

DOI: 10.3901/JME.2021.14.160

# 动力电池组动态均衡时的热安全边界计算与验证<sup>\*</sup>

吴舒婕 王军 熊瑞 李幸港

(北京理工大学电动车辆国家工程实验室 北京 100081)

**摘要:** 均衡系统是解决动力电池系统不一致性的有效途径,然而电池组均衡电路产热过大也易引发控制器安全问题。针对均衡电路产热引发的热安全问题,以某分布式控制器为研究对象,建立电池管理系统控制器和电路板的热力学模型;通过温度场仿真研究不同动态均衡控制策略下电路板的最高温度以及温度分布;分析开启通道位置对动态均衡电路板温度分布的影响,计算在满足热安全设计条件下的各工况下的最大均衡工作效率及热安全边界,获得一套适用于电池管理系统均衡时的热力学模型建立和热仿真分析的方法。仿真与试验结果表明,任意采样点模型误差小于4℃,可以直观准确模拟动态均衡电路板的温度分布。

**关键词:** 电池管理系统; 动态均衡; 温度场仿真; 热安全边界

**中图分类号:** TM912

## Calculation and Verification of Thermal Safety Boundary for Dynamic Equalization of Battery Pack

WU Shujie WANG Jun XIONG Rui LI Xinggang

(National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** The equalization system is an effective way to solve the inconsistency of the battery system. However, excessive heat generation of the battery equalization circuit can easily cause the safety of the controller. Aiming at the thermal safety problem caused by the heat generation of the equalizing circuit, a distributed controller is taken as the research object. A thermodynamic model of the battery management system controller and the circuit board is established. The highest temperature and temperature distribution of the circuit board under different dynamic equilibrium control strategies are studied through temperature field simulation and the influence of the opening channel position on the temperature distribution of the dynamic equilibrium circuit board is analyzed. Calculate the maximum equalization working efficiency and thermal safety boundary under each working condition under the thermal safety design conditions and obtain a set of thermodynamic model establishment and thermal simulation analysis methods that can be applied to the equalization of the battery management system. The simulation and experimental results show that the model error of any sampling point is less than 4℃, which can intuitively and accurately simulate the temperature distribution of the dynamic equalization circuit board.

**Key words:** battery management system; dynamic equalization; temperature field simulation; thermal safety boundary

## 0 前言

为了缓解能源短缺和环境污染的双重压力,发展和推广以锂离子动力电池为主要能源的新能源汽车成为了国际共识<sup>[1]</sup>。随着电动汽车动力电池系统

功率、容量需求的不断提高,电池组中单体数量逐渐增多。然而,单体、模组间的不一致性管理对动力电池管理系统(Battery management system, BMS)带来了巨大挑战。为了提高动力电池单体间的一致性和能量利用率,需要采用合理的均衡控制策略。目前常采用的均衡策略主要分为主动均衡策略和被动均衡策略<sup>[2]</sup>,主动均衡策略是将能量较高单体的能量通过外部电路转移给能量较低单体;而被动均

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51922006)。20201227 收到初稿,20210406 收到修改稿

衡策略是将能量较高单体通过电阻分流的方式以热量的形式耗散<sup>[3]</sup>。由于结构简单、易于实现和成本较低等优点，被动均衡策略被大量使用<sup>[4]</sup>。但由于动力电池组的大电流、高功率特性，均衡电路上的电阻将产生大量的热量，倘若不能及时地将这些热量耗散，会降低 BMS 控制器及动力电池组的可靠性和安全性。高温环境下，电子元器件的失效率随指数式增长<sup>[5]</sup>；当温度进一步升高，局部过热会导致动力电池组内部发生化学副反应，这一系列放热副反应会使得电池组内部温度进一步上升，从而引发动力电池热失控。

目前，大多研究集中在动力电池热和安全管理上。欧阳明高院士团队提出描述动力电池热失控的时序图<sup>[6]</sup>，用以解析动力电池热失控机理，并且系统地材料、单体和系统等各个层面总结了动力电池安全防控策略<sup>[7]</sup>。孙逢春院士团队总结了动力电池故障诊断方法及其应用特点<sup>[8]</sup>，针对动力电池外部短路故障，建立了三维热-力模型，描述动力电池热应力场动态变化规律<sup>[9]</sup>，并提出极速自加热的方法，以改善动力电池低温性能<sup>[10]</sup>。同时，采用双卡尔曼滤波算法，实现动力电池内部温度的精确估计，为热失控预警和安全管理提供了理论支撑<sup>[11]</sup>。然而，目前针对 BMS 控制器及其电子元器件的安全问题研究较少，10 度法则表明每当元器件温度降低 10 °C，元器件的可靠性增长一倍<sup>[12]</sup>。由此可见，BMS 控制器的散热情况直接影响 BMS 控制器的稳定性和可靠性。刘世昌等<sup>[13]</sup>针对 BMS 中的功率电路开展了温度场仿真研究，可以预测出功率器件在实际电路板使用中的发热情况。但在电池动态均衡需求下的温度场仿真鲜有研究，以及满足热安全条件下的最优均衡工作效率也少有讨论。因此，分析动力电池动态均衡需求下的热安全边界具有重要意义。

