

混合动力汽车电池寿命预测及能量控制管理策略

武旭东¹, 王靖岳^{1,2*}, 薛春伟¹, 郑珺文¹, 雷虎¹, 王军年²

1. 沈阳理工大学汽车与交通学院, 沈阳 110159

2. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025

摘要 针对混合动力汽车电池寿命预测及能量管理, 分析了锂离子电池工作原理及影响寿命的因素, 综述了不同锂离子电池剩余寿命预测方法的研究状况, 并讨论了各种方法的优缺点; 依据混合动力汽车工作模式简要说明能量控制策略工作机理, 分别论述了基于规则、基于优化及基于人工智能等能量控制管理策略的发展现状, 讨论了考虑电池寿命的控制策略对整车经济性能的影响。分析发现, 融合多种方法的电池寿命预测方法更具优越性, 且考虑电池寿命的能量控制管理策略对混合动力汽车燃油经济性的提高效果更佳。总结了混合动力汽车电池寿命预测及能量控制管理策略存在的问题并对未来的发展方向进行展望。

关键词 混合动力汽车; 锂离子电池; 剩余寿命预测; 能量管理策略

近年来, 汽车产业的发展加快了国民生活节奏, 为人们的出行提供方便, 与之相关的环境污染和能源紧缺等问题日益突出^[1]。为此, 传统汽车将以节能减排作为主要发展目标^[2], 并从改良发动机以提高燃油经济性和降低有害物质的排放、研发新能源汽车两方面着手研究^[3]。

新能源汽车作为市场的主流研究方向主要可以分为: 纯电动汽车(electric vehicle, EV)、混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)、燃料电池电

动汽车(fuel cell electric vehicle, FCEV)。纯电动汽车无污染、噪声小、结构简单、维修方便且能量转换率高, 是最理想的零排放新能源汽车, 备受青睐; 但电池技术发展尚未成熟, 电池寿命短、维修成本高、充电时间长、受环境温度影响大等问题一直被人们所诟病。燃料电池汽车是将燃料通过还原反应产出电能带动电机工作, 而非经过燃烧, 可以很大程度提高发动机工作效率实现零排放或近似零排放, 而燃料电池适应性、可靠性和耐久性较差且

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2023-07-30

基金项目: 汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金项目(20191203); 辽宁省自然科学基金项目(2020-MS-216)

作者简介: 武旭东, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车技术, 电子信箱: 1294756694@qq.com; 王靖岳(通信作者), 教授, 研究方向为车辆系统动力学与控制, 电子信箱: abswell@126.com

引用格式: 武旭东, 王靖岳, 薛春伟, 等. 混合动力汽车电池寿命预测及能量控制管理策略[J]. 科技导报, 2024, 42(2): 79-89; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.008

成本高等弊病是阻碍燃料电池汽车发展的重要原因。氢燃料电池的使用存在制取、储存、运输困难且易爆炸,安全性难以得到良好保障^[4-6]。混合动力汽车采用动力电池和内燃机两个动力源组成的复合动力驱动,通过电机的调节作用使发动机处于最佳工况点附近。在多动力源能量耦合系统调控下,混合动力汽车相较于传统燃油车辆拥有更好的动力性和燃油经济性,同时可以解决纯电动汽车续航里程差的问题,因此在传统燃油车向纯电动汽车过渡的过程中,混合动力汽车将在市场中占据重要地位。

1 锂电池剩余寿命预测方法研究

1.1 电池工作原理

目前我国混合动力汽车上使用的动力电池多种多样,但锂离子电池的出现,使得其他电池逐渐淡出人们的视野。锂离子电池在同等电容量的情况下质量更轻,这可以在提供更强动力的同时降低整车质量,作为汽车动力电池能带来更高的经济性。锂离子电池主要由正负电极、电解液和隔膜组成。电池充放电过程中,电池内部 Li^+ 在电解液中穿梭于正负极之间, e^- 则由外电路进行移动,其工作原理如图1^[7]所示。

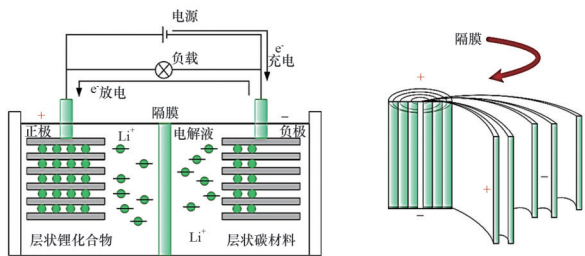


图1 锂离子电池工作原理

1.2 电池寿命衰减的影响因素

电池荷电状态、工作温度、充放电倍率等一些外部因素会造成电池容量的衰减、阻抗增大等,进而导致电池寿命的衰减。在电池充放电过程中,内部发生氧化还原反应的同时在两电极附近还伴随有一些副反应,这些副反应导致电池内部正负极及

隔膜周围不断生成聚合物,阻碍 Li^+ 在电池内部的移动,造成电池寿命衰退。随着电池的使用,有些副反应是不可逆的,这些副反应会消耗电池内部的 Li^+ ,致使电池容量衰退,这会加快电池的老化。由于电池正极材料为锂金属氧化物,随着工作时间的增加,会在电解液中进行一系列影响电池寿命的反应,具体如图2^[7]所示。

