

# 基于模糊算法的汽车电池组系统降温控制

谢存<sup>1</sup>, 米俊宇<sup>2</sup>, 王蒙蒙<sup>2</sup>

(1. 陆军工程大学军械士官学校, 武汉 430075;

2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

**摘要:** 分析了锂离子电池的发热和传热机理, 构建了动力电池组温度数学模型; 选用的电池为 A123-26650 LiFePO<sub>4</sub> 电池, 通过预处理过程建立了动力电池组中的任意一行中 8 个电池单体温度模型, 并网格划分; 将预处理过程中建立数学模型导入到 ANSYS 软件; 利用 ANSYS 对实际条件下电池发热进行仿真, 并与 Zuskauks 实验相关方程进行比较, 验证文中所建立的动力电池 CFD 模型可靠性; 在恒定冷却液流速条件下, 通过比较电池温度数学模型电池温度和 CFD 模型电池温度, 验证了动力电池数学温度模型可作为控制器作用的仿真对象; 设计自适应模糊 PID 控制器, 通过 Matlab/Simulink 仿真试验验证该控制器能够很好控制电池温度至期望值, 具有一定实际应用价值。

**关键词:** 锂离子电池; 数学模型; ANSYS; 模糊 PID 控制器; Matlab/Simulink

## Cooling Control of Automotive Battery Pack System Based on Fuzzy Algorithm

XIE Cun<sup>1</sup>, MI Junyu<sup>2</sup>, WANG Mengmeng<sup>2</sup>

(1. Army Engineering University Ordnance Officer School, Wuhan 430075, China;

2. Beijing Zhenxing Metrology and Testing Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The heating and heat transfer mechanism of lithium-ion batteries was analyzed in this paper, and the mathematical model on the temperature of power battery packs was built. The battery model was selected A123-26650 LiFePO<sub>4</sub>, and the temperature model with 8 individual cells in any row of the power battery pack was established through preprocessing. Through the grid partitioning, the preprocessing mathematical model was imported into ANSYS software to simulate the battery heating under actual conditions, and compared with the relevant equations of Zuskauks experiment, it verified the reliability of the power battery CFD model established in the paper. Under the condition of constant coolant flow rate, the mathematical model of battery temperature and CFD model of battery temperature were compared to verify that the mathematical temperature model of the power battery can serve as a simulation object for the controller. An adaptive fuzzy PID controller was designed to verify the experiments through MATLAB/Simulink simulation the results show that the controller can effectively control the battery temperature to the expected value, which has a certain practical application value.

**Keywords:** lithium-ion batteries; mathematical model; ANSYS; fuzzy PID; MATLAB/Simulink

## 0 引言

社会经济在高速发展, 提高人们生活质量的同时也带来能源缺乏以及环境污染。目前社会非常依赖以油和煤炭为代表的传统能源<sup>[1]</sup>。中国虽然石油储量丰富, 可中国人均实际可采石油量极少。中国的石油消费每年在逐渐递增, 其中交通运输业为石油耗费最多的行业, 50% 的消费和 95% 的私人交通依赖于石油<sup>[2]</sup>。美国交通运输业消耗的石油占其全国石油消耗的 68%<sup>[3]</sup>。发展新能源汽车, 可节约地球资源和保护生态环境。电动汽车相比于传统燃油汽车, 有较多优点: 1) 其排放污染物几乎为零, 不污染环境; 2) 具有高的能源效率。电动汽车能源利用效率可达 80%, 但是汽车内燃机能源利用效率仅有 30%; 3) 具有低噪音优

点<sup>[4]</sup>。电动汽车有广阔发展前景, 可作为重要部分的储能电池技术决定电动汽车未来发展。研制出大容量、产热量小、电池工作温度范围大、电池寿命长且安全系数高, 电动汽车在市场应用推广指日可待, 还能降低地球石油资源缺乏的压力, 改善地球大气气候环境<sup>[5]</sup>。目前电池技术水平较低, 其中汽车电池热管理系统是电池管理系统中重要组成部分, 热管理系统控制性能决定着电动汽车能量利用效率及安全性能<sup>[6]</sup>。因此, 本论文研究内容具有重要研究意义。

为了避免电动汽车电池组在运行或者充放电过程中因出现电池温度过高而导致电池自燃爆炸发生, 国内外专家针对电池热管理系统研究出多种方法, 目前方法有: 风冷

收稿日期: 2023-12-19; 修回日期: 2024-01-28。

作者简介: 谢存(1981-), 男, 硕士, 讲师。

通讯作者: 王蒙蒙(1995-), 女, 硕士。

引用格式: 谢存, 米俊宇, 王蒙蒙. 基于模糊算法的汽车电池组系统降温控制[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 160-165, 172.