本文首先针对 BMS 中印刷电路板(Printed circuit board, PCB)产热问题，对芯片和电阻进行功耗分析，并建立了 BMS 控制器和 PCB 板的热力学模型，该模型可以获得 BMS 控制器的温度场分布。进一步研究了不同动态均衡控制策略下 PCB 板的最高温度以及温度分布，分析了开启通道位置对动态均衡电路板温度分布的影响。最后基于不同动态均衡工况下的温度场仿真结果，计算了在满足热安全设计条件下的各工况下的最优均衡工作效率及热安全边界，有助于指导动力电池组均衡策略和热管理策略的制定以及 PCB 板结构制造。

## 1 电池管理系统热力学建模

电池管理系统均衡电路工作时，PCB 板中热量的传递方式通常是以热传导的方式从芯片及均衡电阻传递至基板以及控制器封装外壳，外壳与外界主要是通过通过对流换热方式发生热交换。此过程满足热力学第一定律

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (1)$$

式中， $\rho$  为密度， $C$  为比热， $T$  为温度， $\lambda$  为导热系数， $x, y, z$  表示坐标轴， $q$  为产热率。

假设芯片以及均衡内阻为均匀且各向同性的，则  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ 。故塑封芯片在三维空间上传热的热传导方程为

$$\frac{\rho C}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (2)$$

同时，热力学模型的边界条件可以由牛顿冷却定律计算

$$q_h = -hA(T - T_{amb}) \quad (3)$$

式中， $q_h$  为散热速率， $h$  为对流换热系数， $A$  为散热表面积， $T_{amb}$  为环境温度。由于 BMS 控制器处于温箱强风工况，控制器外壳对流换热系数设置为 20 W/(m<sup>2</sup>·K)，而 PCB 板处于自然无外界强风中，对流换热系数设置为 5 W/(m<sup>2</sup>·K)，其他具体的材料参数设置见表 1。

表 1 热物性参数

元器件	材料	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	比热容/ [J/(kg·K)]	热导率/ [W/(K·m)]
芯片	硅	2 330	705	150
贴片电阻	陶瓷	3 720	880	24.7
PCB 基板树脂材料	FR4	1 200	880	0.3
PCB 铜线	铜	8 960	384	399
BMS 外壳	环氧树脂	1 120	1 400	0.2

### 1.1 元器件的产热计算

根据式(2)得出热力学模型的输入为产热率，对控制器进行均衡产热测试试验发现，BMS 控制器中的主要发热元器件包含被动均衡管理芯片、板载电源模块的电源芯片产热以及均衡电阻，具体计算如下。

(1) 被动均衡管理芯片产热计算。此分布式 BMS 控制器的被动均衡管理芯片是 LTC 6811 芯片，根据其手册可以获取工作电流  $I_c = 0.012$  A，工作电

压  $U_c=5\text{ V}$ , 故其产热功率为

$$P_c = U_c I_c = 0.012 \times 5 = 0.06\text{ W} \quad (4)$$

(2) 电源芯片产热计算。假设板载电源模块的输出功率为管理芯片 LTC 6811 的产热功率, 电源芯片的输出效率  $\eta$  查阅手册知为 0.6, 其消耗的功率主要以热量的形式耗散, 故其产热功率

$$P_s = P_c \times (1 - \eta) / \eta = 0.04\text{ W} \quad (5)$$

(3) 均衡电阻产热计算。被动均衡工况开启后, 考虑均衡电阻产热最大时的情况, 假设均衡电阻两端电压  $U_b$  为电池单体的最高电压, 即 4.2 V, 均衡电阻阻值为 33  $\Omega$ , 故其产热功率为

$$P_R = U_b^2 / R = 0.534\text{ W} \quad (6)$$

由于实际应用中, 电路板设计的差异, 以上产热功率的计算, 仅为参考值。

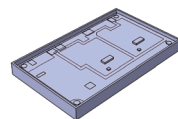
## 1.2 热力学模型建立

根据控制器的实际结构和元器件的分布位置, 利用 Solidworks 画出各零件, 并组成装配体模型。为了提高热仿真的效率和精度, 基于实际结构对模型进行了如下改进。

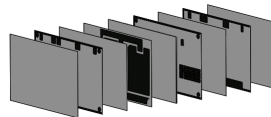
(1) 为提高仿真效率, 省略了大量不生热或者生热很小的电子元器件, 由于分布式 BMS 控制器外壳与电路板没有直接连接, 对散热影响较小, 因此忽略了外壳中的细小结构, 以减少仿真网格数量。

(2) PCB 板是一种由基板树脂材料、铜线和铜片构成的多层复合材料, 其中基板树脂材料的导热系数为  $0.2 \sim 0.4\text{ W/(K}\cdot\text{m)}$ <sup>[14]</sup>, 而纯铜的导热系数在  $300 \sim 400\text{ W/(K}\cdot\text{m)}$ , 两者在导热系数等参数上存在极大的差异。为了精确描述 PCB 板的温度分布, 根据 Gerber 文件对 PCB 多层结构进行精确建模, 分布式 BMS 控制器三维模型示意图如图 1a 所示, 其中上壳处于隐藏状态, PCB 板的示

