DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.196 **中图分类号**：TM921 **文献标志码**：A

考虑道路交通信息的 HEV 能量管理研究综述

周玲雪[1]，李 磊[1]，毛建卫[1]，周鸿旭[1]，武小花[1](中国电源学会会员)，
蒋 平[2]
(1.西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039；2.成都客车股份有限公司，成都 610000)

摘要：以环保、噪音小、节能等为优点的混合动力汽车 HEVs(hybrid electric vehicles)在近年来得到广泛发展。信号交叉口是城市道路中的重要组成部分，道路车辆密度大时极易出现交通拥堵，降低整个路网车辆通行效率，影响车辆的燃油经济性。随着智能交通系统等新技术的发展，考虑道路交通信息的 HEV 能量管理问题成为研究热点。介绍了考虑道路坡度及融合单一车辆和混行车辆在信号交叉口的 HEV 速度规划与能量管理策略 EMS(energy management strategy)结合的研究成果，总结了目前国内外学者在融合道路交通信息基础上的车速轨迹优化及 EMS 方法，并对考虑交通信息的 EMS 发展进行了探讨。

关键词：混合动力汽车；道路坡度；交通信息；能量管理；信号灯

Review of Researches on Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Considering Road Traffic Information

ZHOU Lingxue[1], LI Lei[1], MAO Jianwei[1], ZHOU Hongxu[1], WU Xiaohua[1], *Member, CPSS*, JIANG Ping[2]
(1. Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Chengdu Bus Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Hybrid electric vehicles (HEVs) have been widely developed in recent years owing to their advantages such as environmental protection, low noise and energy saving. The signal intersections are an important part of urban roads, where the traffic congestion is easy to occur when the road vehicle density is high, thus reducing the efficiency of the entire road network and affecting the fuel economy of vehicles. With the development of new technologies such as intelligent transport systems, the problem of HEV energy management considering the road traffic information is becoming a research hotspot. The research results of speed planning and energy management strategy (EMS) for HEVs considering road slopes and combination of single and mixed vehicles at signal intersections are introduced, the existing methods of speed trajectory optimization and EMS based on fusing the road traffic information which are proposed by scholars both at home and abroad are summarized, and the development of EMS considering the traffic information is also discussed.

Keywords: Hybrid electric vehicle (HEV); road slope; traffic information; energy management; signal light

在碳排放和全球气候变化问题日益加剧的背景下[1-2]，作为解决能源及环保问题的有效途径之一，混合动力汽车 HEVs(hybrid electric vehicles)的生产和研发受到各国政府的重视与支持。HEV 不同动力源之间的能量分配对整车燃油经济性及电池寿命等方面有直接影响[3]。此外，随着车辆保

收稿日期：2023-06-07；**修回日期**：2023-09-07；**录用日期**：2023-11-21；**网络首发日期**：2024-01-31
基金项目：四川省科技计划资助项目(2023YFG0067，2023YFG0068)
This work is supported by the Science & Technology Project of Sichuan Province, China under the grants 2023YFG0067 and 2023YFG0068

有量不断增加,交通拥堵也成为社会日益关注的焦点。在智能交通系统 ITS(intelligent transport system)、大数据云计算、5G 等信息技术快速发展的背景下，社会对可持续交通的重视也日益增强[4]，HEVs 已成为全球减少排放、提高能源利用效率和推动可持续交通发展的关键组成部分[5]。在城市道路中，道路坡度、交叉口信号灯等信息的确定与否对道路车辆排队情况、交通流量和车辆的能量需求影响较大。因此，将道路交通信息整合到能量管理系统中可以进一步优化 HEV 的性能[6]。

现阶段，对于不考虑外界环境因素的 HEV 的能量管理策略 EMS(energy management strategy)，相关总结性文献已展现了 EMS 控制算法的多样性和实用性，为研究 HEV 能量管理提供了较充分的理论和现实依据。随着科技的发展，融合道路交通信息的 HEV 能量管理研究逐渐增多[7]。大多数研究将控制策略分为上、下 2 层，上层通过融合道路信息优化车速或输出转矩，下层进行能量管理及优化控制，这种方式减少了控制器的工作负担且控制效果较好。HEVs 因具有能量回收特点，道路坡度对于车辆需求能量有直接影响。上坡时，车辆需要动力来克服重力，下坡时可以利用重力回收能量。通过融合道路坡度信息的能量管理系统可以更好地优化双动力源之间的能量分配，以实现最佳的燃油经济性。在考虑交通信息场景下，目前的研究对象集中于单车或多车队列，车辆能够根据城市交通流量和红绿灯周期，使车辆在交叉口附近保持适当的速度，以避免频繁的加速和制动，提高燃油经济性。在 EMS 中考虑道路坡度和交通信息，以实现燃油经济性优化、改善驾驶舒适度及延长电池使用寿命为目标的研究逐年增多。但随着交通环境复杂性增加，对算法和控制系统性能要求也逐渐升高，数据准确性、成本因素及技术的可行性还需要较长时间来克服。因此，本文从道路坡度和交叉口交通信息 2 个方面对目前的研究进展进行分类阐述，以充分了解当前的研究现状，更清晰地认识 HEVs 在实际道路环境中的能量利用情况。

本文主要概括了考虑道路坡度信息及交叉口交通信息的 HEV 能量管理问题研究现状。首先详细分析了基于道路坡度的能量管理在 HEVs 领域的发展现状，然后分别阐述了单车和多车在考虑交通信息的整车能耗及频繁启停的研究现状，最后进行了全文总结及未来 HEVs 能量管理的发展趋势和展望。