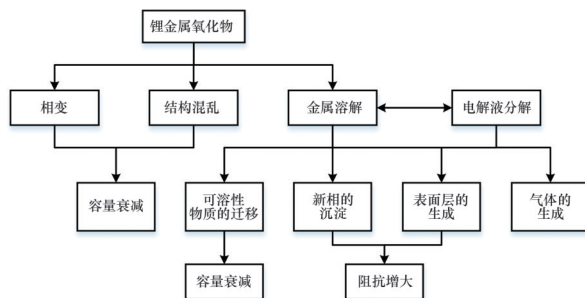


图2 正极材料老化的原因和影响

1.3 电池剩余寿命预测方法的研究现状

在混合动力汽车运行过程中,汽车蓄电池的状态处于频繁的深度充、放电状态,电池荷电状态和温度会对电池产生一定的影响,致使电池寿命出现不可逆的衰减。这种情况对混合动力汽车的使用造成严重影响,因此电池寿命成为研究人员不得不考虑的重要因素之一。国内外相关领域内的研究人员针对电池寿命的衰减机理,提出了电化学模型和电量累积模型等用于能量管理的电池剩余寿命(remaining useful life, RUL)预测模型。图3总结了锂离子电池RUL预测方法^[8]。

除上述关于电池剩余寿命预测方法外,罗承东等^[9]综述了荷电状态(state of charge, SOC)、健康状态(state of health, SOH)、RUL预测等算法,分别介绍了包括经验预测、滤波预测、时间序列预测等关于电池剩余寿命的预测方法。电池剩余寿命预测对锂离子电池技术未来的发展至关重要。

1.3.1 基于模型的方法

基于模型的方法是分析电池容量确定电池的健康状况,结合电池衰退原理,建立电池衰退的数学模型,从而完成电池剩余寿命预测。该方法建模所需数据较少,可以适应多种电池剩余寿命预测。

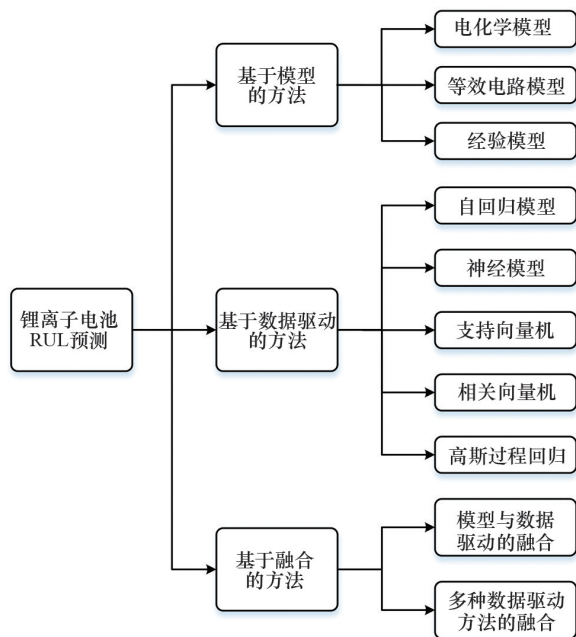


图3 锂离子电池 RUL 预测

Li 等^[10]基于单粒子模型,提出一种自适应无迹卡尔曼滤波器,通过监测电化学过程中的内部状态,实现对锂离子电池荷电状态实时精确估计。卜少华等^[11]用 Arrhenius 方程求解电池老化的参数,建立模型,实现对纯电动汽车锂离子电池寿命的预测。该方法可以反映锂离子电池老化机制,但模型参数较多,建模较困难,且鲁棒性较差。而等效电路模型可以简化电池老化机理过程,建模相对简单。Tran 等^[12]依据 4 种常用锂离子电池对 3 种不同等效电路模型进行实验,验证 3 种等效电路模型适用性均较好,且在动态电流波形中效果更佳。在等效电路模型应用中, Li 等^[13]基于电化学原理,设计了锂离子电池单体的分布参数等效电路模型,提升锂离子电池模型预测精度、实时性及计算速度。该方法降低了计算的要求,更加易于融入热效应等影响因素。经验模型无须分析锂离子电池老化过程,可进一步简化建模过程,具备不确定性表达能力。王学远等^[14]建立电池寿命衰减经验模型,提出基于粒子滤波算法的电池剩余寿命预测方法。针对粒子滤波算法的粒子退化和粒子多样性匮乏等问题,陈万等^[15]采用无迹卡尔曼滤波算法对粒子滤波进行改进,结合双指数经验模型实现预测结果绝对误差的减小,减缓粒子退化问题。

1.3.2 基于数据驱动的方法

基于数据驱动的方法无须考虑电池内部特性,利用电池的实验数据建立预测模型,相较于基于模型的方法可以更好地完成对电池剩余寿命的预测,但计算量也更大。张之琦等^[16]对相关向量机(relevance vector machine, RVM)算法及其改进方向进行介绍,并指出相较于支持向量机(support vector machine, SVM)算法的优劣势。这一研究为我们对 RVM 算法在电池寿命预测方向的应用提供较高的参考价值。Chen 等^[17]将宽度学习系统与相关向量机相结合,提高预测模型的预测精度及泛化能力。王义等^[18]建立双层 BiLSTM 神经网络模型,对电池寿命进行预测,实验结果表明 BiLSTM 具有很好的鲁棒性和准确性。Richardson 等^[19]通过高斯过程回归,实现电池容量衰减地准确预测。单一算法在预测过程中未能考虑到锂电池容量再生问题,预测精度非最理想,可以结合多种算法解决。何星等^[20]提出基于加速鱼群算法的锂离子电池剩余寿命预测方法,预测精度较支持向量机显著提高。通过引入其他算法进行优化的策略可以有效解决单一算法预测精度不足的问题。刘建^[21]在高斯过程回归模型基础上,通过最大似然估计等对模型的优化,实现其对小样本的电池剩余寿命预测。表明高斯回归算法在处理小样本等复杂问题上较容易实现,但其计算量较大且在线应用困难。与之相比, SVM 算法计算量较小,模型训练较快。Li 等^[22]将最小二乘支持向量机与改进鸟群优化算法相结合,在保留支持向量机所有优点的情况下,还可以提高预测模型计算精度。

