

低温环境下混合动力汽车动力系统适应性优化及维护策略

苏勇威

内蒙古乌兰察布市交通运输综合行政执法支队, 内蒙古 乌兰察布 012000

DOI:10.61369/ERA.2025100036

摘 要 : 本文聚焦低温环境下混合动力汽车 (HEV) 动力系统的适应性问题, 从硬件优化、控制策略及维护使用三个维度展开研究。在硬件层面, 针对动力电池、发动机及整车热管理系统提出优化方案, 包括选用低温性能优异的电池材料、优化发动机启动与燃油喷射系统、构建智能化热管理集成系统等; 在控制策略方面, 设计了基于环境温度感知的整车能量管理策略、动力系统协调控制策略及电池管理系统 (BMS) 低温专项控制策略, 以动态适配不同低温工况; 在维护与使用层面, 提出了低温专项维护措施、基于车联网与大数据的预测性维护方案, 以及面向用户的低温使用建议与驾驶引导。研究旨在提升 HEV 在低温环境下的动力性能、经济性与安全性, 为其低温适应性优化及维护提供全面参考。

关 键 词 : HEV (混合动力汽车); 低温环境; 动力系统; 适应性优化

Optimisation of Adaptability and Maintenance Strategies for Hybrid Electric Vehicle Powertrains in Low-Temperature Environments

Su Yongwei

Ulanqab Municipal Transportation Comprehensive Administrative Enforcement Brigade, Ulanqab,
Inner Mongolia 012000

Abstract : This paper focuses on the adaptability issues of hybrid electric vehicle (HEV) powertrains in low-temperature environments, conducting research from three dimensions: hardware optimisation, control strategies, and maintenance and usage. At the hardware level, optimisation schemes are proposed for the battery pack, engine, and vehicle thermal management system, including selecting battery materials with excellent low-temperature performance, optimising engine start-up and fuel injection systems, and constructing an intelligent integrated thermal management system; In terms of control strategies, the study designs vehicle energy management strategies based on environmental temperature sensing, coordinated control strategies for the powertrain system, and special low-temperature control strategies for the battery management system (BMS) to dynamically adapt to different low-temperature operating conditions; In terms of maintenance and usage, the study proposes special low-temperature maintenance measures, predictive maintenance solutions based on vehicle-to-vehicle communication and big data, as well as low-temperature usage recommendations and driving guidance for users. The research aims to enhance the power performance, economy, and safety of HEVs in low-temperature environments, providing comprehensive references for their low-temperature adaptability optimisation and maintenance.

Keywords : HEV (hybrid electric vehicle); low-temperature environment; powertrain system; adaptability optimisation

引言

低温环境对 HEV 动力系统的性能表现构成严峻挑战, 成为制约其在高纬度、高海拔等寒冷地区推广应用的关键瓶颈。目前国内学者针对 HEV 低温适应性已开展部分研究, 但现有成果多聚焦单一部件优化, 缺乏对动力系统整体协同性的考量, 且在极端低温 (-20°C 以下) 工况下的适应性方案仍待完善。此外, 低温环境下的长效维护机制与用户使用规范研究相对滞后, 导致车辆实际服役过程中故障发生率偏高。本文立足 HEV 动力系统的多部件耦合特性, 系统探究低温环境下的适应性优化路径: 通过硬件结构改进提升核心部件的低温耐受能力, 借助智能化控制策略实现能量流与热流的动态协同, 结合预测性维护与用户引导构建全生命周期保障体系。研究成果可为 HEV 在寒冷地区的推广应用提供技术支撑, 对推动新能源汽车产业的高质量发展具有重要现实意义。