1　考虑道路坡度的能量管理

实际驾驶过程中，道路交通信息与高效 EMS 的结合研究在 HEVs 能量管理领域具有重要意义。EMS 主要分为基于规则的策略、基于优化的策略和基于学习的控制策略[8-10]。基于规则的策略可分为确定性规则和模糊性规则，例如：功率跟随、模糊逻辑控制等策略[11]。基于优化的策略主要分为全局优化和局部优化[12]，如：动态规划 DP(dynamic programming)[13]、模型预测控制 MPC(model predictive control)[14]和粒子群优化[15]等策略。随着人工智能算法技术的不断进步，基于学习的策略开始广泛运用，例如：强化学习[16]、神经网络、数据驱动和深度强化学习 DRL(deep reinforcement learning)[17-18]等算法。完全训练的学习算法可以构建智能体并实时应用于在线学习，能够较好地解决基于规则和基于优化的 EMS 计算负担大、适应性差等问题，为 EMS 提供切实可行的方法，具体 EMS 分类如图 1 所示。

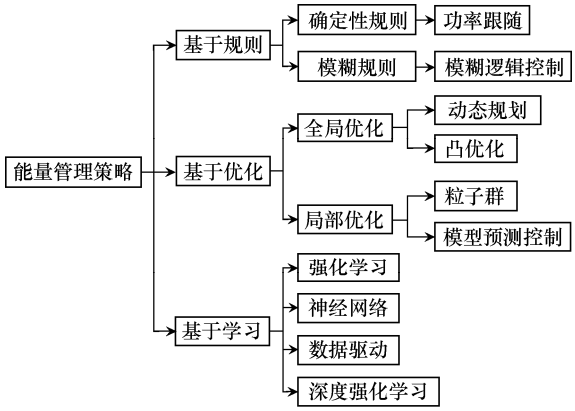


图 1　EMS 的分类

Fig. 1 Classification of EMS

近年来，世界各国根据自身道路条件陆续提出

了考虑坡度信息的 EMS。国内外诸多学者根据采集到的道路信息计算出道路坡度系数[19]，并在考虑道路坡度、行驶车速等因素前提下开展 HEV 能量分配研究[20]。HEV 因具有能量回收特点，其能量分配的最优效果受坡度信息的影响较大，若忽略坡度信息，能量分配控制难以达到最佳状态。中国和美国公路对不同车速下的最大坡度有一定限制，具体见表 1 及表 2[21]。

表 1 中国公路不同车速下的最大坡长限值

Tab. 1 Maximum slope length limits at different vehicle speeds on roads in China

计算车速/(km·h^{-1})	纵坡坡度/%	坡长限值/m
80	3	1 000
	4	800
	5	700
60	3	800
	4	700
	5	600
	6	500
40	4	600
	5	500
	6	400
	7	300

表 2 美国公路不同车速下的最大坡长限值

Tab. 2 Maximum slope length limits at different vehicle speeds on roads in USA

计算车速/(km·h^{-1})	纵坡坡度/%	坡长限值/m
80	4	700
	5	600
	6	500
	7	400
60	5	600
	6	500
	7	400
	8	300
40	6	600
	7	500
	8	400
	9	300

如果某一坡道长度小于规定临界值，则可以在合理的速度范围内行驶，这一特性在工况构建中具有一定参考价值。付永恒[21]基于道路坡度和车速信息，建立了考虑道路坡度的美国城市标准循环工况 UDDS(urban dynamometer driving schedule)和中国公交循环工况，随着车载环境传感器和定位技术的不断成熟，基于汽车行驶环境信息感知和精准定位的需求功率预测成为 1 种可行的解决方案；尹炳琪等[22]引入道路坡度 α 作为控制器影响因素，构建了基于道路坡度和海拔信息的车辆需求功率模型，并进行整车控制仿真，研究结果表明，所开发的控制策略能够延长动力电池的使用寿命，提升复合电源的能量管理效率；刘永刚等[23]在已知前方道路坡度及坡长的前提下，建立了坡道行驶电量消耗预估模型，分别对行车过程中的电池进行预充电时刻规划，保证车辆在坡道行驶时电量充足，避免动力电池过放；郭露露[24]提出基于非线性 MPC 的预测巡航控制方法[25-27]，将行驶路线上获取的坡度信息、曲率等道路信息融合到预测优化问题中，并通过实车实验验证了所提预测巡航控制方法的有效性；王玉海等[28]在人机交互系统中输入前方距离内的道路坡度，考虑车速变化与动力部件能量分配对车辆油耗的影响，将车速与电池荷电状态 SOC(state-of-charge)作为系统状态变量，并用 DP 算法确定当前行驶道路上的全局最优车速轨迹及能量分配方式；Li 等[29]提出了 1 种基于 DRL 的 EMS，结果表明，考虑地形信息可以提高约 2%的燃油经济性；Hu 等[30]提出了 1 种基于坡度信息的规则式 EMS，实现了能量合理分配；Tao 等[31]基于历史实验数据，得到考虑地形信息的需求功率转移概率矩阵并将其应用于 DRL 算法，以降低计算负担，得到最优 EMS；Li 等[32]将未来地形信息嵌入到基于 DRL 的 EMS 中进行训练，实现了系统耐久性与氢气消耗的最佳平衡，仿真结果显示，与考虑当前地形信息和不考虑地形信息的 EMS 相比，所提出的 DRL 学习能力分别提高了 43.73%和 43.79%，与忽略未来地形信息的 EMS 相比，所提策略的动力电池耐久性提高了 7.39%，总运营成本降低了 5.76%。

当前道路坡度信息大多运用于构建行驶工况及能量管理领域或通过 GPS 采集道路坡度值，以离线或在线控制方式将信息融合到 EMS 中，随着

信息采集设备精度和大数据及基于学习的 EMS 推广，将道路坡度信息融合到基于学习的控制策略中能够较大程度上弥补不同道路条件下 EMS 的泛用性，具有较大的发展前景。