意图如图 1b 所示, 其中黑色部分为铜, 灰色部分为基板树脂材料。



(a) BMS 控制器三维示意图(上壳隐藏)



(b) BMS 控制器 PCB 板的示意图

图 1 热力学模型示意图

利用 CATIA V5 中嵌入的 FLOEFD 插件, 模型求解区域尺寸设置为 BMS 控制器的物理尺寸, 不考虑流动压力特性和辐射散热, 根据表 1 列出的散热结构中 PCB 各层材料和元器件材料的热物性属性, 给定模型参数与热边界条件设置, 开展有限元热仿真工作。

## 2 模型验证与参数分析

### 2.1 模型仿真与试验验证

本文选取了三种均衡工况对上述模型开展了理论计算、仿真以及试验验证: ① 开启最底部的两个均衡电阻(环境温度为 50  $^{\circ}\text{C}$ ); ② 开启两侧的四个均衡电阻(环境温度 20  $^{\circ}\text{C}$ ); ③ 开启中部的四个均衡电阻(环境温度 20  $^{\circ}\text{C}$ )。其稳态温度场仿真结果如图 2 所示, PCB 板的温度分布与均衡电阻开启位置有关, 且在任意工况下, PCB 板的最高温度点主要集中在均衡电阻附近, 电源芯片和被动均衡管理芯片虽然存在产热, 但其温度远低于均衡电阻温度。同时, 由于板内铜线的不规则布置, 导致下方均衡电阻的温度始终高于上方均衡电阻的温度。

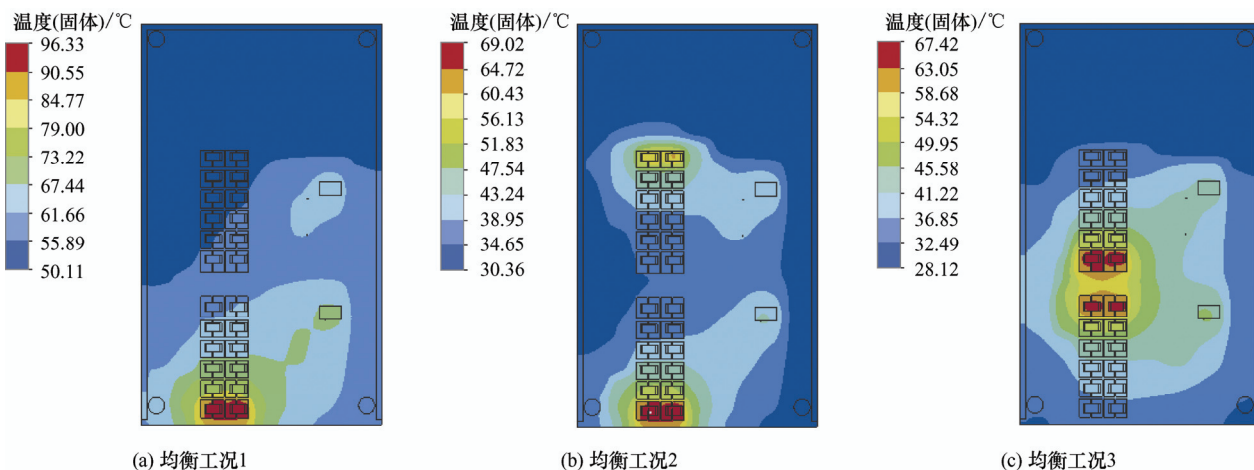


图 2 均衡工况下稳态温度场仿真结果

将 BMS 控制器放置在恒温箱中, 调节恒温箱温度至指定温度 50 ℃(或 20 ℃), 并静置 2 h。考虑到试验的安全性, 我们采用电池模拟器系统代替动力电池组进行试验, 接通 BMS 控制器并开启上述工况相对应的均衡通道以及采用相应的均衡策略。试验中在 PCB 板上的 5 个采样点布置了温度传感器以实时获取其温度变化, 如图 3 中的实心点所示, 均衡电阻位置因工况不同而有所有差异, 具体位置见表 2~4。当达到热平衡即温度不再发生变化或最高温度超过 100 ℃则停止试验。由于动力电池组热失控过程中发生的第一个副反应为 SEI 膜分析, 其峰值大约 100 ℃, 因此将 100 ℃作为热安全边界值。