1.3.3 基于融合的方法

基于融合的方法包括模型与数据驱动方法的融合及多种数据驱动方法的融合,这种方法集各自优点于一身,是目前研究的重点。Feng 等^[23]基于电化学机理模型设计电化学-热-神经网络模型,可以有效用于电池荷电状态和温度状态联合估计。模型与数据驱动方法的融合可以考虑多种电池寿命衰减影响因素,更加符合电池寿命衰减的实际情况。肖迁等^[24]采用自适应鲁棒损失函数(adaptive robust loss function, ARLF)对轻量型梯度提升机

(light gradient boosting machine, LightGBM) 预测模型进行改进, 实现电池剩余寿命在线预测, 具有较好的自适应能力。Li 等^[25]将长短期记忆网络和卷积神经网络有机结合, 经过验证可知, 该方法预测能力更佳。姚远等^[26]将马尔科夫链(Markov Chain, MC)方法与门控制循环单元网络(gated recurrent unit, GRU)预测模型相结合, 提出基于 GRU-MC 混合算法的锂离子电池剩余寿命预测方法, 提高了电池剩余寿命预测的精确度。Xue 等^[27]通过遗传算法对支持向量机算法进行优化, 并引入自适应无迹卡尔曼滤波算法, 利用 NASA 的电池数据集进行仿真验证该方法的有效性。郑伟彦等^[28]提出一种 RVM 算法与粒子滤波算法(particle filter, PF)算法相融合的锂离子电池 RUL 预测方法, 该方法预测精度高且通用性强。由此可知, 基于融合的方法预测精度较高, 且方法鲁棒性较强, 但算法的增加也会使计算量加大, 模型复杂程度上升, 这一问题仍有待解决。

2 能量控制管理策略工作原理及重要性

2.1 工作原理

混合动力汽车是在传统燃油汽车基础上增设动力电池作为第二动力源, 通过电动机介入, 实现动力输出。根据电动机和发动机驱动部件间连接方式的不同, 将混合动力汽车整合为并联式、串联式和混联式 3 种结构形式。动力电池作为汽车核心驱动力之一, 对混合动力汽车整体性能的影响也极为重要。为实现双动力源的动力耦合, 能量管理策略起到中枢的作用。其工作原理是在混合动力汽车结构基础上, 结合汽车的工作模式建立数学模型, 通过传感器获取电池荷电状态、汽车需求转矩等性能参数, 利用控制算法求解目标函数, 设计出合理的能量管理策略, 通过能量管理策略控制器实现对混合动力汽车转矩的分配。以混联式动力结构为例, 能量管理策略总体控制流程如图 4 所示。

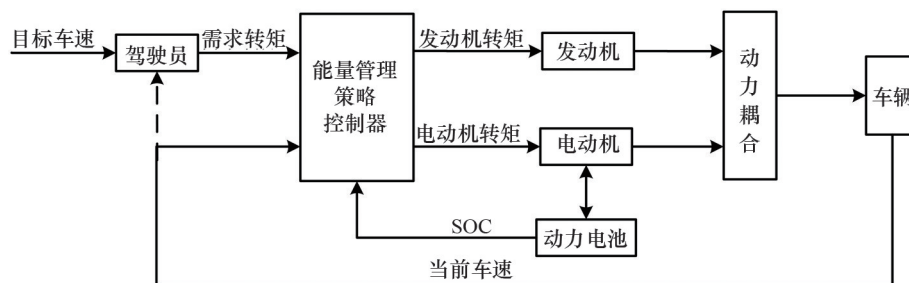


图4 能量控制策略总体控制流程图

2.2 能量控制管理策略重要性

能量控制管理策略是保证混合动力汽车正常运行的核心, 通过能量管理策略控制器实时监控各传感器传来的数据, 判断出混合动力汽车当前所处的工作模式, 利用动力耦合装置控制电动机与发动机转矩的输出, 从而使混合动力汽车具有良好的动力性及燃油经济性。考虑电池寿命对汽车的影响, 通过能量控制管理实现电池的合理使用, 可达到减缓电池容量衰减及内阻增大的目的, 以延长电池使用寿命、提高电池的安全性。这就使得混合动力汽

车相较于纯电动汽车, 解决了里程焦虑的问题; 相较于传统燃油汽车, 又降低了汽车油耗, 减少了尾气排放。在新能源汽车研究领域有着广阔的前景。

3 能量管理策略研究现状

目前, 混合动力汽车的研究正如火如荼地开展。为更大限度的实现动力性能的提升, 改善汽车燃油经济性能, 能量管理策略的开发也与之齐头并进, 以便可以合理的契合多动力源能量耦合系统。

目前的能量管理策略可分为3类:基于规则、基于优化和基于人工智能的能量管理策略^[29-32]。

3.1 基于规则的能量管理策略

基于规则的控制算法依据历史经验,运用确定规则或模糊规则,实现能量分配。基于确定规则的控制策略计算量小,有较好的实时性,应用于目前市面上大部分混合动力汽车。金传琦^[33]设置蓄电池组SOC值的上下限为静态门限参数,设置发动机在工作高效区的最大和最小转矩及发动机最大效率转矩为动态门限参数,建立切换控制规则,设计基于规则的逻辑能量管理控制策略,实现燃油经济性的有效提高。该方法可能无法得到最优结果且节油效果有限。

基于模糊规则的能量管理策略是通过开发具有多值逻辑形式的模糊逻辑,从而近似实现车辆动力源间的功率分流问题。该策略鲁棒性好、可靠性高,搭载于部分混合动力原型车。Singh等^[34]设计模糊逻辑能量管理策略,并通过仿真验证该策略具有更好的燃油经济性和更快的响应速度。万鹤高^[35]根据并联混合动力车辆的工作模式结合Mamdani型和T-S型两种经典的模糊控制理论,设计双输入单输出的模糊逻辑控制能量管理策略,模糊逻辑控制器如图5所示,在城市道路循环工况(urban dynamometer driving schedule, UDDS)和新欧洲汽车法规循环工况(new europe driving cycle, NEDC)道路循环工况下,通过仿真分析得出相较于基于规则的控制策略,该模糊控制策略可有效降低汽车燃油消耗及废气排放。