2　车辆通过交叉口场景

2.1　目标车辆通过交叉口场景

信号交叉口主导城市内的交通流量，直接影响了道路车辆的能量消耗和行驶延误时间。为减轻交通信息对车辆能耗的负面影响，生态驾驶控制策略应运而生[33]。生态驾驶是速度规划和能量管理的耦合问题，生态驾驶控制设置了目标车辆的车速引导区域和速度恢复区域，具体场景如图 2 所示。随着智能驾驶及无人驾驶车辆不断升级，以及以车联网系统为代表的智慧交通设施不断完善，车辆可以在车联网环境下通过车载单元、路侧控制单元及中心控制单元的协同工作获取合适的行驶速度，实现不停车或少停车通过连续信号交叉口。

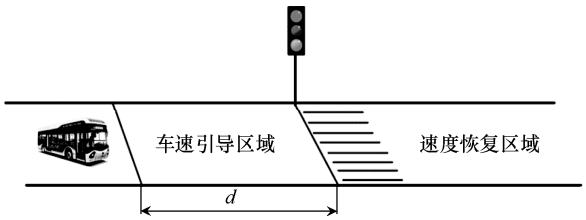


图 2　车辆通过交叉口场景

Fig. 2 Scenario of vehicle crossing the intersection

目标车辆通过信号交叉口的场景及建议采取策略主要分为 4 种：

(1)匀速通过，以正常速度通过红绿灯交叉口及停车线，此时车辆将顺利通过交叉口且绿灯剩余时间充足；

(2)加速通过，剩余绿灯时间以当前速度行驶不能通过交叉口，经计算后在道路最高限速范围内可加速通过；

(3)减速通过，以当前车速行驶到交叉口时为红灯且剩余红灯持续时间较短，仅能减速至信号灯为绿灯通过；

(4)减速停车，以当前车速行驶到交叉口时，信号灯为红灯且红灯持续时间较长，且不能以最低速度通过时，仅能停车等待绿灯相位到来。

具体车速引导流程如图 3 所示。图中：t_g 为剩余绿灯时间；t_r 为剩余红灯时间；d 为车速引导区域长度；v_0 为到达引导区域车速；v_{max} 为道路限速；v_{min} 为最低行驶速度；a_{max} 为最大加速度；a_{min} 为最大减速度。

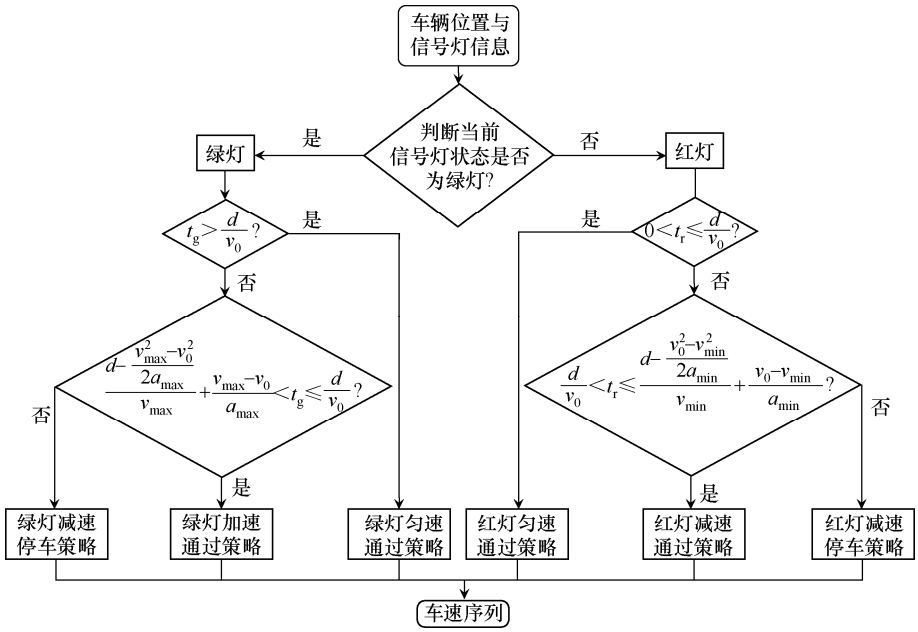
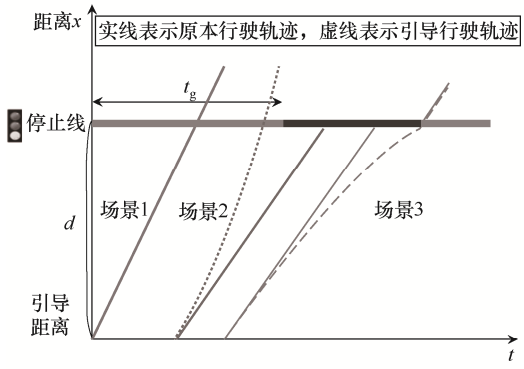


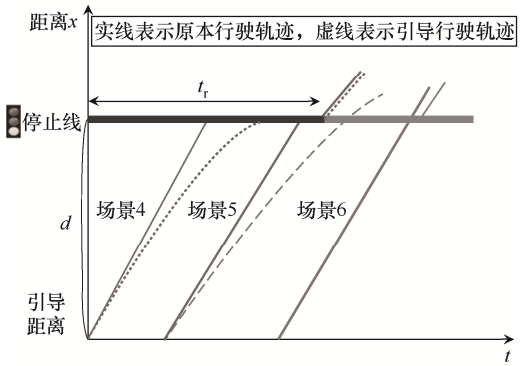
图 3　车速引导流程

Fig. 3 Flow chart of speed guidance

车辆在交叉口场景下的通行状态可分为绿灯匀速、绿灯加速、绿灯停车、红灯缓慢减速、红灯适当减速、红灯匀速行驶 6 种场景，如图 4 所示。依据前方红绿灯剩余时长提前预判并采取措施，尽可能不停车通过交叉口。