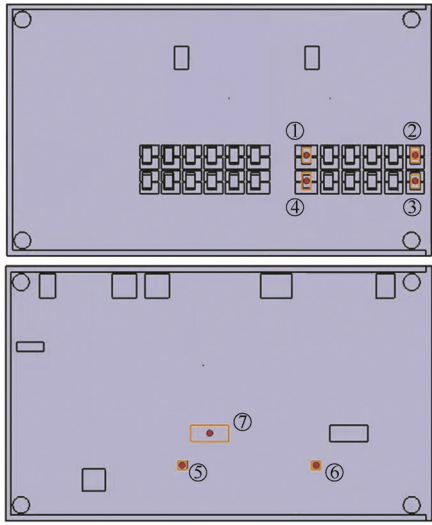


图 3 PCB 采样点示意图

图 4~6 分别为三种均衡工况下关键点试验结果与仿真数据的对比结果, 对应值见表 2~4。从表 2~4 中可以看出, 当 BMS 控制器达到热平衡时, 该模型可以对均衡电路板中的关键点的温度进行较为准确的仿真模拟, 其任意采样点误差小于 4 ℃, 因此可以认为该模型建立、参数确定和仿真方法基本能够满足工程应用需求。

表 2 均衡工况 1 关键点温度对比结果

工况 1	点②	点③	点⑤	点⑥	点⑦
试验值/℃	95.49	93.28	75.56	72.88	65.62
仿真值/℃	96.04	95.93	75.14	71.1	66.10

表 3 均衡工况 2 关键点温度对比结果

工况 2	点②	点③	点⑤	点⑥	点⑦
试验值/℃	72.0	67.09	49.09	47.37	42.04
仿真值/℃	68.62	68.47	48.39	46.58	41.37

表 4 均衡工况 3 关键点温度对比结果

工况 3	点①	点④	点⑤	点⑥	点⑦
试验值/℃	68.26	63.42	51.74	49.86	46.78
仿真值/℃	66.67	65.72	49.11	47.29	43.32