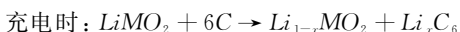
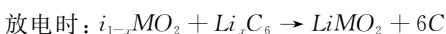
散热、液冷散热和相变材料散热。风冷散热: Al Hallaj S 研究电池模块串联和并联气体通风方式下的温度。通过实验验证了平行通风可降低电池组中不同电池温度差<sup>[7-8]</sup>。风冷散热是利用低温空气掠过电池表面带走热量, 从而达到电池系统散热的目的。风冷散热方式优点是电池系统重量小, 耗费的成本低, 但缺点为散热效率小。风冷散热方法有串联通风和并联通风两种方式<sup>[9]</sup>。在串联通风时, 电池温度均匀性较差。在并联通风时, 电池组内部温度均匀性较好<sup>[10]</sup>。液冷散热时通过使用具有高导热系数液体吸收电池组系统内部所产生电化学热量, 从而减小电池组内部温度<sup>[11]</sup>。液冷散热的结构设计通常为在电池组内部铺设液体流动管道, 液体在电池组内部电池间的空隙管道中流动, 以热传导方式带走电池组内部电池产生的热量<sup>[12]</sup>。液冷散热优点为高散热效率, 整个热管理系统体积较小, 但其对整个电池组系统密闭性要求高且相对成本高<sup>[13]</sup>。基于 PCM 的电池散热方法通过使用 PCM 吸收热量并降低电池温度。PCM 在进行相变时可吸收热量, 能保持其自身温度不变。电池在运行工作过程中产生的热量可传输到涂在电池表面的 PCM。PCM 吸收热量, 当其温度到达熔点时会发生相变反应, 但 PCM 温度基本保持不变, 使得电池与 PCM 之间的温差逐渐减小<sup>[14]</sup>。基于 PCM 的散热的缺点为电池包重量大, 且 PCM 因散热被消耗掉时, 电池散热效果会变低<sup>[15]</sup>。

在控制方面, 朱世怀设计模型预测控制器调节液冷电池系统温度, 仿真结果验证该控制器的有效性, 但是该控制器因调节系统温度过程中计算量大, 其不能快速调节液冷电池系统温度<sup>[16]</sup>。PID 控制器可有效调节液冷电池系统温度, 但是 PID 控制器参数不能够自适应调节, 使得其调节电池系统温度的速度相对较慢。文章在设计出的动力电池组温度数学模型基础上, 结合传统 PID 算法鲁棒特性和模糊控制算法可自适应调节 PID 控制算法参数的优点, 设计出自适应 PID 控制算法。通过调节冷却液的流速, 从而调节电池组温度至目标值。

## 1 动力电池组原理及温度数学模型构建

本章研究了锂离子电池内部化学反应原理, 并参考电池 Bernardi 产热速率模型、牛顿冷却公式以及物体能量守恒方程, 建立出电池组内部数学温度模型。将锂离子动力电池和散热介质具体参数代入到数学模型中, 建立了面向实际应用的电池组温度数学模型。实际上, 锂离子电池在发生充放电过程时, 内部会发生很多化学反应。例如, 充电时, 锂离子会向负极移动, 放电时, 锂离子会向正极移动。锂离子电池虽然经历了很多位置的变化, 但并没有改变锂离子的形状, 因此锂离子电池可以多次作为绿色能源使用<sup>[16]</sup>。锂离子电池原理结构如图 1 所示。

充放电条件下锂离子电池的反应过程为:



锂离子电池内部增加热量  $Q_b$  等于电池组化学反应产生

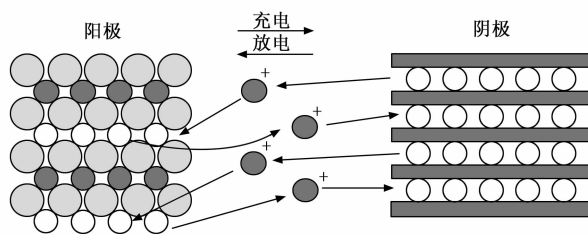


图 1 锂离子电池原理结构图

的热量  $Q_c$  减去热对流散失的热量  $Q_s$ :

$$Q_b = Q_c - Q_s \quad (1)$$

单位时间内, 单体电池增加的热量与电池温度改变成正比, 所以得到公式:

$$Q_b = c_b m_b \Delta T_b = c_b m_b \bar{T}_b \quad (2)$$

其中:  $C_b$  为单体电池的比热容, 式中为单个电池的比热容, 为单个电池的温度变化。  $\Delta T_b$  为单体电池的温度变化量。在电化学反应方面, 锂离子电池的内产热包括内阻产热、化学反应过程产生的热量、电极极化（电化学、浓度差、欧姆极化等）产生的极化热和辅助反应热, 其中辅助反应热是电池两极电解质分解产生的热量。由于辅助反应热的数值较小, 在计算中通常被忽略。因此, 本次建立的电池温度模型只考虑焦耳热、极化热和化学反应热。电流流经锂离子电池, 但由于锂离子电池不是理想的无损耗电源, 它们会产生热量。焦耳热是电池产热中非常重要的一部分, 而这部分电阻抗又可分为电子内阻和离子内阻两部分。极化热: 当负载电流流过锂离子电池时, 电池会发生极化, 极化后的电池会产生能量损失, 锂离子电池的温度会升高。锂离子电池的极化过程包括化学反应、欧姆电阻和浓度差极化。由于电池在极化过程中产生热量而不吸收热量, 因此锂离子电池的极化热值为正。化学反应热: 锂离子电池在放电过程中也会通过化学反应产生热量。因为排出化学反应中生成物的总能量小于反应物的总能量, 所以这部分损失的能量以热的形式释放出来。在设定锂离子电池是质点模型的基础上, 美国的 Bernardi 提出了一种简化的单体电池温度模型<sup>[17]</sup>, 可以用数学公式 (3) 表示:

$$Q_c = I(E_{oc} - E) + IT_c \frac{dE_{oc}}{dT_c} = I^2 R + IT_c \frac{dE_{oc}}{dT_c} \quad (3)$$

其中:  $Q_c$  为生热 (w),  $E_{oc}$  为电池的开路电压,  $E$  为电池的工作电压,  $R$  为电池欧姆和极化内阻之和,  $I$  为通过电池的电流,  $T_c$  为单体电池温度,  $\frac{dE_{oc}}{dT_c}$  表示电池温度系数, 是一个变化量, 可以通过测量电池开路电压与电池温度的变化值求解, 本文记为  $a_1$ :

$$a_1 = \frac{dE_{oc}}{dT_c} \quad (4)$$

为了降低电池组温度模型的复杂程度, 本文将锂离子电池内阻与温度的关系近似表示成一次函数式, 其中  $a_2$  与  $a_3$  均为常数:

$$R = a_2 T_c + a_3 \quad (5)$$

将公式 (4) 和 (5) 代入公式 (3) 可以得到<sup>[18]</sup> 公式 (6):

$$Q_c = I^2(a_2 T_c + a_3) + a_1 I T_c = (a_1 I + a_2 I^2) T_c + a_3 I^2 \quad (6)$$

锂离子电池与外界热量交换方法不是单一的, 可以分成对流、传导和辐射 3 种方式, 本文建立的电池组温度控制系统是通过对流方法交换热量的, 散热可用公式 (7) 表示:

$$Q_s = A_c h (T_c - T_e) \quad (7)$$

其中:  $Q_s$  为电池损失的能量 (J),  $A_c$  为冷却液流经电池的面积 ( $\text{m}^2$ ),  $h$  为电池与外界的换热强度 ( $\frac{1}{\text{m}^2} \cdot \text{K}$ ),  $T_e$  为冷却介质的温度 (K)。

一般来讲, 电池与冷却液的对流换热系数不仅与冷却液流速还、冷却液的导热系数还有电池的直径有关。

电池与冷却液的对流换热系数<sup>[19]</sup> 为:

$$h = \frac{N_u k_{\text{fluid}}}{D} \quad (8)$$

式中,  $N_u$  为努赛尔数,  $k_{\text{fluid}}$  为冷却液静止时的导热系数,  $D$  为圆柱体电池的直径。

当冷却液流动速度在 0.5 m/s 以上时, 雷诺数  $R_e$  的范围是 3 265~65 295。具体的雷诺数可以根据冷却液的密度, 锂离子电池直径, 液体最高流速和湍流粘度计算得到。而努赛尔数可以根据雷诺数  $R_e$  和普朗特数  $P_r$  求解<sup>[20]</sup>, 如公式 (9) 和 (10) 所示:

$$R_e = \frac{\rho_a v_{\text{max}} D}{\mu} \quad (9)$$

$$N_u = 0.27 R_e^{0.63} P_r^{0.36} (P_r/P_{r_c})^{0.25} \quad (10)$$

式中,  $P_r$  为入口处冷却液的普朗特数,  $P_{r_c}$  为接近电池表面的普朗特数,  $R_e$  为雷诺数,  $\rho_a$  为冷却液流体的密度,  $v_{\text{max}}$  是冷却管道中冷却液最高流动速度,  $\mu$  为冷却液湍流粘度。冷却液最高流动速度计算方法如公式 (11) 所示:

$$v_{\text{max}} = \frac{L}{L-D} v \quad (11)$$

其中:  $L$  为相邻两个电池的中心间距,  $D$  为圆柱体电池的直径,  $v$  为入口处冷却液流速。

则最终对流换热系数  $h$  可以由公式 (12) 求解:

$$h = 0.27 \left( \frac{\rho_a D}{\mu} \cdot \frac{L}{L-D} \cdot v \right)^{0.63} P_r^{0.36} (P_r/P_{r_c})^{0.25} \cdot \frac{k_{\text{fluid}}}{D} \cdot v^{0.63} \quad (12)$$

