文章编号:1674-2974(2024)08-0135-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024184

BMS电路板多模块协同热-力耦合建模及仿真分析

何莉萍[1,2†],原江鑫[1],李耀东[3]
(1. 湖南大学 整车先进设计制造技术全国重点实验室,湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082;
3. 湖南中南智能装备有限公司,湖南 长沙 410117)

摘 要:针对现有电动汽车电池管理系统(BMS)电路板研究仅仅考虑单一功能模块的温度场及其散热效果,缺乏考虑BMS多个功能模块在温度场和力场下的相互影响及协同效应的研究的情况,以某商用BMS电路板为研究对象,采用ANSYS构建了表征BMS多模块协同作用下的热-力耦合数值仿真分析模型并验证了其有效性.在此基础上,针对BMS电路板各功能模块温度场及热变形行为开展了数值仿真研究.结果表明:BMS电路板温度分布不均,最大温差达20.5 ℃.均衡模块存在积热,温度高达54.4 ℃.高温导致电路板组件发生热膨胀变形,同时电路板约束诱发均衡模块及供电模块边缘的贴片电阻出现热应力集中,两者共同作用致使BMS均衡模块、供电模块产生凸起翘曲变形,且Z轴热变形量随着温度升高而增大,最大变形量达9.5 μm,应针对BMS电路板上积热模块开展散热优化设计.

关键词:电动汽车;BMS;多模块;温度场;热变形;热-力耦合;仿真分析
中图分类号:U469.72 **文献标志码**:A

Thermal-stress Coupling Modeling and Simulation Analysis of Multiple Modules in BMS Circuit Board

HE Liping[1,2†], YUAN Jiangxin[1], LI Yaodong[3]
(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Hunan Central South Intelligent Equipment Co., Ltd., Changsha 410117, China)

Abstract: In light of the current research on Battery Management System (BMS) circuit boards for electric vehicles, which only takes into account the temperature field and heat dissipation effects of individual functional module but lacks consideration of the interdependence and cooperative effects under the temperature and force fields among multiple functional modules of the BMS, a certain commercial BMS circuit board is taken as the research object, the software ANSYS is used to construct a thermal-stress coupling numerical simulation analysis model that characterizes the synergistic action of multiple BMS modules, and the effectiveness of the model is verified. On this basis, a numerical simulation study was carried out on the temperature field and thermal deformation behavior of each functional module of the BMS circuit board. The results show that the temperature distribution of the BMS circuit board is uneven, and the maximum temperature difference reaches 20.5 ℃. The balancing module generates

* **收稿日期**:2023-06-14
基金项目:湖南省重点专项项目(2019GK2191),Key Special Projects in Hunan Province(2019GK2191)
作者简介:何莉萍(1967—),女,湖南长沙人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:lphe@hnu.edu.cn

heat, and the temperature reaches 54.4 ℃, which causes thermal expansion and deformation of circuit board components. At the same time, thermal stress concentration occurs at the chip resistors on the edges of the balancing module and the power supply module due to the circuit board constraint, which causes the balancing module and the power supply module of the BMS to produce protruding and warping deformation. The Z-axis thermal deformation increases with the temperature rising, and the maximum deformation amount reaches 9.5 μm. Therefore, the heat dissipation optimization design should be carried out for the heat-generating modules on the BMS circuit board.

Key words: electric vehicles; Battery Management System (BMS); multiple modules; temperature field; thermal deformation; thermal-stress coupling; simulation analysis

电动汽车作为一种近零排放的交通工具,对促成绿色交通、带动能源结构转型升级、实现双碳战略目标具有重要意义[1].为了确保电池的安全性和性能,电动汽车(Electric Vehicle, EV)上集成了复杂的电池管理系统(Battery Management System, BMS)来实现对电池组状态的监控以及各种控制和保护.因此,其可靠性显著影响着电池组的性能和安全,受到消费者和制造商的高度关注[2-6].相关研究指出,温度是导致电子设备故障的重要因素[7].BMS作为车载电子设备,其印刷电路板组件(Printed Circuit Board Assembly, PCBA)上数量众多的电子元器件组成了不同的功能模块.部分功能模块在工作时会产生大量的热[8-9],如果这些热量不能及时散出,就会降低PCBA上电子元器件的导电、耐压等性能,增大其失效率[10].此外,由于PCBA各组件的构成材料不同,且彼此相互约束,在温度影响下不同材料间热膨胀系数的差异会引起PCBA的热变形,产生热应力,造成PCBA上电子元器件焊点连接处产生裂纹,界面结构出现损伤,引发电气故障[11-13].这将威胁BMS的寿命和可靠性,影响整个BMS的功能安全.为了减小BMS电路板工作时的热变形,提高其可靠性,有必要在设计阶段对其温度场的分布和热变形进行分析和预测,从而为后续BMS的PCBA优化设计提供理论指导.

目前,已有部分学者对BMS的电路板组件(PCBA)开展了热分析及热变形研究.熊瑞等[8]结合有限元仿真和试验,获得了一套适用于BMS均衡模块的热分析仿真方法.Pattnayak等[9]基于均衡模块的热仿真模型对不同均衡策略下均衡模块的最高温度进行了仿真分析,确定出了散热最佳的均衡策略.这些研究仅仅考虑了BMS电路板单一功能模块的温度场及其散热效果,而未考虑电路板组件(PCBA)在温度场作用下的热变形,而热-力耦合效应导致的热变形恰恰是影响BMS可靠性的重要因素.为此,Lee等[14]研究了温度对BMS电路板上芯片组件不同封装模式下的热变形及其与机械疲劳的作用规律,提出了一种BMS疲劳寿命预测方法.Otto等[15]通过热-力耦合仿真与试验测量的方式研究了某款BMS电路板上控制模块的温度场与热变形.然而,BMS电路板上存在多种功能模块,现有热与热变形研究主要围绕BMS电路板上单一功能模块开展,未能考虑多个功能模块在温度场和力场下的相互影响及协同效应,需要进一步开展整个BMS电路板的温度场及其热变形研究,以期为优化BMS功能模块板级散热设计提供指导,从而提高电动汽车动力性与安全性.