一、HEV 动力系统低温适应性硬件优化策略

（一）动力电池系统硬件优化

动力电池系统在低温下的性能衰减是影响 HEV 低温适应性的关键问题，针对这一情况，可从多个硬件层面进行优化。在电池单体层面，可选用低温性能更优异的电池材料。例如采用镍钴锰酸锂（NCM）与钛酸锂（LTO）混合的电池体系，LTO 材料具有出色的低温充放电性能和循环寿命，能有效提升电池在低温环境下的容量保持率和充放电效率。同时优化电池单体的结构设计，减小电极厚度、增大电极表面积，可缩短离子扩散路径，提高离子在低温下的迁移速度。电池包的结构设计也至关重要。采用高效的保温隔热结构，在电池包外壳内侧添加高性能保温材料，减少外界低温环境对电池内部的影响。同时合理设计电池包的密封结构，防止湿气和冷空气进入，避免电池内部结霜或结冰。此外，在电池包内部设置独立的加热装置，可在低温启动前对电池进行预热，使电池快速达到适宜的工作温度。加热装置的布置应均匀合理，确保每个电池单体都能被均匀加热，避免局部过热或加热不足的情况。电池管理系统（BMS）的硬件也需要优化，采用高精度的温度传感器，提高对电池温度的检测精度，确保 BMS 能准确掌握电池的温度状态，为加热和充放电控制提供可靠依据。同时增强 BMS 的运算处理能力，使其能更快速、准确地分析电池状态，优化充放电策略，避免低温下的过度充放电。

（二）发动机系统硬件优化

汽油发动机的最佳工作温度为 90℃ 左右，该温度下发动机内部的摩擦力比冷启动时降低约 1.5 倍，可有效提高发动机的燃油经济性，温度过高易导致发动机爆震，缩短发动机使用寿命^[1]。发动机系统在低温下启动困难、燃烧效率低等问题，可通过硬件优化得到改善。在发动机启动方面，优化启动电机的性能，选用功率更大、扭矩更高的启动电机，以应对低温下发动机启动阻力增大的情况^[2]。同时改进启动电机与发动机的连接结构，减少启动过程中的能量损失，提高启动效率。此外，采用快速预热装置，在发动机启动前对进气和缸体进行预热，降低启动时的阻力，提高燃油雾化效果，使发动机更易启动。为提升发动机在低温下的燃烧效率，可优化燃油喷射系统。采用高压共轨燃油喷射技术，提高燃油喷射压力，使燃油雾化更充分、均匀，改善混合气的形成质量。同时调整喷嘴的结构和喷射角度，确保燃油能准确喷射到燃烧室的合适位置，提高燃烧效率。优化发动机的压缩比，适当提高压缩比可提高缸内温度和压力，有利于燃油在低温下的燃烧^[3]。发动机的润滑系统也需要针对低温环境进行优化。选用低温粘度小、流动性好的专用机油，减少低温下机油的粘度增加，提高润滑效果。同时改进机油泵的结构，提高机油在低温下的泵送能力，确保发动机各部件能得到及时、充分的润滑。

（三）整车热管理集成优化

整车热管理系统的集成优化能有效利用各部件产生的热量，提高 HEV 在低温环境下的能量利用效率和舒适性。构建智能化的热管理控制系统，通过多个温度传感器实时监测发动机、电机、电池、驾驶室等部位的温度，并根据监测数据智能调节热量的分

配和流动。同时利用电机和电子元件工作时产生的废热，通过热交换器将其回收利用，减少能量浪费^[4]。优化热交换系统的结构和布局，采用高效的热交换器，提高热量交换效率。合理布置热交换器的位置，缩短热量传递路径，减少热量损失。此外，加强整车的保温隔热设计，减少热量的散失。在车身、发动机舱、电池包等部位采用高性能的保温材料，提高整车的保温性能。优化车门、车窗的密封结构，减少冷空气渗入，降低驾驶室的热量损失^[5]。通过整车热管理的集成优化，实现各部件之间的热量高效利用和合理分配，提升 HEV 在低温环境下的动力性能、经济性和舒适性。