文献[36]以丰田卡罗拉混合动力汽车为例,提出一种模糊转矩控制策略实现对混联式混合动力汽车的优化。并证明车辆燃油经济性明显提高。

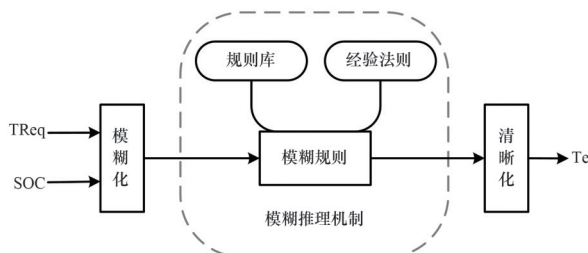


图5 模糊逻辑控制器

由此可见,模糊控制策略可以实现燃油消耗的下降,且一定程度上优于基于规则的控制策略。但基于模糊的控制策略更多依赖于经验设计,存在一定的主观性与局限性,无法得到全局最优。机器学习的应用可以很好地解决这一问题。Zheng等^[37]采用网格搜索和交叉验证优化的最小二乘支持向量机进行工况识别,并通过粒子群算法对模糊控制策略进行优化,结果表明,该策略在功率分配及经济型等方面效果较优。文献[38]在NEDC工况与中国工况下,利用粒子群算法优化模糊控制器,研究表明,我国实际道路曲线下的模糊控制器可以有效降低能耗,且结合粒子群算法优化后可以进一步提高发动机工作效率。

综上所述,传统规则控制的局限性并不能满足需求,通过与智能优化算法相结合以实现对混合动力汽车工作模式的门限值切换的优化已经逐渐进入研究领域,但这并不能完美的适应实际行驶工况的变化。对于最优控制的需求,使得基于优化的能量管理控制策略备受关注。

3.2 基于优化的能量管理控制策略

基于优化的能量管理控制策略定义燃油消耗、排放或其他指标^[39]为目标函数,将混合动力汽车能量管理问题转化为一个带有约束条件的最优控制问题,而后利用优化控制的方法求解最优控制解。因此,采用最优控制策略一直是最常用的车辆能量管理方法。

3.2.1 全局优化能量管理策略

全局优化控制策略应用严密的最优化方法和最优控制理论对混合驱动动力进行分配控制^[40],从而实现全局最优。常见的理论主要包含:变分法、动态规划(dynamic programming, DP)、多目标数学规划^[41]和庞特里亚金极小值原理(pontryagin minimum principle, PMP)^[42]等。文献[43]以串联式混合动力车辆作为研究对象,提出了基于动态规划的能量管理策略,结果表明燃油经济性有所提升。可见动态规划能够很好地解决多阶段优化问题, Liu等^[44]依据这一优点,采用动态规划分析电动汽车最优控制模式,并提出基于负载自适应规则的控制策略,相较于普通基于规则的控制策略,该策略电池

保护能力更强且节能效果更好。但随着变量的变化,其计算复杂导致计算量大且依赖已知工况的缺

点随之暴露,动态规划求解过程如图6所示。

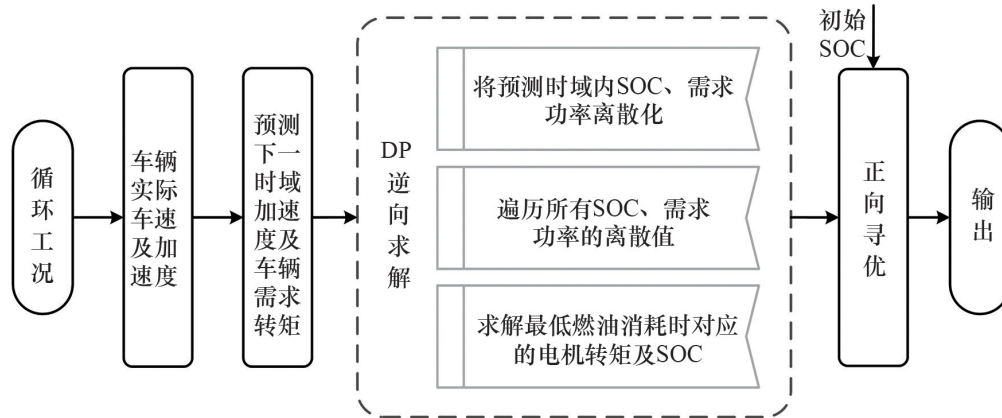


图6 动态规划求解过程

为解决此不足,庞涵泽等^[45]用工作模式作为控制变量制定相应规则并缩减控制变量集内元素,提高了动态规划算法对于复杂构型的适用性,同时降低了算法的计算量,结果表明该策略具有整车经济性优势。曾小华等^[46]开展了电池充放电功率的多目标优化研究,以神经网络控制器对NEDC循环工况进行训练,解决动态规划算法运算速度慢、须预知工况的缺陷。陈渠^[47]基于动态规划与机器学习选择相应的神经网络模型优化能量分配,并验证该算法控制下车辆油耗降低,优化性能更佳。

在预知工况的前提下,庞特里亚金极小值原理是通过将最优控制问题转换为求对应的哈密顿函数最小的问题来实现最优求解。Li等^[48]提出了一种基于庞特里亚金极小值原理的自适应能量控制策略,相较于规则的能量控制策略,该策略能耗更低,燃油经济性更好。鲍宸浩^[49]利用极小值原理,建立了哈密顿函数求解性能指标的极小值,对电量消耗模式(charge depleting, CD)/电量维持模式(charge sustaining, CS)策略进行优化,证明策略有效性及电池寿命衰减的减缓。相较于动态规划而言,在降低计算负荷的同时考虑时间的变化,提高了最优化的实时性,在这方面瞬时优化可以做的更好。

