

DOI: 10.3901/JME.2022.16.224

电动汽车锂离子电池-超级电容混合储能系统能量分配与参数匹配研究综述^{*}

胡林^{1,2} 田庆韬¹ 黄晶³ 叶瑶¹ 伍贤辉⁴

- (1. 长沙理工大学汽车与机械工程学院 长沙 410114;
2. 长沙理工大学工程车辆安全性设计与可靠性技术湖南省重点实验室 长沙 410114;
3. 湖南大学机械与运载工程学院 长沙 410082;
4. 中南大学交通运输工程学院 长沙 410083)

摘要: 锂离子电池与超级电容组合的混合储能系统(Hybrid energy storage system, HESS)通过超级电容补充输出峰值功率,有效解决了锂离子电池电动汽车在城市工况频繁启动和制动的大功率需求造成锂离子电池不可逆的容量衰减问题,但相比于单独使用动力电池,超级电容的加入增加了成本和重量并且降低了整个储能系统的输出效率。从能量分配策略和参数匹配两个方面论述了当前 HESS 的研究进展。目前能量分配策略的研究多采用燃油汽车的循环测试工况作为研究数据,依据在线运算能力及应用场景将能量分配策略分为离线控制和在线控制,前者依赖已知的能耗数据但能实现优化分配效果,而后者能实现在线实时分配但优化效果有限。参数匹配的研究由效率分析和策略匹配向基于能量分配策略的全局优化发展,以解决前两种方法未考虑 HESS 成本和重量的优化问题。最后,指出未来需要基于电动汽车的城市道路自然行驶数据,以优化整个动力电池组的寿命为目标,考虑驾驶员风格建立个性化的参数匹配全局优化模型,以降低其制造成本;并结合道路交通信息进行更准确的能耗预测,采用离线与在线控制相结合的智能化能量分配策略,以进一步提升能量分配效果。

关键词: 电动汽车; 混合储能系统; 能量分配; 参数匹配

中图分类号: U469

Review on Energy Distribution and Parameter Matching of Lithium-ion Battery-super Capacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles

HU Lin^{1,2} TIAN Qingtao¹ HUANG Jing³ YE Yao¹ WU Xianhui⁴

- (1. School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114;
2. Hunan Province Key Laboratory of Safety Design and Reliability Technology for Engineering Vehicle, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114;
3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082;
4. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: The hybrid energy storage system(HESS) composed of lithium-ion battery and super capacitor supplements the output peak power through super capacitor, which effectively solves the problem of irreversible capacity attenuation of lithium-ion battery caused by the high power demand of frequent start and braking of lithium-ion battery electric vehicle under urban driving conditions.

^{*} 国家自然科学基金(52172399, 51875049)、国家自然科学基金国际合作(52211530054)、湖南省重点研发计划(2020SK2099)和国家重点研发计划(2017YFE01184, 2019YFE0108000)资助项目。20210928 收到初稿, 20220620 收到修改稿

However, compared with the power battery alone, the addition of super capacitor increases the cost and weight and reduces the output efficiency of the whole energy storage system. The research progress of HESS is discussed from two aspects: energy allocation strategy and parameter matching. At present, the researches of energy allocation strategy mostly use the cycle test conditions of fuel-engined vehicles as the research data, and according to the online computing ability and application scenarios, the energy allocation strategies are divided into offline control and online control, the former relies on the known energy consumption data, but can achieve the optimal allocation effect, while the latter can achieve real-time energy allocation, but the optimization effect is limited. The researches of parameter matching have developed from efficiency analysis and strategy matching to global optimization based on energy allocation strategy to solve the optimization problem that the first two methods do not consider cost and weight of HESS. Finally, it is pointed out that in the future, it is necessary to establish a personalized parameter matching global optimization model based on the natural driving data of electric vehicles on urban roads, aiming at optimizing the service life of the whole power battery pack and considering the driver's style, so as to reduce its manufacturing cost; and combined with road traffic information, more accurate energy consumption prediction would be carried out, and the intelligent energy distribution strategy combining off-line and on-line control is adopted to further improve the effect of energy allocation.

Key words: electric vehicle; hybrid energy storage system; energy allocation; parameter matching

0 前言

近年来, 人类面临着巨大的环境和资源压力, 因此电动汽车(Electric vehicles, EV)作为低碳出行工具越来越受到人们的重视。在我国, 依据公安部的数据统计, 截至 2022 年 6 月底, 全国新能源汽车保有量达到 1 001 万辆, 而其中纯 EV 的保有量为 810.4 万辆, 占新能源汽车总量的 80.93%^[1]。2019 年 12 月 3 日工信部发布了《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》征求意见稿中提到, 我国已经进入 EV 加速发展时期。动力电池作为 EV 的核心技术之一, 随着 EV 的快速发展, 动力电池技术也提出了越来越高的要求。

锂离子电池(Lithium-ion batteries, LIB)以其高能量密度优势, 占有动力电池市场最大份额^[2], 目前单体锂离子电池的能量密度已可达到 300~400 W·h/kg。此外, 锂离子电池有高额定电压、低自放电率、无记忆效应以及重量较轻等特点。但当 EV 在城市中行驶频繁加速、制动时, 要求电源具有高功率密度以满足 EV 在这类工况下对于大功率充放电的需求^[3]。但这种大功率充放电方式将加速 LIB 的容量衰减^[4], 式(1)为 15 °C 到 60 °C 下 LIB 容量衰减与充放电倍率的关系^[5]。

$$Q_L = B \cdot \exp\left[\frac{-31\,700 + 370.3 \times C_Rate}{RT}\right] (A_h)^{0.55} \quad (1)$$

式中, Q_L 为 LIB 容量损失百分比, R 为气体常数, T 为绝对温度, A_h 为 LIB 安时容量, C_Rate 为 LIB 充放电倍率, B 为指前因子, 它的值与充放电倍率有关。

超级电容(Supercapacitors, SC)是一种适合大倍

率充放电的储能器^[6], SC 与 LIB 的对比如表 1 所示。

表 1 锂离子电池与超级电容性能对比

	锂离子电池	超级电容
能量密度/(W·h/kg)	300~400	10~40
功率密度/(W/kg)	250~340	7 000
循环寿命/次	5 000	大于 500 000
工作温度范围/°C	-20~60	-40~85

由表 1 可知, LIB 与 SC 的能量密度和功率密度性能具有很强的互补性, 因此将 SC 与 LIB 组成混合储能系统(Hybrid energy storage system, HESS)逐渐成为研究热点。同时 SC 具有超长的循环寿命以及超强的电流充放电能力, 因此 HESS 与单独使用 LIB 相比具有如下优点。

(1) 通过合理的 HESS 能量分配策略使 SC 发挥“削峰填谷”的作用, 有效降低 LIB 的峰值电流, 并更加高效地吸收制动回收能量, 从而有效延长 LIB 的使用寿命^[7], 降低 HESS 的整体使用成本^[8]。

(2) HESS 可有效降低 LIB 的充放电电流, 从而解决了 LIB 大倍率充放电时所导致的电池温度快速升高问题, 减少 LIB 热失控的风险^[9]。

(3) 在低温环境下, 搭载了 HESS 的 EV 可以在没有电池预热的前提下立即启动, 这将拓宽 EV 使用的温度范围^[10]。

HESS 的拓扑结构如图 1 所示, 依据所使用的双向 DC/DC 转换器的数量, 可以大致分为三类: 被动拓扑, 全主动拓扑和半主动拓扑^[11]。HESS 的拓扑结构与整个系统的性能、控制方式以及成本密切相关。增加双向 DC/DC 转换器的数量虽然可以控制