二、HEV 动力系统低温适应性控制策略优化

（一）基于环境温度感知的整车能量管理策略

环境温度是影响 HEV 动力系统性能的关键因素，基于环境温度感知的整车能量管理策略能根据实时温度动态调整能量分配，提升低温适应性^[6]。通过布置在车身不同位置的温度传感器，实时采集外界环境温度、车内温度、电池温度、发动机温度等关键温度参数，并利用数据融合算法对采集到的温度数据进行处理，提高温度感知的准确性和可靠性。当处于轻度低温（0℃至 -5℃）时，适当提高发动机的工作优先级，让发动机更早介入工作，利用发动机产生的热量为电池和驾驶室供暖，同时保持电池在较高的 SOC（State of Charge）水平，一般控制在 40%–60%，以避免电池深度放电^[7]。当处于中度低温（-5℃至 -15℃）时，进一步增加发动机的工作时间和负荷，优先保证电池的加热需求，将电池温度维持在 10℃–20℃ 的适宜区间，同时减少电机的大功率输出，降低电池的放电压力。当处于重度低温（低于 -15℃）时，启动发动机强制工作模式，即使车辆处于低速行驶或怠速状态，发动机也持续运转，为电池和整车热管理系统提供充足的热量，此时电池主要作为辅助动力源，避免深度充放电。

（二）低温工况下的动力系统协调控制策略

低温工况下，发动机、电机等动力部件的性能特性发生变化，需要通过协调控制策略实现各部件的高效配合^[8]。在发动机与电机的动力分配方面，采用动态扭矩分配策略。根据发动机和电机在当前温度下的效率特性曲线，实时计算两者的最佳扭矩分配比例。当车辆需要急加速或爬坡时，综合考虑发动机和电机的动力输出能力，在保证动力充足的前提下，优先利用效率较高的部件，减少能量浪费。针对发动机的冷启动问题，制定预启动与暖机控制策略。当系统检测到发动机温度过低时，在车辆启动前通过电机带动发动机进行短时间的预运转，使机油充分润滑各部件，同时利用电机产生的热量对发动机进行预热。启动后，控制发动机在较高转速下运行一段时间，加快发动机的暖机过程，待发动机温度达到设定阈值后，再根据驾驶需求调整转速^[9]。电机的控制策略也需要优化。在低温下，限制电机的最大输出功率和扭矩，避免电机因过载而损坏。同时通过电机绕组加热控制，利用电机自身的电阻发热对电机进行预热，提高电机的工作温度。当电机温度低于 -10℃ 时，可通过向电机绕组通入小电流，使电机

缓慢升温，待温度升高至 0℃以上后，再允许电机进行正常的功率输出。

（三）电池管理系统低温专项控制策略

电池管理系统（BMS）的低温专项控制策略是保障电池低温安全高效工作的核心。其采用分级预热策略，依据电池温度和 SOC 选择预热方式，确保温度均匀升至 15℃以上停止；充电时用阶梯式电流控制，严格把控截止电压，低于 - 20℃禁止充电；提高电池均衡控制频率和精度，维持单体电压一致；增加参数监测频率，发现异常立即采取保护措施并记录故障信息。

三、HEV 低温环境下的智能维护与用户使用策略

（一）低温环境下的专项维护策略

低温环境下 HEV 各部件损耗加剧，需针对性专项维护以延长寿命、保障低温性能。动力电池系统要定期检测维护，每周查外观，每月测单体参数，冬季前全面检查加热系统；发动机系统每 2 - 3 个月换低温机油，定期检查火花塞、维护燃油系统，冬季重点检查冷却系统并换低温防冻液；电机和动力耦合系统每月查电机绝缘性能，定期润滑耦合装置部件并检查其密封情况。

（二）基于车联网与大数据的预测性维护

借助车联网与大数据可实现 HEV 低温预测性维护，提前处理潜在故障。通过构建数据采集与分析平台，实时采集并分析车辆各类数据，建立性能衰减和故障预警模型，预测部件状态并预警；实现分级故障预警与维护提醒，制定个性化维护周期；利用远程诊断与维护技术，远程调整软件解决部分问题，提高效率并减少车辆停运时间。