把  $a_1$  表示为公式 (13):

$$a_1 = 0.27 \left( \frac{\rho_a D}{\mu} \cdot \frac{L}{L-D} \cdot v \right)^{0.63} P_r^{0.36} (P_r/P_{r_c})^{0.25} \cdot \frac{k_{\text{fluid}}}{D} \quad (13)$$

最终得出锂离子电池被冷却液带走的热量为:

$$Q_s = a_1 A_c (T_c - T_e) v^{0.63} \quad (14)$$

将公式 (6) 和 (14) 代入公式 (1) 最终得到单体电池的温度模型如公式 (15) 所示:

$$\dot{T}_{c,i} = \frac{[(a_1 I + a_2 I^2) - a_4 v^{0.63} A_b]}{c_b m_b} T_{c,i} + \frac{[a_3 I^2 + a_4 v^{0.63} A_b T_{a,i}]}{c_b m_b} \quad (15)$$

其中:  $T_{c,i}$  是编号为  $i$  的锂离子电池的温度,  $T_{a,i}$  是编号为  $i$  的锂离子电池周围的冷却液的温度, 然而在实际电池组温度控制系统中  $T_{a,i}$  是无法测量得到的, 所以就要想办法消除  $T_{a,i}$  的影响。如果  $T_{a,1} = T_a$  (进口处冷却液的温度)。通过热量守恒能够得到进口处到出口处冷却液得到的能量  $Q_{f,1}$  等于各个锂离子电池传递给冷却液的能量  $Q_{f,2}$ :

$$Q_{f,1} = Q_{f,2} \quad (16)$$

又因为  $Q_{f,1}$  与锂离子电池温度改变成正比关系:

$$Q_{f,1} = \rho_a c_a S_a v (T_{a,n} - T_{a,1}) \quad (17)$$

$S_a$  是冷却通道进口处的截面的大小,  $c_a$  为冷却液的比热容。

$$Q_{f,2} = Q_{c,1} + Q_{c,2} + \dots + Q_{c,n} = a_4 \cdot v^{0.63} A_c [(T_{c,1} - T_{a,1}) + (T_{c,2} - T_{a,2}) + \dots + (T_{c,n} - T_{a,n})] \quad (18)$$

$Q_{c,1}, Q_{c,2}, \dots, Q_{c,n}$  分别表示编号为 1~ $n$  的锂离子电池被冷却液带走的热量。

如果设定在整个流场中, 每个相邻单体电池表面的冷却液温度变化是等幅的, 则有:

$$T_{a,n-1} = T_{a,1} + \frac{n-2}{n-1} (T_{a,n} - T_{a,1}) \quad (19)$$

设定相邻锂离子电池的温度变化和其表面冷却液温度变化一样也是等幅的。

$$T_{c,n-1} = T_{c,1} + \frac{n-2}{n-1} (T_{c,n} - T_{c,1}) \quad (20)$$

将公式 (17) ~ (20) 代入公式 (16) 得到:

$$T_{a,n} = \frac{na_4 A_c}{2\rho_a c_a S_a v^{0.37} + na_4 A_c} (T_{c,1} + T_{c,n}) + \frac{2\rho_a c_a S_a v^{0.37} - na_4 A_c}{2\rho_a c_a S_a v^{0.37} + na_4 A_c} \cdot T_{a,1} \quad (21)$$

将公式 (21) 代入 (14) 得到每个电池散失的热量的数值, 如公式 (22) 所示:

$$Q_{s,n} = \frac{2\rho_a c_a S_a A_b \cdot v}{2\rho_a c_a S_a A_b \cdot v^{0.37} + na_4 A_b} \cdot T_{b,n} - \frac{na_4^2 A_b^2 \cdot v^{0.63}}{2\rho_a c_a S_a A_b \cdot v^{0.37} + na_4 A_b} \cdot T_{b,1} - \frac{2\rho_a c_a S_a A_b \cdot v - na_4^2 A_b^2 \cdot v^{0.63}}{2\rho_a c_a S_a A_b \cdot v + na_4 A_b} \cdot T_{a,1} \quad (22)$$

