

混合动力机车动力电池系统温度控制方法研究

唐华¹, 牛军¹, 李虹玮¹, 高凯², 朱涛²

1. 北京首都国际机场股份有限公司, 北京 100621

2. 北京交通大学, 北京 100044

DOI: 10.61369/TACS.2025090034

摘要 : 混合动力机车电池热管理系统 (BTMS) 的控制策略对整车能效至关重要。本文通过仿真对比了恒温控制与阈值控制。研究表明: 恒温控制虽能精确控温, 但在高温环境下存在能耗失控风险 (高达 128.8Kwh), 成本高且鲁棒性低。相比之下, 阈值控制 (约 75Kwh) 引入 “节能死区”, 在保障安全温度下, 能耗显著降低 (节能超 40%), 展现出卓越的工程实用性与环境适应性。

关键词 : 动力电池热管理系统; 恒温控制; 阈值控制

Research on the Temperature Control Method of Hybrid Locomotive Power Battery Systems

Tang Hua¹, Niu Jun¹, Li Hongwei¹, Gao Kai², Zhu Tao²

1. Beijing Capital International Airport Co., Ltd., Beijing 100621

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044

Abstract : The control strategy of the battery thermal management system (BTMS) in hybrid locomotives is crucial to the overall vehicle energy efficiency. This paper compares constant temperature control and threshold control through simulation. The study shows that although constant temperature control can accurately regulate temperature, it carries a risk of uncontrolled energy consumption in high-temperature environments (up to 128.8 kWh), with high costs and low robustness. In contrast, threshold control (around 75 kWh) introduces an "energy-saving dead zone," significantly reducing energy consumption (by over 40%) while ensuring safe temperatures, demonstrating excellent engineering practicality and environmental adaptability.

Keywords : power battery thermal management system; temperature control; threshold control

引言

交通运输业的绿色转型是全球应对气候变化的战略焦点^[1]。轨道交通中, 非电气化线路仍依赖传统内燃机车, 其热效率低下导致高能耗与高排放, 是铁路实现净零排放的瓶颈。混合动力机车技术为此而生, 它结合了柴油发电机组与动力电池系统^[2]。其优势在于: 通过再生制动回收能量, 并利用电池平抑负载波动, 确保柴油机运行于高效区间。实践表明, 混合动力机车较传统机车节能 20% 至 40%, 效益显著。

然而, 系统效能依赖于动力电池的可靠性。锂离子电池对温度敏感, 在机车苛刻工况下, 热管理失控易诱发容量衰减或热失控。因此, 高效的电池热管理系统 (BTMS) 是保障安全与节能的前提^[3]。但 BTMS 本身也是能耗单元, 其控制策略直接影响整车能效。目前主流策略为恒温控制 (PID) 和阈值控制 (启停式)。前者是否能耗过高? 后者的综合表现如何? 本文旨在通过仿真对比, 在统一动态工况下评估两种策略, 为 BTMS 工程设计提供兼顾安全与能效的策略依据。

一、电池热管理系统建模

为对比不同控制策略的能耗表现, 本章构建了含工况、电池、空调、换热四大模块的仿真模型。模型逻辑为: 工况驱动电池产生热负荷, 控制模块决策空调提供冷却, 最终在热动态平衡中计算总能耗。