(a) 绿灯相位行驶和优化轨迹



(b) 红灯相位行驶和优化轨迹

图 4 信号灯前车辆行驶轨迹

Fig. 4 Driving trajectory of vehicle before the signal light

2.2 混行车辆通行的交叉口场景

混行车辆是机动车、非机动车、行人等共同通行的 1 种道路模式。如图 5 所示，相对于单一车辆通行场景，混行车辆场景车速规划的仿真研究更加符合实际道路情况。目前智能网联技术的发展为提高混行车辆在交叉口的通行效率提供了扎实的研究基础。Sun 等[34]将有效红灯持续时间作为 1 个随机变量，并讨论了考虑红绿灯的通信网联化和自动化车辆速度规划及燃油经济性问题，与改进的智能驾驶模型相比，最优生态驾驶在保持到达时间一致的同时，可节省 50%~57%的能耗。

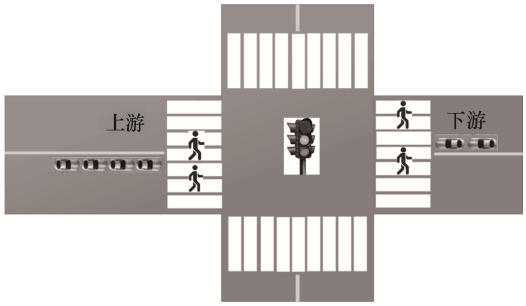


图 5 混行车辆通行场景

Fig. 5 Scenario of mixed vehicles crossing the intersection

在多车通行场景下，可通过仿真软件设置车辆密度、车流量等环境模拟车辆通过交叉口场景，验证车辆生态驾驶策略在不同车流量下的有效性。目前大多数交叉口车速规划控制研究都建立在车联网自动驾驶技术基础上，通过车联网获取准确、全面的道路交通状态信息，从而提供高效的驾驶控制框架与算法，并确保系统输出控制方案的准确性。

3 考虑交通信息的车速规划及能量管理

车路协同技术发展迅速，引入车路协同技术的控制方法减少了车辆周围环境的复杂程度[35]。高效的生态驾驶控制策略可以通过优化车速进一步挖掘车辆的节能潜力[36]。EMS 在 HEV 中扮演着能量分配者的角色，直接关系到整个车辆的性能[37]。车速规划与车路协同技术结合的方式丰富了整个 EMS 的研究内容。融合道路多元交通信息的 EMS 是提高能量利用率的方法之一，其流程如图 6 所示。

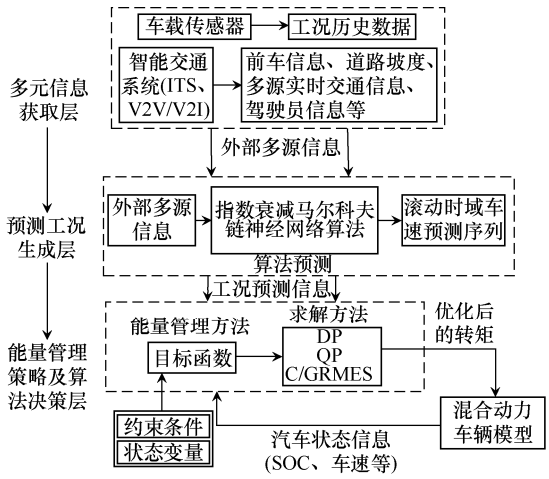


图 6 融合道路交通信息的 HEV 能量管理流程

Fig. 6 Flow chart of HEV energy management fusing the road traffic information

融合道路多元交通信息的 EMS 通过 ITS、车车协同 V2V(vehicle-to-vehicle)、车与基础设施协同 V2I(vehicle-to-infrastructure)等方法获得车辆与前方交通信号灯的距离、剩余时间信息和交通流量等交通信息[38]，利用控制器提前计算相应速度序列作为驾驶员的参考速度，进行预测或实时车速规划，并选择合适的 EMS 实现功率最优分配[14]。

3.1 单车通行的速度规划及 EMS

在速度规划与能量分配控制中，多种控制算法及 EMS 的结合研究，较大程度减少了车辆的能量消耗，促进了 HEVs 的广泛推广和使用[39]。Yang 等[40]考虑车辆减速和加速的冲击波剖面模型对车辆行驶过程进行了建模，为车辆轨迹规划提供了 1 个不停车通过的绿灯窗口；Kim 等[41]研究了基于 DP 算法和庞特里亚金极小值原理 PMP(Pontriagyn's minimum principle)的速度规划和能量分配协同优化方法；在基于 V2V/V2I 协同获取前方交通信息，预测当前车辆在未来行驶阶段信息背景下，魏小栋等[42]提出了车辆行驶单位距离的静态氢耗图，结合 DP 算法和 MATLAB 中算子分裂二次规划 OSQP(operator splitting quadratic program)求解器获得车辆通过信号灯的最优绿灯窗口车速，而后基于交替方向乘子法 ADMM(alternating direction method of multipliers)的 EMS 实现各动力源输出能量的合理分配。

DP 算法作为全局优化方法代表，其控制效果显著但难以实时应用。MPC 算法作为实时优化能量的代表，在保证实时性的前提下，能够搜索控制时域内带约束优化问题的最佳控制结果，应用前景十分广泛。余开江等[43]建立信号灯信息模型、车辆动力学模型，并从最优控制问题角度出发求解预测区间内的最优控制序列，实现能量实时优化分配。

随着人工智能技术的发展，基于学习的算法是目前的研究热点之一。得益于算法在实时性和鲁棒性方面的优势，Wu 等[44]基于 DRL 算法将收集到的交通信息、公交车动力电池 SOC 和车速作为车辆状态输入进行能量管理。与以往研究不同的是，该文所提出的 EMS 是在多个行驶工况中寻找最优策略，而不是几个标准工况。同样考虑道路信号交叉口信号灯信息，庄伟超等[45]以车辆能耗最小化与通行效率最大化为优化目标，基于强化学习建立奖励函数，并对车辆加速度进行实时控制和训练，最后仿真验证了基于强化学习的 EMS 在融合交通信息场景下的有效性与鲁棒性。基于学习的算法在未来交通信息处理和 EMS 研究中具有较大应用潜力，能够兼顾实时性与优化性，弥补基于全局优化 EMS 缺乏实时性与基于规则 EMS 优化性不足的缺点。

