

新能源汽车热管理系统协同优化策略

张得仓

湖北三峡职业技术大学 湖北 宜昌 443000

摘 要：新能源汽车热管理系统涵盖电池热管理、电机电控冷却、空调系统和余热回收等多个子系统，各子系统之间存在复杂的耦合关系和能量交互。当前热管理系统设计多采用“各自为政”的独立控制策略，子系统之间缺乏有效协同，导致系统整体能效偏低、低温续航衰减严重、热管理能耗占比居高不下。本文从系统耦合的视角出发，分析了各子系统之间的热交互机理与协同潜力，构建了以能量流和热流综合优化为核心的协同控制架构，提出了基于多目标优化的热管理协同策略。通过系统级协同优化，可在不增加硬件成本的条件下显著降低热管理系统能耗，提升新能源汽车全气候环境下的综合能效水平。

关键词：新能源汽车；热管理系统；协同优化；能量流；系统耦合

引言：热管理系统是新能源汽车除动力系统外影响整车能效的核心系统之一。电池、电机、电控及空调系统均对热管理提出日益增长的需求，热管理能耗已成为整车能耗的重要组成部分。传统设计将各子系统作为独立单元进行开发和控制，忽视了子系统之间的热交互关系和能量互补潜力，造成大量可利用热能的浪费。低温环境下，座舱采暖和电池加热导致热管理能耗大幅攀升，严重制约整车续航里程。本文从系统耦合的本质出发，分析各热管理子系统之间的热交互机理，提出面向整车能量流优化的协同控制策略，为提升热管理系统整体能效提供理论支撑。

1 新能源汽车热管理系统架构与耦合关系

1.1 热管理系统的构成与功能

新能源汽车热管理系统由多个功能子系统构成。电池热管理子系统将动力电池温度维持在 15 至 35℃ 的最优区间，兼具高温散热和低温加热功能，直接影响电池充放电效率、可用容量和循环寿命。电机电控热管理子系统负责驱动电机、电机控制器及 DC-DC 变换器等功率部件的冷却，确保功率器件结温不超安全阈值。空调子系统承担座舱环境调节，其能耗对整车续航里程有直接影响。余热回收子系统通过热泵或废热回收装置，将电机电控运行产生的废热回收用于座舱采暖和电池加热。四个子系统通过冷却液、制冷剂和空气回路形成复杂的热量传递网络。

1.2 子系统间的热耦合机理

各子系统通过多种途径形成热耦合。在冷却液回路层面，电池冷却与电机冷却通过换向阀实现串并联切

换，电机回路在低温工况下可作为电池加热热源。在制冷剂回路层面，空调系统与电池冷却系统共用制冷循环，电池冷却与座舱制冷之间存在制冷量分配的竞争关系^[1]。在空气回路层面，座舱回风余热可通过热泵回收用于电池加热。电池放电效率受温度显著影响——低温下内阻增大、放电电压下降、可用能量减少，而热管理系统为维持电池温度所消耗的能量进一步加剧可用能量减少，形成“低温—能耗增加—续航里程下降”的正反馈循环。

1.3 独立控制模式的局限性

当前主流策略采用“各自独立、按需运行”的模式，各子系统依据各自温度阈值独立决策，缺乏系统级能量统筹。低温环境下，电池需要加热的同时电机电控废热被直接散失，未能用于电池加热或座舱采暖；高温环境下，电池冷却需求增加时压缩机转速提高，但电机回路散热能力未被充分利用；热泵制热性能系数随环境温度降低而急剧下降，而此时恰是座舱和电池加热需求最旺盛的时刻。独立控制忽视了热管理系统是一个整体——一个子系统的“废热”可能是另一子系统所需的“热源”，系统性能损失源于子系统间的能量壁垒。

2 协同优化的理论框架与控制架构

2.1 协同优化的目标与约束

协同优化总体目标是实现热管理系统能效最优，在满足各子系统温度约束的前提下最小化系统总能耗。约束条件包括电池最高温不超过 45℃、最低温不低于 0℃（低温充电不低于 10℃），电机绕组不超过 150℃，功率器件结温不超过 125℃，座舱温度维持在设定值

$\pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内。优化目标为热管理部件总功率最小化,同时兼顾电池可用能量最大化。各目标之间存在非支配关系,降低热管理能耗与增加电池可用能量往往需要权衡,需通过帕累托最优解集进行多目标决策。

2.2 协同控制架构设计

协同控制架构采用“顶层优化决策+底层快速响应”的分层结构。顶层为协同优化层,基于行驶工况预测、环境温度信息和子系统状态反馈,以分钟级时间尺度计算各子系统最优温度设定点和能量分配方案。中间层为协调控制层,将顶层设定点分解为执行器控制指令,协调子系统间能量流和热流分配。底层为快速响应层,各子系统控制器在毫秒级执行指令并对局部扰动进行补偿。三层架构通过车载网络实现数据交互,使系统兼具全局优化能力和局部响应实时性。