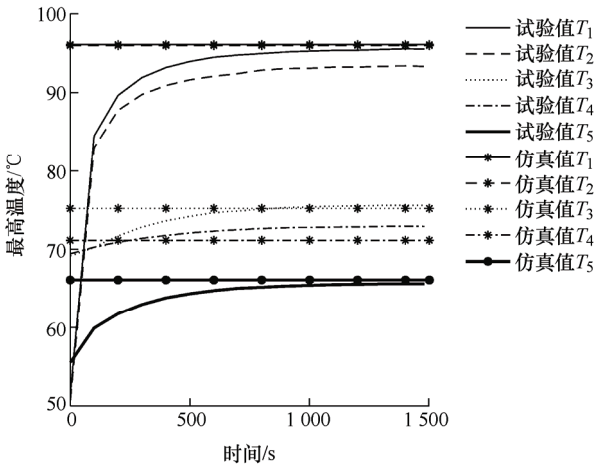


图 4 均衡工况 1 关键点温度对比结果

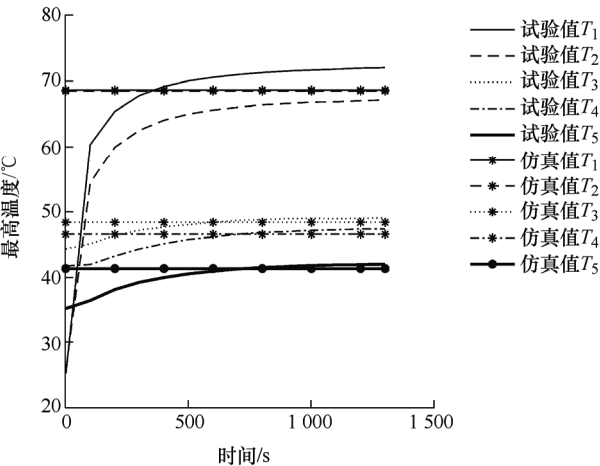


图 5 均衡工况 2 关键点温度对比结果

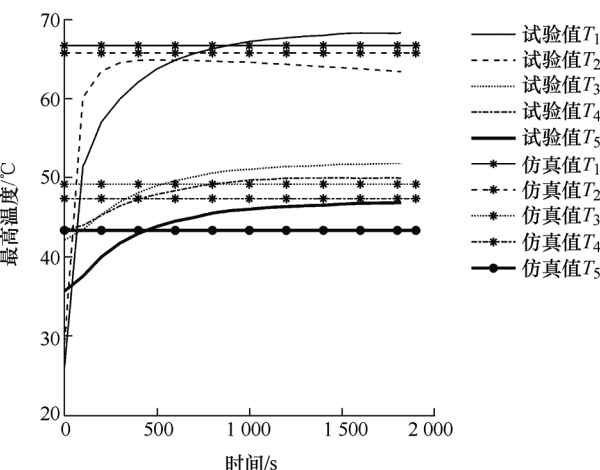


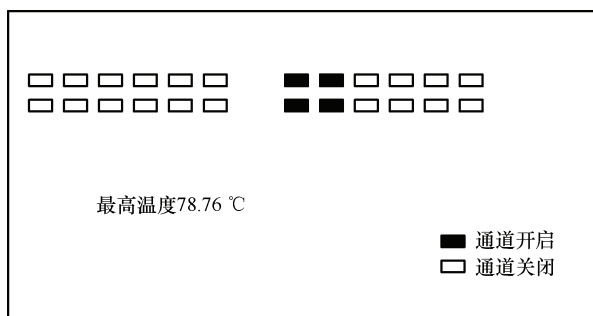
图 6 均衡工况 3 关键点温度对比结果

2.2 开启通道位置对温度分布的影响

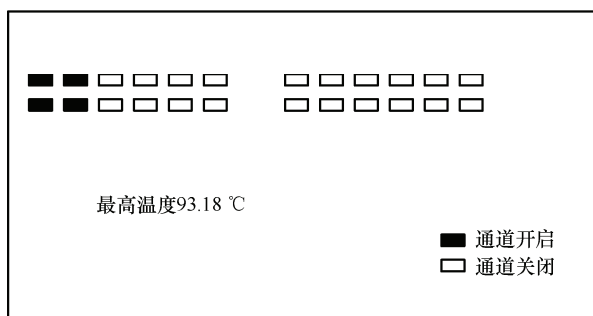
为了确定在满足热安全条件下的最高效率均衡工况, 在工况分析前首先开展了均衡电阻开启位置对最高温度影响的研究, 以预测相同均衡效率下, BMS 控制器会达到的最高温度。具体分析如下: ① 对比开启相同数量的中部通道与底部通道

数的最高温度;② 对比开启相同数量的双排通道与单排通道数的最高温度。本研究的均衡效率定义为仿真工况开启通道数量与开启时间的乘积比上控制器总通道数量与总周期时间的乘积。

(1) 由于 PCB 板内铜线的不规则布置,开启底部通道的最高温度将高于开启中部通道最高温度。以开启 4 个通道为例,如图 7 所示,开启底部 4 个通道的最高温度为 93.18 °C,而开启中部 4 个通道的最高温度为 78.76 °C,当开启 6 个通道时,该结论仍旧成立,同时图 2 也可验证该结果,结果显示最高温度均分布在底部电阻区域内。



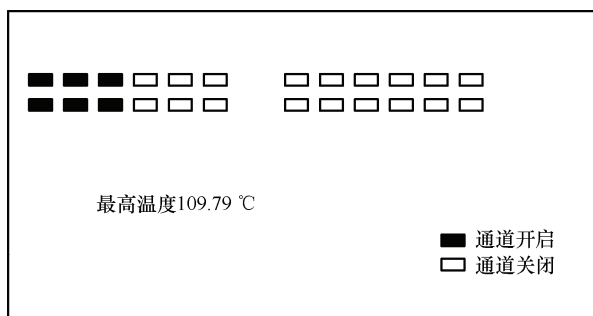
(a) 开启中部通道



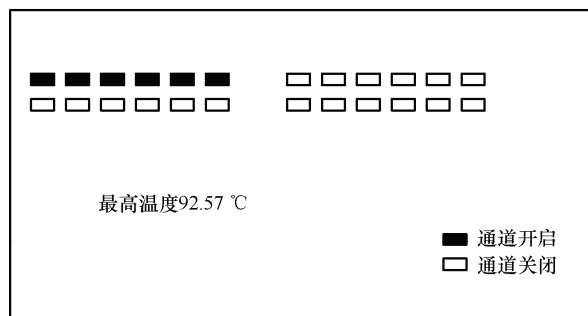
(b) 开启底部通道

图 7 开启中部通道与底部通道的最高温度对比结果

(2) 由于热量传递路径距离的原因,开启双排通道工况的最高温度高于开启单排通道工况的最高温度。以开启 6 个通道为例,如图 8 所示,开启双排通道的最高温度为 109.79 °C,高于开启单排通道的最高温度 92.57 °C。



(a) 开启双排通道



(b) 开启单排通道

图 8 开启双排通道与单排通道的最高温度对比结果

通过分析开启位置对最高温度的影响,发现开启底部双排通道时,BMS 控制器电路板的温度将达到最高,即最容易出现安全问题。因此在后续的工况分析中,针对相同的均衡效率即开启相同通道数和占空比,选取的仿真工况为对板上温度影响最大的工况进行仿真。

### 3 工况分析

#### 3.1 温度场分析

针对动态均衡工况,采用温度范围简化方法,具体分析流程如图 9 所示,图 9 中占空比是指通道开启时间对于周期的占空比,例如对于 100 ms 周期来说占空比 60%是指开 60 ms 再关闭 40 ms 的均衡工况。

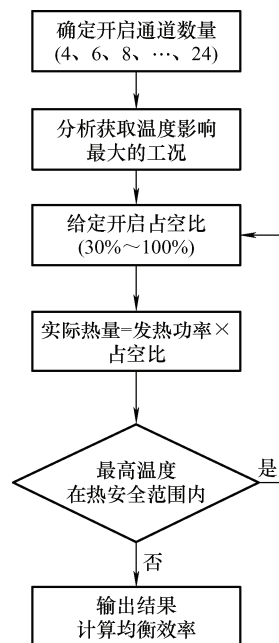


图 9 工况分析流程

表 5 为环境温度为 50 °C 时,开启不同通道数和不同占空比时被动均衡电路的最高温度统计表。分析表 5 的数据可知,当开启通道数相同时,最高温度与占空比成正比关系,可以进行线性拟合并且插值,由