3.2 多车避撞速度规划及 EMS

若考虑单车行驶，控制效果难以兼顾实际交通情况下的安全与节能驾驶。在融合交通信息的整车能量管理趋势下进行能耗分析时，考虑获取车辆自身与前车车速及安全时距[46]，利用该时距与红绿灯相位及配时信息控制后车车速，即可避免与前车相撞同时实现最优车速控制。廖光亮等[47]将最优车速规划与避撞控制分为 2 层，设计多目标函数与车速序列结合的框架计算避撞控制的最优加速度。目前，为实现在绿波带通行，考虑交通信号时在全路段采用信号周期或初始时刻固定方式能够得到较优经济车速和较少燃油消耗量。但实际交通环境下，各个路口不同时段的红绿灯周期和配时信息各自独立又具有时空相关性，因此，根据实际道路信号灯配时信息，分时段和交通流量制定不同配时能更真实反映实际场景。王旭等[48]在剩余行程尺度上，利用各路段的交通拥堵等级，并结合当前路段长度、信号灯配时、前车车速、车距等信息，通过神经网络算法准确预测车速；Liu 等[49]采用配备雷达传感器的电动汽车获取 100 m 内的受控车辆状态、前车车速和车距及信号灯剩余时间，将这些信息发送到车辆控制单元计算车速序列，仿真表明，该种方式减少了 9.51%的用电量；Tang 等[50]提出了 1 种基于自适应 DP 的分层 EMS，在上层车速规划中，利用反向传播神经网络建立前方车辆速度预测模型，通过预测车速和主车状态，基于启发式 DP 实时规划主车车速，在下层能量管理控制中，采用基于双启发式 DP 的 EMS，实现各动力源的能量分

配并降低能耗；Sun 等[51]提出了 1 种具有动态概率约束的自适应随机 MPC 速度规划与 EMS 协同优化方法，有效模拟了随机交通环境的宏观和微观扰动，结果表明，所搭建的模型预测精度提高了约 10%，行驶安全性提高了 14.81%，并维持了较低能耗。

随着传统算法的改进、交通信息采集和预测，以及各种算法大量应用在速度规划和能量分配上，使得 HEVs 在燃油经济性及实时控制方面有了显著提高和发展。考虑信号灯信息的 EMS 研究可以预测 HEV 在不同路段的速度和停车次数，从而提前调整车辆的运行状态，减少燃油消耗和排放量，同时还能减少交通拥堵。

3.3 频繁启停控制及 EMS

当车辆启停频繁时，会影响发动机的寿命和可靠性[52]。因此，协同内部动力总成控制和外部驾驶行为可以获得更优的能源效率，利用合适的 EMS 对车辆行驶过程中的能量进行优化，可以减少燃油消耗和排放量[53]。

为了进一步降低燃油消耗量，Gao 等[54]提出了 1 种基于等效燃油消耗最小化 ECMS(equivalent consumption minimization strategy)的 MPC 策略，实现了 HEV 启停优化；Tang 等[55]采用 MPC 的 EMS 与基于神经网络的发动机启停策略结合的方法，多目标协同控制了车辆的启停状态和 EMS，仿真结果表明，与基于规则的 EMS 相比，总成本降低了 21.1%；Min 等[56]提出 1 种考虑车辆启停的 EMS，运用神经网络和遗传算法，停车概率降低了 33%。考虑车辆在信号灯控制区域频繁启停带来的通行延误和通行效率低问题，雷朝阳等[57]建立了交叉口车速引导模型，并以车辆通行延误时间和停车次数为评价指标，采用多目标粒子群算法求解公交车通过多个信号灯场景下的经济车速；Yan 等[58]采用分层控制策略降低公交车能耗，上层采用灰色网格图像的交通流表征受控车辆的车速及其他状态信息，基于 DRL 算法选择合适的启动时间，下层基于 MPC 算法实现双动力源能量的合理分配，但忽略了公交车站点停车时间问题。

目前，从红绿灯路口车辆频繁启停角度出发，将车辆通行延误时间和停车次数作为评价指标的研究技术逐渐成熟。传感器设备采集大量路况信息，并通过机器学习算法对智能体进行训练和验证后确定合适的停车和起步时间，为提升 HEVs 技术提供了广阔发展空间，这在降低车辆怠速时间，提高交叉口通行效率领域具有重要意义。

为清晰了解考虑交通信息的车速规划及能量管理研究进展，从车速规划方法、EMS 方法及相关研究的结果对上述研究进行归纳总结，结果见表 3。

表 3 车速规划方法及 EMS 方法对比分析

Tab. 3 Comparative analysis of vehicle speed planning methods and EMS methods

文献	车速规划方法	EMS 策略	优点	缺点	研究结果
[41]	PMP+DP	PMP+DP	减少 DP 计算负担	实时运用效果差，平坦道路优化效果不显著	总能耗降低 0.5%以上
[42]	DP+OSQP	ADMM	车速最优解和 EMS 次优解	缺乏实时性，未考虑交通流量	燃料消耗比智能驾驶员模型节省 45%
[43]	连续广义最小残量法	MPC	建立信号灯模型并验证其有效性、实时控制	工况适应性差，未考虑交通流量	燃油经济性提升 1.79%
[44]	DRL	DRL	考虑交通信息和乘客数量、工况适应性好	仅优化交通模拟产生的工况，无实车数据	与 DP 相比燃料成本仅差 1.32%
[45]	强化学习	蒙特卡洛试验	实时控制加速度，实车试验	训练时交叉口信息非实际道路信息	提升通行效率，缩短路口等待时长，能耗降低 37.3%
[47]	DP+MPC	DP+MPC	分层控制信号灯和车速规划单元	间接计算能耗，信号灯信息固定	能耗降低 19.5%
[49]	DP	DP	考虑前方有车和无车情况，巡航控制	计算量大，实时运用性差	驾驶安全性提高，驾驶时间缩短 6.90%，能耗降低 9.51%

