混合动力汽车热平衡分析及能耗策略优化研究

陆训　杨世杰　林新峰

（奇瑞新能源汽车股份有限公司，芜湖 241000）

【欢迎引用】陆训，杨世杰，林新峰．混合动力汽车热平衡分析及能耗策略优化研究[J]．汽车文摘，2026(4)：10-16.

【Cite this paper】LU X, YANG S J, LIN X F. Research on Thermal Balance Analysis and Energy Consumption Strategy Optimization for Hybrid Electric Vehicles[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(4): 10-16.

【摘要】针对某混合动力汽车热管理系统，基于整车热管理架构，通过建立一维仿真模型，以系统出水温度为安全性指标，分析了不同行驶工况下各子系统的散热性能及高负荷空调运行对系统热干扰的影响。通过构建包含发动机冷却、电池冷却和空调系统的集成模型，在5种典型行驶工况下进行仿真，揭示了前端冷却模块中高温散热器、冷凝器及低温散热器之间的热耦合效应，并提出了基于能耗优化的压缩机与电池水泵拟合转速控制策略。结果表明：所有工况下各散热器出水温度均保持在安全阈值内，系统设计可行；采用拟合转速控制策略后，系统在30 ℃、35 ℃和40 ℃环境温度下的总能耗较线性控制分别降低35.8%、12.0%与6.1%。通过热管理耦合建模与能耗优化控制，可在保证系统安全的同时有效提升混合动力汽车的热管理能效。

关键词：分级优化混合动力；热管理；热平衡

中图分类号：U469.7　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240173

Research on Thermal Balance Analysis and Energy Consumption Strategy Optimization for Hybrid Electric Vehicles

Lu Xun, Yang Shijie, Lin Xinfeng

(Chery New Energy Automobile Co., Ltd., Wuhu 241000)

【Abstract】 For a certain hybrid vehicle thermal management system, based on the overall vehicle thermal management architecture, a one-dimensional simulation model is established. Using the system outlet water temperature as a safety indicator, the heat dissipation performance of each subsystem under different driving conditions and the thermal interference effects of high-load air conditioning operation on the system are analyzed. The study constructs an integrated model including engine cooling, battery cooling, and the air conditioning system, and conducts simulations under 5 typical driving conditions. It reveals the thermal coupling effects among the high-temperature radiator, condenser, and low-temperature radiator in the front-end cooling module, and proposes a compressor and battery water pump fitted speed control strategy based on energy consumption optimization. Results show that under all conditions, the outlet water temperatures of all radiators remains within safe thresholds, confirming the feasibility of the system design. After adopting the fitted speed control strategy, the total energy consumption of the system decreases by 35.8%, 12.0%, and 6.1% at ambient temperatures of 30 ℃, 35 ℃, and 40 ℃ respectively, compared to linear control. The study demonstrates that through coupled thermal management modeling and energy consumption optimized control, the thermal management efficiency of hybrid vehicles can be effectively improved while ensuring system safety.

Key words: Graded optimization of hybrid power, Thermal management, Thermal balance

0　引言

随着社会发展和人民生活水平的提升，汽车已成为家庭日常出行的重要工具。然而，传统燃油车的大规模使用带来了严峻的环境污染问题，推动新能源汽车发展成为当前研究的热点[1]。东北等严寒地区，低温环境对纯电动汽车的续航能力产生显著负面影响。混合动力汽车在保留发动机的基础上，引入电机驱动

系统，兼具低排放与长续航的优势，展现出良好的适应性与应用前景[2]。

与传统燃油车相比，混合动力汽车的结构更为复杂，通常配备大容量动力电池、一个或多个驱动电机，其冷却系统也相应扩展为多个子系统，涵盖发动机、电池及电机等部件的独立散热需求[3]。文献[4]对某混合动力汽车的热管理系统构型进行分析，通过试验分析混动模式下热管理系统性能，得到各热管理系统的冷却液温度均能控制在允许范围内，保障了关键发热部件的稳定运行。武东[5]以插电混合动力汽车热管理系统为研究对象，结合整车的电池、电机、发动机温度特性及混合动力汽车热管理系统设计要求，基于AMEsim软件对整车热管理模型进行验证。仿真结果较好地验证了热管理系统设计的有效性。Dong[6]等针对插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle，PHEV）设计了一个集成热管理系统，包括高温冷却液回路、中温冷却液回路、低温冷却液回路、制冷剂回路和电池回路，并基于逻辑门限控制策略实现部件温度管理。仿真分析表明，该系统具有良好的电池温度均匀性与各部件温控效果。张文博[7]等对混动重型载货车的热管理系统进行研究，该系统包含发动机冷却系统、电机冷却系统和电池冷却系统，通过在整车控制器中预设控制方案来控制电风扇及水泵等元件，有效提升了整车性能与驾驶舒适性。顾宁[8]等利用KULI对某款重型柴油机的冷却系统在瞬态工况下进行仿真，分析了冷却液与润滑油温度变化，结果显示仿真与实验数据吻合良好。Xu[9]基于KULI对质子交换膜燃料电池汽车的集成热管理系统进行建模，并提出了有效控制策略。