3.2.2 瞬时优化控制策略

瞬时优化控制策略核心思想是减少油耗,研究人员依据混合动力汽车当前的瞬时工况对车辆转矩进行分配从而提出这一控制策略。故瞬时优化实时性较好,且计算量较全局优化也大为减少。常见的瞬时优化控制策略有等效燃油消耗最小策略(equivalent consumption minimization strategy, ECMS)和模型预测控制策略(model predictive control, MPC)。等效燃油消耗最小策略是确定一个等效因子,把电动机的电能消耗量通过特定的比例等效为发动机的燃油消耗量,然后再进一步优化^[50]。在瞬时优化控制策略的优化过程中,也可以通过加权因子来引入汽车的电池寿命^[51]、排放性能等^[52]多种指标进行多个方面的折中优化。文献[53]也提到等效燃油消耗最小策略,并且是瞬时优化能量管理策略一般采用的方法。模型预测控制策略是通过对汽车行驶时的各个动态参数进行在线辨识,判断这些数据与数据库中的动态模型是否拟合,从而预测下一时域的汽车状态,这样可以把全局优化的问题转化为对下一个预测时域的局部优化问题,用滚动时域优化的方法完成实时优化^[54-55]。Bonab等^[56]讨论了基于模型预测控制的方法解决每个时间步能量管理的燃料最优控制问题,且该策略优于基于规

则的控制策略。

Liu等^[57]结合遗传算法,设计改进的等效燃油消耗最小策略,实现燃油经济性的提高。Zhang等^[58]提出利用比例积分(Proportional integral, PI)控制器设计自适应律,通过这种方法可以实时的对等效因子进行调整,这也是一种等效燃油消耗最小的策略。并通过仿真分析验证了这一控制策略有效性。孙芳科^[59]在对等效燃油消耗最小能量管理策

略分析的基础上,针对混合动力汽车不同的工作模式建立满足系统瞬时油耗最低的控制策略的数学模型,同时建立基于神经网络的工况识别模块,增强汽车的工况适应性,并提高整车的燃油经济性,原理图如图7所示。以上研究过程中均存在计算量大且须预知工况的问题,但通过与机器学习算法相结合,这一问题可得到有效解决。

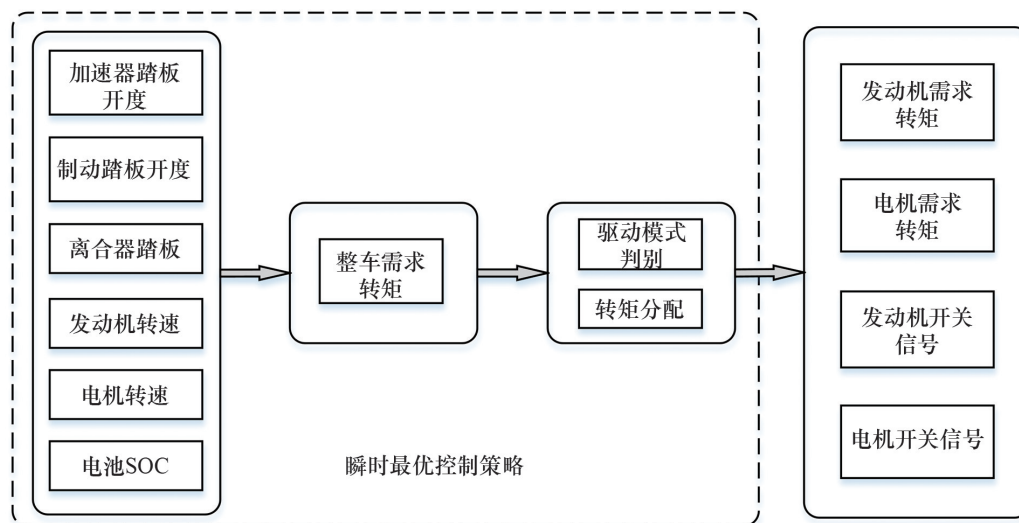


图7 基于系统油耗率最低控制策略图

3.3 基于人工智能的能量控制管理策略

基于人工智能的能量控制管理策略是运用智能算法对混合动力汽车的转矩进行分配实现能量高效利用。在该研究领域内,目前在HEV能量管理技术中引入了很多智能优化算法,如神经网络、博弈论和遗传算法等。

郭俊利^[60]以电气变速器(electric variable transmission, EVT)混合动力汽车为研究对象,运用神经网络算法对全局优化能力管理策略进行学习,并融合工况识别算法实现实车能量的在线分配与控制,实现节能减排的目的。Wu等^[61]利用神经网络对动态规划和庞特里亚金极小值原理得到最优结果进行模式识别,建立在线状态估计模型。神经网络模型的引用实现等效消耗最小策略最优性能的在线利用,且较于庞特里亚金最小模型计算时间减少。Sun等^[62]提出一种协同进化算法与博弈模型相结合

的能量管理策略,并证明该方法具有较好的鲁棒性和经济性。耿文冉等^[63]研究关于某功率分流式混合动力汽车,提出了一种新型的基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)的多目标能量的管理策略,把PSO优化与ECMS优化相结合,这种方式的能量管理策略可以降低整车能耗,与此同时还可以控制电池电量。高建树等^[64]研究了采用鱼群算法对隶属度函数进行优化从而实现对模糊控制器的优化,该控制策略实现了蓄电池和超级电容的功率的合理分配,且优化之后的控制策略降低了整车耗能,提高了汽车的燃油经济性。Meng等^[65]提出基于遗传算法优化的智能模糊控制策略,对控制策略进行了建模并在ADVISOR软件仿真中进行检验,结果表明这一控制策略可以有效改善油耗、排放、电池充放电平衡等问题。研究者更多将智能算法同基于优化的控制策略相结合,形成基于人工