更多储能元件,但是增加了控制的复杂程度以及系统成本。因此,需要根据控制要求选择合适的拓扑结构,并设计与之相适应的能量分配策略以实现最佳的控制效果。不同拓扑结构的优势与局限性如表 2 所示。

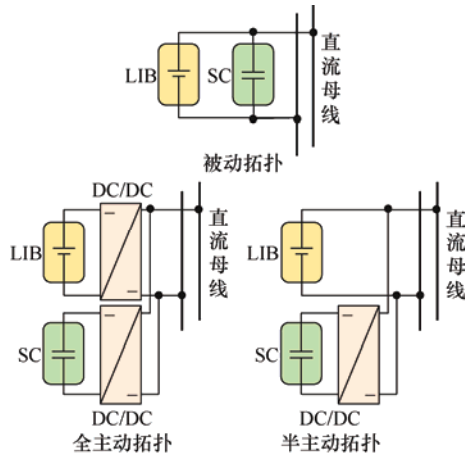


图 1 HESS 拓扑结构

表 2 HESS 拓扑结构优势与局限性对比

拓扑类型	优点	局限性
被动拓扑	结构简单;成本低	能量分配不可控; SC 效率低
全主动拓扑	LIB 和 SC 的能量分配皆可灵活控制	成本高;结构复杂
半主动拓扑	SC 输出可控且容量利用率高	LIB 输出不可控;对 DC/DC 转换器要求高

HESS 相比单电池结构更加复杂,使得控制难度增加并且建模与状态估计更加困难,同时也会增加系统内的能量损失以及成本。因此,HESS 能量分配策略设计和参数匹配的关键是:在有效延长 LIB 的使用寿命的同时减少系统内能量损失,尤其是 DC/DC 转换器损失的能量;EV 行驶过程中对储能系统的能量需求复杂多样且难以准确预测,HESS 的能量分配策略需要有足够的鲁棒性;合理匹配 HESS 参数使延长 LIB 寿命的成本收益弥补 SC 和 DC/DC 转换器成本。

针对上述问题,近年来提出了多种能量分配策略在延长 LIB 使用寿命以及降低系统内能量损失方面得到了良好的优化效果。同时,对 HESS 参数匹配的研究也使得 HESS 成本和重量得到有效控制。本文综述了近年 HESS 能量分配策略和参数匹配方面的研究成果,并展望了未来 HESS 的发展方向。本文其余部分安排如下:第一部分对 HESS 的能量管理策略进行了分类总结;第二部分分类概述了 HESS 的参数匹配研究;最后,对 HESS 的未来发展进行了展望。

1 HESS 能量分配策略

能量分配策略是 HESS 发挥 LIB 和 SC 高能量密度和高功率密度特性并延长锂离子电池寿命和减少系统内能量损失的关键。基本流程如图 2 所示。

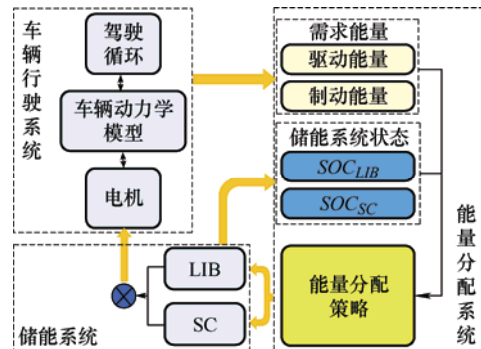


图 2 HESS 能量分配基本流程图

除被动拓扑的能量分配由 LIB 和 SC 自身参数决定外,全主动和半主动拓扑的能量分配策略通常依据车辆行驶系统产生的需求能量以及储能系统中获取的 LIB 和 SC 的电荷状态(State of charge, SOC)合理分配 LIB 和 SC 需要提供的能量,并由 LIB 和 SC 共同为电机提供能量。本文依据在线运算能力及应用场景,将能量分配策略分为离线控制和在线控制。前者能实现优化的分配效果,而后者常用作底层执行器。它们的分类对比如表 3 所示。

表 3 HESS 能量分配策略分类对比

类别	方法	优点	局限性	应用场景
离线控制	动态规划	全局最优且通用性强	需要已知离线能耗数据	提取优化规则
	模型预测控制	实时预测并优化分配	在线运算量大且需要部分历史数据	能耗预测
	神经网络	智能优化能量分配	大量离线数据训练且无法调整	智能优化 LIB 和 SC 输出功率
在线控制	模糊逻辑控制	控制效果好且鲁棒性强	优化效果有限	底层执行器
	低通滤波	控制简单	优化效果有限且鲁棒性差	
	负载跟踪控制	响应快且鲁棒性强	优化效果有限	
	门限值控制	易于实现	优化效果有限且鲁棒性差	

1.1 离线控制

离线控制能根据已知的离线能耗曲线数据或者预测模型得到延长电池使用寿命和降低系统内能量

损失的 HESS 能量优化分配结果。它包括动态规划(Dynamic programming, DP), 模型预测控制(Model predictive control, MPC)和人工神经网络(Artificial neural networks, ANNs)等。

DP 算法是一种求解多级决策问题的优化算法, 其向后寻优的特点可以高效求出全局最优解。WANG 等^[12]通过建立电池和 SC 的等效电路模型, 采用以电池和 SC 的内阻损耗最小化为优化目标的 DP 算法得到了最优的能量分配策略。其仿真结果表明 DP 算法降低了电池的峰值电流并且提高了系统的能量效率。但是, DP 算法计算量大而且需要已知离线功耗数据作为全局优化前提。针对 DP 的这一缺陷, LU 等^[13]使用 DP 算法以最小化系统损耗为优化目标获得的能量分配策略基础上, 采用马尔科夫链将 DP 算法拓展为随机动态规划(Stochastic dynamic programming, SDP)。由于马尔科夫过程是基于当前状态对未来数据进行预测, 因此 SDP 不依赖于已知的离线功耗数据并通过仿真得出和 DP 相似的结果。另外, SHEN 等^[14]在系统内能量损失的分析中加入双向 DC/DC 转换器的开关损耗及通导损耗, 并将以系统损耗和电池寿命为优化目标的 DP 算法分配结果用以训练 ANNs, 如图 3 所示。改善了 DP 算法对于离线功耗数据的依赖并使电池寿命延长了 64.8%。虽然 DP 计算复杂且难以实现在线优化, 但是其求解全局最优解的特性, 常用来评估其他分配策略的优化效果或者从中提取出优化规则, 也常用于优化 HESS 的参数匹配。

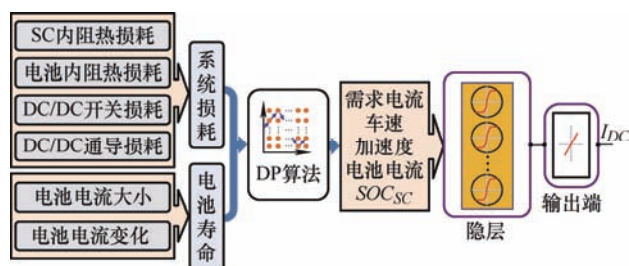


图 3 DP 训练 ANNs 算法示意图

HESS 是一种具有非线性以及时变性的复杂系统, 其优化控制依赖于已知的工况数据。MPC 能通过部分历史数据和预测模型在预测域中获得工况数据并优化 HESS 能量分配^[15]。其中, 准确的预测模型成为 MPC 优化控制的关键。TROVAO 等^[16]提出采用非均匀采样时间概念建立宏观能量的 MPC 预测模型来推导内部控制层, 以此来解决汽车动力学管理中的能量和动力问题。为改善 MPC 在线运算量大的问题, SHEN 等^[17]提出一种