现有研究多从混合动力汽车热管理系统构型设计、多回路温控策略及仿真建模验证等方面开展研究，侧重保障关键部件温控稳定性与系统设计准确性，但较少深入分析不同行驶工况下混合动力汽车热管理系统性能。因此，本文针对某混合动力汽车热管理系统开展仿真研究，分析车辆不同行驶状态下的散热器参数，验证热管理系统的冷却能力。此外，通过分析压缩机、水泵与风扇等部件的能耗特性，进一步提出了热管理系统能耗控制优化策略，旨在为系统节能优化提供依据。

1　仿真模型

混合动力汽车与传统燃油车的主要区别在于引入了电机驱动，并以动力电池作为电机驱动的动力源。对于PHEV，其电池容量基本可以满足中近距离的纯电动低速行驶需求。本文以一款七座MPV车型为研究对象，该车型采用双换热器结构，分别实现对电池系统的冷却与加热。整车热管理系统架构包含发动机冷却系统、增压冷却系统、空调系统（采用双蒸发器与换热器结构）、电机冷却系统、电控冷却系统以及电池冷却系统，整体架构如图1所示。

基于上述热管理系统架构，本文利用KULI软件建立了混合动力汽车整车热管理系统及动力系统的集成模型。建模过程中，将整车热管理系统按照上述子系统进行分解，逐步分析各个系统结构，并且对各部件模型分析验证。所搭建的一维热管理系统模型如图2所示，其中热管理系统的各个子系统模型分别对应于图2a~图2f。在空气流动路径方面，外部空气自车辆前进气格栅进入后，依次流经中冷器、低温换热器、冷凝器、高温散热器及油冷器，如图3所示。

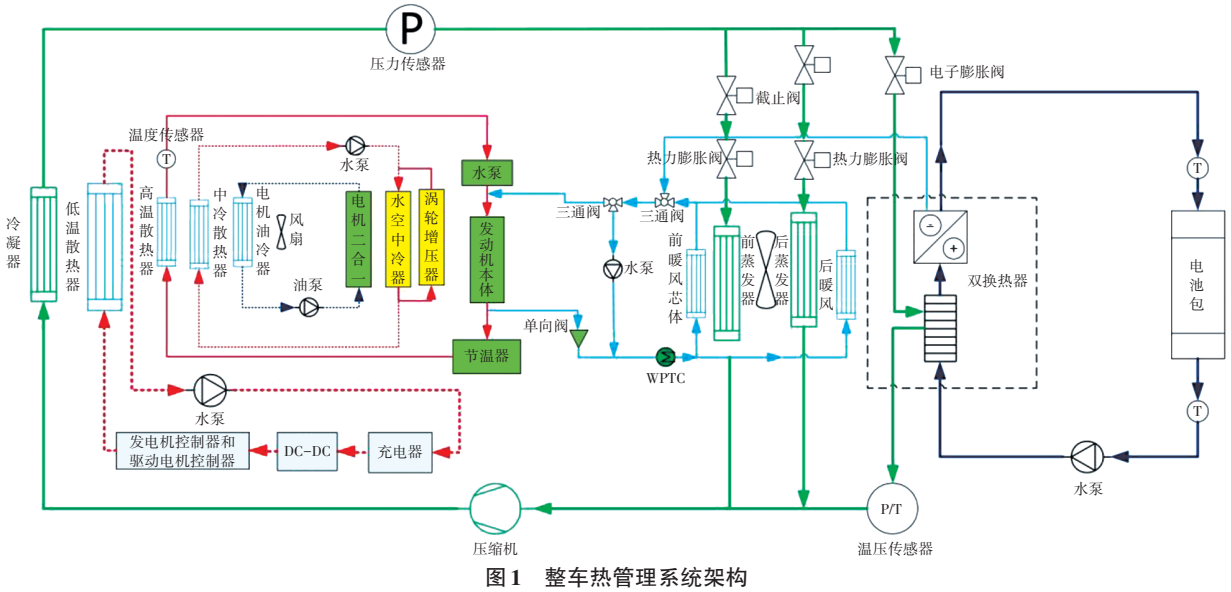
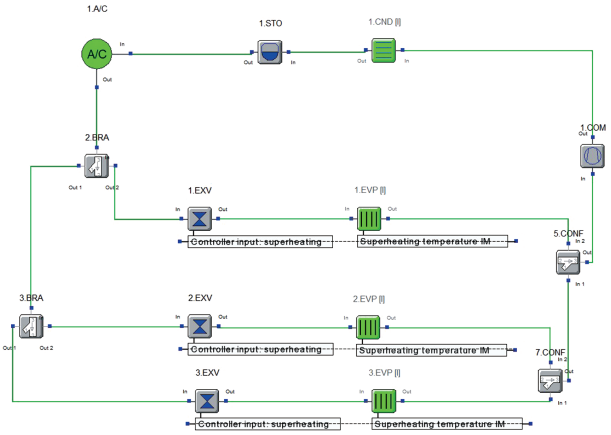
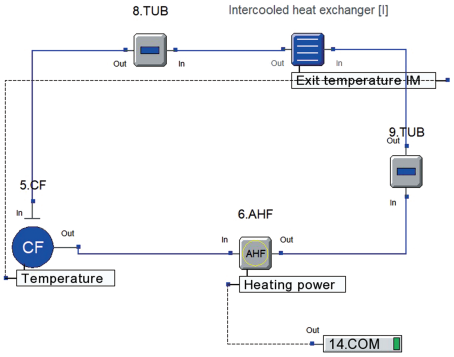