本文以某款商用分布式BMS电路板为研究对象,采用ANSYS首次构建BMS整体而非单一功能模块的热-力耦合数值仿真分析模型并验证其有效性,对BMS电路板多功能模块(采集/均衡模块、供电模块、控制模块、通信模块等)的温度场及其热-力耦合热变形开展了系统研究,并对多模块协同作用下的温度场以及温度场导致的热变形行为进行了仿真.

1 热-力耦合有限元分析理论方法

BMS电路板上各功能模块元器件的材料参数不同,因材料热膨胀系数差异而出现不同程度的热变形.对于一个最小微元体,当温度变化为ΔT时,可引起微元体的线性热应变ε_0,也可称为初始应变[16-17]:

$$\varepsilon_0 = \alpha \Delta T \tag{1}$$

式中:α为材料的热膨胀系数,单位为10^{-6}/℃.

由于元器件会受到来自其内部或外部的约束,微元体无法自由变形从而产生热应力σ_T:

$$\sigma_T = E \cdot \varepsilon_0 = \alpha E \Delta T \tag{2}$$

式中:E为材料的弹性模量,单位为MPa.

在约束的影响下,这些热应力又引起该处发生机械应变ε_e,则最终元器件内的总应变ε,总应力σ可表示为:

$$[\varepsilon]=[\varepsilon_e]+[\varepsilon_0] \tag{3}$$

$$[\sigma]=\boldsymbol{D}[\varepsilon] \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{D}$为材料弹性模量组成的弹性矩阵.

商用有限元分析软件ANSYS中已经集成了上述的理论公式,在此基础上本研究设计了如图1所示的仿真工作流程.首先利用PCBA设计软件Altium Designer快速导出BMS电路板的PCBA几何模型.之后利用有限元软件ANSYS中的Design Modeler(DM)模块对几何模型进行前处理,通过Icepak热分析模块和Mechanical力学分析模块的协同工作,对PCBA进行热-力耦合仿真.

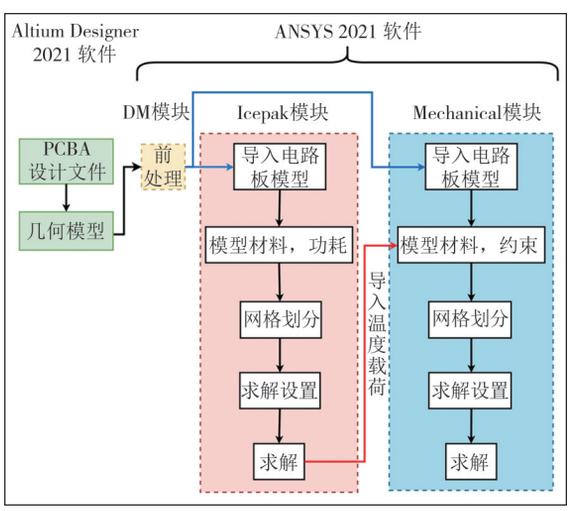


图1　BMS电路板热-力耦合仿真工作流程

Fig.1　Simulation workflow for thermal-stress coupling of BMS circuit boards

2　BMS电路板热-力耦合模型建立及试验验证

常用的分布式BMS硬件电路可分为"BMS主控板"和"BMS从控板"两种电路板组件(PCBA).BMS从控板作为获取电池信息的桥梁,负责采集电池电压、温度,并将其提供给BMS主控板来计算荷电状态(State of Charge, SOC),做各种决策[18].

图2为某商用分布式电池管理系统从控板,该BMS电路板主要由印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)、安装在PCB上的塑料接插件以及大量的贴片电子元器件组成.可以对16节串联锂离子电池的电压、温度实施监控并实现电压均衡、故障保护以及通信功能.由图2可知BMS电路板上安装有众多的电子元器件以实现多种功能.BMS电路板主要包括四个功能模块:采集/均衡模块、供电模块、控制模块、通信模块.

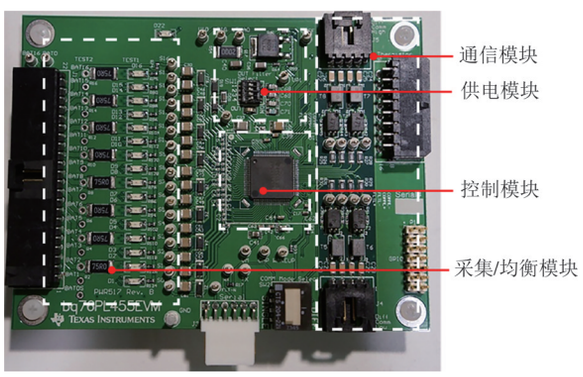


图2　BMS电路板实物图及其功能模块组成

Fig.2　Photo of BMS circuit board and its functional module composition

2.1　热-力耦合模型的建立

在PCBA相关建模研究中,功耗较大的元器件是产热的主要来源,是导致PCBA过热性能降低和失效的主因.为了尽可能获得接近真实情况的仿真结果,同时保证仿真的收敛性和计算效率,通常只考虑电路板上功耗较大的元器件主体,省略元器件的引脚以及尺寸较小且功耗较低的组件.因此,本研究建立BMS电路板的几何模型时进行了一些简化与假设.

BMS电路板中较大功耗元器件为均衡模块的贴片电阻R1、R2、R3~R14、R15、R16,供电模块中的贴片电阻R52、R54和三极管(Q17)、控制模块中的主控芯片(U1).采集模块和通信模块中无较大功耗元器件,故建模时忽略不计.