非线性功率分配的 MPC 策略, 通过适当的近似处理将非线性问题转换为二次规划问题来提高 MPC 的运算效率。其中的预测控制器通过控制电池半主动拓扑中的 DC/DC 转换器调节电池和 SC 电流, 使得最优目标函数值比 DP 提高了 26%。ZHAO 等^[18]提出了一种具有两级结构的非线性 MPC 的能量分配策略: 第一层是根据当前的驱动信息采用了基于参数辨识的控制型发动机模型和动态电机传动对象模型预测出一定时间范围内的电机能量需求并且结合正向 DP 方法解决 MPC 中的滚动优化问题; 第二层是电池和 SC 之间能量分配的优化结果。仿真表明该策略在系统能量损失和降低峰值功率方面均获得改善。而随着近年来智能交通、云计算以及 5G 技术等先进技术的发展与应用, 能够进一步提高对 EV 速度及工况数据的预测精度^[19-20]。HOU 等^[21]提出通过云平台从基础设施和其他车辆收集交通信息, 采用 DP 的方法预测未来的能量需求并得出高度非线性成本函数的全局最优解; 而在车辆层面接收云平台的参考控制信息并采用 MPC 处理预测误差等不确定性问题。这种基于车辆云连接的分层优化的能量管理策略提高了 MPC 鲁棒性和工况预测精度。

ANNs 是一种模拟人脑神经结构处理信息的数学模型, 通过其学习和寻优的能力得到智能化的 HESS 能量分配结果。ALAOUI^[22]将已知的离线工况能耗数据特征调优归一化后训练 ANNs, 以需求功率、LIB 和 SC 的 SOC 作为输入得到最大化 HESS 效率的分配结果。另外, SHEN 等^[23]提出一种实时 ANNs 能量管理策略, 以电池健康状态(State of health, SOH)作为评价指标验证了 ANNs 能量管理策略可降低电池的峰值电流且具有良好的鲁棒性和控制性能, 相比于单独电池储能系统使电池 SOH 降低了 38%。但 ANNs 依赖于大量离线数据的训练才能获得最优的能量分配效果并且其黑盒属性使得无法对 ANNs 的决策过程进行调整等。为了获得更好的能量分配效果, LAGO 等^[24]提出采用不同标准行驶周期的特征组合成混合行驶循环(Mixed driving cycle, MDC)来训练 ANNs。与单一的驾驶循环训练的 ANNs 相比, 采用 MDC 训练的 ANNs 训练效率更高。此外, 将 ANNs 用来预测车速具有很大的潜力, ZHANG 等^[25]将 ANNs 用于 EV 的车速预测并统计预测误差, 再与最优变频控制器得到的截止频率耦合得到实时的 LIB 和 SC 需求功率, 如图 4 所示, 电池能耗和温度分别降低了 28.57% 和 16.67%。

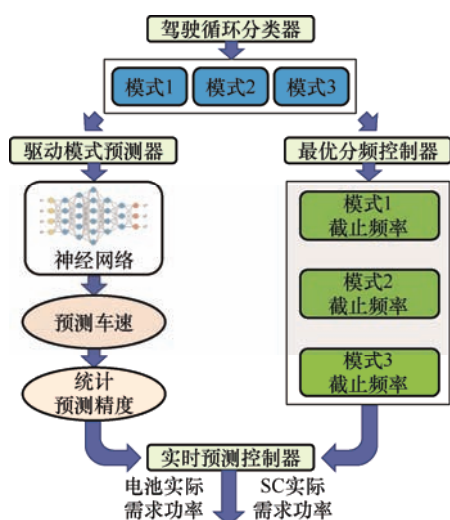


图 4 ANNs 预测管理示意图

离线控制常采用单体电池容量衰减经验模型(式 1)估计 LIB 寿命,而电动汽车上电池组使用寿命除了受单体电池容量衰减影响外,还受到电池组中各个单体之间充放电一致性影响^[26]。因此在离线控制的仿真结果中,电池电流峰值虽然降低了但是波动频率大,这对于电池组的一致性控制是不利的。因此,电池电流的波动频率最小化也成为能量分配优化控制的目标之一^[27]。LI 等^[28]采用了双线性插值的马尔科夫决策过程来对能量分配策略进行平滑处理,在不增加计算成本的同时减小了功率的波动。KUPERMAN 等^[29]提出了一种平均电流的策略,让电池组在整个 EV 的行驶周期中保持输出平均电流使电流波动最小化。但是这种方法依赖已知的工况平均功率,只能离线实现。

离线控制虽然能够得到延长电池寿命并减少系统损耗的能量分配最优解,但这种优化依赖于已知的离线工况数据以及精确的预测模型。如果实际的工况与离线工况数据有较大的差别就难以保证全局优化效果。另外,离线控制的算法复杂难以在线实现。为了使离线控制能够获得在线处理能力,提出从离线优化结果中提取优化规则并且优化规则控制中的参数求取次优解,这类方法将在下一节做介绍。

1.2 在线控制

在线控制是指可以在线快速地实现 HESS 能量分配的控制策略。在线控制包括基于规则的控制策略,比如:模糊逻辑控制(Fuzzy logical control, FLC)、低通滤波(Low pass filtering, LPF)、负载跟踪控制和门限值策略等。基于规则的控制方法虽然简单有效且易于实现,但它们的能量分配仅基于降低 LIB 的充放电功率,优化效果有限。通过

研究电池和 SC 的损耗、功率分配、行驶距离与负载之间的关系发现:存在 SC 功率与直流总线功率的最佳比例,使系统内能量损失和电池寿命得到优化^[30]。

FLC 不依赖精确数学模型而依赖专家的知识 and 经验。通过分析 LIB 和 SC 的容量特性,FLC 规则库设计总原则如下:① 提高 SC 利用率;② 减少电池的放电倍率^[31]。宋邵剑等^[32]为 EV 的驱动和制动分别设计了一套 FLC 规则,结果表明采用 FLC 的能量分配策略可以提升 EV 的动力性、经济性和安全性。张卫等^[33]认为以往的控制策略经过一次行驶循环后,SC 的电压和效率已经极低导致 SC 在下一次的行驶循环中已经无法发挥平衡电池功率的作用。通过对模糊规则库重新设计,在进行多次行驶循环的仿真过程中 SC 均能有效发挥作用。BINDU 等^[34]为了进一步延长电池的使用寿命,在 FLC 中加入对 SC 的功率调节,通过电池对 SC 充电使其 SOC 维持在充电状态极限值以此来降低电池电流的变化率。仿真和实验表明,该方法可以使电池的输出电流大致稳定在 0.8 C。由于单一的控制方式并不能有效适应 EV 复杂的行驶工况,姚堤照等^[35]将模糊方波控制器与功率分配因子 FLC 组成联合控制器共同控制双向 DC/DC 转换器的输出。让 SC 既承担需求功率的高频部分又能抵消需求功率的高幅值部分使得锂离子电池在不同的 SOC 下充放电电流均保持在 1 C 以内。ZHOU 等^[36]建立了一种预测电池组动态性能的 SOC 和功率状态(State of power, SOP)联合估计器并将其作为 FLC 的输入,如图 5 所示。其仿真结果表明,该策略使电池组峰值放电电流和平均放电电流分别降低 8.7%和 12%并使电池容量衰减减少 5.4%。另外,针对 FLC 优化效果有限的问题,ECKERT 等^[37]采用遗传算法、GAO 等^[38]采用黄金分割准则、MICHALCZUK 等^[39]和 USMANI 等^[40]采用粒子群算法对 FLC 的隶属函数,控制规则库以及分配比例等进行优化。相比于传统的 FLC,经过优化后的 FLC 方法在电池应力、电池寿命和系统内能量损失上均得到了改善。