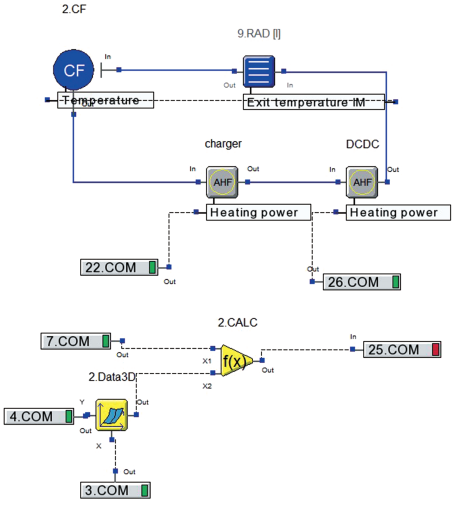
图1　整车热管理系统架构



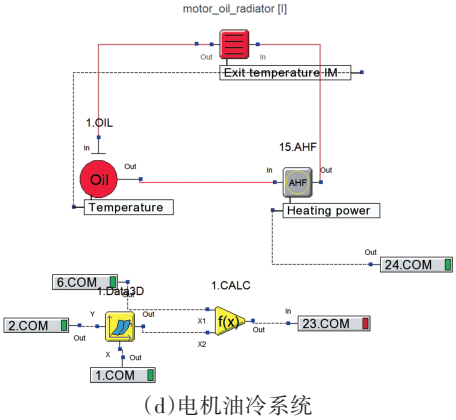
(a)空调系统



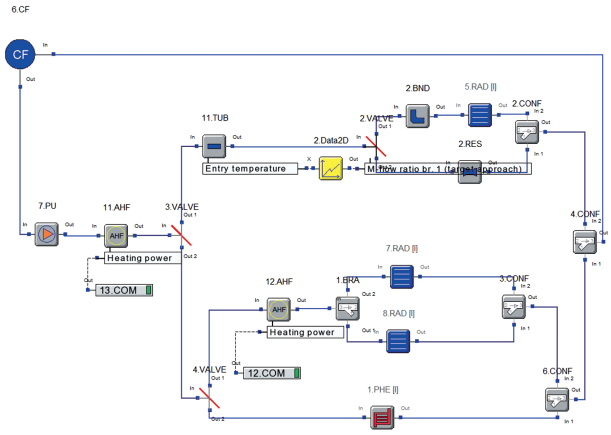
(b)涡轮增压冷却系统



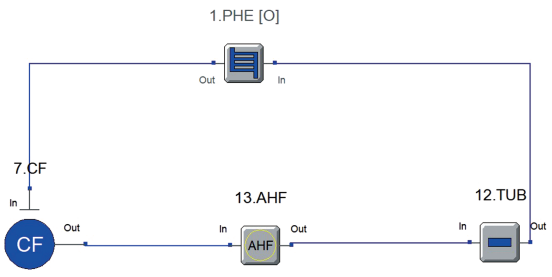
(c)DC-DC 和控制器冷却系统



(d)电机油冷系统



(e)发动机热管理系统



(f)电池热管理系统

图2　热管理系统整体模型

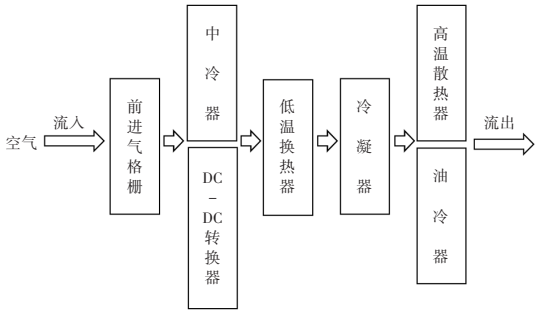


图3　空气流动路线图

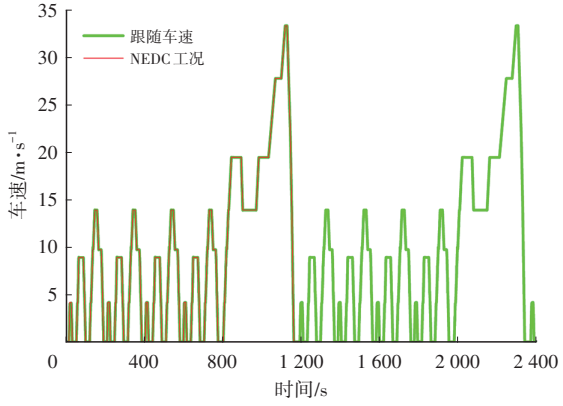
根据循环冷却介质不同，可分为水循环、油循环和制冷剂循环3种类型。空调系统冷却介质为制冷剂，因此选用制冷剂循环进行建模。发动机、电池、电机和电子元器件冷却系统内部均以冷却液为介质，故采用水循环建模。此外，发动机的机油冷却区别于其他冷却方式，油冷器采用板式换热器，两侧流过的介质不同，一侧为油，另一侧为冷却液。各系统冷却剂类型及散热器名称如表1所示。