同时,为了避免仿真过程中出现应力集中的失误,几何建模严格按照元器件外形尺寸建立,对模型截面存在突变的位置进行圆角处理,在网格划分时对孔洞进行局部网格加密.简化后的BMS电路板几何模型如图3所示.各元器件几何尺寸和主要材料参数见表1.

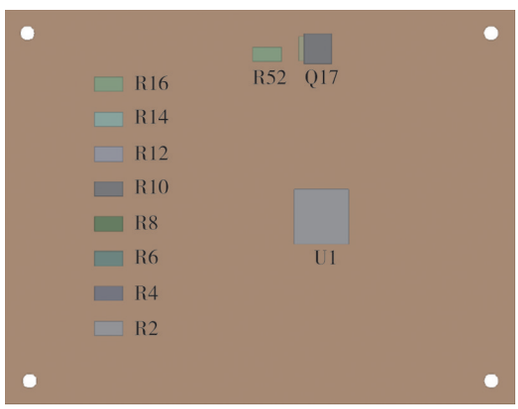
本研究假设PCB上的铜箔走线在PCB中均匀分布,将其与PCB看作一个整体考虑.同时,假设各元器件内部的材料都是均匀分布的.

为了获得BMS电路板在发热量最高的工作条件下各功能模块的温度及分布,对BMS电路板上各功能模块中发热元器件的功耗参数进行了分析计算,各高功耗发热元器件的功耗参数如表2所示.

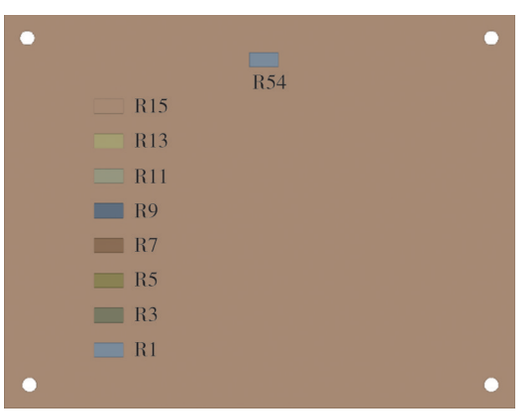
表 1 元器件的几何尺寸及材料参数

Tab.1 Geometric dimensions and material parameters of components

器件类别	几何尺寸/(mm×mm×mm)	材料	ρ/(kg·m^{-3})	K/(W·m^{-1}·K^{-1})	α/[1E^{-6}(℃)$^{-1}$]	v	E/GPa
PCB	111.7×86.36×1.60	玻纤板(FR-4),铜	2 264	25.23(XY)0.37(Z)	15.0(XY)55.0(Z)	0.15	29.11
主控芯片	12.00×12.00×1.20	封装树脂	2 783	47.90	11.8	0.29	48.92
贴片电阻	6.30×3.15×0.60	氧化铝陶瓷	3 720	24.70	6.9	0.23	300.00
三极管	7.30×6.58×2.30	铜	8 900	385.00	17.6	0.34	113.00
		封装树脂	3 967	113.30	14.6	0.30	57.91



(a)正面视图



(b)反面视图

图 3 BMS 电路板几何模型视图

Fig.3 Geometric model view of BMS circuit board

表 2 元器件功耗参数

Tab.2 Power consumption parameters of components

元器件编号	器件类别	P/mW
R1, R3, R5, R7, R9, R11, R13, R15	贴片电阻	0
R2, R4, R6, R8, R10, R12, R14, R16	贴片电阻	235.2
U1	主控芯片	38.5
R52、R54	贴片电阻	9.8
Q17	三极管	407.4

在研究中,BMS 电路板以自然冷却方式进行散热,故 Icepak 热分析模块中边界条件设置为:环境温度为 25 ℃,流动状态为自然对流,开启重力及辐射换热[19].经过网格质量及独立性验证后,Icepak 模块中的 BMS 电路板及空气域被离散化为 354 885 个网格,412 991 个节点.在 Mechanical 模块中,BMS 电路板几何模型被划分为 60 204 个网格,307 219 个节点,如图 4 所示.将 Icepak 温度场计算结果通过时序间接耦合的方式映射至 Mechanical 模块中,作为 Mechanical 静力场分析的热载荷,实现温度场和力场的耦合.关联热载荷后,对 BMS 电路板几何模型四周的 4 个 M3 螺栓孔施加固定约束.

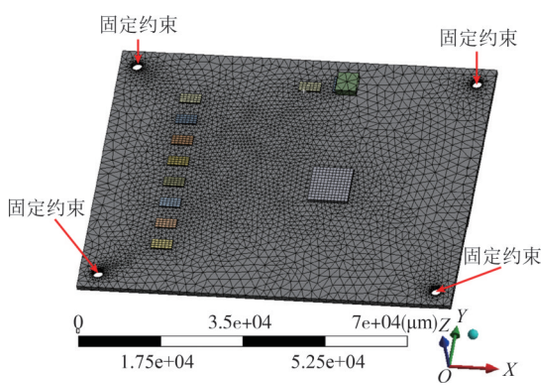


图 4 BMS 电路板几何模型网格划分及固定约束施加位置示意图

Fig.4 Geometric model mesh and fixed constraint location for BMS circuit board

2.2 试验方案

为验证热-力耦合仿真模型的有效性,本研究搭建了反映温度-位移规律的热-力耦合试验平台,如图 5 所示.