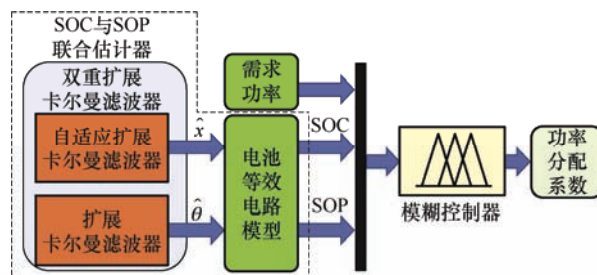


图 5 联合估计模糊控制示意图

根据 SC 和电池的充放电特点, LPF 从汽车工况能耗曲线中分离出高频和低频部分并分别由 SC 和 LIB 输出^[41-43]。传统的 LPF 的截止频率是依据能耗曲线确定, 鲁棒性差。为了改善鲁棒性并改善优化效果, 需要调整 LPF 截止频率以适应 EV 不同的行驶条件。SUN 等^[44]设计了一种智能功率转换器作为 LPF 的高层控制器, 它能够实时跟踪需求功率并确定当前的截止频率实现滤波的自适应控制。另外, 不同的驾驶员风格会表现出不同的加速和减速行为^[45-46], 这将影响汽车的能耗。因此, 张骞等^[47]引入了驾驶员风格和驾驶模式及电机扭矩来对截止频率进行调整以实现更合理的自适应能量分配控制。但是, 单一的 LPF 能量分配策略同样无法实现延长电池寿命的优化效果, 需要结合其他控制方法^[48]。ASENSIO 等^[49]提出根据 SC 的 SOC 实时调整截止频率, 并在 LPF 的基础上结合滑膜控制与电流闭环控制以限制电池的峰值电流, 从而实现降低电池容量衰减的效果。HU 等^[50]提出一种驾驶模式识别与自适应小波变换相结合的方法调整 LPF 截止频率并运用 FLC 维持 SC 的 SOC 在期望水平, 仿真结果表明电池充放电峰值电流降低 8.2%, 电池寿命和续航里程分别延长 6.16% 和 11.06%。WU 等^[51]将能量分配策略分为两层: 功率分配层和控制层。在功率分配层采用人工势场法实时寻求功率分配比: 放电时, 当 SC 的 SOC 较高时增加 SC 的功率占比而当 SOC 较低时减少 SC 的功率占比, 以此获得 LPF 的自适应截止频率; 在控制层, 将 LPF 结合前馈补偿器来保持总线电能稳定, 如图 6 所示。仿真结果表明该策略在城市驾驶循环中电池容量衰减减少 15% 以上。

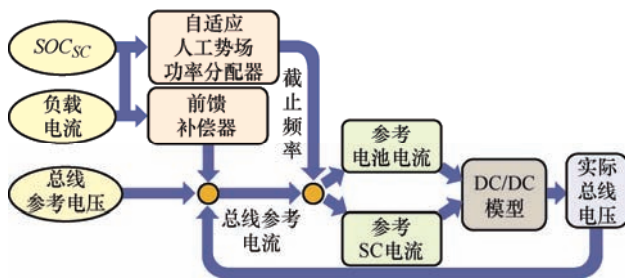


图6 自适应人工势场滤波控制示意图

HESS 门限值策略基本原理是将汽车行驶过程的期望功率或者平均功率作为电池输出的门限值, SC 在其 SOC 工作范围内提供超出门限值部分的功率。由于原理简单, 易于实现且能够充分利用 SC 高功率密度的特性, 门限值控制的在能量分配中应用广泛^[52]。但是, 门限值控制的效果依赖于门限值的选择, 鲁棒性差且优化效果有限, 因此需要结合

优化算法优化的能量分配结果。YANG 等^[53]以最小化 HESS 的能量损失为目标采用粒子群优化算法得出有价值的优化规律, 然后应用这些规律优化门限值策略以得到最小化系统内能量损失的次优解。RIZOUG 等^[54]提出对电池的输出功率进行动态限制使得门限值可根据 SC 的 SOC 实时调整, 降低了电池均方根功率并保持 SC 的 SOC 稳定在工作范围内。MESBAHI 等^[55]依据 LIB 和 SC 的 SOC 数据采用混合粒子群算法得到电池最优动态门限值。该策略与单电源相比电池寿命提高了 20%。基于门限值控制原理衍生出的多模式策略依据 EV 驱动和制动回收时不同的需求功率、电池和 SC 的 SOC 以及 HESS 的拓扑结构特点将控制策略分为多种模式, 每一种控制模式有各自的能量分配方法^[56-58], 其架构如图 7 所示。相比于门限值策略, 多模式控制的能量分配方法更为灵活并且可以对各个控制模式进行针对性的优化, 提高了鲁棒性。另外, 在分配方式合理且 SC 参数合适的前提下, 多模式控制能以较低的控制成本实现电池电流恒定且保持 SC 的 SOC 在合理的工作范围^[59]。ZHAO 等^[60]考虑电池和 SC 以及 DC/DC 转换器的开关损耗对各个模式的能量分配进行优化, 得出了最小化系统损耗同时最大化能量回收效率的控制策略, 相比于以前基于规则的策略系统能耗降低了 8.9%。SONG 等^[61]和 LIU 等^[62]从 DP 算法的结果中提取出若干规则应用在各个模式中获得了近似 DP 结果的次优分配策略。但是, 多模式控制策略各个模式相互切换的过程中会产生不可预测的扰动。为此, WANG 等^[63]采用滞环控制与滑膜控制相结合的方式来提高模式切换的稳定性。

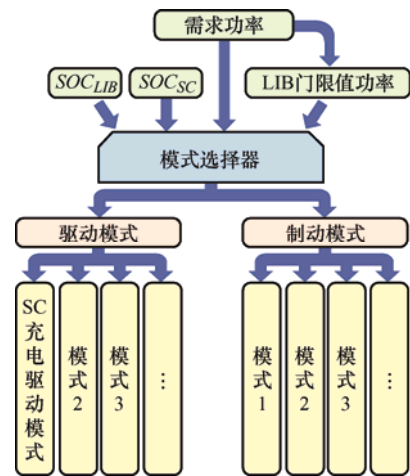


图7 多模式控制策略

负载跟踪控制是 HESS 中各个储能器的实际充放电电量实时跟踪参考充放电量的控制方法, 能实现

跟踪控制的平滑过渡且具有鲁棒性^[64]。因此, 负载跟踪控制易于与其他算法相结合: 由其他算法生成参考充放电量, 而负载跟踪控制实现实际充放电量在线跟踪^[65]。其中, 滑膜控制(Sliding Mode Control, SMC)是一种能够克服系统不确定性以及对外界扰动具有很强鲁棒性的非线性控制方法, 具有响应快且易实现的特点。YANG 等^[66]让能量管理系统采用多模式控制生成电池电流的基准, 然后将 SMC 作为底层控制器跟踪基准电流并采用扰动观测器实时估计各种不确定扰动并进行全局补偿。SONG 等^[67]提出电池的参考电流由能量管理系统生成, SC 的参考电流由李雅普诺夫函数控制器生成并调节直流母线的电压, SMC 分别作为电池和 SC 的底层控制器跟踪各自的参考电流。仿真结果表明负载跟踪控制是一种理想的在线底层控制方法。