表1　热管理系统冷却剂类型及散热器名称

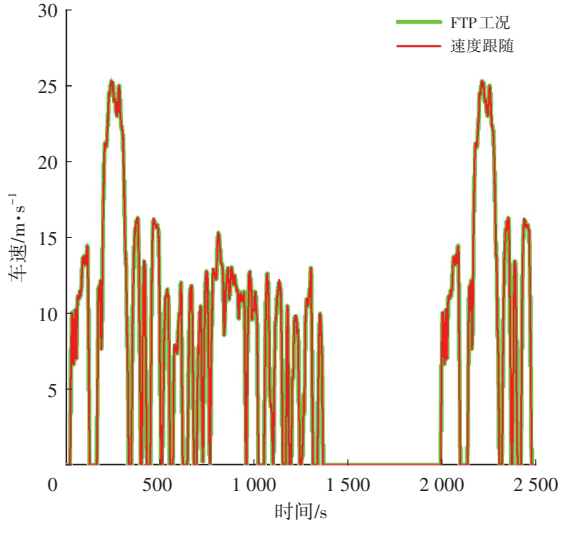
冷却回路	冷却剂	散热器名称
发动机冷却	50%乙二醇	高温散热器
空调系统	R134a	冷凝器、蒸发器
电机油冷却	ENG 10W40+油	电机油冷器
涡轮增压散热	50%乙二醇	中间冷却器
DC-DC及控制器冷却	50%乙二醇	低温散热器

2 整车动力学模型及工况

混合动力汽车的整车模型主要分为2部分：动力系统和热管理系统。本文针对整车一维模型实现了动力系统模型的动力分配，验证了不同工况下的车速跟随情况。依托于配置良好的动力系统，分析了空调系统、发动机冷却/加热系统、电机电子冷却系统和电池冷却/加热系统的热平衡性能。本文选取连续2个新欧洲驾驶循环（European Driving Cycle, NEDC），和连续2个联邦测试规程（Federal Test Procedure, FTP）工况验证该模型的速度跟随情况。车速与工况车速的跟随情况如图4所示。结果表明，在连续NEDC和连续FTP工况下的车辆速度跟随情况良好，满足建模需求。