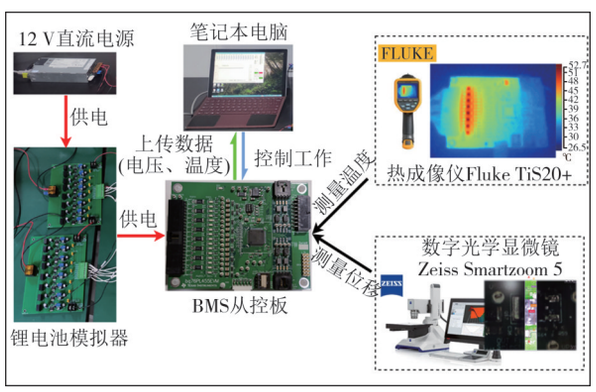


图 5 BMS 电路板热-力耦合试验平台

Fig.5 BMS circuit board thermal-stress coupling test platform

试验平台包括12 V直流电源(用于模拟16节串联锂电池的锂电池模拟器[20])、BMS电路板、笔记本电脑、红外热像仪(Fluke TiS20+,发射率0.95)和数字光学显微镜(Zeiss Smartzoom 5,最大分辨率0.56 μm).试验在室温25 ℃条件下进行,采用数字光学显微镜获取初始条件下BMS电路板指定区域特征点位坐标.测试分析时,BMS电路板的控制模块会实时将主控芯片的核心温度上传至笔记本电脑上位机控制软件中,当核心温度不再变化后(约1 h左右),使用红外热成像仪记录BMS电路板当前的温度.同时,再次使用数字光学显微镜记录BMS电路板指定区域特征点的新坐标,并与初始条件下坐标进行对比,采用光学测量标记点位移方法确定指定区域温度与位移的变化规律.

光学测量标记点位移方法如图6所示.假设初始条件下在BMS电路板上选择的两个标记点及其坐标为$A_1(X_{A1},Y_{A1})$、$B_1(X_{B1},Y_{B1})$.工作t时间段后,由于PCBA发生了热变形,两个标记点的坐标变为$A_2(X_{A2},Y_{A2})$、$B_2(X_{B2},Y_{B2})$.则工作t时间段前后,两标记点之间的相对位移可用两标记点之间线段在X和Y方向投影的长度变化来表示:

$$\Delta X=\left|X_{B2}-X_{A2}\right|-\left|X_{B1}-X_{A1}\right| \tag{5}$$

$$\Delta Y=\left|Y_{B2}-Y_{A2}\right|-\left|Y_{B1}-Y_{A1}\right| \tag{6}$$

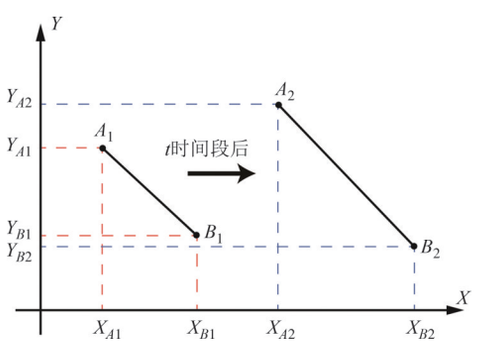


图6　光学测量标记点位移方法示意图

Fig.6　Schematic diagram of optical measurement mark point displacement method

3　结果与讨论

3.1　试验结果

待BMS电路板温度稳定后,采用热成像仪获得整个BMS电路板的温度云图(如图7所示).

由图7可见,温度较高的区域呈红色和橙黄色,位于均衡模块以及供电模块所在区域,其中均衡模块温度在51.9~54.4 ℃.控制模块及通信模块的温度则较低,呈蓝绿色.表3为试验测得的元器件温度与仿真结果对比.对比分析表明,试验与仿真的相对误差均小于6.9%,验证了热-力耦合仿真分析模型中热分析模型的有效性.

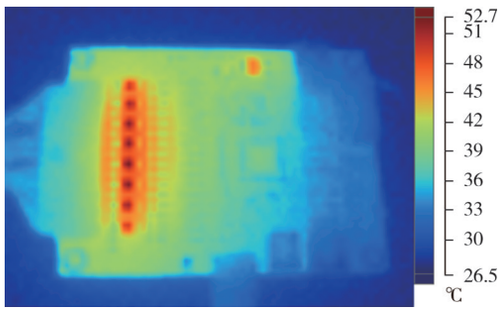


图7　试验测量BMS电路板温度云图

Fig.7　Temperature map of BMS circuit board from experimental measurement

表3　25℃环境温度下BMS电路板温度试验与仿真结果对比

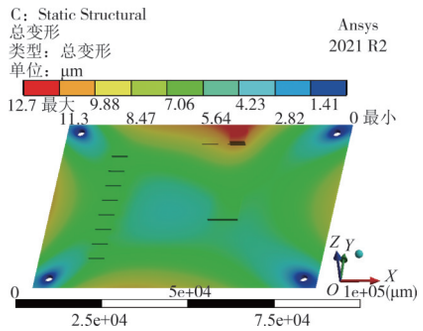
Tab.3　Comparison of temperature test and simulation results for BMS circuit board at 25 ℃ ambient temperature

元器件	试验结果/℃	仿真结果/℃	相对误差/%
R2	49.0	51.9	5.9
R4	51.2	53.3	4.1
R6	52.3	54.0	3.3
R8	52.5	54.3	3.4
R10	52.1	54.4	4.4
R12	52.1	54.2	4.0
R14	51.1	53.8	5.3
R16	49.3	52.7	6.9
U1	39.2	38.2	2.6
Q17	46.0	48.9	6.3

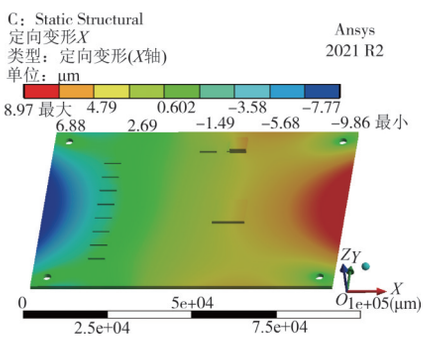
图8(a)为仿真得到的BMS电路板总热变形云图,选取供电模块三极管Q17所在位置为位移试验的测量区域.在试验开始前对该区域进行拍摄,待BMS电路板工作温度稳定后进行第二次拍摄.图8(d)是位移试验中拍摄的图像,从图中选取了特征明显的A、B、C、D、E、F,共6个标记点.