在线控制还包括瞬时优化策略, 其特征在于采用比较简单的优化算法对瞬时功率进行最优功率分配, 比如: 极限学习机(Extreme learning machine, ELM), 庞特里亚金极小值原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)和卡罗需-库恩-塔克条件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)。JIANG 等^[68]从 DP 算法中获取离线数据中的瞬时最优功率分配的特征数据并提出采用 ELM 学习这些数据。这种 ELM 具有学习速度快精度高的特点从而实现了在线功率分配。ZHENG 等^[69]首次提出采用 PMP 将驱动过程和制动过程中的瞬时最优功率分配给电池和 SC 以实现最大化电池寿命。CUI 等^[70]在 PMP 的基础上仅建立以 SC 的 SOC 为状态变量的哈密顿函数并通过 SC 的 SOC 偏差量对分配结果进行在线调整, 在城市驾驶循环中相比于 FLC 和单电池储能的峰值电流分别降低 32.42% 和 35.35%。为了改善文献[29]中平均电流法对离线数据的依赖, YIN 等^[71-72]将 KKT 结合效用函数建立多目标优化器控制 DC/DC 转换器以最小化电池电流波动以及 SC 剩余 SOC 与初始 SOC 差异, 如图 8 所示。仿真结果表明, 在驾驶循环未知的条件下实现了近似平均电流法的在线控制。尽管瞬时优化的效果不如离线全局优化且容易陷入局部最优, 但是它能在不依赖离线数据的情况下在线获得能量分配的次优解。

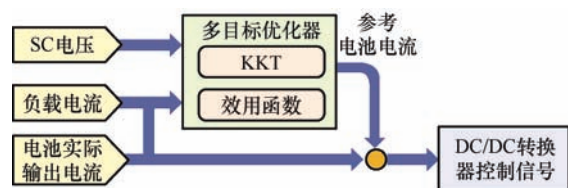


图 8 KKT 多目标优化器控制示意图

在线控制策略通过结合优化算法或是通过瞬时优化改善了优化效果, 获得延长电池寿命以及降低系统内能量损失的次优解, 具有灵活性且易于调整^[73]。但是, 在线控制中规则和控制参数优化也依赖于从离线数据中提取的优化特征, 如何确保在线控制在实际工况中优化的适应性成为需要克服的难题。

2 HESS 参数匹配

通常 EV 动力电池参数匹配需要满足三个要求, 如图 9 所示。

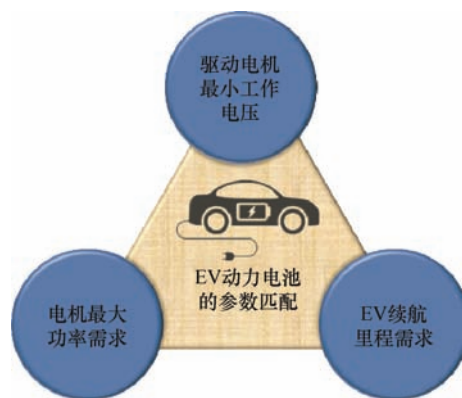


图 9 EV 动力电池参数匹配的要求

HESS 的参数主要指与成本和重量相关的 LIB 和 SC 串并联数量, 相比于单独使用动力电池, 增加了 SC 和 DC/DC 转换器, 在成本和重量上不具备优势, 这是阻碍 HESS 实用化的关键问题之一。合理的参数匹配能保证能量分配策略的实现, 延长电池的使用寿命并有效降低 HESS 整体的成本和重量, 改善 HESS 的经济性^[74-76]。

HESS 参数匹配的约束条件需要满足 EV 行驶对动力电池的要求^[77]: 首先, 不同的 EV 驾驶循环决定了 HESS 中 LIB 和 SC 的数量^[78], 为了发挥 LIB 高能量密度和 SC 高功率密度的特点, HESS 参数匹配需由 LIB 满足续航里程的要求, 由 LIB 和 SC 共同满足最大功率的需求; 其次, HESS 的参数匹配需使总线电压满足电机驱动的最小电压。

HESS 的参数匹配采用的方法主要分为三类: 效率分析法、策略匹配法以及全局优化法。

效率分析法在满足 HESS 参数匹配约束条件的基础上, 通过分析 DC/DC 转换器效率匹配 SC 的串并联数量。DC/DC 转换器效率和其输出端与输入端电压成正比相关^[79], 因此 SC 成组电压不能与总线电压相差过大。但是, 这类方法只求出 HESS 参数匹配的解域, 在 HESS 能量分配研究中常作为初步参

数匹配方法^[80]。

策略匹配法根据 HESS 能量分配策略匹配其参数。SADOUN 等^[81]依据 HESS 能量分配策略估计 HESS 最佳混合度并由此得出 HESS 的匹配参数。ZHANG 等^[82]建立了 HESS 参数匹配模型分析匹配其参数以达到能量分配策略优化的电池使用寿命。MASIH-TEHRANI 等^[83]提出采用电池热模型设计能量分配策略并匹配 HESS 的参数, 仿真结果表明 HESS 的温升相比单独使用 LIB 时更低, 可以使用重量更轻价格更便宜的冷却系统。相比于效率分析法, 策略分析法能满足能量分配策略要求且缩小了参数匹配解域的范围。

但是, 前两种方法在确定 HESS 的参数时并未考虑对成本和重量的优化。而 HESS 的参数匹配与其采用的拓扑结构以及能量分配策略高度耦合^[84], 因此提出综合考虑能量分配策略、成本和重量来进行 HESS 参数匹配的全局优化。

全局优化是依据 HESS 拓扑结构, 在能量分配策略的优化中建立额外的成本优化函数来实现, 采用的优化算法包括: 凸优化^[85]、粒子群优化方法^[86]以及遗传算法^[87-88]等。仿真结果表明 HESS 可以通过参数匹配的全局优化达到降低成本和重量的目的。ZHANG 等^[89]采用第二代非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) 对 HESS 的电池寿命和成本进行多目标优化得出了满足约束的最优解。进一步, SHEN 等^[90]在多目标优化的基础上建立了最小化 HESS 重量的惩罚函数, 得出 HESS 的最优参数为 152 个 LIB 单元和 72 个 SC 单元, 使整个 HESS 的重量不到 230 kg 同时 LIB 循环寿命延长了 76%, 实现了电池寿命与重量的同时优化。ELDEEB 等^[91]采用 NSGA-II 多目标优化时考虑最小化成本、重量、体积以及延长电池寿命四个目标, 并通过与电池寿命理想点的欧式距离确定最优参数, 仿真结果表明该优化框架节省 40% 成本和重量。DP 算法虽然在能量分配中存在缺陷, 但是其全局最优的特点使其在 HESS 参数优化中得到了广泛应用^[31, 61]。LU 等^[13]在 DP 算法推导出能量控制策略后, 再结合模拟退火算法对成本函数进行求解从而得到与能量分配策略相匹配的优化参数, 使得 HESS 成本降低 11.9%, 电池循环寿命延长了 21.7%。

综上所述, 对 HESS 参数匹配的全局优化是未来需要重点研究的方法, 其最终的目的是在 EV 整个生命周期中, 通过对 HESS 参数匹配的全局优化使延长 LIB 寿命的成本收益弥补增加 SC 和