2.3 关键协同策略

基于耦合机理和协同架构,提取三项核心策略。废热回收与再利用策略:低温工况下电机电控回路热量通过四通阀导入电池回路,电池无需加热时则导入热泵低温热源侧,提升制热性能系数。制冷量动态分配策略:高温工况下根据电池温度状态和对续驶里程的敏感性,动态调整制冷量在电池回路与空调回路间的分配比例。预冷与预热策略:在充电或驻车状态下利用电网电能提前对电池进行预处理,将热管理能耗从行驶工况转移至充电工况。上述策略的核心逻辑是以“热”为媒介实现子系统间能量再分配^[2]。

3 协同优化策略的分场景实施

3.1 低温环境下协同策略

低温环境下电池可用容量衰减、充放电效率下降,座舱采暖和电池加热双重需求使热管理能耗剧增。协同策略核心思路是“热尽其用”——将电机电控运行产生的废热优先用于电池加热和座舱采暖,减少 PTC 电加热器使用。实施分为三个模式。冷启动阶段,电机尚未产生足够废热,策略重点为限制电加热功率、优先保障电池温度提升至可接受充电温度。正常行驶阶段,电机废热通过热交换器导入电池回路和空调暖风回路,废热量充足时可完全替代 PTC 加热。减速或停机阶段,利用车辆惯性通过电机主动发热产生热量储存于冷却液中,用于停机后电池保温。

3.2 高温环境下协同策略

高温环境下核心矛盾是制冷需求集中释放导致压缩机功耗过高。协同策略核心思路是“冷量共享、余热分流”。一方面,利用电机散热回路(通常 50°C 至 70°C)作

为制冷系统辅助散热通道,在冷凝器散热不足时通过水冷冷凝器将部分热量转移至电机回路,提升制冷效率。另一方面,在电池冷却与座舱冷却间实施动态分配:电池温度处于 30°C 至 35°C 安全区间时优先保障座舱制冷;接近 40°C 时逐步将制冷量向电池回路倾斜;超过 42°C 时实施强制性电池优先制冷。此外,利用充电时段进行电池预冷,使出发前电池已达最佳温度区间,减少行驶中的冷却需求。

3.3 瞬态工况下的协同控制

瞬态工况(急加速、急减速、持续爬坡等)热负荷快速波动,对协同控制实时性提出更高要求。瞬态工况协同关键在于预测性控制——基于导航路况信息或历史驾驶数据预判数分钟内功率需求变化,提前调整热管理系统状态。当预测到即将进入长上坡路段时,提前主动降低电池温度至目标值下限,为爬坡过程电池发热预留温升空间,避免因过热被迫启动高功率冷却。当预测到即将停车充电时,提前提升电池温度至适宜充电区间,减少充电过程中加热或冷却所需的时间和能耗。预测性控制的有效实施依赖于行驶工况准确预测和系统热惯性精确建模。

4 关键技术与系统集成

4.1 关键执行器件的协同配合

协同策略的有效执行依赖于关键执行器件的精确控制和协同配合。电子膨胀阀是制冷剂流量分配的核心执行器,在协同控制中须根据制冷量分配指令实时调节开度,其响应速度和调节精度直接影响分配的准确性。四通换向阀实现冷却液回路的串并联切换,是废热回收策略的执行基础,其切换策略应根据温度差和热量需求综合判断,避免频繁切换造成系统不稳定^[3]。PTC 加热器和热泵压缩机是低温热量的主要来源,协同策略的目标是在满足热需求的前提下选择效率最高的热量来源组合——优先使用废热,不足部分由热泵补充,最后才是 PTC 电加热。此外,水泵和风扇等常规执行器也需纳入协同体系,根据系统总热负荷动态调整流量和风量,避免独立控制下的冗余运行。

4.2 控制算法的工程化实现

协同控制算法在车载控制器上的实现面临算力资源有限、实时性要求高和可靠性要求严格等多重约束。工程化实现的主流路径是将复杂优化问题分解为离线计算与在线查表两部分。离线阶段,通过仿真和标定试验,在典型工况和环境条件下生成最优控制参数的 MAP 表,将多目标优化问题的求解结果预先存储在控制器中。在

线阶段,控制器根据当前工况和环境参数查表获取最优控制参数,再通过 PID 或模型预测控制算法进行动态修正。对于工况变化较大的场景,采用模型预测控制作为在线优化算法,基于系统状态空间模型预测未来有限域内的最优控制序列,兼具优化性能和实时性。近年来,随着车载算力的持续提升,基于深度强化学习的端到端热管理控制策略也在逐步向工程化迈进。