此可以进一步推算出不超过 100 ℃ 下的精确占空比，从而获得在满足热设计条件下的最大工作效率。图 10 为占空比为 40%，不同通道数下的最高温度和效率，图 11 占空比为 30%，不同通道数下的最高温度和效率，由图 11 可知，在相同占空比下，即在相同的控制策略下，随着开启通道数的增加，最高温度也在增加，但是其增加的速率低于均衡效率的增加速率。且在占空比为 30% 下，均未发生超温情况。

表 5 不同工况下被动均衡电路的最高温度统计表

通道数	占空比(%)	最高温度/℃	效率值
4	60	93.50	0.100
	70	99.99	0.117
	80	106.45	0.133
6	50	95.24	0.125
	60	103.31	0.150
	70	111.27	0.175
8	40	91.24	0.133
	50	100.93	0.167
	60	109.99	0.200
10	30	85.13	0.125
	40	95.62	0.167
	50	105.23	0.208
12	30	87.70	0.150
	40	98.43	0.200
	50	109.17	0.250
14	30	88.64	0.175
	40	99.75	0.233
	50	110.60	0.292
16	30	89.36	0.200
	40	100.65	0.267
	50	111.73	0.333
20	30	90.34	0.250
	40	101.91	0.333
	50	113.20	0.416
24	30	90.99	0.300
	40	102.72	0.400
	50	114.14	0.500

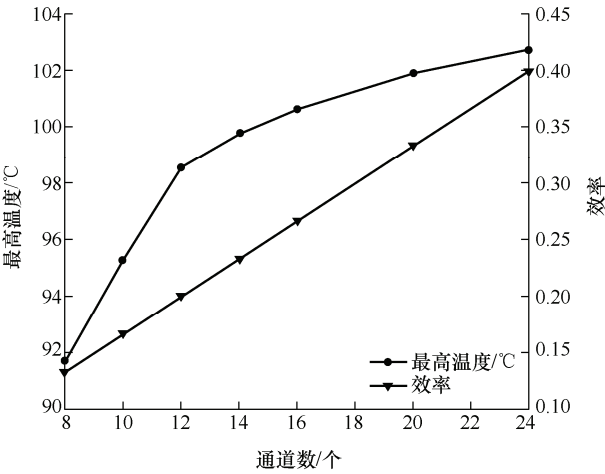


图 10 占空比为 40%，不同通道数下的最高温度和效率

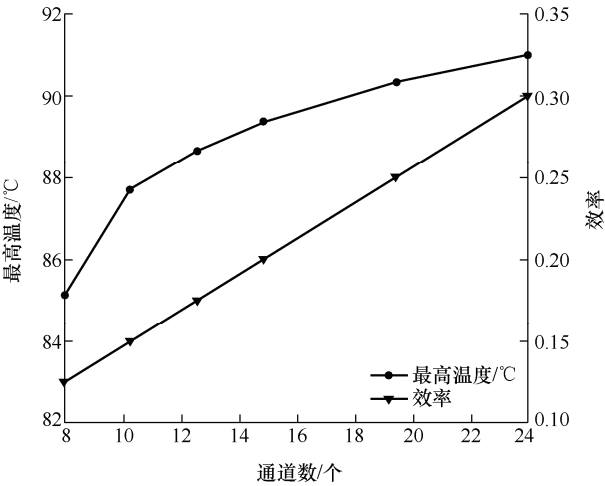
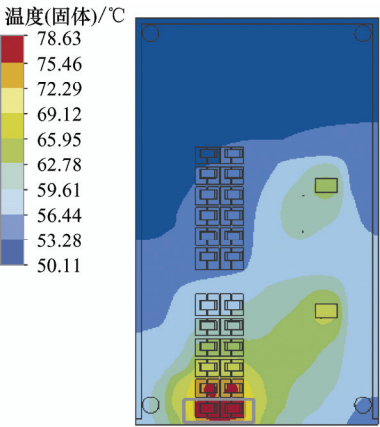
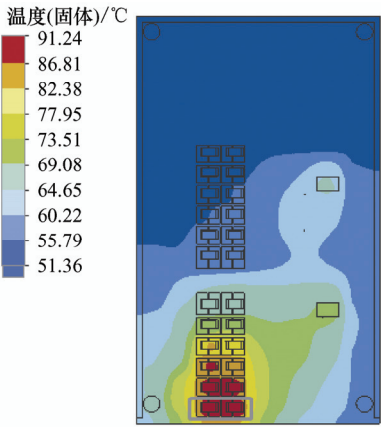