智能的能量控制管理策略,可以建立精确的数学模型,改善基于优化控制策略中的缺陷,以此提高控制精度,进一步提高混合动力汽车的燃油经济性。

4 考虑电池寿命的控制策略

从用车经济性角度考虑,动力电池不仅在整车动力系统中充当重要角色,在车辆整个寿命周期中,电池成本也是影响车辆使用经济性的关键因素。通过对电池剩余寿命的预测可以更好地掌握蓄电池性能参数,从而将电池寿命衰减计入混合动力汽车研究中,结合控制算法以实现混合动力汽车转矩分配的最优配置,达到改善车辆经济性能的目的。徐福国^[66]研究了电池寿命对整车经济性的影响,利用曲面拟合方法得到一个可用于优化控制设计的电池寿命衰减模型,利用改进的随机动态规划策略迭代算法分别得到考虑和不考虑电池寿命的通勤插电式混合动力汽车的能量管理策略,对比两种不同控制策略 15 天行车工况下的花费情况,分析得出考虑电池寿命的能量控制策略可以进一步提高整车经济性。陈景夫^[67]以增程式电动客车为研究对象,全面分析了车辆寿命周期中电池成本、运营成本等与整车经济性的关系,并验证了考虑电池寿命的能量控制管理策略可以有效降低用车成本。以上研究表明,动力电池从动力损耗及用车成本等方面均影响着车辆经济性。考虑电池寿命的能量控制策略至关重要。文献[68]以插电式混合动力汽车为研究对象,利用模糊逻辑对混合储能系统进行能量管理,实现对电池损耗的优化。Fu 等^[69]提出了基于模糊控制的优化频率解耦策略,并通过遗传算法对其进行优化,实现电池寿命的延长。李双双^[70]在插电式混合动力汽车控制策略中引入电池寿命衰减,进而实现动力电池功率与电池寿命状态相匹配,仿真证明其可以延长电池使用寿命。将电池寿命计入混合动力汽车能量控制管理策略中,在保证动力性能前提下,控制电池充放电功率限制,以延长电池使用寿命,从而降低用车成本,但考虑电池寿命的能量控制策略研究较少。

目前关于汽车电池寿命的延长,超级电容储能

系统的研究已经取得阶段性的成果。Ferahtia 等^[71]提出一种基于最优控制理论的电池-超级电容混合动力系统能量管理策略,该策略可以保护超级电容免于深度放电,从而提高系统效率和改善电能质量。杨轶成等^[72]对超级电容能量的最大化进行优化,研究出基于超级电容储能系统能量管理策略,通过仿真实验验证了其有效性。超级电容电池工作效率高,使用寿命长,在汽车上的应用极具研究价值。

5 结论

基于目前取得的研究进展,智能算法在电池寿命预测及能量管理策略研究中应用较为广泛。对于电池寿命预测及能量控制管理策略研究中,引入智能算法与其他方法相结合使用,能够弥补传统方法的不足,运算结果更佳精确,这将是未来的主要发展方向。然而,上述研究中仍存在技术性问题。目前,锂离子电池寿命预测均以单一电池模型为研究对象,而实际动力电池是由多块单体电池串联而成,由于生产工艺及使用条件差异,导致电池组中存在单体一致性问题,使得单体电池寿命预测在实际应用效果较差;在能量控制管理策略设计过程中,均在 UDDS 及 NEDC 等路面工况进行仿真模拟,而在实际行驶工况下运行结果产生差异,对车辆燃油经济性造成影响;多数能量管理策略以动力输出为主要研究目标,轻视制动能量回收对车辆燃油经济性的帮助,再生制动控制策略的研究处于基础阶段。

针对这些问题,对混合动力汽车电池剩余寿命预测及能量控制管理策略提出了未来发展的方向。(1) 在电池充放电过程中,电池组内部温度分布不同,各个单体电池老化情况存在差异,引入单体电池寿命预测的能量控制策略实际运行效果并不理想。因此,设计电池组剩余寿命预测的方法是未来研究的重点。(2) 目前,我国导航系统技术水平已经相当成熟。可以通过蜂窝技术、第五代移动通信技术(5G)、北斗卫星导航系统(beiyou navigation satellite system, BDS)、智能网联系统等技术实时获