最后将公式 (2) (6) 和 (22) 代入式 (1) 得到电池组中编号为  $n$  的锂离子电池数学温度模型为:

$$\begin{aligned} \dot{T}_{b,n} &= \frac{p_1}{c_b m_b} \cdot T_{b,1} + \frac{(a_1 I + a_2 I^2) - p_2}{c_b m_b} \\ &T_{b,n} + \frac{a_3 I^2 + p_3 T_{a,1}}{c_b m_b} \end{aligned} \quad (23)$$

$$p_1 = \frac{2\rho_a c_a S_a A_c \cdot v}{2\rho_a c_a S_a A_c \cdot v^{0.37} + na_4 A_c}$$

$$p_2 = \frac{na_4^2 A_c^2 \cdot v^{0.63}}{2\rho_a c_a S_a A_c \cdot v^{0.37} + na_4 A_c}$$

$$p_3 = \frac{2\rho_a c_a S_a A_c \cdot v - na_4^2 A_c^2 \cdot v^{0.63}}{2\rho_a c_a S_a A_c \cdot v + na_4 A_c}$$

## 2 动力电池组温度数学模型验证

设计控制策略调节电池组温度之前是需要验证文中所

建立动力电池组的温度数学模型精度。实际过程中很难建立一个完整的电池冷却系统。这里是通过在 CFD 软件 ANSYS 中搭建动力电池组液冷数学模拟模型,模拟了在不同流量下的冷却液作用下动力电池组温度变化情况,将 ANSYS 中观测得到的电池组温度模拟值作为实际值,进而验证所搭建动力电池组温度数学模型精度。流体数学计算方法是通过对 CFD 软件模拟实际电池组内部冷却剂流动,进而分析流体传热特性,可模拟显示流场,可以得到流场情况。文章使用 CFD 软件计算流体动力学,具体步骤主要为:动力电池组网格划分建模、设置求解条件和仿真过程。电池组几何建模与网格划分:使用 GAMBIT 软件将建立动力电池组几何模型,同时网格划分。本文选用的电池为 A123-26650 LiFePO<sub>4</sub> 电池,容量 6 Ah,半径 13 mm,中心距  $L$  为 35 mm。动力电池组内部的各单体电池采用并联的放置方式。

如果从电池组的任意一行中选择 8 个电池单体来控制其温度,则将模型的上下表面设置为对称,使电池组中每一行电池单体的环境相同,整个电池组的温度变化可以用一组电池单体来表示。

电池温度沿直径方向的变化比沿其他方向的变化大 10 倍以上,因此为了表征电池温度沿直径方向的变化,文中建立动力电池组二维网格模型。

GAMBIT 中的预处理过程根据前面描述的电池参数创建电池组的二维网格模式二维网格应按规定选择一个四边形,然后在电池与冷却液接触部位增加一个节点,为下一步设置监控窗口做准备。通过对电池与冷却液接触部位的节点进行监控,可以获得整个控温过程中各电池的温度变化情况。一旦网格被划分,边界和区域类别被设置。电池外壳和内部部分均应设置为固体,冷却液部分应设置为流体。其实,分析文中所建立的动力电池组数学温度模型,可知电池组内部不同单体电池温度模型是不同的。这里将 8 个动力单体电池命名为 1~8 号。 $N(N=1, \dots, 8)$  代表控制器控制冷却液实际流速,这里设置动力电池组进口部分的冷却液速度为速度输入,将动力电池组出口部分设置成压力输出;动力电池表面部分设置成为 WALL,这样可将单体电池和冷却液流动部分区分开。在 8 个动力电池单体网格化二维模型中发现 16 424 个网格。使用 EquiSize Skew 方法进行网格化检查,网格的坡度应介于 0 和 1 之间。如果网络的倾角小于 0.1,认为网格质量是合格的。文中倾角小于 0.1 的网络数量大于总数的 90%,验证建立动力电池组二维模型满足要求。

将所建立的电池组二维网格模型保存为 a.msh 文件,完成所有预处理过程。将电池组二维网格模型导入求解软件 ANSYS/FLUENT 中,设置边界、材料和发热条件。ANSYS/FLUENT 求解条件设置:

ANSYS 软件中对导入电池组二维网格模型网格质量进行校核,并在求解软件中设置仿真的材料边界条件后进行仿真分析。具体仿真条件设置如下:

1) 导入:将 msh 文件导入 ANSYS 中进一步检查网格质量。

2) 电池组物理模型:本文主要研究了电池组的产热和对流散热过程,以及不同冷却剂流量下电池组产热和散热行为的变化。选择能量方程(能量模型)进行电池温度模拟计算。还需要定义冷却液的流动状态,由于雷诺数电池组温度控制系统的冷却剂的流量范围有限的雷诺数大于层流,所以冷却液的流动是动荡的,和湍流模型选择标准湍流模型,在流场计算的主要工具,不仅适用于大范围和高精度。