通过数字光学显微镜及计算机处理获取各标记点的坐标,将其代入式(5)、式(6)中计算,得到表4结果.

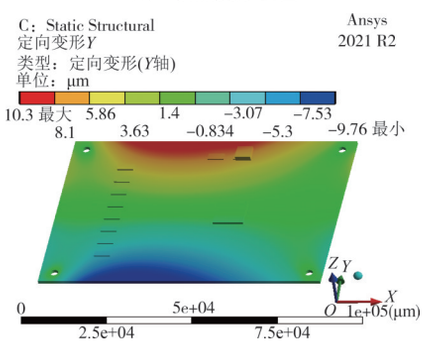
从表4可知,测量区域内的标记点越靠近PCB的中心,变形量越小.同时,标记点相距越近,它们之间的位移差距越小.这是因为它们相距较近,热变形趋势相同,相对位移不明显.因而相距较远的标记点的热变形更能体现变形.从相距较远的几个标记点



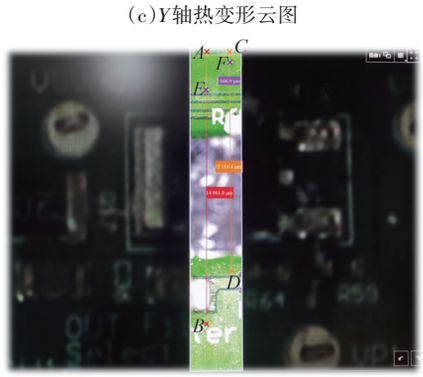
(a)总热变形云图



(b)X轴热变形云图



(c)Y轴热变形云图



(d)位移测量区域及标记点示意图

图 8 BMS 电路板热变形云图及标记点示意图

Fig.8 Thermal deformation map and mark point schematic diagram of BMS circuit board

的计算结果可知,该区域试验测量得到的X轴方向位移在3~4 μm范围内,Y轴方向的位移在7~11 μm范围内,表明该区域内Y轴方向的热变形量明显大于X轴方向的热变形量.结合图8(b)和图8(c)的BMS电路板X、Y轴热变形仿真结果,可以看出试验

表 4 位移试验测量结果

Tab.4 Displacement test measurement results

标记点连线	ΔX/μm	ΔY/μm
AB	1	8
AC	3	0
AD	4	9
AE	0	2
AF	3	1
BD	3	1
CB	2	8
CD	1	9
CE	3	2
CF	0	1
EB	1	10
ED	4	11
FB	2	7
FD	1	8
EF	3	3

测量区域内X轴方向的热变形量在3~4 μm范围内,Y轴方向的热变形量在5~10 μm范围内,热变形趋势与试验结果相似,且平均值误差在25%以内.综合温度及位移的测量与仿真结果对比表明,本研究所建立的BMS电路板热-力耦合模型是有效的.

3.2 BMS电路板热-力耦合仿真结果

BMS电路板在25 ℃环境下工作的温度场仿真结果如图9所示.其中,各主要发热元器件的温度分布如图10所示.

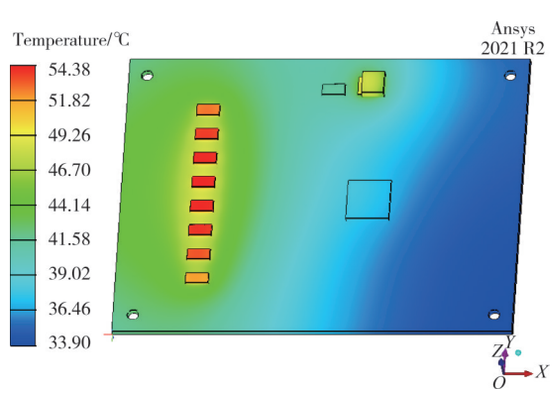


图 9 BMS 电路板温度场仿真结果

Fig.9 Simulation results of temperature field for BMS circuit board

可见,PCB上的高温区域主要集中在均衡模块和供电模块,区域内的最高温度分别达到了54.4 ℃和48.9 ℃.结合图10中各元器件最高温度情况可知,均衡模块的中心位置出现了积热,PCB正面参与工作的均衡电阻与背面未参与工作的均衡电阻的温度均呈抛物线状分布.最高温度54.4 ℃出现在均衡电

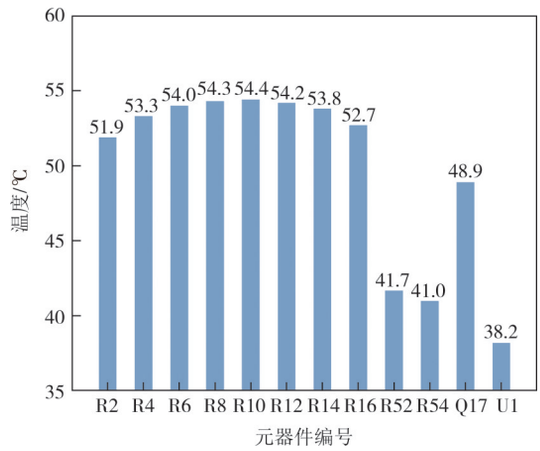


图 10　主要发热元器件温度分布图

Fig.10　Temperature distribution chart of main heat-generating components

阻 R10 所在位置.这一方面是因为其发热量大且元器件的散热表面积小,另一方面,多个均衡电阻同时工作导致越靠近均衡模块中心,散热越困难,积热现象越严重.

供电模块是以 NPN 三极管组成的 LDO(Low Dropout Regulator,低压差线性稳压器)电路来实现供电的.其中,三极管 Q17 负责将 16 节串联锂电池高达 67 V 的电压转换为主控芯片 U1 工作所需的 5 V 电压.在这样的高电压差环境下,超出 5 V 部分的电压产生的功耗需要三极管 Q17 以热的形式进行耗散,使得其温度达到了 48.9 ℃.