取精确的路面工况信息,并将其用于HEV能量控制管理系统中,从而提高能量管理系统的实时性和精确性,实现能量管理控制策略与智能交通系统相结合。(3) 车辆再生制动技术可以有效缓解混合动力汽车续航不足的问题,并且实现较为容易。因此,更加精准的再生制动力控制策略在智能化方向上有待深入研究。(4) 对于混合动力汽车来说,动力电池的寿命对整车的性能有着很大的影响。为延长汽车电池使用寿命并保持汽车的动力性能,考虑电池寿命的能量控制管理策略还需进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 谭忠富,王抒祥,何洋,等. 电动汽车节能与减排潜力计算模型[J]. 现代电力, 2013, 30(2): 78-82.
- [2] 伍塞特. 混合动力汽车能量管理系统研究及展望[J]. 节能, 2019, 38(10): 45-48.
- [3] Sciarretta A, Serrao L, Dewangan P C, et al. A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2014, 29: 287-298.
- [4] 余卫平,李明高. 现代车辆新能源与节能减排技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 殷承良,张建龙. 新能源汽车整车设计——典型车型与结构[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
- [6] Mi C, M. Abul M, Gao D W. 混合动力电动汽车原理及应用前景[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [7] 穆邱倩. 数据驱动的锂离子电池剩余寿命预测方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [8] 蔡艳平,陈万,苏延召,等. 锂离子电池剩余寿命预测方法综述[J]. 电源技术, 2021, 45(05): 678-682.
- [9] 罗承东,吕桃林,解晶莹,等. 电池管理系统算法综述[J]. 电源技术, 2021, 45(10): 1371-1375.
- [10] Li W, Fan Y, Ringbeck F, et al. Electrochemical model-based state estimation for lithium-ion batteries with adaptive unscented Kalman filter[J]. Journal of Power Sources, 2020, 476: 228534.
- [11] 卜少华,代鹏,叶华国,等. 基于Arrhenius方程下EV用磷酸铁锂电池寿命预测[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 98-104.
- [12] Tran M K, DaCosta A, Mevawalla A, et al. Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA[J]. Batteries, 2021, 7(3): 51.
- [13] Li Y, Vilathgamuwa M, Farrell T, et al. A physics-based distributed-parameter equivalent circuit model for lithium-ion batteries[J]. Electrochimica Acta, 2019, 299: 451-469.
- [14] 王学远,李日康,魏学哲,等. 基于传荷电阻的锂离子电池剩余寿命预测研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 105-117.
- [15] 陈万,蔡艳平,苏延召,等. 基于改进粒子滤波的锂离子电池剩余寿命预测[J]. 中国测试, 2021, 47(7): 148-153.
- [16] 张之琦,郁亚娟,李茜,等. 相关向量机预测电池健康状态和剩余有效寿命[J]. 电源技术, 2021, 45(3): 419-423.
- [17] Chen Z, Shi N, Ji Y, et al. Lithium-ion batteries remaining useful life prediction based on BLS-RVM[J]. Energy, 2021, 234: 121269.
- [18] 王义,刘欣,高德欣. 基于BiLSTM神经网络的锂电池SOH估计与RUL预测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 1-5.
- [19] Richardson R R, Osborne M A, Howey D A. Battery health prediction under generalized conditions using a Gaussian process transition model[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 23: 320-328.
- [20] 何星,丁有军,宋丽君,等. 基于加速鱼群算法的锂离子电池剩余寿命预测[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(02): 163-169.
- [21] 刘健. 基于高斯过程回归的锂离子电池剩余寿命预测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [22] Li L L, Liu Z F, Tseng M L, et al. Enhancing the Lithium-ion battery life predictability using a hybrid method[J]. Applied Soft Computing, 2019, 74: 110-121.
- [23] Feng F, Teng S, Liu K, et al. Co-estimation of lithium-ion battery state of charge and state of temperature based on a hybrid electrochemical-thermal-neural-network model[J]. Journal of Power Sources, 2020, 455: 227935.
- [24] 肖迁,穆云飞,焦志鹏,等. 基于改进LightGBM的电动汽车电池剩余使用寿命在线预测研究[J/OL]. 电工技术学报, (2022-01-04) [2022-08-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2188.TM.20220104.1226.004.html>.
- [25] Li J, Li X, He D. A directed acyclic graph network combined with CNN and LSTM for remaining useful life prediction[J]. IEEE Access, 2019, 7: 75464-75475.
- [26] 姚远,陈志聪,吴丽君,等. 采用GRU-MC混合算法的锂离子电池RUL预测[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 169-174.
- [27] Xue Z, Zhang Y, Cheng C, et al. Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries with adaptive unscented kalman filter and optimized support vector regression[J]. Neurocomputing, 2020, 376: 95-102.
- [28] 郑伟彦,吴靖,许杰,等. 基于RVM-PF融合算法的锂离子电池剩余使用寿命预测[J]. 浙江电力, 2021, 40(4): 54-64.
- [29] Sabri M F M, Danapalasingam K A, Rahmat M F. A re-