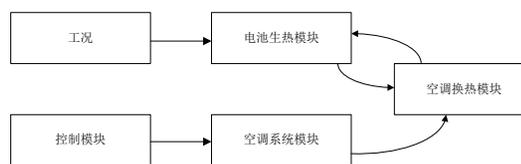


图 1 系统流程图

(一) 工况模块

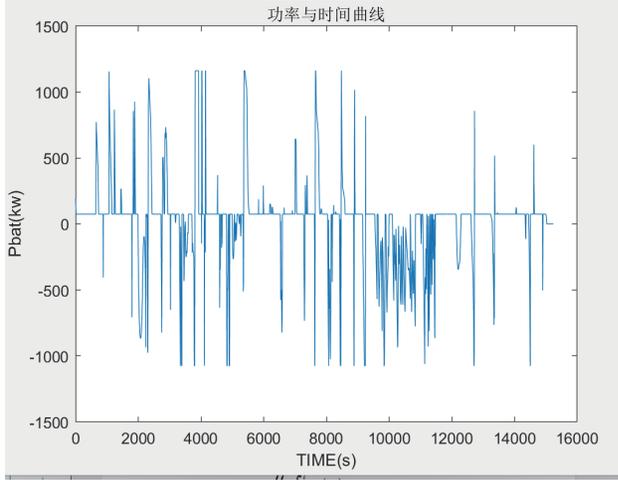


图2 工况功率与时间曲线

本文工况选取混合动力机车在真实调车工况的运行数据构建，其功率 - 时间曲线如图2所示。

(二) 电池模块

电池模块用于模拟电池系统的动态热行为。本文采用一阶 Thevenin 等效电路模型^[4]，其电压响应如公式 (1) 所示，SOC 通过安时积分法^[5]估算。电池生热基于 Bernardi 生热模型^[6]确定，如公式 (3) 所示。电池的热平衡方程综合考虑了生热与散热，如公式 (5) 所示。

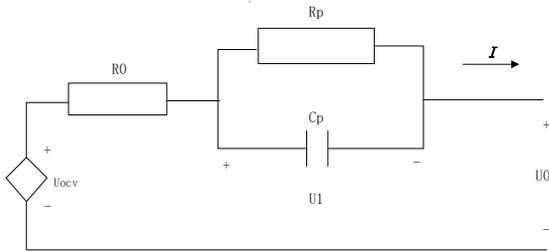


图3 一阶 Thevenin 模型

由基尔霍夫定律可得等效电路模型为

$$\begin{cases} U_0 = U_{ocv} - IR_0 - U_1 \\ \frac{dU_1}{dt} = \frac{I}{C_p} - \frac{U_1}{R_p C_p} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中：t 为充放电时间。

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\eta}{Q_n} \int_0^t I(\tau) d\tau \times 100\% \quad (2)$$

式 (2) 中：SOC₀ 为电池的初始电量，η 为库伦效率系数，Q_n 为电池的可用容量，I(τ) 为充、放电电流，τ 为时间积分变量。

$$Q_{heat} = I^2 R_0 + IT \cdot \frac{dU_{ocv}}{dT} \quad (3)$$

散热功率为：

$$Q_{loss} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (4)$$

其中 ΔT 为温差，指电池包和冷却介质之间的温差及 ΔT = T_{battery} - T_{coolant}，R_{th} 为热阻。

热平衡方程为：

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q_{heat} - Q_{loss} \quad (5)$$

由此搭建电热耦合模型，通过融合电池的电气特性和热学特性，为电池性能提供了更加全面和准确的描述。

(三) 空调系统模块

空调系统是 BTMS 的主要能耗源，其电功耗基于性能系数 (COP)^[7] 由制冷功率指令计算得出，如公式 (6) 所示。

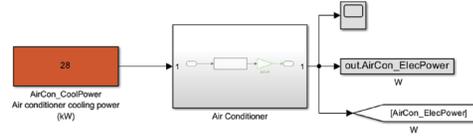


图4 空调系统模块

模块内部的核心是一个预设的功率映射关系，他基于制冷系统的性能系数 (COP) 特性构建。其中 COP 定义为输出制冷量与输入电功率之比：

$$COP = \frac{Q_{cooling}}{P_{ac}} \quad (6)$$

本模型采用由实验数据拟合数据得到的能效特性方程

$Q_{cooling} = 6.48\sqrt{P_{ac}}$ 。因此当输入一个特定的制冷功率指令 $Q_{cooling}$ (如 28KW) 时，模块内部通过数学关系直接计算出对应的电功耗 P_{ac} 。

(四) 换热系统模块

换热系统负责将冷量传递给电池，其核心耗能单元——水泵的功耗由冷却剂流量、扬程等参数决定，如公式 (7) 所示。

$$P_{pump} = Q \times H \times \rho \times g / \eta \quad (7)$$

式中 Q 为冷却剂流量，H 为总动态扬程，ρ 为冷却剂密度，g 为重力加速度，η 为泵的效率。

二、阈值与恒温的节能型对比研究

BTMS 能耗是影响整车能效的关键。本章旨在量化并对比恒温控制 (PID) 与阈值控制的节能效益^[8]。在统一工况与模型下，重点分析各策略的总能耗，以验证恒温控制的局限性及阈值控制的节能性。

(一) 恒温控制 (PI Control)