相比于均衡模块和供电模块,主控芯片 U1 的功耗较低,散热表面积大,所在区域附近没有高发热元器件,最高温度仅为 38.2 ℃.总之,BMS 电路板上的温度场分布不均,最高温差达 20.5 ℃,叠加 BMS 电路板 4 个 M3 螺栓孔施加的固定约束,导致 BMS 电路板产生热应力和热变形.

对于电路板组件而言,热应力及 Z 轴方向的翘曲变形对元器件本体及其焊点可靠性的影响最大[21].图 11 为 BMS 电路板的热应力云图.

由图 11 可见,BMS 电路板四角的螺栓孔处出现了最大的热应力,为 78.3 MPa.这是因为螺栓孔处存在的固定约束,限制了其附近区域的膨胀变形.位于均衡模块边缘的贴片电阻底部四角与 PCB 接触的位置均存在较大的热应力.其中,位于 BMS 电路板的背面、没有参与均衡工作的贴片电阻 R15 与 PCB 接触的一角出现了明显的应力集中,热应力达到了 59.7 MPa.同时,供电模块中的贴片电阻 R52 与 PCB 接触的一角也出现了应力集中,为 34.3 MPa,其位置靠近发热量较大的三极管 Q17,如图 12 所示.

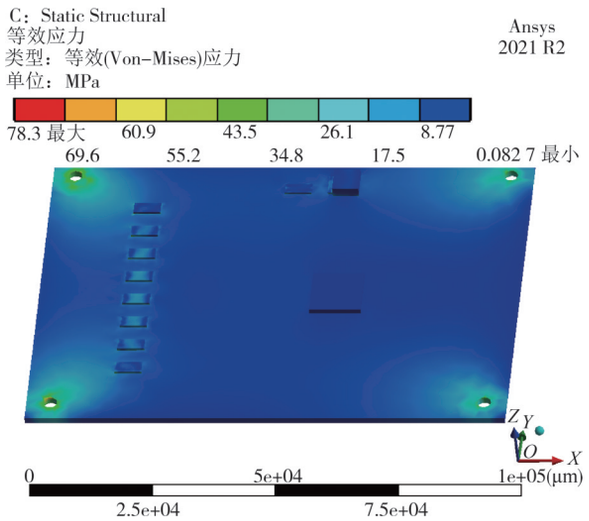
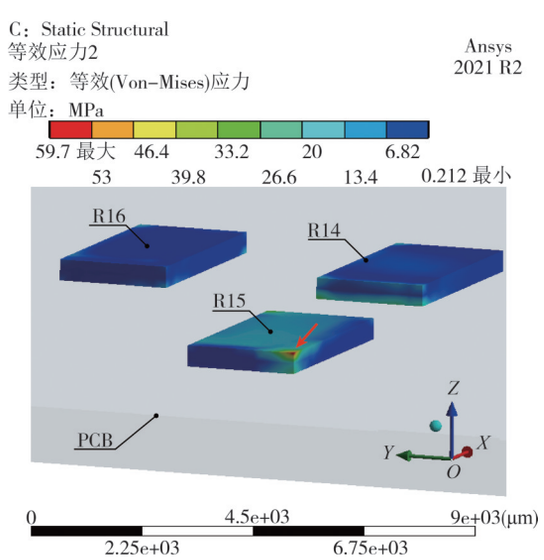
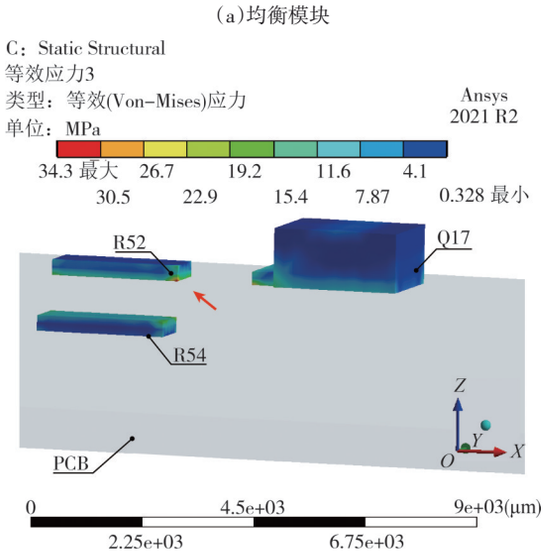


图 11　BMS 电路板热应力云图

Fig.11　Thermal stress map of BMS circuit board



(a)均衡模块



(b)供电模块

图 12　BMS 电路板局部热应力云图

Fig.12　Cloud map of local thermal stress for BMS circuit board

图 13 为 BMS 电路板的 Z 轴热变形云图.可见,在温度、约束及热应力的共同影响下,均衡模块和供电模块所在位置呈凸起状翘曲.最大 Z 轴热变形出现在供电模块的三极管 Q17 处,变形量为 9.5 μm,而在 4 个螺栓孔处的热变形则几乎为零.

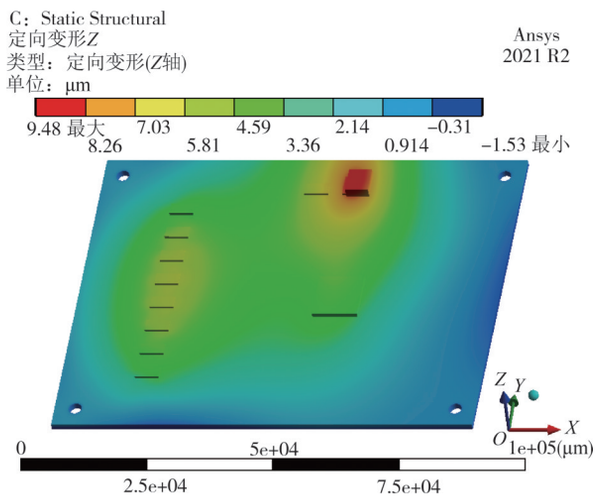


图 13 BMS 电路板 Z 轴热变形云图

Fig.13 Z-axis thermal deformation map of BMS circuit board

这是由于 BMS 电路板四角的 4 个螺栓孔所施加的固定约束限制了 PCBA 外围部分的热变形,而 PCBA 中心部分距离固定约束较远,在温度影响下产生了更大的热变形.为了分析 BMS 电路板组件温度、热应力与热变形三者之间的关系,提取 BMS 电路板主要元器件的温度、热应力及 Z 轴热变形,见表 5.