图 11 占空比为 30%，不同通道数下的最高温度和效率

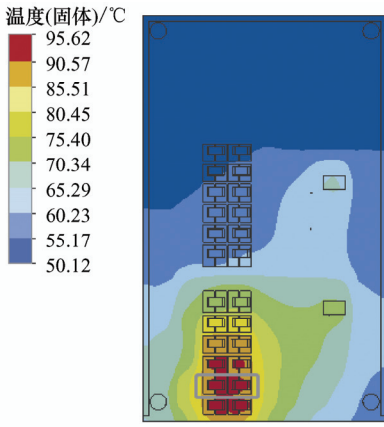
部分动态均衡工况的稳态仿真结果的温度云图如图 12 所示。随着开启通道数增加，最高温度点的位置将发生变化，从最底部向中部移动，图 12 中黑色线框表示被动均衡板上最高温度位置，在开启 4~8 个通道时，最高温度点在最底部的均衡电阻处，在开启 10 个通道时，最高温度点开始上移，在开启超过 12 个通道时，最高温度点处于底部倒数第三排均衡电阻处，且位置趋于稳定状态。



(a) 开启4通道



(b) 开启8通道



(c) 开启10通道

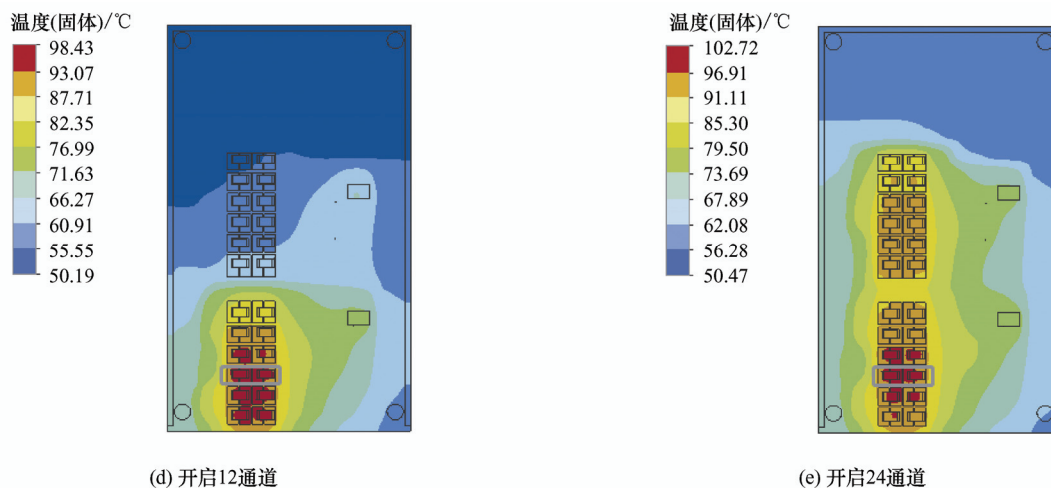


图 12 开启不同通道最高温度的影响

### 3.2 热安全边界构建

由上述分析可知,动力电池组均衡电路的最高温度与开启通道数和占空比有关,以仿真工况为例,提取不同开启通道数下不同占空比的最高温度,采用回归优化方法拟合法,构建 BMS 控制器的最高温度随开启通道数和占空比的变化规律,如图 13 所示。其中黑色部分为已经超出热安全边界区域,灰色部分为没有超出热安全边界区域。利用此响应面即可推算出任意开启通道数下任意占空比的最高温度。而灰色区域与黑色区域的交界处即是热安全条件下的不超温边界(环境温度为 50 °C),即热安全边界,如图 14 所示,在此边界下方相对应的通道数和占空比,开启任意位置的电阻,可以保证控制器处于热平衡时最高温度不超过 100 °C。