- view on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1433–1442.
- [30] M. Ali A, Söffker D. Realtime application of progressive optimal search and adaptive dynamic programming in multi-source HEVs[C]// *Proceedings of the ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference*. Tysons, Virginia, USA: American Society of Mechain Engineers, 2017, 58288: V002T17A003.
- [31] Du G, Zou Y, Zhang X, et al. Intelligent energy management for hybrid electric tracked vehicles using online reinforcement learning[J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113388.
- [32] Xiong R, Chen H, Wang C, et al. Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor—a critical review on topology and energy management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 1228–1240.
- [33] 金传琦. 新能源混合动力汽车能量管理策略研究[J]. *交通节能与环保*, 2022, 18(2): 27–30.
- [34] Singh K V, Bansal H O, Singh D. Feed-forward modeling and real-time implementation of an intelligent fuzzy logic-based energy management strategy in a series-parallel hybrid electric vehicle to improve fuel economy[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 102(2): 967–987.
- [35] 万鹤高. 并联混合动力系统能量管理策略研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [36] 张金柱, 韩玉敏, 孙远涛, 等. 基于模糊控制的并联式混合动力汽车能量管理策略[J]. *交通科技与经济*, 2019, 21(5): 53–59.
- [37] Zheng Y, He F, Shen X, et al. Energy control strategy of fuel cell hybrid electric vehicle based on working conditions identification by least square support vector machine[J]. *Energies*, 2020, 13(2): 426.
- [38] 马琨其. 基于粒子群-模糊控制的并联式混合动力汽车能量管理策略仿真研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- [39] 杨天. 基于新型动力系统的混合动力能量控制策略仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [40] 刘云. 并联混合动力汽车参数匹配与优化方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [41] 赵航, 史广奎. 混合动力电动汽车技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [42] Li T, Rizzoni G, Onori S. Optimal energy management of HEVs with consideration of battery aging[C]// *Proceedings of 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific*. Beijing: IEEE, 2014: 1–6.
- [43] 孔泽慧, 熊继芬. 基于动态规划的混合动力汽车能量管理策略研究[J]. *时代汽车*, 2021, 18(17): 14–15.
- [44] 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.
- [45] 庞涵泽, 王立, 袁一脚. 基于DP算法的新双模PHEV系统能量管理策略[J]. *汽车安全与节能学报*, 2020, 11(2): 227–235.
- [46] 曾小华, 王星琦, 宋大风, 等. 考虑电池寿命的插电式混合动力汽车能量管理优化[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2019, 53(11): 2206–2214.
- [47] 陈渠, 殷承良, 张建龙, 等. 基于动态规划与机器学习的插电式混合动力汽车能量管理算法研究[J]. *汽车技术*, 2020, 51(10): 51–57.
- [48] Li X, Wang Y, Yang D, et al. Adaptive energy management strategy for fuel cell/battery hybrid vehicles using Pontryagin's Minimal Principle[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 440: 227105.
- [49] 鲍宸浩. 基于电池寿命的混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [50] Serrao L, Onori S, Rizzoni G. ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control[C]// *Proceedings of the American Control Conference*. St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009: 3964–3969.
- [51] Ebbesen S, Elbert P, Guzzella L. Battery state-of-health perceptive energy management for hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(7): 2893–2900.
- [52] Sezer V, Gokasan M, Bogosyan S. A novel ECMS and combined cost map approach for high-efficiency series hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(8): 3557–3570.
- [53] 李森林. 新能源汽车技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2020.
- [54] Borhan H, Vahidi A, Phillips A M, et al. MPC-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(3): 593–603.
- [55] Borhan H, Vahidi A, Phillips A M, et al. Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle[C]// *Proceedings of the American Control Conference*. St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009: 3970–3976.
- [56] Bonab S A, Emadi A. MPC-based energy management strategy for an autonomous hybrid electric vehicle[J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2020, 1: 171–180.
- [57] Liu X, Qin D, Wang S. Minimum energy management strategy of equivalent fuel consumption of hybrid electric vehicle based on improved global optimization equivalent factor[J]. *Energies*, 2019, 12(11): 2076.
- [58] Zhang F, Xi J, Langari R. An adaptive equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid electric vehicle based on fuzzy PI[C]// *Proceedings of 2016*

- IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2016: 460–465.
- [59] 孙芳科. 混合动力汽车瞬时最优控制策略的研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [60] 郭俊利. 基于工况识别的混合动力汽车能量管理策略研究[J]. 粘接, 2020, 41(1): 185–188.
- [61] Wu Y, Zhang Y, Li G, et al. A predictive energy management strategy for multi-mode plug-in hybrid electric vehicles based on multi neural networks[J]. Energy, 2020, 208: 118366.
- [62] Sun Z, Wang Y, Chen Z, et al. Min-max game based energy management strategy for fuel cell/supercapacitor hybrid electric vehicles[J]. Applied Energy, 2020, 267: 115086.
- [63] 耿文冉, 楼狄明, 张彤. 基于粒子群优化的混合动力汽车多目标能量管理策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 1030–1039.
- [64] 高建树, 尹尔乐, 陈煜, 等. 基于鱼群算法的复合电源模糊能量管理策略[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(11): 86–90.
- [65] Meng D, Zhang Y, Zhou M, et al. Intelligent fuzzy energy management research for a uniaxial parallel hybrid electric vehicle[J]. Computers & Electrical Engineering, 2016, 58: 447–464.
- [66] 徐福国. 混合动力汽车计及电池寿命的能量管理优化控制策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [67] 陈景夫. 面向动力电池衰减的增程式电动客车能量管理策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [68] Akar F, Tavlasoglu Y, Vural B. An energy management strategy for a concept battery/ultracapacitor electric vehicle with improved battery life[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 191–200.
- [69] Fu Z, Zhu L, Tao F, et al. Optimization based energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle considering fuel economy and fuel cell lifespan[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 8875–8886.
- [70] 李双双. 考虑动力电池寿命衰退的PHEV能量管理控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [71] Ferahtia S, Djeroui A, Mesbahi T, et al. Optimal adaptive gain LQR-based energy management strategy for battery-supercapacitor hybrid power system[J]. Energies, 2021, 14(6): 1660.
- [72] 杨轶成, 丁明进, 王响成, 等. 基于超级电容的双向DC-DC变换器控制研究[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 129–139.

Review of battery life prediction and energy control management strategies for hybrid electric vehicles

WU Xudong¹, WANG Jingyue^{1,2*}, XUE Chunwei¹, ZHENG Junwen¹, LEI Hu¹, WANG Junnian²

1. School of Automobile and Transportation, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

Abstract At present, environmental pollution and energy shortage are becoming increasingly serious, and the automobile industry is also moving in the direction of energy conservation and environmental protection. In order to promote the research on the power performance and fuel economy of hybrid electric vehicles, this paper briefly analyzes the working principle of the lithium-ion battery and the factors affecting the life of the lithium-ion battery, summarizes the research status of different methods for predicting the remaining life of the lithium-ion battery and analyzes their advantages and disadvantages. According to the working mode of hybrid electric vehicles, the working mechanism of energy control management strategies are briefly explained, and the development status of energy control management strategies based on rules, optimization and artificial intelligence is described respectively. The influence of battery life control management strategy on vehicle economic performance is discussed. According to the relevant literature analysis, it is found that the battery life prediction method combining multiple methods is more superior, and the energy control management strategy considering battery life has a better effect on improving the fuel economy of hybrid electric vehicles. The problems of battery life prediction and energy control management strategies for hybrid electric vehicles are summarized and the future development direction is forecasted.

Keywords hybrid electric vehicle; lithium-ion battery; prediction of residual life; energy management strategy



(责任编辑 祝叶华)