3) 材料定义:本文采用直接液冷方式降温,冷却液流经单体电池表面,故选用油作为冷却剂。请根据 A12326650 磷酸铁锂电池的实际参数设置电池壳和电池芯参数。

4) 电池热源设置:单体电池的产热功率不是静态的,它会因电池电流、内阻和自身温度的变化而发生变化。依据电池组温度数学模型,建立 1~8 号单体动力电池的产热率。

5) 边界条件的设置:不同冷却液流速对整个电池组的温度影响很大。冷却液的流速越快,电池组内的温度下降越大。因此,合理设置进口冷却液的速度对于模型的验证非常重要。

6) 求解算法的设置:由于所选择的冷却剂是油,这是一种不可压缩的液体,所以速度耦合方法是 SIMPLE。在 PRESSURE 离散项中选择二阶上风(Second Order Upwind),而不是一阶上风(First Order Upwind),因为如果保留泰勒级数的两项,就避免了流体流动方向和网格方向的干扰。

7) 溶液参数设置:残差图中每条曲线的收敛速度会随着求解参数的变化而变化。在求解之初,利用初始值,不断观察残差图中每条曲线的变化,改变求解参数,最终达到较好的收敛效果。

8) 监控窗口设置:监控窗口监控冷却液的压力、流量和速度以及电池组中单个电池的温度。如上所述,这里监测窗口的主要功能是监测 1 号电池和 8 号电池表面设置节点的温度变化。

9) 流场初始化:电池和冷却液的启动温度以及流体的启动速度在这里设定,用于整个电池组温度控制系统。初始冷却液温度设置为 25 °C。

10) 设置迭代次数:最后计算时可将时间步长设置为 15,模拟次数为 1 200 次。

通过 ANSYS/FLUENT 仿真得到的电池组中 1~8 号电池的温度云如图 2 所示。



图 2 8 个单体电池温度云图

可以明显看到,随着冷却液(油)从左向右流动,电池的温度从左向右在逐渐增加,为了简化电池组温度模型,减少计算量,这里可以假设单体电池的温度变化是等幅的。这样由于电池组中每一排中第 1 个单体电池的温度最低,第 8 个单体电池的温度最高,所以在仿真中只要通过模拟第 1 个和第 8 个单体电池的温度就可以得到整个电池组的温度范围,不需要再模拟 2~7 号电池的温度变化。

外部管束介质的流动是比较复杂的,其换热特性和流动特性主要通过实验数据和实验关联式进行预测。在众多的实验关联式中 Zukauskas 实验关联式有着非常广泛的应用<sup>[21]</sup>。如公式(24)所示:

$$N_u =$$

$$\begin{cases} 0.8R_e^{0.4} P_r^{0.36} (P_r/P_{r_c})^{0.25} & 10^0 < R_e < 10^2 \\ 0.51R_e^{0.5} P_r^{0.36} (P_r/P_{r_c})^{0.25} & 10^2 < R_e < 10^3 \\ 0.27R_e^{0.63} P_r^{0.36} (P_r/P_{r_c})^{0.25} & 10^3 < R_e < 2 \times 10^5 \\ 0.021R_e^{0.84} P_r^{0.4} (P_r/P_{r_c})^{0.25} & 2 \times 10^5 < R_e < 2 \times 10^6 \end{cases} \quad (24)$$

其中:  $N_u$  为努赛尔数,是传热现象中的一个重要指标数,努赛尔数直接影响对流换热强烈数值,  $R_e$  为雷诺数,表征粘性影响的一个重要指标数,通过确定雷诺数的大小可以确定流场中的液体流动状态,本文中的液体流动为湍流。两者的计算方法都已经在第二章介绍。  $P_r$  为入口冷却液的普朗特数,  $P_{r_c}$  为接近电池表面冷却液的普朗特数。

通过公式(24)可以做出  $N_u$  关于  $R_e$  的曲线。然后利用本文所建立的 CFD 模型进行了仿真实验,最终得到了努赛尔数  $N_u$  关于雷诺数  $R_e$  的仿真曲线,然后利用本文所建立的 CFD 模型进行了仿真实验,最终得到了努赛尔数  $N_u$  关于雷诺数  $R_e$  的仿真曲线,通过与 Zukauskas 实验关联式进行对比来验证 CFD 模型的可靠性。结果将以第二种形式显示。同时,安装在 CFD 模型中的电池的热控制系统与安装在 CFD 中的热相关方程相似。通过对电池组温度控制系统的仿真模型,对实验平台上实际建立的电池组温度数学模型进行了验证。在该设计中,在 2C 和 4C 负载下改变了电池封装仿真模型中的温度变化,并对电池数学温度模型计算。实验结果如图 3 所示。对比这两条线之间的区别,然后确定数学模型的真实性的。