4.3 系统集成的工程挑战

从技术方案到量产应用,协同优化策略还面临系统集成层面的工程挑战。其一是系统复杂度增加带来的可靠性风险——协同控制使各子系统之间的耦合度大幅提升,单一部件故障可能通过耦合路径扩散,影响范围显著扩大,需要通过故障隔离设计和冗余策略保障系统安全。其二是标定工作量的指数级增长——独立控制模式下各子系统分别标定即可,协同控制需考虑多种工况组合下的全局最优参数匹配,标定维度大幅增加,需借助自动化标定工具缩短开发周期。其三是整车布置空间的限制——废热回收所需的换热器、管路和阀件增加了系统复杂度和布置难度,需要在设计阶段将热管理系统的集成化布置纳入整车架构的统筹考量。

5 协同优化的效果评估与发展趋势

5.1 整车能效提升效果

基于典型 A 级纯电动车型的仿真和台架试验,协同优化策略在不同环境温度下的能效提升效果已得到初步验证。在-10℃低温环境下,协同策略将热管理系统能耗降低 22%至 28%,整车续航里程提升 10%至 16%,其中废热回收策略贡献约 60%的节能量。在 35℃高温环境下,协同策略将空调和电池冷却的综合能耗降低 12%至 18%,续航里程提升 5%至 8%。综合 WLTC 循环和 CLTC-P 循环的仿真结果表明,协同策略可在全年平均工况下将热管理系统能耗降低约 18%,对应的整车百公里电耗降低约 6%至 8%。上述效果在不增加硬件成本的前提下,通过控制策略优化即可实现,具有极高的投入产出比。

5.2 集成热管理系统的发展趋势

协同优化策略的终极形态是全车集成热管理系统——将动力系统热管理、座舱热管理和电池热管理在物理层面进行一体化集成设计。在物理架构层面,通过统一的热量管理系统取代独立的子系统,使用集成阀组减少管路和连接点。在功能层面,实现“一热多用”——同一条冷却回路在不同模式下承担不同功能,冬季是热源输送通道、夏季是散热通道。在控制层面,整车级

热管理控制器统一协调所有热相关执行器,不再有子系统边界^[4]。集成热管理系统的核心价值在于从物理层面消除子系统间能量流动的障碍,使热量在全车范围内以最低能耗的方式自由调配。目前,特斯拉、比亚迪等头部企业已在部分车型上实现了集成热管理系统的量产应用,其能效优势和成本优势正推动这一技术路线成为行业共识。

5.3 智能网联赋能的协同进化

智能网联技术的发展为热管理协同优化开辟了新的维度。通过与导航系统的信息融合,热管理系统可提前获知行驶路线、路况、预计行驶时间和目的地充电条件等信息,据此制定全局最优的热管理策略。V2X 通信使车辆能够与充电桩、其他车辆和交通基础设施进行信息交互,共享路况信息和能量管理策略,进一步拓展优化空间。基于云端大数据的个性化热管理策略可通过学习驾驶员的驾驶习惯和用车规律,自适应调整热管理参数,实现“千人千面”的个性化能效管理。智能网联与热管理协同的结合,将使热管理系统从“感知—响应”的被动模式升级为“预测—优化”的主动模式,这是热管理技术继集成化之后的又一重要发展方向。

结束语

新能源汽车热管理系统的协同优化,是从“部件最优”走向“系统最优”的必然选择。本文从系统耦合的本质出发,分析了各子系统之间的热交互机理,构建了面向整车能效最优的协同控制架构,提出了分场景的实施策略并评估了其效果。研究表明,通过废热回收、冷量共享和预测性控制等协同策略,在不增加硬件成本的前提下即可实现热管理系统能耗显著降低和整车续航里程有效提升。随着集成热管理系统架构的成熟和智能网联技术的赋能,热管理协同优化将向全域、全时、全场景的方向持续演进,为新能源汽车能效水平的持续提升提供核心支撑。

参考文献

- [1] 李昌,林剑超.新能源汽车电池热管理系统对续航性能的影响分析[J].工程技术研究,2025,7(12):128-130.
- [2] 田秘.新能源汽车动力电池热管理系统优化设计与性能提升[J].汽车电器,2026(3):33-35.
- [3] 杨昱.新能源汽车热管理系统方案及控制策略探讨[J].汽车与驾驶维修,2025(12):56-58.
- [4] 关泽强.新能源商用车热管理系统设计优化及验证[J].汽车实用技术,2025,50(18):26-30.