DC/DC 转换器成本, 最终实现 HESS 成本和重量的最优化。

3 总结与展望

综上, 对于 HESS 的能量分配策略, 将其分为离线控制和在线控制。离线控制虽然可以获得延长电池寿命和减少系统损耗的优化效果, 但這些控制算法大都依赖于离线工况数据且运算量大难以在线应用。因此, 将离线控制中提取出的优化规则与在线控制相结合并优化在线控制参数, 改善了在线控制的优化效果。另外, 瞬时优化采用简单的算法对瞬时功率进行优化分配, 但容易陷入局部优化。在 HESS 的参数匹配研究中, 效率分析法和策略匹配法都只能获得参数匹配的解域; 全局优化考虑了参数匹配与能量分配策略的耦合性得到成本与重量最佳参数匹配结果, 因此全局优化的研究相对较多。

通过总结现有 HESS 研究中存在的问题与不足, 对未来可能的研究方向进行展望。

(1) 目前很多优化算法的效果都依赖于已有的标准测试工况的数据, 比如 UDDS、NEDC 等, 而在实车上应用 HESS 就需要提升 HESS 对能耗预测的准确性。对于公交车或者常用来上下班的 EV 而言, 它们的行驶路线是相对固定并可以通过学习算法进行能耗预测。随着智能交通, 交通大数据以及云计算的发展, 通过提前预知行驶路线的路况信息和交通状态, 能够对 EV 的行驶速度做出更准确的预估。同时, 对驾驶员驾驶风格的研究揭示了驾驶员对于汽车能耗的影响^[92], 考虑驾驶员风格不仅能改善能耗预测且能让 HESS 的能量分配更合理, 实现智能化的能量分配, 未来 HESS 仍具有优化潜力。

(2) 对于 LIB 使用寿命的能量分配优化多采用单体 LIB 的容量衰减模型。而对于整个 LIB 组, 其使用寿命不仅仅与单体 LIB 的使用寿命有关, 还包含其充放电一致性的影响^[93-94]。因此, 今后能量分配策略的设计应考虑整个电池组使用寿命的改善, 需要进一步研究。

(3) 由于 HESS 系统的非线性与时变性, 单一的能量分配策略存在其固有的弊端。因此可采用分层控制方式: 把离线控制作为顶层控制获取优化的规则 and 参数, 在线控制作为底层控制提升在线运算性能。将离线控制和在线控制能量分配策略的优势相结合以寻求近似全局优化的次优解,

未来这将是 HESS 能量分配策略中的研究重点。

(4) 建立 HESS 参数匹配通用全局优化模型。该模型通过输入 LIB 和 SC 的基本参数以及车辆行驶里程即可根据分配策略输出最优的 LIB 和 SC 的串并联数量。另外, 针对不同驾驶风格驾驶员的能耗需求, 可以结合换电技术实行个性化的参数匹配。相比于 HESS 能量分配策略的研究, HESS 参数匹配的研究很少, 未来仍具有广阔的研究空间。

参 考 文 献

- [1] 公安部交通管理局. 全国新能源汽车保有量已突破 1000 万辆[R/OL]. (2022-07-06)[2022-08-05]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c8577234/content.html>. Traffic Management Bureau of the Ministry of Public Security. The number of new energy vehicles in China has exceeded 10 million[R/OL]. (2022-07-06)[2022-08-05]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c8577234/content.html>.
- [2] 缪平, 姚祯, 刘庆华, 等. 电池储能技术研究进展及展望[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 670-678. MIAO Ping, YAO Zhen, LIU Qinghua, et al. Current situations and prospects of energy storage batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 670-678.
- [3] ZHANG L, HU X, WANG Z, et al. Hybrid electrochemical energy storage systems: An overview for smart grid and electrified vehicle applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 110581.
- [4] 范智伟, 乔丹, 崔海港. 锂离子电池充放电倍率对容量衰减影响研究[J]. 电源技术, 2020, 44(3): 325-329. FAN Zhiwei, QIAO Dan, CUI Haigang. Influence of charge and discharge rate on capacity fade of lithium-ion battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(3): 325-329.
- [5] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [6] 张雷, 胡晓松, 王震坡. 超级电容管理技术及在电动汽车中的应用综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 32-43, 69. ZHANG Lei, HU Xiaosong, WANG Zhenpo. Overview of supercapacitor management techniques in electrified vehicle applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 32-43, 69.
- [7] VUKAJLOVIĆ N, MILIĆEVIĆ D, DUMNIĆ B, et al. Comparative analysis of the supercapacitor influence on lithium battery cycle life in electric vehicle energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101603.
- [8] CARTER R, CRUDEN A, HALL P J. Optimizing for efficiency or battery life in a battery/supercapacitor electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1526-1533.
- [9] 朱晓庆, 王震坡, 王聪. 锂离子动力电池热失控与安全研究综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 91-118. ZHU Xiaoqing, WANG Zhenpo, WANG Cong. Review of thermal runaway and safety management for lithium-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 91-118.
- [10] BARCELLONA S, PIEGARI L, VILLA A. Passive hybrid energy storage system for electric vehicles at very low temperatures[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100833.
- [11] ZIMMERMANN T, KEIL P, HOFMANN M, et al. Review of system topologies for hybrid electrical energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 8: 78-90.
- [12] WANG T, DENG W, WU J, et al. Power optimization for hybrid energy storage system of electric vehicle[C]//2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing: IEEE, 2014: 1-6.
- [13] LU X, WANG H. Optimal sizing and energy management for cost-effective PEV hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(5): 3407-3416.
- [14] SHEN J, KHALIGH A. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 223-231.
- [15] 张凤奇, 胡晓松, 许康辉, 等. 混合动力汽车模型预测能量管理研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2020, 55(10): 86-108. ZHANG Fengqi, HU Xiaosong, XU Kanghui, et al. Current status and prospects for model predictive energy management in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 55(10): 86-108.
- [16] TROVAO J P, DUBOIS M R, GOMOZOV O, et al. A model predictive control with non-uniform sampling times for a hybrid energy storage system in electric vehicle application[C]//2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion