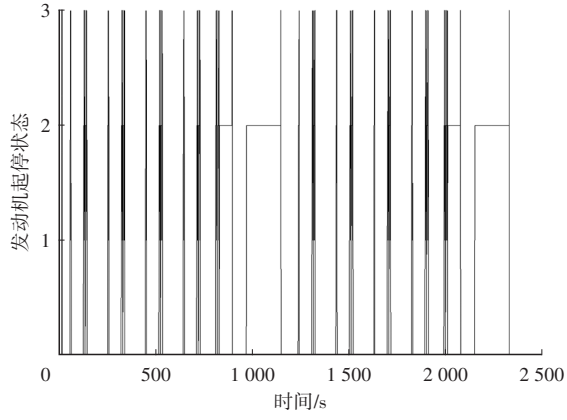
（a）NEDC工况



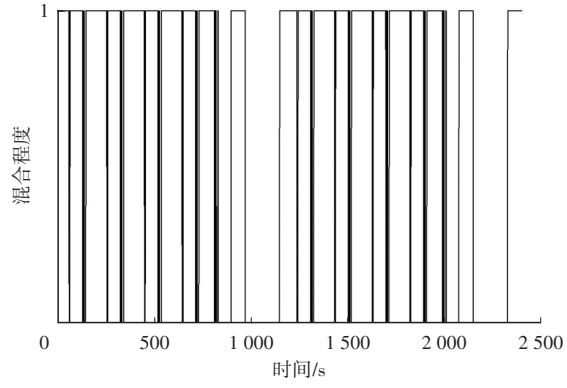
（b）FTP工况

图4 不同行驶工况模型对标

混合动力汽车的发动机根据实际需求起停，并随驱动模式切换工作状态。在NEDC工况下，本文基于能量分配原则对发动机工作状态进行设置。发动机起停及混合程度如图5所示。图5a中，0表示关闭、1表示参与驱动、2表示怠速、3表示关闭。对应结合图5b中的0表示发动机参与驱动、1表示纯电驱动，从而验证了采用动力系统的能量分配原则能够对模型进行有效控制。



（a）发动机起停



（b）混合程度

图5 发动机起停及驱动形式

为确保散热系统安全运行，任何车速下出水温度均需控制在安全阈值以内。表2列出了各散热器出水温度的最高允许值。

表2 散热器出水温度安全阈值

散热器	出水温度/℃
高温散热器	≤115
低温散热器	≤70
中冷散热器	≤60
电机油冷器	≤90

下面将针对不同车速工况的仿真结果进行分析，以验证系统是否满足散热需求。

3 仿真结果分析

3.1 热性能分析参数选取

整车热性能分析涉及的主要参数包括：车速、空气湿度、空气绝对压力、格栅进气量、发动机转速、环境温度、电机工作状态。

固定条件包括空气的相对湿度和空气绝对压

力。空气相对湿度选取50%，空气绝对压力选取0.101 3 MPa。

热平衡工况下不同车辆行驶状态分别为：怠速（车速0 km/h）、低速爬坡（车速40 km/h，坡度10%）、中速爬坡（车速60 km/h，坡度7.2%）、高速爬坡（车速120 km/h，坡度3%）和超高速（车速140 km/h）。各工况下的具体试验条件如表3所示。

表3　不同工况下试验条件数据

行驶工况	车速/km·h^{-1}	坡度/%	环境温度/℃	发动机转速/r·min^{-1}	发动机扭矩/N·m	前格栅进气量/kg·s^{-1}	电机是否参与工作
怠速	0	0.0	45	1 210	60.0	0.545	是
低速爬坡	40	10.0	40	2 640	152.1	1.110	是
中速爬坡	60	7.2	38	2 640	180.2	1.580	是
高速爬坡	120	3.0	45	3 000	224.0	2.990	否
超高速	140	0.0	45	3 500	150.1	3.440	否

3.2　热平衡工况下散热器散热性能分析

在不同车速与路面条件下，各发热部件产热量存在显著差异。为了验证混合动力汽车散热系统的有效性，本文设定空调系统在所有工况下均以最大负荷运行，以确保乘员舱温度处于舒适范围内。

当冷凝器以最大散热能力工作时，其空气侧温度较高，可能对后续布置的散热器性能产生不利影响。因此，在评估散热器自身散热能力的同时，需重点关注冷凝器后方散热器是否仍能满足散热需求。图6展示了通过仿真分析得到的各散热器在不同车速下的散热量分布。