表 3 (续)

文献	车速规划方法	EMS 策略	优点	缺点	研究结果
[50]	神经网络	双启发式 DP	实时预测车速、分层控制车速和能耗	计算量大，忽略车流量	驾驶安全性和舒适性提高，加减速度变化减少
[51]	概率分布模型	MPC	车速动态概率约束，模拟随机交通环境宏观和微观扰动	计算量大，工况适应性差	驾驶安全性提高14.81%，低能耗
[54]	MPC	ECMS	实时预测启停状态	目标函数多且计算负担大	燃油经济性提高
[55]	神经网络	PMP+MPC	考虑启停对电池温度影响及电池老化与经济性平衡	训练与测试数据集来源不同，控制效果精度有待提高	平衡燃油经济性和电池老化，与基于规则方法相比，PMP 的总成本降低 21.1%
[56]	遗传算法+神经网络	DP	预测精度高，Amesim 和 Simulink 协同仿真，良好的燃油经济性和电池耐久性	计算量大，运算复杂	牺牲少量能耗降低停车次数 33%
[58]	DRL	MPC	实际道路红绿灯和公交车站台信息纳入车速规划	预测时域和优化控制能力有限，未考虑启停对电池寿命影响	启停控制缩短行驶时间和空转时间，能耗降低 4.87%

4　总结及发展趋势

在交通环境复杂多变的背景下，本文从考虑道路坡度、信号灯、前后车速和车距、车辆频繁启停等方面出发，对反映实际道路情景下 HEV 的车速规划和 EMS 方法进行总结分析。当前融合交通信息的研究进展及未来发展总结如下。

(1)随着车联网技术快速发展，在公共交通中获取交通信息的可能性逐渐增加。目前，在多元交通信息中合理进行能量管理是 1 个新的挑战，交通信息已逐步应用于智能网联汽车的 EMS，并取得了显著成果。

(2)在 EMS 方面，大多是将离线控制策略和在线控制策略相结合。采用模型预测控制和基于全局优化的 DP 结合研究，这种结合方式可较大程度提升车速规划精度。利用全局优化的车速作为 MPC 策略输入量是 EMS 较好的 1 种控制方法，但对模型准确度要求较高，且工况适应性差。基于学习的车速规划和 EMS 逐渐广泛运用，不同学习算法的奖励性能、计算成本和学习收敛性还有较大的提升空间。

(3)实际道路条件下，信号灯配时是根据不同交通流连续变化的。因此，考虑信号灯配时可变且连续信号交叉口的车速规划和能耗优化，还可以进行进一步研究。

(4)随着基于学习和大数据算法的广泛运用，在未来工作中还可以尝试更多控制方法进行对比分析。除此之外，还可将弯道、天气和更多信号灯等环境条件纳入考虑，以进一步评估算法在车速规划和 EMS 中的优化效果。

参考文献：

[1] 孙闫, 夏长高, 尹必峰, 等. 燃料电池电动汽车的能量管理[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(9): 2130-2138.
Sun Yan, Xia Changgao, Yin Bifeng, et al. Energy management strategy of fuel cell electric vehicles [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(9): 2130-2138. (in Chinese)

[2] 舒俊豪, 武小花, 杨佳珞, 等. 新能源汽车动力电池安全问题分析及改进趋势综述[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 354-362.
Shu Junhao, Wu Xiaohua, Yang Jialuo, et al. Review of analysis and improvement trend of new energy vehicle power battery safety issues [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 354-362. (in Chinese)

[3] Anselma P G, Kollmeyer P, Lempert J, et al. Battery state-of-health sensitive energy management of hybrid electric vehicles: Lifetime prediction and ageing experimental validation [J]. Applied Energy, 2021, 285: 116440.

[4] Kazemi H, Fallah Y P, Nix A, et al. Predictive AECMS by utilization of intelligent transportation systems for hybrid electric vehicle powertrain control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(2): 75-84.

[5] Wang Ziqing, Dridi M, El Moudni A, et al. Co-optimization of eco-driving and energy management for connected HEV/PHEVs near signalized intersections: A review [J]. Applied Sciences, 2023, 13(8): 5035.

[6] 何洪文, 孟祥飞. 混合动力电动汽车能量管理技术研究综述[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(8): 773-783.
He Hongwen, Meng Xiangfei. A review on energy management technology of hybrid electric vehicles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(8): 773-783. (in Chinese)

[7] Du Aimin, Han Yeyang, Zhu Zhongpan. Review on multi-objective optimization of energy management strategy for hybrid electric vehicle integrated with traffic information [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(3): 7914-7933.

[8] Liu Yonggang, Liu Junjun, Zhang Yuanjian, et al. Rule learning based energy management strategy of fuel cell hybrid vehicles considering multi-objective optimization [J]. Energy, 2020, 207: 118212.

[9] Wu Xiaohua, Hu Xiaosong, Yin Xiaofeng, et al. Convex programming improved online power management in a range extended fuel cell electric truck [J]. Journal of Power Sources, 2020, 476: 228642.

[10] Bagwe R M, Byerly A, Euzeli Cipriano dos Santos J Jr, et al. Adaptive rule-based energy management strategy for a parallel HEV [J]. Energies, 2019, 12(23): 4472.

[11] Rodriguez R, Trovão J P F, Solano J. Fuzzy logic-model predictive control energy management strategy for a dual-mode locomotive [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 253: 115111.

[12] 高锋阳, 高翾宇, 张浩然, 等. 全局与瞬时特性兼优的燃料电池有轨电车能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5923-5938.
Gao Fengyang, Gao Xuanyu, Zhang Haoran, et al. Management strategy for fuel cell trams with both global and transient characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5923-5938. (in Chinese)

[13] Anselma P G, Anselma P G. Dynamic programming based rapid energy management of hybrid electric vehicles with constraints on smooth driving, battery state-of-charge and battery state-of-health [J]. Energies, 2022, 15(5): 1665.