表 5 元器件温度、热应力及 Z 轴热变形

Tab.5 Temperature, thermal stress and Z-axis thermal deformation of components

元器件编号	温度/ ℃	热应力/MPa	Z 轴热变形/μm
R2	51.9	38.8	3.9
R4	53.3	35.9	4.9
R6	54.0	38.1	5.6
R8	54.3	25.4	6.1
R10	54.4	24.3	6.2
R12	54.2	24.6	6.0
R14	53.8	37.9	5.5
R16	52.7	35.9	4.6
R52	41.7	34.3	7.1
Q17	48.9	29.0	9.7
U1	38.2	3.4	4.5

由表 5 可见,热应力较大的地方多集中在靠近螺栓孔固定约束的位置以及温度梯度变化较大的区域,随着温度的升高,电路板组件的 Z 轴热变形量也增大.图 14 为均衡模块截面的 Z 轴热变形云图.

由图 14 和表 5 可知,越靠近均衡模块中心,温度梯度越小,距离螺栓孔的固定约束越远,使得该处的热应力越小,Z 轴热变形量越大;越靠近均衡模块边缘,温度梯度越大,受到来自螺栓孔固定约束的影响越大,使得该处的热应力越大,Z 轴热变形量越小.供电模块与控制模块中元器件的温度、热变形、热应力变化情况也符合上述特征.

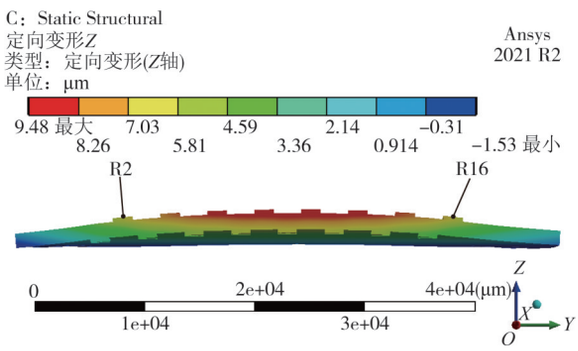


图 14 均衡模块截面 Z 轴热变形云图

Fig.14 Z-axis thermal deformation map of equalization module cross-section

综合上述结果可知均衡模块是本研究中 BMS 电路板上发热最大的功能模块,在热-力耦合效应的影响下,均衡模块及供电模块边缘的贴片电阻均出现了较大的热应力.由于这些贴片电阻主要由陶瓷材料构成,在局部热应力的影响下极易出现裂纹或焊点开裂,从而失效[22-23],降低 BMS 电路板的可靠性.因此,在后续的 BMS 电路板优化设计时,应优先考虑增强均衡模块及供电模块的散热,如优化均衡模块中均衡电阻的布局,选择散热面积更大的贴片电阻封装.对于供电模块,则应避免在三极管 Q17 附近放置比其尺寸更小的陶瓷基材元器件,或者考虑将供电模块的 LDO 供电方案更换为发热相对较小的开关电源方案.

4 结 论

1) 本文以某款商用分布式 BMS 电路板为研究对象,采用 ANSYS 首次构建考虑 BMS 多模块协同作用下的热-力耦合数值仿真分析模型,并通过搭建的试验平台进行对比分析.结果表明,试验与仿真的相对误差均小于 6.9%,验证了建立的热-力耦合仿真分析模型的有效性.

2) 采用验证的热-力耦合仿真分析模型,对BMS电路板采集/均衡模块、供电模块、控制模块、通信模块开展了温度场及热-力耦合热变形仿真研究.结果指出:BMS电路板上均衡模块和供电模块存在积热,均衡模块和供电模块最高温度分别为54.4 ℃和48.9 ℃. BMS电路板上温度存在不均匀性,最大温差达20.5 ℃.

3)BMS电路板温度场的不均匀性,以及BMS电路板4个M3螺栓孔施加的固定约束,导致BMS电路板产生热应力和翘曲变形.热应力多集中在约束位置及温度梯度变化较大的区域,最大热应力达78.3 MPa. BMS电路板温差及多模块热应力的协同作用导致BMS均衡模块、供电模块出现凸起翘曲变形.最大Z轴热变形出现在供电模块的三极管Q17处,变形量为9.5 μm.结果表明,该商用BMS电路板需要开展均衡模块及供电模块散热优化设计,营造高散热、低温差的良好生态.

总之,本研究针对BMS电路板整体而不是单个功能模块建立了数值仿真模型并开展了热-力耦合数值仿真分析研究,BMS整体仿真结果反映了多个功能模块在温度场和力场相互协同作用下的温度场以及温度场导致的热变形行为,研究发现了BMS电路板上高温积热区域,以及出现最大应力和翘曲变形的区域.积热、最大应力和翘曲变形区域的明确有望为BMS功能模块的散热优化设计提供有价值的参考.