（三）面向用户的低温使用建议与驾驶引导

向用户提供科学的低温使用建议和驾驶引导，能帮助用户更好地操作 HEV，提升车辆在低温环境下的性能和安全性。在车辆启动与预热方面，建议用户在低温环境下启动车辆前，先通过手机 APP 远程启动车辆的预热功能，对电池和发动机进行预热，预热时间一般为 5-10 分钟，待车辆各项参数达到正常范围后再启动行驶^[10]。启动后，避免立即高速行驶，应保持低速行驶一段时

间，让发动机和电机逐步升温，减少冷启动对部件的磨损。驾驶过程中，需注意能量管理与动力输出。尽量避免急加速、急刹车等激烈驾驶行为，因为急加速会导致电机大功率输出，增加电池的放电压力，而急刹车在低温下能量回收效果不佳，还可能影响制动安全性。合理使用空调制热功能，可采用分区制热模式，减少不必要的能量消耗；当车内温度达到适宜水平后，可适当降低空调温度或切换为通风模式，降低对动力系统能量的消耗。在充电与停车方面，建议用户尽量选择在室内停车场或有保温设施的充电站点进行充电，避免在极端低温环境下长时间露天充电。充电前，确保电池温度不低于 - 10℃，若电池温度过低，可先启动车辆预热功能，待电池温度升高后再进行充电。停车时，尽量将车辆停放在避风、向阳的位置，减少车辆受低温和寒风的影响；停车后，及时关闭车载电器设备，避免电池不必要的放电。此外，向用户提供冬季应急处理指南，如遇车辆在低温环境下无法启动，指导用户检查电池电量、发动机机油粘度等；如遇电池故障报警，告知用户应立即停车并联系维修人员，切勿继续强行行驶。通过这些使用建议和驾驶引导，提高用户对 HEV 低温性能的认知和操作水平，确保车辆在低温环境下的安全、高效运行。

四、结束语

低温环境对混合动力汽车（HEV）动力系统的性能制约是新能源汽车产业发展中亟待突破的关键问题，其核心矛盾在于低温下多部件性能衰减的协同效应与能量供需失衡。本文通过系统性研究，构建了涵盖硬件优化、控制策略与维护体系的低温适应性解决方案。研究成果不仅为 HEV 在寒冷地区的推广提供了技术支撑，更构建了“硬件 - 控制 - 维护”三位一体的低温适应性框架，为其他新能源汽车的低温性能优化提供了可借鉴的思路。然而极端低温（-30℃以下）工况下的材料极限与能量平衡、长期低温服役后的部件老化规律等问题仍需深入探索。未来可结合新材料技术与智能算法，进一步提升系统的鲁棒性与适应性，推动 HEV 在更广泛气候区域的高效应用，为全球新能源汽车产业的可持续发展贡献力量。

参考文献

[1] 李凯. 面向低温环境的增程式电动汽车能效优化与控制 [D]. 吉林大学, 2024.
[2] 刘小飞. 低温条件下 PluG-in 柴电混合动力汽车综合优化控制策略研究 [D]. 重庆交通大学, 2016.
[3] 王天泽. 低温运行状态下插电式混合动力客车能量管理策略研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2019.
[4] 张涛. 考虑冷却系统能耗的 PHEV 综合能量管理策略研究 [D]. 江苏大学, 2020.
[5] 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 [C].//2016 Siemens PLM Software 仿真与试验技术大会论文集. 2016:1-21,23-45,47-57,59-.
[6] 修玲玲. 混合动力汽车概述及其维护与保养 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2017, 19(4): 15-17.
[7] 周林. 混合动力汽车的维护与保养 [J]. 时代汽车, 2022, (8): 175-176.DOI:10.3969/j.issn.1672-9668.2022.08.072.
[8] 混合动力汽车的维护与保养 [J]. 汽车工程师, 2019, (1): 59.
[9] 王峰, 王安新. 混合动力电动汽车的使用与维护 [J]. 客车技术与研究, 2011, 33(3): 58-60.DOI:10.3969/j.issn.1006-3331.2011.03.019.
[10] 郑晨飞, 姚晓山, 曹晓雨等. 两轴驱动混合动力汽车动力系统的优化设计 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2021, 42(1): 22-27.DOI:10.3969/j.issn.1671-7775.2021.01.004.