[14] He Hongwen, Wang Yunlong, Han Ruoyan, et al. An improved MPC-based energy management strategy for hybrid vehicles using V2V and V2I communications [J]. Energy, 2021, 225: 120273.

[15] Du Aimin, Chen Yaoyi, Zhang Dongxu, et al. Multi-objective energy management strategy based on PSO optimization for power-split hybrid electric vehicles [J]. Energies, 2021, 14(9): 2438.

[16] Bo Lin, Han Lijin, Xiang Changle, et al. A Q-learning fuzzy inference system based online energy management strategy for off-road hybrid electric vehicles [J]. Energy, 2022, 252: 123976.

[17] Wang Zexing, He Hongwen, Peng Jiankun, et al. A comparative study of deep reinforcement learning based energy management strategy for hybrid electric vehicle [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 293: 117442.

[18] 陈明昊, 孙毅, 谢志远. 基于双层深度强化学习的园区综合能源系统多时间尺度优化管理[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1864-1881.
Chen Minghao, Sun Yi, Xie Zhiyuan. The multi-time-scale management optimization method for park integrated energy system based on the bi-layer deep reinforcement learning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1864-1881. (in Chinese)

[19] 吴婧之, 余芳, 杨佳珠, 等. 自适应坡度的复合电源物流车能量管理研究[J]. 汽车技术, 2023(3): 56-62.
Wu Jingzhi, Yu Fang, Yang Jiazhu, et al. Research on energy management of compound power logistics vehicle based on adaptive slope [J]. Automobile Technology, 2023(3): 56-62. (in Chinese)

[20] 胡杰, 王明, 刘迪, 等. 基于交通信息的复合电源系统控制策略优化[J]. 汽车工程, 2021, 43(5): 675-682.
Hu Jie, Wang Ming, Liu Di, et al. Optimization of control

strategy for hybrid power system based on traffic information [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(5): 675-682. (in Chinese)

[21] 付永恒. 基于路况信息的混合动力汽车控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
Fu Yongheng. Study on control strategy based on route information for HEV [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

[22] 尹炳琪, 马彬, 杨朝红, 等. 融合地形信息的车载复合电源控制方法研究[J]. 电源技术, 2020, 44(1): 116-120.
Yin Bingqi, Ma Bin, Yang Zhaohong, et al. Research on control method of vehicle hybrid energy storage system based on terrain information [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(1): 116-120. (in Chinese)

[23] 刘永刚, 卢立来, 解庆波, 等. 基于道路坡度信息的插电式混合动力汽车能量管理策略[J]. 工程科学学报, 2016, 38(7): 1025-1031.
Liu Yonggang, Lu Lilai, Xie Qingbo, et al. Energy management for plug-in hybrid electric vehicles based on road gradient [J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(7): 1025-1031. (in Chinese)

[24] 郭露露. 面向智能节能的汽车实时优化控制及实车验证[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Guo Lulu. Real-time optimal automotive control for intelligent energy conservation and road test [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[25] Shao Yunli, Sun Zongxuan. Eco-approach with traffic prediction and experimental validation for connected and autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(3): 1562- 1572.

[26] 徐鑫, 武小花, 杨佳珞, 等. 燃料电池客车模型预测控制能量管理策略[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 309-319.
Xu Xin, Wu Xiaohua, Yang Jialuo, et al. Model predictive control-based energy management strategy for fuel cell buses [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 309-319. (in Chinese)

[27] Shi Dehua, Wang Shaohua, Pisu P, et al. Modeling and optimal energy management of a power split hybrid electric vehicle [J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(5): 713-725.

[28] 王玉海, 李晓之, 李兴坤. 面向高速工况的混合动力卡车预见性节能算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(8): 2121-2129.
Wang Yuhai, Li Xiaozhi, Li Xingkun. Predictive energy saving algorithm for hybrid electric truck under high-speed condition [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(8): 2121-2129. (in Chinese)

[29] Li Yuecheng, He Hongwen, Khajepour A, et al. Energy management for a power-split hybrid electric bus via deep reinforcement learning with terrain information [J]. Applied Energy, 2019, 255: 113762.

[30] Hu Tengda, Li Yunwu, Zhang Zhi, et al. Energy management strategy of hybrid energy storage system based on road slope information [J]. Energies, 2021, 14 (9): 2358.

[31] Tao Fazhan, Gong Huixian, Fu Zhumu, et al. Terrain information-involved power allocation optimization for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid electric vehicles via an improved deep reinforcement learning [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 125: 106685.

[32] Li Kunang, Zhou Jiaming, Jia Chunchun, et al. Energy sources durability energy management for fuel cell hybrid electric bus based on deep reinforcement learning considering future terrain information [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 821-833.

[33] Liu Rui, Liu Hui, Han Lijin, et al. Predictive eco-driving strategy for hybrid electric vehicles on off-road terrain considering vehicle stability constraint [J]. Applied Energy, 2023, 350: 121532.

[34] Sun Chao, Shen Xinwei, Moura S. Robust optimal ECO-driving control with uncertain traffic signal timing [C]// 2018 Annual American Control Conference (ACC). Milwaukee, WI, USA, 2018: 5548-5553.

[35] Li S E, Xu Shaobing, Huang Xiaoyu, et al. Eco-departure of connected vehicles with V2X communication at signalized intersections [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5439-5449.

[36] Li Jie, Wu Xiaodong, Xu Min, et al. Deep reinforcement learning and reward shaping based eco-driving control for automated HEVs among signalized intersections [J]. Energy, 2022, 251: 123924.

[37] Hao Lei, Wang Ying, Bai Yuanqi, et al. Energy management strategy on a parallel mild hybrid electric vehicle based on breadth first search algorithm [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114408.