恒温控制旨在将电池平均温度精确维持在设定值 (T_{setpoint})。本研究采用 PI 控制器实现，其控制律如公式 (8) 所示。

恒温控制旨在将电池平均温度精确维持在设定值 (T_{setpoint})。本研究采用 PI 控制器实现，其控制律如公式 (8) 所示。

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (8)$$

式中 K_p 是比例增益，决定了对当前偏差的反应强度，K_i 是积分增益，决定了消除稳态误差的速度。

其优点是控温精度高，能为电池提供稳定的工作环境，理论上有利于延长寿命。

其核心缺陷在于能耗较高

- “过度控制”在低热负荷下，控制器仍会消耗能量以消除无害的微小温度波动。
- 缺乏“死区”，由于积分环节的存在，系统几乎永不停止，

导致持续的能量消耗。

(二) 阈值控制 (Threshold Control)

阈值控制是一种以保障安全为导向的启停式策略，其原理是预设温度上下限 (T_{max} , T_{min}) 当电池最高温度超过上限时系统开启，降至下限时则关闭 [9]，其控制律如公式 (9) 所示。

$$u(t) \begin{cases} P_{max} & \text{if } T_{bat} \geq T_{max} \\ 0 & \text{if } T_{bat} \leq T_{min} \\ u(t-1) & \text{if } T_{min} < T_{bat} < T_{max} \end{cases} \quad (9)$$

式中， $[T_{min}, T_{max}]$ 是预设的温度区间， T_{bat} 是电池当前温度， $u(t)$ 是控制输出 (如冷却功率)， P_{max} 是冷却系统最大功率， $u(t-1)$ 保持上一时刻的工作状态以实现滞回，防止在阈值边缘频繁启停。

其优点是结构简单、可靠性高。“按需服务”的逻辑从根本上避免了无效能耗，在节能方面具有显著优势。

其缺点主要在于控制精度方面

1. 温度波动：系统会导致电池温度在 $[T_{min}, T_{max}]$ 区间内周期性波动，无法实现精密的温度维持。
2. 响应被动：是一种“滞后”反馈，无法预测即将到来的高负荷只能被动响应。

三、仿真结果与对比分析

(一) 无控制策略下的仿真结果

“无控制” (冷却系统持续满功率运行) 被设为能耗基准。在此策略下，总能耗高达 134.2kWh，电池最高温度被过度冷却至 36.19°C。

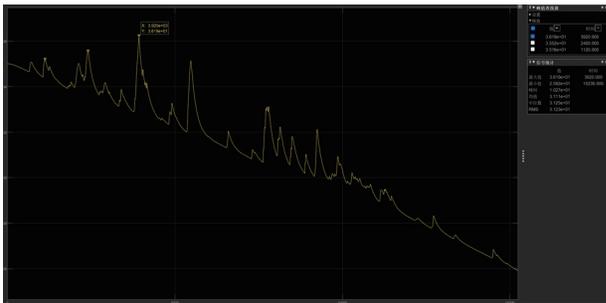


图5 无控制下的电池温度曲线

(二) 恒温控制

以‘无控制’策略 (能耗 134.2kWh) 为基准，本节评估恒温控制。作为闭环反馈，恒温控制能按需调节冷却功率。若目标设置合理“按需调节”节能效果显著。

为定量分析，我们以 35°C 的高温环境为例

控制目标	系统能耗 (单位 kWh)	电池最高温度 (°C)	相较于“无控制”的节能率
无控制	134.2	36.19	0%
恒温控制 (35°C)	60.91	39.79	54.6%
恒温控制 (25°C)	91.26	35.01	32.0%

表1 恒温控制与“无控制”基准性能对比

分析可见，恒温控制节能效果远优于基准。若目标设为接近环境的 35°C，总能耗仅 60.91kw (节能 54.6%)，最高温度 39.79°C。即使目标为 25°C，能耗 91.26kwh (节能 32.0%)。此对比证明恒温控制解决了“暴力制冷”的浪费问题。

然而，该节能成果很脆弱，高度依赖预设的完美目标值。一旦目标设定不当，缺陷明显。仍以 35°C 环境为例，如图 6 所示，若强行冷却至 15°C，能耗飙升至 128.8kw，节能率仅 0.4%。

低温目标下的“能耗失控”

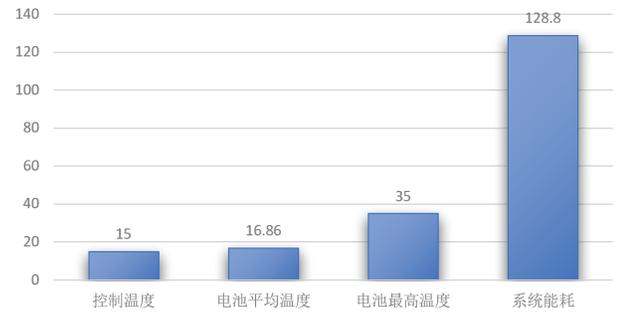


图6 35°C 环境下低温恒温控制的性能指标

同时，若为节能将目标放宽至 45°C，如图 7 所示，能耗降低至 44.31kwh，但电池最高温度达危险的 56.79°C，牺牲了安全。

高温目标下的“温度失控”