第一组设定电池组中,每个单体电池的起始温度为 25℃,冷却液起始温度为 25℃,流动速度为 0.5 m/s,电池 2C 放电。实验结果如图 4 所示。

第二组设定电池组中,每个单体电池的起始温度为 25℃,冷却液起始温度为 25℃,流动速度为 1 m/s,放电倍率为 2C。实验结果如图 5 所示。

综合两组实验可以看出,电池放电电流一定时,电池组中每个单体电池的温度都会逐渐增加,最终温度保持不变。电池放电电流越大,电池温度较起始温度增加越大。

综上,从不同冷却液流速条件下,电池组数学温度模

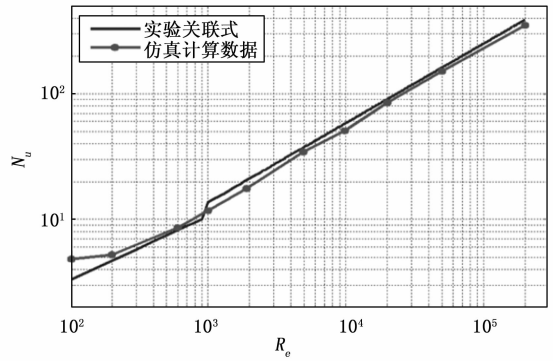


图 3 实验关联式对比

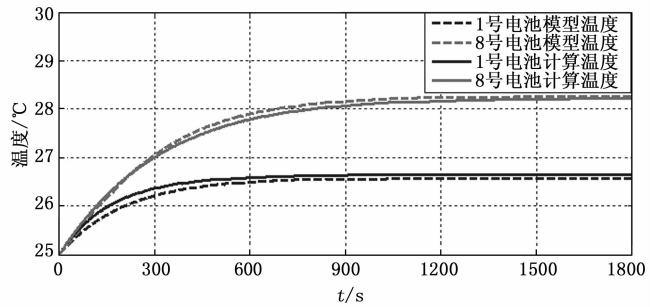


图 4 2 C 恒流放电电池组温度变化曲线

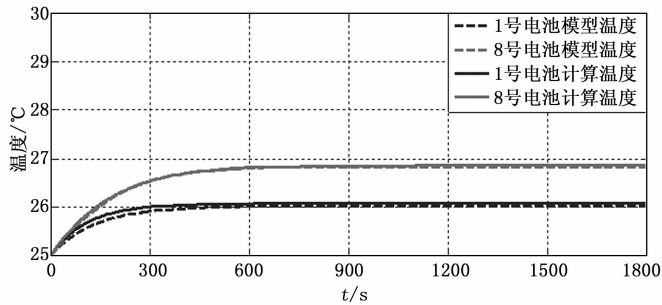


图 5 2 C 恒流放电电池组温度变化曲线

型计算得到的数据和仿真数据差距始终在 0.5℃ 之内,说明文中建立的电池组数学温度模型是准确的。

### 3 仿真结果及分析

依据前文所设计好的电池组数学温度模型和降温控制算法,在 Matlab/Simulink 里建立了电池组降温控制系统。

将模糊自适应 PID 控制器的控制效果同传统 PID 控制器的控制效果进行对比,分别通过控制作用下仿真动力电池组系统 1 号电池和 8 号电池温度变化曲线对比验证分析。仿真结果验证模糊自适应 PID 在电池组系统降温控制方面更加有效。

为了体现模糊自适应 PID 控制器求解冷却液流速的过程,将整个温度控制过程中冷却液流速的变化的数据输出,得到如图 6 所示的模糊自适应 PID 控制下冷却液流速的变化。