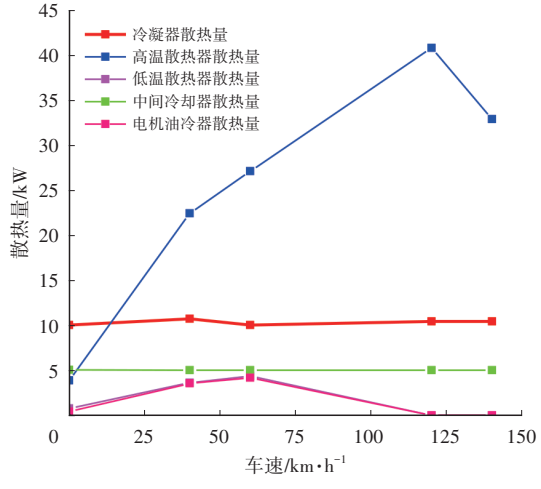


图6　不同行驶状态下各散热器散热量对比

在仿真参数设置时，已将爬坡度所需的额外发动机扭矩需求折算至发动机转速与扭矩参数。随着车速提升，发动机产热量相应增加，同时前端冷却模块的进风量也随之增大。如图6所示，各散热器的总散热量随车速提高累计增加29.02 kW。在怠速、低速及中速行驶工况下，电机持续参与工作，符合系统在低速段的设计预期；电机及DC-DC转换器的产热量随负载程度相应增加，热负荷上升约600 W。

在高速与超高速工况对比中可见，随着车速提高，发动机产热量呈现下降趋势。这主要是由于高速爬坡工况（坡度3%）下发动机需输出更大扭矩，其产热量相应增加，较无坡度的超高速工况高出7.89 kW。

散热性能直接反映车辆散热模块的有效性，而设备的安全性则体现为各循环回路出水温度的控制效果。以发动机为例，其冷却回路出水温度必须控制在临界值以下，以确保有效散热并避免机体损伤。根据表4，各散热器出水温度需严格保持在规定范围内。图7展示了4种典型行驶状态下各散热器的出水温度对比。

表4　设定参数下温度及车速

工况序号	影响因素	
	环境温度/℃	车速/km·h^{-1}
1	30	30
2	35	30
3	40	30
4	30	60
5	35	60
6	40	60
7	30	120
8	35	120
9	40	120
10	30	150
11	35	150
12	40	150

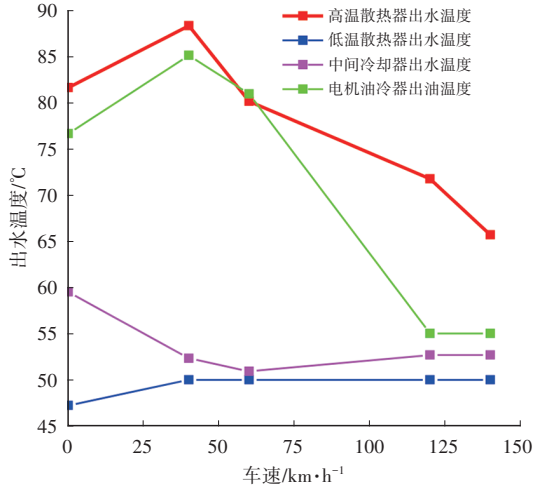


图7　不同行驶状态下散热器出水温度对比

分析图7可知，各回路回水温度总体保持稳定，波动幅度较小。当车速超过40 km/h时，高温散热器出

水温度呈现下降趋势。根据发动机冷却回路工作原理，随着发动机转速与扭矩提升，产热量增加导致冷却液温度上升，此时节温器开度增大，回路中冷却液流量相应提高。在流量增加的情况下，高温散热器的水温和电机油冷器的油温会相应降低20~30 ℃，进风量增加2.9 kg/s。其余散热器的出水温度相对比较稳定，其散热量在不同行驶工况下差异较小，因此出水温度波动幅度控制在12 ℃以内。

需要说明的是，前端冷却模块中各散热器之间存在空气流动序列影响。当其中一个散热器的出风温度较高时，会对其后的散热器产生一定的影响，进风温度提高也会对散热器的散热情况产生影响。

3.3 不同环境温度及车速条件下整车热性能分析

在压缩机转速固定为8 000 r/min、水泵转速为300 r/min的条件下，选取某南方地区（40 ℃），某中原地区（35 ℃）和某北方地区（30 ℃）等代表区域温度进行仿真，系统分析乘员舱、电池、发动机及电机在不同工况下的热性能表现，具体分析结果如表4所示。

乘员舱初始温度设定为与环境温度相同，车辆起动后，散热系统开始工作。如图8所示，乘员舱温度均能在一段时间内下降并稳定在26 ℃以下。在南方地区约40 ℃高温环境下，系统仍可实现有效降温。在中原地区35 ℃以及北方地区30 ℃环境中，空调制冷能力不仅满足需求，还具备一定的性能余量。