- Conference (VPPC). Montreal: IEEE, 2015: 1-6.
- [17] SHEN J, KHALIGH A. Predictive control of a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles[C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Dearborn : IEEE, 2016: 1-6.
- [18] ZHAO Yulong, WANG Weida, XIANG Changle, et al. Research and bench test of nonlinear model predictive control-based power allocation strategy for hybrid energy storage system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 70770-70787.
- [19] HU L, ZHONG Y, HAO W, et al. Optimal route algorithm considering traffic light and energy consumption[J]. IEEE Access, 2018, 6: 59695-59704.
- [20] 胡林, 钟远兴, 黄晶, 等. 考虑信号交叉口延时的最优车辆路径规划算法[J]. 汽车工程, 2018, 40(10): 1223-1229.
- HU Lin, ZHONG Yuanxing, HUANG Jing, et al. Optimal path programming algorithm with consideration of signalized intersection delay[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(10): 1223-1229.
- [21] HOU J, SONG Z. A hierarchical energy management strategy for hybrid energy storage via vehicle-to-cloud connectivity[J]. Applied energy, 2020, 257: 113900.
- [22] ALAOUI C. Hybrid vehicle energy management using deep learning[C]//2019 International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS). Taza: IEEE, 2019: 1-5.
- [23] SHEN J, KHALIGH A. Design and real-time controller implementation for a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1910-1918.
- [24] LAGO L F R, FACEROLI S T, FERREIRA R A F, et al. Power demand prediction based on mixed driving cycle applied to electric vehicle hybrid energy storage system[C]//2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). Santos: IEEE, 2019: 1-6.
- [25] ZHANG Q, DENG W, LI G. Stochastic control of predictive power management for battery/supercapacitor hybrid energy storage systems of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(7): 3023-3030.
- [26] HU L, HU X, CHE Y, et al. Reliable state of charge estimation of battery packs using fuzzy adaptive federated filtering[J]. Applied Energy, 2020, 262: 114569.
- [27] CHOI M E, KIM S W, SEO S W. Energy management optimization in a battery/supercapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 3(1): 463-472.
- [28] LI G, YANG Z, LI B, et al. Power allocation smoothing strategy for hybrid energy storage system based on Markov decision process[J]. Applied Energy, 2019, 241: 152-163.
- [29] KUPERMAN A, AHARON I, MALKI S, et al. Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(2): 806-815.
- [30] XUE X D, CHENG K W E, RAMAN S R, et al. Investigation of energy distribution and power split of hybrid energy storage systems in electric vehicles[C]//2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE). Hong Kong: IEEE, 2016: 1-7.
- [31] 王峰, 罗玉涛. 基于电池寿命的复合储能系统参数优化及能量管理[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(2): 211-218.
- WANG Feng, LUO Yutao. Parameter optimization and energy management of hybrid energy storage system based on battery life[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2019, 10(2): 211-218.
- [32] 宋绍剑, 魏泽, 刘延扬, 等. 锂电池和超级电容混合动力汽车的能量管理[J]. 控制工程, 2019, 26(12): 2272-2277.
- SONG Saojian, WEI Ze, LIU Yanyang, et al. Research on energy management for ultracapacitor/lithium battery hybrid electric vehicles[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(12): 2272-2277.
- [33] 张卫, 杨珏, 张文明, 等. 纯电动汽车蓄电池-超级电容复合能源系统研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 82-90.
- ZHANG Wei, YANG Jue, ZHANG Wenming, et al. Research on battery-supercapacitor hybrid energy system for pure electric vehicle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 82-90.
- [34] BINDU R, THALE S. Power management strategy for an electric vehicle driven by hybrid energy storage system[J]. IETE Journal of Research, 2022, 68(4): 2801-2811.
- [35] 姚堤照, 谢长君, 曾甜, 等. 基于多模糊控制的电电混合动力汽车能量管理策略[J]. 汽车工程, 2019, 41(6): 615-624.
- YAO Dizhao, XIE Changjun, ZENG Tian, et al. Multi-fuzzy control based energy management strategy of battery/super-capacitor hybrid energy system of electric

- vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(6): 615-624.
- [36] ZHOU S, CHEN Z. Model prediction and rule based energy management strategy for hybrid energy storage system[C]//2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Beijing: IEEE, 2019: 427-432.
- [37] ECKERT J J, DE ALKMIN SILVA L C, DEDINI F G, et al. Electric vehicle powertrain and fuzzy control multi-objective optimization, considering dual hybrid energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 3773-3782.
- [38] GAO C, ZHAO J, WU J, et al. Optimal fuzzy logic based energy management strategy of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles[C]//2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin: IEEE, 2016: 98-102.
- [39] MICHALCZUK M, UFNALSKI B, GRZESIAK L M. Particle swarm optimization of the fuzzy logic controller for a hybrid energy storage system in an electric car[C]//2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). Karlsruhe: IEEE, 2016: 1-10.
- [40] USMANI M J, HAQUE A, KURUKURU V S B, et al. Power management for hybrid energy storage system in electric Vehicles[C]//2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA). New Delhi: IEEE, 2019: 1-6.
- [41] SINGH A, PATNAIK S. Design of a efficient power sharing strategy for a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[C]//2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). Delhi: IEEE, 2016: 1-5.
- [42] ASENSIO M, MAGALLAN G, AMAYA G, et al. Efficiency and performance analysis of battery-ultracapacitor based semi-active hybrid energy systems for electric vehicles[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2018, 16(10): 2581-2590.
- [43] DINH A N, HOANG T T, TAM C. Modeling and control of electric vehicles with hybrid energy storage system using energetic macroscopic representation[C]//2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Belfort: IEEE, 2017: 1-6.
- [44] SUN Li, FENG Kaiwu, CHAPMAN C, et al. An adaptive power-split strategy for battery-supercapacitor powertrain-design, simulation, and experiment[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(12): 9364-9375.
- [45] HUANG Jing, CHEN Yimin, PENG Xiaoyan, et al. Study on the driving style adaptive vehicle longitudinal control strategy[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(4): 1107-1115.
- [46] 黄晶, 蒯仲勋, 彭晓燕, 等. 考虑驾驶人风格的换道轨迹规划与控制[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 226-239, 247.
- HUANG Jing, JI Zhongxun, PENG Xiaoyan, et al. Driving style adaptive lane-changing trajectory planning and control[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(6): 226-239, 247.
- [47] 张骞, 武小兰, 白志峰, 等. 电动汽车混合储能系统自适应能量管理策略研究[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(3): 878-884.
- ZHANG Qian, WU Xiaolan, BAI Zhifeng, et al. Research on adaptive energy management strategy of hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(3): 878-884.
- [48] ZHANG Qiao, LI Gang. Experimental study on a semi-active battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicle application[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(1): 1014-1021.
- [49] ASENSIO E M, MAGALLÁN G A, DE ANGELO C H, et al. Energy management on battery/ultracapacitor hybrid energy storage system based on adjustable bandwidth filter and sliding-mode control[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101569.
- [50] HU J, LIU D, DU C, et al. Intelligent energy management strategy of hybrid energy storage system for electric vehicle based on driving pattern recognition[J]. *Energy*, 2020, 198: 117298.
- [51] WU Y, HUANG Z, LIAO H, et al. Adaptive power allocation using artificial potential field with compensator for hybrid energy storage systems in electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 2020, 257: 113983.
- [52] 专祥涛, 崔婷婷. 电动汽车复合电源系统能量管理研究[J]. *电源技术*, 2020, 44(4): 549-552.
- ZHUAN Xiangtao, CUI Tingting. Research on energy management of composite power system for electric vehicles[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(4): 549-552.
- [53] YANG G, LI J, FU Z, et al. Optimization of logic