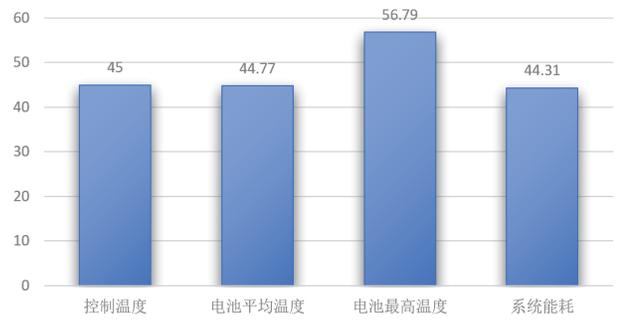


图7 35°C 环境下高温恒温控制的性能指标

恒温控制策略是一把“双刃剑”，它在特定，合理的工况下，相比于“无控制”基准展现出巨大的节能潜力，然而其核心缺陷在于是一种僵化的非适应性策略。一个固定的温度目标，在某些特定的环境下是节能的，但在另一些环境下会立刻导致能耗灾害或安全灾难。

(三) 阈值控制

上文证实恒温控制缺乏工况适应性，易致“能耗”或“温度”失控。阈值控制则不同，其“按需服务”理念通过设置温度上下限，创造了“节能死区”。该设计具鲁棒性，不追求固定目标，唯一使命是防止温度越过安全线，在保障安全下最大化节能。

阈值控制性能表现高度依赖其核心参数 - 开启温度 (T_{on}) 的设定，这是安全与能耗的关键权衡。本节聚焦 35°C 的高温环境，对比不同开启阈值的性能差异。



图8 35℃环境下不同开启阈值的阈值控制性能对比

由图8所示关断温度统一设置成25℃，权衡关系清晰：保守策略(35℃)能耗最高(75.11kWh)；激进策略(55℃)最高温度(55.01℃)超出安全冗余；而平衡策略(45℃)在保障安全(最高温45℃)的同时，实现了近优的低能耗(60.99kWh)。

四、结论

本研究通过仿真对比了恒温控制与阈值控制在混合动力机车BTMS中的应用。研究证实，阈值控制兼顾了安全性与节能性，是一种高效、鲁棒的实用策略，值得推荐^[10]。

参考文献

[1] 高峰. 充分利用“双碳”战略驱动力推动现代能源体系发展[J]. 数据, 2022(8): 12-14.
 [2] 陈涇佳. 燃料电池复合能源系统及能量管理发展综述[J]. 机电一体化, 2019, 25 (Z1): 3-10+28. DOI:10.16413/j.cnki.issn.1007-080x.2019.z1.001.
 [3] 王柯永. 电动汽车锂电池热管理系统综述[J]. 新型工业化, 2022(008):012.DOI:10.19335/j.cnki.2095-6649.2022.8.005.
 [4] 枣庄职业学院. 一种电池的 Thevenin 模型参数的辨识方法及其应用: 202010267442.8[P]. 2020-06-19.
 [5] 李丽珍, 王星, 向小华, 等. 基于安时积分法估算电池低温荷电状态的方法对比[J]. 电子与封装, 2025, 25(2): 79-85.
 [6] 李维平, 李隆健, 陈化雨. 锂离子电池可逆与不可逆生热特性研究[J]. 汽车工程学报, 2019, 9 (02): 123-129.
 [7] 高永利. 某型纯电动汽车热管理系统全局优化控制策略研究[D]. 吉林大学, 2023. DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2023.006774.
 [8] 王钰淞. 锂离子电池组热管理优化及动态热控制研究[D]. 石家庄铁道大学(原名: 石家庄铁道学院), 2022.
 [9] 南京金龙新能源汽车研究院有限公司. 一种锂离子电池热管理控制方法: 201710932289.4[P]. 2018-03-30.
 [10] 张蕾, 杨洋, 马菁, 等. 液冷动力电池系统热管理控制策略优化探究[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 127-133. DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2024.S1.127.