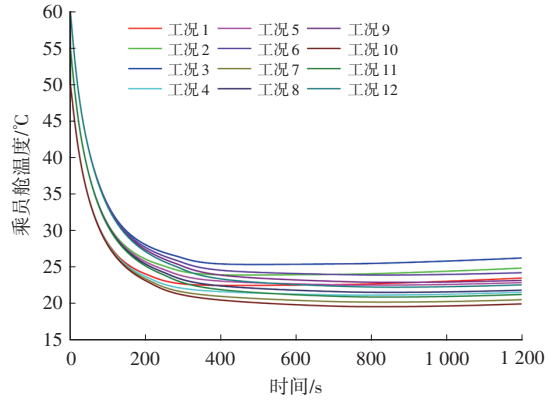


图8 定参数下乘员舱温度曲线

考虑到空调系统还需承担电池散热任务，由图9可见，电池温度在200 s内显著下降至30 ℃以下的最佳工作范围，验证了电池冷却系统的合理性与有效性。电池温度呈现平稳下降趋势，进一步证明其冷却系统的设计合理性。

发动机与电机在设定参数下的温度变化如图10所示。发动机温度上升较快，在超过85 ℃后通过高温散热器调节回落至85 ℃左右。电机温度特性呈现2个明显阶段：高温区间对应低速工况下的高发热状态，低温区间对应高速非驱动时的低发热状态。在热管理系统调控下，各驱动部件温度均能控制在安全阈值以内。

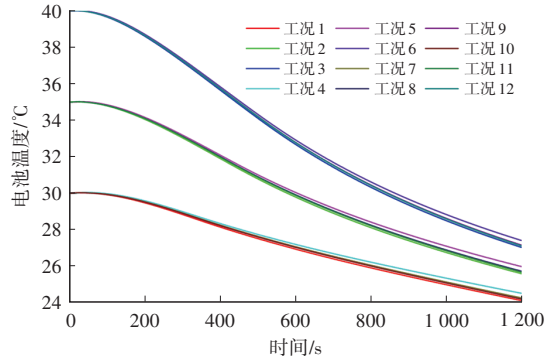
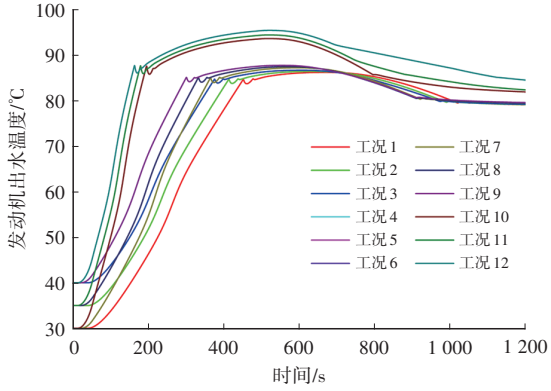
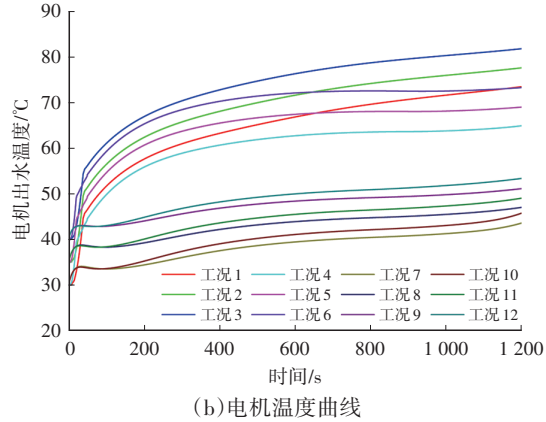


图9 电池温度曲线



（a）发动机温度曲线



（b）电机温度曲线

图10 发动机与电机在设定参数下的温度变化

4 热管理系统能耗控制策略优化

热管理系统能耗主要包括压缩机、水泵及风扇3部分，其中风扇能耗占比较小可忽略。因此，本文重点对压缩机与水泵的运行能耗进行优化控制。

选取高温温度40 ℃、中温温度35 ℃和低温温度30 ℃，选取压缩机转速3 000 r/min、4 000 r/min、5 000 r/min、6 000 r/min、7 000 r/min和8 000 r/min，电池水泵冷却水泵和电机冷却水泵转速300 r/min、

600 r/min、900r/min、1 200 r/min、1 500 r/min和1 800 r/min，发动机转速500 r/min、1 000 r /min、1 500 r/min、2 000 r/min、2 500 r/min和3 000 r/min，定义车辆行驶车速30 km/h，60 km/h，90 km/h，120 km/h，组成72个组合对能耗进行分析。计算获得乘员舱降温时间、压缩机能耗、电池水泵能耗等，探究冷却系统的降温效果及能耗。