[38] Tang Xiaolin, Duan Ziwen, Hu Xiaosong, et al. Improving ride comfort and fuel economy of connected hybrid electric vehicles based on traffic signals and real road information [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 3101-3112.

[39] Zhou Xingyu, Sun Fengchun, Sun Chao, et al. Predictive co-optimization of speed planning and powertrain energy management for electric vehicles driving in traffic scenarios: Combining strengths of simultaneous and hierarchical methods [J]. Journal of Power Sources, 2022, 523: 230910.

[40] Yang Zhen, Feng Yiheng, Gong Xun, et al. Eco-trajectory planning with consideration of queue along congested corridor for hybrid electric vehicles [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(9): 277-286.

[41] Kim Y, Figueroa-Santos M, Prakash N, et al. Co-optimization of speed trajectory and power management for a fuel-cell/battery electric vehicle [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114254.

[42] 魏小栋, 刘波, 冷江昊, 等. 基于凸优化的燃料电池汽车节能驾驶研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(6): 851-858.
Wei Xiaodong, Liu Bo, Leng Jianghao, et al. Research on eco-driving of fuel cell vehicles via convex optimization [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(6): 851-858. (in Chinese)

[43] 余开江, 许孝卓, 胡治国, 等. 基于交通信号灯信息的混合动力汽车节能预测控制方法[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(5): 480-486.
Yu Kaijiang, Xu Xiaozhuo, Hu Zhiguo, et al. Predictive control strategies for energy saving of hybrid electric vehicles based on traffic light information [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(5): 480-486. (in Chinese)

[44] Wu Yuankai, Tan Huachun, Peng Jiankun, et al. Deep reinforcement learning of energy management with continuous control strategy and traffic information for a series-parallel plug-in hybrid electric bus [J]. Applied Energy, 2019, 247: 454-466.

[45] 庄伟超, 丁昊楠, 董昊轩, 等. 信号交叉口网联电动汽车自适应学习生态驾驶策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(1): 82-93.
Zhuang Weichao, Ding Haonan, Dong Haoxuan, et al. Learning based eco-driving strategy of connected electric vehicle at signalized intersection [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(1): 82-93. (in Chinese)

[46] 聂浩. 考虑交通信息的插电式混合动力汽车智能能量管理策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
Nie Hao. Research on intelligent energy management strategy of plug-in hybrid electric vehicle considering traffic information [D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)

[47] 廖光亮, 郑玲, 张志达, 等. 考虑信号灯状态的电动汽车最优车速规划与避撞控制研究[J]. 中国科学(技术科学), 2022, 52(7): 1134-1144.
Liao Guangliang, Zheng Ling, Zhang Zhida, et al. Optimal speed planning and collision avoidance control for electric vehicles considering traffic lights [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2022, 52(7): 1134-1144. (in Chinese)

[48] 王旭, 杜光乾, 黄勇, 等. 考虑交通信息的 PHEV 电量消耗轨迹预测与跟随算法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(8): 1-7.
Wang Xu, Du Guangqian, Huang Yong, et al. Research on predicting and tracking algorithm of SOC trajectory for PHEV with traffic information considered [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2018, 32(8): 1-7. (in Chinese)

[49] Liu Qingwu, He Hongwen. The velocity regulation of power consumption with traffic lights for electric vehicles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(9): 2312-2322.

[50] Tang Wenbin, Wang Yaqian, Jiao Xiaohong, et al. Hierarchical energy management strategy based on adaptive dynamic programming for hybrid electric vehicles in car-following scenarios [J]. Energy, 2023, 265: 126264.

[51] Sun Chao, Zhang Chuntao, Sun Fengchun, et al. Stochastic co-optimization of speed planning and powertrain control with dynamic probabilistic constraints for safe and ecological driving [J]. Applied Energy, 2022, 325: 119874.

[52] Kumar A, Kumar R, Aggarwal A, et al. A meta-heuristic-based energy efficient route modeling for EVs integrating start/stop and recapturing energy effect [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 91: 104420.

[53] Ruan Shumin, Ma Yue, Yang Ningkang, et al. Real-time energy-saving control for HEVs in car-following scenario with a double explicit MPC approach [J]. Energy, 2022, 247: 123265.

[54] Gao Aiyun, Deng Xiaozhong, Fu Zhumu, et al. Optimization of ICE start-stop based on MPC for an HEV to improve fuel economy [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2017, 41(3): 355-374.

[55] Tang Xiaolin, Jia Tong, Hu Xiaosong, et al. Naturalistic data-driven predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(2): 497-508.

[56] Min Dehao, Song Zhen, Chen Huicui, et al. Genetic algorithm optimized neural network based fuel cell hybrid electric vehicle energy management strategy under start-stop condition [J]. Applied Energy, 2022, 306: 118036.

[57] 雷朝阳, 高建平, 屈俊凯, 等. 考虑信号灯状态的经济车速规划[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7484-7492.
Lei Zhaoyang, Gao Jianping, Qu Junkai, et al. Economic speed planning with consideration the state of traffic lights [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18): 7484-7492. (in Chinese)

[58] Yan Mei, Li Guotong, Li Menglin, et al. Hierarchical predictive energy management of fuel cell buses with launch control integrating traffic information [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 256: 115397.



周玲雪

作者简介：

周玲雪(1999—)，女，硕士研究生。研究方向：燃料电池客车能量管理。E-mail：2218463256@qq.com。

李磊(1982—)，男，硕士，讲师。研究方向：汽车振动性能与实验。E-mail：lilei2015@163.com。

毛建卫(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：多堆燃料电池重卡能量管理。E-mail：1055776315@qq.com。

周鸿旭(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：燃料电池水热管理。E-mail：1550144909@qq.com。

武小花(1984—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源汽车控制技术。E-mail：xiaohuawu13@163.com。

蒋平(1986—)，男，硕士，工程师。研究方向：车辆工程。E-mail：jp8675@126.com。

(责任编辑：耿越)