参考文献

[1] 袁晓华,华小婧. 浅析电动汽车助力绿色交通碳中和目标实现[J]. 世界环境, 2021(3): 56-59.
YUAN X H, HUA X J. A brief analysis of the role of electric vehicles in facilitating the realization of carbon neutrality target through green transport[J]. World Environment, 2021(3): 56-59. (in Chinese)

[2] 廖晓军,何莉萍,钟志华,等. 电池管理系统国内外现状及其未来发展趋势[J]. 汽车工程,2006,28(10):961-964.
LIAO X J, HE L P, ZHONG Z H, et al. A review of battery management system[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(10): 961-964. (in Chinese)

[3] 卢兰光,李建秋,华剑锋,等. 电动汽车锂离子电池管理系统的关键技术[J]. 科技导报,2016,34(6):39-51.
LU L G, LI J Q, HUA J F, et al. A review on the key issues of the lithium-ion battery management [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(6): 39-51. (in Chinese)

[4] 冯刘中, 张雅文, 张舟. 电动汽车BMS系统架构与发展趋势[C]// 2021中国汽车工程学会年会论文集, 2021: 276-281.
FENG L Z, ZHANG Y W, ZHANG Z. Electric vehicle BMS system architecture and development trend [C]//Proceedings of 2021 Annual Meeting of China Society of Automotive Engineering, 2021: 276-281.(in Chinese)

[5] CUI Y X, LIN K S, ZHU J X, et al. Quantum-inspired degradation modeling and reliability evaluation of battery management system for electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104840.

[6] SHU X, YANG W X, GUO Y F, et al. A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system[J]. Journal of Power Sources, 2020, 451: 227805.

[7] ZVEI. Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules[M]. Germany, 2008.

[8] 熊瑞, 李幸港. 电池管理系统被动均衡电路的热仿真研究[C]//2019中国汽车工程学会年会论文集, 2019: 4.
XIONG R, LI X G. Thermal simulation of passive equalization circuit in battery management system [C]//Proceedings of 2019 Annual Meeting of China Society of Automotive Engineering, 2019: 4.(in Chinese)

[9] PATTNAYAK R A, VIJAY T. Thermal analysis of cell balancing for battery management system in electric vehicle[C]//2020 26th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). Berlin, Germany. IEEE, 2020: 1-7.

[10] LAKSHMINARAYANAN V, SRIRAAM N. The effect of temperature on the reliability of electronic components[C]//2014 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). Bangalore, India. IEEE, 2014: 1-6.

[11] 于岩,王守绪,何为,等. 基于COSMOSWORKS有限元分析的HDI板热应力仿真[J]. 印制电路信息,2012,20(增刊1):494-500.
YU Y, WANG S X, HE W, et al. Thermal stress simulation of HDI PCB based on finite element analysis of COSMOSWORKS [J]. Printed Circuit Information, 2012, 20(Sup.1): 494-500. (in Chinese)

[12] 李政,史兴华,王海东,等. 电路板在温变载荷作用下的响应特性分析[J]. 装备制造技术,2019(6):50-54.
LI Z, SHI X H, WANG H D, et al. Mechanical response and fatigue life analysis of PCB in thermo-mechanical coupling environment[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(6): 50-54.(in Chinese)

[13] 成钢. 电路板设计中的膨胀系数匹配问题[J]. 电子设计工程,2011,19(3):57-60.
CHENG G. The problem of CTE matching in PCB design[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(3): 57-60.(in Chinese)

[14] LEE J H, JEONG H Y. Fatigue life prediction of solder joints with consideration of frequency, temperature and cracking energy density[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 61: 264-270.

[15] OTTO A, SCHINDLER-SAEFKOW F, RZEPKA S, et al.

Thermo-mechanical stress investigations on newly developed passive balancing board for battery management systems [C]// AmE 2016 - Automotive meets Electronics; 7th GMM-Symposium. Dortmund, Germany. VDE,2016:1-6.

[16] 邓涛,胡丰宾,孙冬野. 湿式多片离合器的热弹性失稳分析[J]. 汽车工程,2012,34(10):918-922.
DENG T, HU F B, SUN D Y. An analysis on the thermoelastic instability of wet multi-disc clutch[J]. Automotive Engineering, 2012,34(10):918-922.(in Chinese)

[17] 赵亮,郭建平,田洋. 机载电子设备热力耦合仿真分析[J]. 机械研究与应用,2016,29(2):31-32.
ZHAO L, GUO J P, TIAN F. Thermo-mechanical coupling simulation analysis of airborne electronics equipment [J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(2): 31-32. (in Chinese)

[18] 王芳,夏军. 电动汽车动力电池系统设计与制造技术[M]. 北京:科学出版社,2017.
WANG F,XIA J. Design and manufacturing technology of battery pack for electric vehicle[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)

[19] 李承隆. 电子产品热设计及热仿真技术应用的研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
LI C L. Research on thermal design of electronic products and application of thermal simulation technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)

[20] 周嘉诚,刘芳. 基于有限元的车载电路板多场热应力分析[J]. 武汉纺织大学学报,2017,30(6):76-80.
ZHOU J C, LIU F. Thermal stress analysis of the PCB assembly in vehicle under different thermal field based on finite element method[J]. Journal of Wuhan Textile University, 2017, 30(6): 76-80.(in Chinese)

[21] 秦智晗. 高压共轨电控柴油机ECU热性能分析及优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
QIN Z H. Research on thermal property analysis and optimization of high-pressure common-rail electronic-controlled diesel Engine ECU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.(in Chinese)

[22] 范士海. 表贴电阻典型的失效模式及机理分析[J]. 环境技术,2019,37(4):75-79.
FAN S H. Failure mode and failure mechanism analysis of surface mounting resistor[J]. Environmental Technology, 2019, 37(4):75-79.(in Chinese)

[23] 曹耀龙,高东阳,裴选,等. 贴片电阻典型失效案例分析[J]. 环境技术,2022,40(2):126-129.
CAO Y L, GAO D Y, PEI X, et al. Typical failure case analysis of surface mounting resistors [J]. Environmental Technology, 2022,40(2):126-129.(in Chinese)