对每种环境温度与车速条件下的降温时间与能耗数据进行归一化处理，归一化后的数据通过引入权重系数对降温时间和能耗进行整合，将权重系数从0~1进行均等分布，共11组。通过分析每个温度和车速的整合值，结果表明：特定转速下的时间和能耗综合值会随权重系数的变化而改变，环境温度越低，整合值的变化趋势越显著。基于各环境温度及车速下的整合值，选取整合值最小值作为拟合最佳转速。本文设定降温时间权重系数为a，能耗权重系数为b。根据仿真拟合数据与实测值之间的偏差分析可知，标准差随降温时间权重系数增大而上升。当a = 0.3、b = 0.7时，压缩机转速随环境温度和车速变化的控制公式为：

$$N_{compressor} = 3.279 \times 10^4 - 879v - 102\,5T + 4.954v^2 + 27.5v \cdot T + 10T^2 - 0.008\,23v^3 - 0.083v^2 \cdot T - 0.2v \cdot T^2 \quad (1)$$

式中：$N_{compressor}$为压缩机转速，v为车速，T为环境温度。

在电池冷却子系统方面，随着降温时间权重系数提高，所需水泵转速相应增加，符合热力学机理。在环境温度为30 ℃、35 ℃和40 ℃条件下，电池降温时间峰值分别低于1 600 s、1 900 s和2 200 s，满足设计预期，且所有拟合结果的标准差均保持在较低水平。基于电池降温性能要求，选取相同权重组合（a=0.3, b=0.7）下的最小拟合转速，得到电池水泵转速控制公式：

$$N_{pump} = -5\,325 + 38.33v + 270T - v \cdot T - 3T^2 \quad (2)$$

式中：N_{pump}为电池水泵转速，v为车速，T为环境温度。

通过上述分析，获得了压缩机与水泵转速随环境温度和车速的变化规律，并据此制定了相应的转速控制策略。在同等工作条件下，采用拟合转速控制策略的热管理系统总能耗较线性转速控制策略显著降低，在30 ℃、35 ℃和40 ℃环境温度下分别实现35.8%、12%和6.1%的能耗降低。

5 结论

本文通过建立某混合动力汽车热管理系统模型，并在5种典型行驶工况下验证其热平衡性能，得到以下结论：

a. 在怠速、低速及高速行驶条件下，各热管理系统均能有效通过前端冷却模块带走发热部件产生的热量，散热器出水温度始终维持在安全阈值以下，确保了被冷却元件的正常运行。

b. 在车辆行驶过程中，散热器空气侧风量充足，能够满足散热器空气侧的换热需求；在怠速工况下，风扇提供的风量也可以将散热器的热量完全带走，保证了散热器可用性及安全性，有效避免热害现象。

c. 在高速、爬坡等严苛工况下，空调系统持续大负荷运行，冷凝器的高热负荷会对冷却模块中后续散热器的进气温度产生一定影响。

d. 定参数冷却仿真结果表明，整车冷却系统及热管理系统部件配合良好，各散热器均能满足部件降温需求，空调回路制冷量有一定的余量。

e. 采用拟合转速控制策略的热管理系统能耗表现显著优于线性控制策略，在30 ℃、35 ℃和40 ℃温度环境下分别实现了35.8%、12%和6.1%的能耗降低，可在保证系统安全的同时有效提高混合动力汽车的热管理能效。

参 考 文 献

[1] 钮怡飙. 混合动力汽车现状及发展趋势浅析[J]. 汽车与配件, 2015(50): 49-51.

[2] 崔可欣. 基于多目标优化的混合动力汽车能量管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

[3] 李峰. 插电式混合动力汽车热管理系统开发及其控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

[4] 王远, 张建凯, 牟连嵩. 插电式混动汽车热管理构型和性能试验研究[J]. 汽车工程师, 2020(12): 42-44.

[5] 武东. 混动整车热管理系统的研究与开发[D]. 西安: 长安大学, 2019.

[6] DONG Y Q, WANG X, XU S, et al. Designing and Evaluating the Integrated Thermal Management System of a Plug-In Parallel Hybrid Electric Vehicle[J]. SAE Technical Papers, 2020: 2020-01-5242.

[7] 张文博, 杨志刚, 王磊. 混动重卡热管理系统性能与控制逻辑研究[J]. 汽车实用技术, 2018(18): 43-45.

[8] 顾宁, 倪计民, 仲韵, 等. 基于KULI的发动机热管理瞬态模型的参数设置与仿真[J]. 计算机应用, 2009, 29(7): 1963-1965+1977.

[9] XU J, ZHANG C, FAN R, et al. Modelling and Control of Vehicle Integrated Thermal Management System of PEM Fuel Cell Vehicle[J]. Energy, 2020, 199(5): 117495.

（责任编辑 **明慧**）