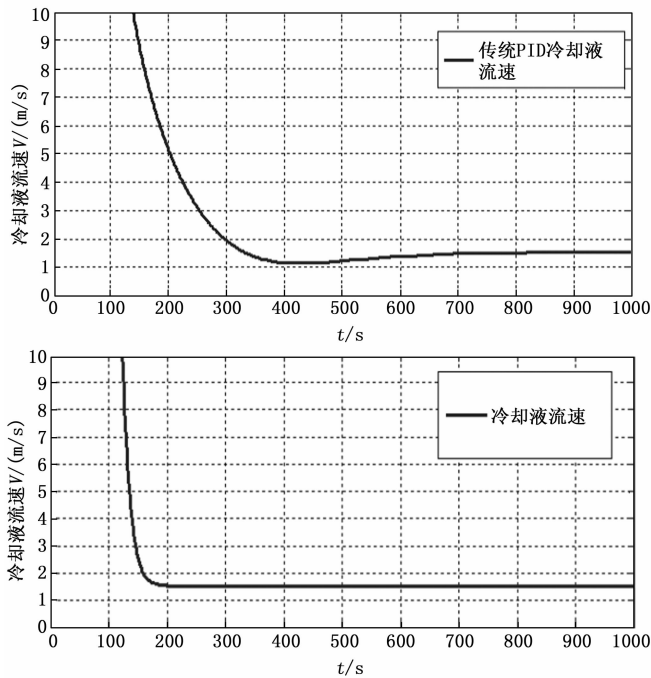


图 6 不同控制器作用下冷却液流速曲线图

与传统 PID 类似, 冷却剂的初始流量相对较高, 但温度误差也逐渐减小, 冷却剂的最终流量逐渐减小, 最终达到稳定。与传统 PID 控制器相比, 整个温度控制过程中冷却剂流量曲线的变化相对稳定, 这表明了模糊自适应 PID 的参数自动调节和智能化特点。传统 PID 控制和模糊自适应 PID 控制效果的比较如图 7 所示。

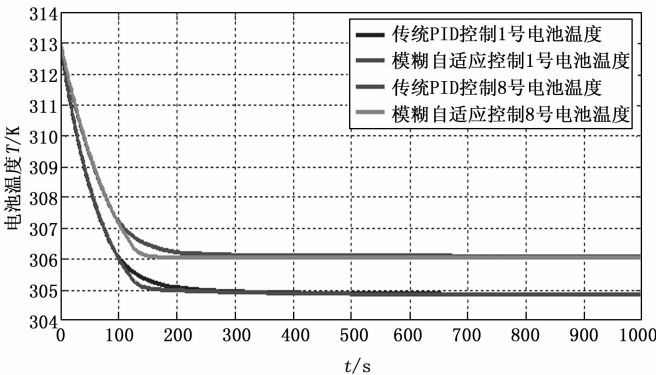


图 7 PID 控制与模糊 PID 控制的对比图

本文对电池组系统 1 号和 8 号电池进行了电池温度控制效果对比。更直观地可以看出, 模糊自适应 PID 控制比传统 PID 控制具有更短的响应时间和调整时间, 并且可以更早地实现稳定状态。最重要的是, 不需要手动设置 3 个 PID 参数, 这节省了时间, 消除了复杂的调整过程, 从而获得了更好的控制效果。

#### 4 结束语

分析了锂离子电池的发热和传热机理, 构建了动力电

池组温度数学模型。通过预处理过程建立了动力电池组温度模型, 并网格划分化; 将预处理过程中建立动力电池组数学模型导入到 ANSYS 软件。利用 ANSYS 对实际条件下电池组的发热进行仿真, 并与 Zuskauskas 实验相关方程进行比较, 表明所建立的动力电池组 CFD 模型可靠性, 进一步验证文章中动力电池组数学温度模型可作为控制器作用的仿真对象。在恒定冷却液流速条件下验证了动力电池组的温度数学模型。设计自适应模糊 PID 控制器, 通过 Matlab/Simulink 仿真试验验证该控制器能够很好控制电池组温度至期望值, 具有一定实际应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 李哲阳, 刘婷玉. 新能源汽车动力电池热管理技术探究 [J]. 汽车测试报告, 2023 (16): 38-40.
- [2] 邱洁玉, 贾照丽, 黄爱娣. 电动汽车动力电池热管理系统性能研究与实验测试 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48 (14): 1-6.
- [3] 李嘉鑫, 李鹏钊, 王 苗, 等. 锂离子电池热管理技术研究进展 [J]. 过程工程学报, 2023, 23 (8): 1102-1117.
- [4] HE Y, ZHANG Q, PANG Y. The development pattern design of Chinese electric vehicles based on the analysis of the critical price of the life cycle cost [J]. Energy Policy, 2017: 382-388.
- [5] GELAZANSKAS L, BARANAUSKAS A, GAMAGE K, et al. Hybrid wind power balance control strategy using thermal power, hydro power and flow batteries [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 74: 310-321.
- [6] 杨啸天, 尹忠东. 动力电池安全事故预警能力量化指标研究 [J]. 智能电网, 2017, 5 (7): 638-643.
- [7] 墨 柯. 中国车用动力锂离子电池发展现状 [J]. 新材料产业, 2016 (9): 10-17.
- [8] AL HALLAJ S, MALEKI H, HONG J S, et al. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources 1999, 83 (1): 1-8.
- [9] 杨凯乔. 耦合热管的风冷式动力电池热管理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [10] YANG N, ZHANG X, LI G, et al. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: a comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 8055-8065.
- [11] CHEN K, CHEN Y, LI Z, et al. Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018: 393-401.
- [12] 宋 洋. 基于相变材料与液冷耦合的车用磷酸铁锂电池热管理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [13] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: a review [J]. Journal of Power Sources, 2016, 3 (6): 178-192.

(下转第 172 页)