- threshold control strategy for electric vehicles with hybrid energy storage system by pseudo-spectral method[J]. *Energy Procedia*, 2018, 152: 508-513.
- [54] RIZOUG N, MESBAHI T, SADOON R, et al. Development of new improved energy management strategies for electric vehicle battery/supercapacitor hybrid energy storage system[J]. *Energy Efficiency*, 2018, 11(4): 823-843.
- [55] MESBAHI T, RIZOUG N, BARTHOLOMEÛS P, et al. Optimal energy management for a li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on a particle swarm optimization incorporating Nelder-Mead simplex approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2017, 2(2): 99-110.
- [56] 汪亚飞, 田国富, 刘忠旭, 等. 电动汽车复合储能系统能量管理策略及其快速控制原型验证[J]. *集成技术*, 2020, 9(1): 66-79.
- WANG Yafei, TIAN Guofu, LIU Zhongxu, et al. A hybrid energy storage system and its energy management strategy verification for electric vehicle applications[J]. *Journal of Interation Technology*, 2020, 9(1): 66-79.
- [57] 黄智奇, 姚栋伟, 杨国青, 等. 电动汽车复合能源系统再生制动分段控制策略研究[J]. *机电工程*, 2016, 33(3): 280-286.
- HUANG Zhiqi, YAO Dongwei, YANG Guoqing, et al. Study on piecewise control strategy of braking energy regeneration for hybrid power system of electric vehicle[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(3): 280-286.
- [58] WANG B, XU J, CAO B, et al. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 281: 432-443.
- [59] RADE M R. Design and development of hybrid energy storage system for electric vehicle[C]//2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET). Pune: IEEE, 2018: 1-5.
- [60] ZHAO W, WU G, WANG C, et al. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 427: 174-183.
- [61] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programing approach[J]. *Applied Energy*, 2015, 139: 151-162.
- [62] LIU C, WANG Y, WANG L, et al. Load-adaptive real-time energy management strategy for battery/ultracapacitor hybrid energy storage system using dynamic programming optimization[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 438: 227024.
- [63] WANG B, XU J, WAI R J, et al. Adaptive sliding-mode with hysteresis control strategy for simple multimode hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 64(2): 1404-1414.
- [64] 王刚, 宋晓麒, 许德智, 等. 汽车混合储能系统的非线性自适应控制方法研究[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(23): 2643-2647.
- WANG Gang, SONG Xiaoqi, XU Dezhi, et al. Research on nonlinear adaptive control method for hybrid energy storage system[J]. *China Sciencepaper*, 2018, 13(23): 2643-2647.
- [65] JUNG H, WANG H, HU T. Control design for robust tracking and smooth transition in power systems with battery/supercapacitor hybrid energy storage devices[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 267: 566-575.
- [66] YANG B, WANG J, ZHANG X, et al. Applications of battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles using perturbation observer based robust control[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 448: 227444.
- [67] SONG Z, HOU J, HOFMANN H, et al. Sliding-mode and Lyapunov function-based control for battery/supercapacitor hybrid energy storage system used in electric vehicles[J]. *Energy*, 2017, 122: 601-612.
- [68] JIANG X, HU J, JIA M, et al. Parameter matching and instantaneous power allocation for the hybrid energy storage system of pure electric vehicles[J]. *Energies*, 2018, 11(8): 1933.
- [69] ZHENG C, LI W, LIANG Q. An energy management strategy of hybrid energy storage systems for electric vehicle applications[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(4): 1880-1888.
- [70] CUI Naxin, ZHUO Kong, WANG Chunyu, et al. Research on energy management strategy for electric vehicles with hybrid battery/capacitor energy storage system[J]. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, 2018: 1-8.
- [71] YIN H, ZHAO C, LI M, et al. Optimization based energy control for battery/super-capacitor hybrid energy storage systems[C]//IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna: IEEE, 2013: 6764-6769.

- [72] YIN H, ZHAO C, LI M, et al. Utility function-based real-time control of a battery ultracapacitor hybrid energy system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 11(1): 220-231.
- [73] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system[J]. Applied Energy, 2014, 134: 321-331.
- [74] 袁义悦. 基于 ADVISOR 二次开发的车载复合电源参数匹配研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- YUAN Yiyue. Research on parameters matching of the vehicle-mounted combined power based on secondary development of ADVISOR[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012
- [75] MASIH-TEHRANI M, HA'IRI-YAZDI M R, ESFAHANIAN V, et al. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement[J]. Journal of Power Sources, 2013, 244: 2-10.
- [76] SCHALTZ E, KHALIGH A, RASMUSSEN P O. Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3882-3891.
- [77] 于远彬, 王庆年, 王加雪, 等. 混合动力汽车车载复合电源参数匹配及其优化[J]. 吉林大学学报, 2008, 38(4): 764-768.
- YU Yuanbin, WANG Qingnian, WANG Jiaxue, et al. Parameter matching and optimization of on-board synergic electric power supply system of hybrid electric vehicle[J]. Journal of Jilin University, 2008, 38(4): 764-768.
- [78] PAUL T, MESBAHI T, DURAND S, et al. Study and influence of standardized driving cycles on the sizing of Li-ion Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage[C]//2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). IEEE, 2019: 1-6.
- [79] LI Y, HUANG X, LIU D, et al. Hybrid energy storage system and energy distribution strategy for four-wheel independent-drive electric vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 756-770.
- [80] 王贞雅. 纯电动汽车复合电源建模及控制策略研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- WANG Zhenya. Modeling and research on hybrid energy storage system and control theory for electric vehicle[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [81] SADOON R, RIZOUG N, BARTHOLOMEÛS P, et al. Optimal sizing of hybrid supply for electric vehicle using Li-ion battery and supercapacitor[C]//2011 IEEE vehicle power and propulsion conference. Chicago: IEEE, 2011: 1-8.
- [82] ZHANG L, YE X, XIA X, et al. A real-time energy management and speed controller for an electric vehicle powered by a hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6272-6280.
- [83] MASIH-TEHRANI M, YAHYAEI R. Study of lithium battery thermal effect on battery and hybrid battery/ultra-capacitor sizing for an electric vehicle[J]. Journal of Engineering Technology, 2017, 6: 85-99.
- [84] CHEN H, ZHANG Z, GUAN C, et al. Optimization of sizing and frequency control in battery/supercapacitor hybrid energy storage system for fuel cell ship[J]. Energy, 2020, 197: 117285.
- [85] 宋传学, 周放, 肖峰, 等. 基于凸优化的车载复合电源参数匹配[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 44-51.
- SONG Chuanxue, ZHOU Fang, XIAO Feng, et al. Parameter matching of on-board hybrid energy storage system based on convex optimization method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 44-51.
- [86] OSTADI A, KAZERANI M. A Comparative analysis of optimal sizing of battery-only, ultracapacitor-only, and battery-ultracapacitor hybrid energy storage systems for a city bus[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4449-4460.
- [87] CORREA F C, ECKERT J J, SANTICIOLLI F M, et al. Electric vehicle battery-ultracapacitor energy system optimization[C]//2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Belfort: IEEE, 2017: 1-6.
- [88] ECKERT J J, SILVA L, DEDINI F G, et al. Electric vehicle powertrain and fuzzy control multi-objective optimization, considering dual hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3773-3782.
- [89] ZHANG L, HU X, WANG Z, et al. Multi-objective optimal sizing of hybrid energy storage system for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 67(2): 1027-1035.
- [90] SHEN J, DUSMEZ S, KHALIGH A. Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle

- applications[J]. IEEE Transactions on industrial informatics, 2014, 10(4): 2112-2121.
- [91] ELDEEB H H, ELSAYED A T, LASHWAY C R, et al. Hybrid energy storage sizing and power splitting optimization for plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2252-2262.
- [92] HU L, ZHOU X, ZHANG X, et al. A review on key challenges in intelligent vehicles : Safety and driver-oriented features[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2021, 15(9): 1093-1105.
- [93] 汪宜秀, 魏学哲, 房乔华, 等. 面向整组寿命最大化的电动汽车电池一致性变化规律及其均衡策略[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 176-183.
- WANG Yixiu, WEI Xuezhe, FANG Qiaohua, et al. Consistency variation law and equalization strategy of electric vehicle battery for maximizing the life of the battery pack[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 176-183.
- [94] ZHANG Z, ZHANG L, HU L, et al. Active cell balancing of lithium-ion battery pack based on average state of charge[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(4): 2535-2548.
-
- 作者简介:** 胡林, 男, 1978 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学控制与智能化、交通事故深入调查及预防。
E-mail: hulin@csust.edu.cn
- 黄晶(通信作者), 女, 1980 年出生, 副教授。主要研究方向为车辆电动化与智能化, 损伤生物力学与交通安全。
E-mail: huangjing926@hnu.edu.cn