我们选取2组 MOS 管的核心和其余部件中温度最高的电感 I1 为代表,将实验结果与仿真结果进行对比,对比结果如图6所示。

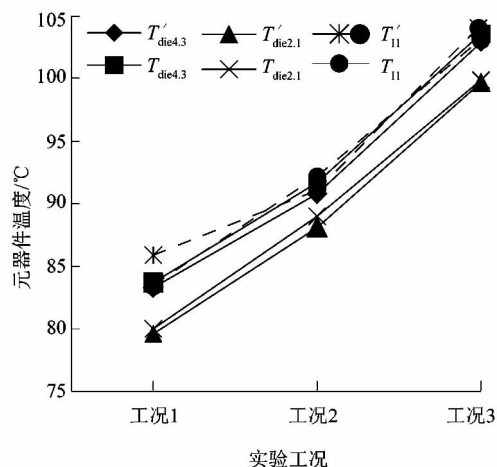


图6 实验与仿真测点温度对比

Figure 6 Comparison of experimental and simulated temperature

表6中列出实验与仿真计算时各个测点之间温度结果的误差百分比,其误差百分比的计算方式如下:

$$\text{误差百分比} = \frac{|\text{实验值} - \text{模拟值}|}{\text{实验值}} \times 100\%$$

表6 实验值与模拟值的偏差

Table 6 Deviation between experimental and simulated values

工况	误差/%						
	MOS4.3	die4.3	MOS2.1	die2.1	T1	C1	I1
工况1	0.6	0.5	3.4	0.5	0.2	0.7	2.8
工况2	2.4	1.0	3.4	1.0	0.5	2.5	1.2
工况3	0.1	0.7	2.6	0.2	1.3	0.5	1.1

结合图6与表6中的数据可以得出:在所有工况下,各个功率元器件的工作温度的模拟结果与实验结果十分接近,其变化趋势也基本相同,实验值与模拟值的最大差值为3.4%,完全控制在允许的计算误差范围之内。虽然实验结果与仿真计算的误差在合理范围之内,但是误差的存在是毋庸置疑的,针对2个计算结果偏差进行分析,得出产生误差的主要原因如下:①实验仪器的误差;②实验中热电偶测点的布置与数值仿真计算时的测点布置存在一定的偏差;③温度升高导致的逆变器效率下降;④数值模拟过程中对元器件发热区域结构上的简化;⑤数值模拟过程中对元器件发热方式的简化;⑥车载逆变器各个部件相互连接中接触热阻。

5 结 语

课题组以某款小功率的车载逆变器为研究对象,在CFD热分析软件中建立了该款车载逆变器的有限元三维模型,运用笛卡尔网格划分系统进行网格划分与求解计算,不仅可以得到逆变器内温度分布,还可以得到逆变器内温度的增幅随着环境温度的上升而增长,证明了以自然冷却作为散热方式基本能够满足这款车载逆变器的散热要求。并通过设计实验,验证了仿真方法的可行性。因此,在小型车载逆变器产品设计早期,采用热仿真的方法可为产品热设计提供有效的理论指导,有利于提高产品的可靠性。

参考文献:

- [1] 李政. 车载逆变电源及其效率研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2004:31-41.
- [2] IANNELLO C, LUO S, BATARSEH I. Full bridge ZCS PWM converter for high-voltage high-power applications [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2002, 38(2): 515-526.
- [3] 杨成明. 车载逆变电源的研究与设计[D]. 大连:大连海事大学, 2005:12-15.
- [4] 丁成伟, 高鹤, 赵义忠, 等. 一种实用车载逆变器的设计[J]. 电子产品世界, 2008(1): 88-89.
- [5] DE JONG E C W, FERREIRA J A, BAUER P. Design techniques for thermal management in switch mode converters[J]. IEEE transactions on industry applications, 2006, 42(6): 1375-1386.
- [6] BILLINGS K, MOREY T. 开关电源手册[M]. 3版. 张占松, 汪仁煌, 谢丽萍, 等译. 北京:人民邮电出版社, 2006.
- [7] KALRA S. Effect of temperature dependence on performance of digital CMOS circuit technologies [C]// 2013 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC). Noida, India: IEEE, 2013: 392-395.
- [8] 李波, 李科群, 俞丹海. Flotherm 软件在电子设备热设计中的应用[J]. 电子机械工程, 2008, 24(3): 11-13.
- [9] 杨世铭. 传热学[J]. 北京:高等教育出版社, 1998: 106.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社有限公司, 2004.
- [11] 李玉宝, 王建萍, 吕召会. 矩形肋片散热器几何参数对散热的影响分析[J]. 电子机械工程, 2012, 28(2): 4-7.

[信息·简讯]

· 产品信息 ·

西门子推出新款伺服驱动系统为设备制造商简化项目工程

西门子将其全新开发的 Simotics S-1FK2 电机和专为其开发的 Sinamics S210 伺服驱动器,共同组成了全新伺服驱动系统,包括5个功率等级,功率范围从50 W到750 W。Sinamics S210 伺服驱动器集成了丰富的安全功能,可实现快速工程组态,并可通过Profinet 连接到上位控制器,使用 Web 服务器和一键优化功能,使得调试变得非常简单。与 Simotics 伺服电机配合使用,可实现小负载的高动态响应运动以及中高负载的超精密运动。电机与伺服驱动器之间只使用一根电缆连接。该全新驱动系统可广泛用于包装机械、物料抓取应用、木材和陶瓷加工,以及数字印刷。

Sinamics S210 伺服驱动器的主要优势是实现电机轴的高度动态控制。通过与 Simatic S7-1500 控制系统和 S7-1500T 运动控制系统相连接,可以完成从简单定位到复杂的运动控制。使用集成 Web 服务器即可完成对 S210 进行调试。通过一键自动优化功能,可根据不同的机械负载选择相应的动态系数,系统自动优化控制参数。集成安全功能包括“安全扭矩断开”(STO)和“安全停止1”(SS1)。2者都支持 PROFI-safe, STO 还可通过端子启用。凭借 Sinamics S210 伺服驱动器的快速采样,智能控制算法和高级编码器系统,以及低转子惯量和高过载能力,伺服电机可实现出色的动态性能和运动精度。在刚刚结束的2017年德国汉诺威工业博览会上,西门子展示了中心高为20、30和40 mm的电机。

(朱建芸)