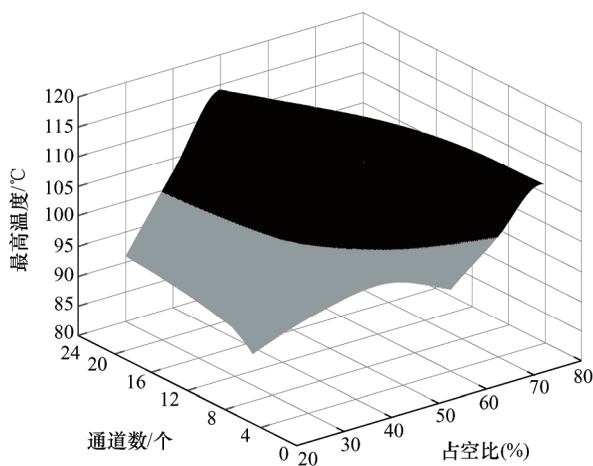


图 13 最高温度-开启通道数-占空比响应面

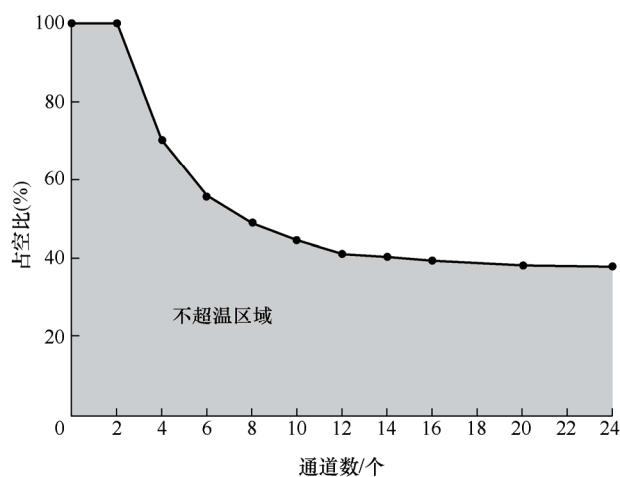


图 14 毫秒级工况不超温边界

## 4 结论

本文针对某分布式 BMS 控制器开展了热力学建模与热仿真分析,同时,计算在满足热安全设计条件下的各工况下的最大均衡工作效率及热安全边界,主要结论如下。

(1) 通过不同均衡工况的试验与仿真对比结果表明,该模型任意采样点误差小于 4 °C,可以较为直观准确地预测出控制器在动态均衡工况下的温度场分布。

(2) PCB 板内复杂的线路结构布置对其温度场分布具有一定影响,开启均衡电阻聚集于底部时,对板上温度影响最大,在边缘处的均衡电阻的温度一般高于内侧的电阻,在进行热管理时,应该加强这些地方的散热设计。

(3) 在相同占空比下,即在相同的控制策略下,随着开启通道数的增加,最高温度也在增加,但是其增加的速率低于均衡效率的增加速率。且在占空比为 30%下,开启全部均衡通道均未发生超温情况,但是存在的最高温度区域改变的现象。采用回归优化方法拟合法,构建最高温度-开启通道数-占空比三维响应面,从而获得 BMS 控制器热安全边界,可以指导均衡策略的制定。

### 参 考 文 献

- [1] LING Z, WANG F, FANG X, et al. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 403-409.
- [2] ALATF F. Simultaneous thermal and state-of-charge balancing of batteries: A review[C]// *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2014.
- [3] ZHANG Z, CHENG X, LU Z Y, et al. SOC estimation of lithium-ion battery pack considering balancing current[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017: 2216-2226.
- [4] LIU F, DAI J. Equalization circuit topologies of lithium battery strings: A brief review[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1633(1): 012141.
- [5] COURTIAL J, PATTERSON B A, HARVEY A R, et al. Design of a static Fourier-transform spectrometer with increased field of view[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(34): 6698-6702.
- [6] FENG X, ZHENG S, HE X, et al. Time sequence map for interpreting the thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries with LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> cathode[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2018, 6: 126.
- [7] FENG X, REN D, HE X, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 743-770.
- [8] XIONG R, SUN W, YU Q, et al. Research progress, challenges and prospects of fault diagnosis on battery system of electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115855.
- [9] 熊瑞, 马骥骁, 杨瑞鑫, 等. 动力电池外部短路故障热力影响与分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(2): 115-125. XIONG Rui, MA Suxiao, YANG Ruixin, et al. Thermo-mechanical influence and analysis of external short circuit faults in lithium-ion battery[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(2): 115-125.
- [10] 熊瑞, 马骥骁, 陈泽宇, 等. 锂离子电池极速自加热中的电-热耦合特性及建模[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(2): 179-189. XIONG Rui, MA Suxiao, CHEN Zeyu, et al. Electric-thermal coupling characteristics and modeling of Lithium ion battery self-heating at high speed[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(2): 179-189.
- [11] 熊瑞, 李幸港. 基于双卡尔曼滤波算法的动力电池内部温度估计[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(14): 146-151. XIONG Rui, LI Xinggang. Battery internal temperature estimation method through double extended Kalman filtering algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(14): 146-151.
- [12] 杜红炎, 唐欣, 冯建琼, 等. 10 °C 法则与多层瓷介电容器的贮存寿命试验[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2011, 29(4): 21-24. DU Hongyan, TANG Xin, FENG Jianqiong, et al. 10 °C principle and the ALT of MLCC[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2011, 29(4): 21-24.
- [13] 刘世昌, 刘新. 电池管理系统功率电路热仿真方法研究[J]. *计算机产品与流通*, 2018(2): 100-101. LIU Shichang, LIU Xin. Research on thermal simulation method of power circuit in battery management system[J]. *Computer Products and Circulation*, 2018 (2): 100-101.
- [14] 祝大同. PCB 基板材料用 BT 树脂[J]. *热固性树脂*, 2001, 16(3): 38-43. ZHU Datong. Bismaleimide-triazine resin used for PCB laminate[J]. *Thermosetting Resin*, 2001, 16(3): 38-43.

作者简介: 吴舒婕, 女, 1999 年出生, 硕士研究生。主要研究方向动力电池系统安全管理与控制。

E-mail: 18811379806@163.com

王军, 男, 1968 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学。

E-mail: wangjunbit@bit.edu.cn

熊瑞(通信作者), 男, 1985 年出生, 教授, 博士研究生导师, IET Fellow。主要研究方向为电动载运工具动力系统和电化学储能系统。

E-mail: rxiong@bit.edu.cn

李幸港, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为新能源汽车动力电池管理。

E-mail: lixinggang@bit.edu.cn