

汽车智能化专题 · 评述

汽车经济性行驶优化

郭露露^{①②}, 高炳钊^①, 陈虹^{①②*}

① 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025

② 吉林大学控制科学与工程系, 长春 130025

* 通信作者. E-mail: chenh@jlu.edu.cn

收稿日期: 2016-01-27; 接受日期: 2016-04-20

国家自然科学基金国际(地区)合作与交流重点项目(批准号: 61520106008)、国家自然科学基金优秀青年基金(批准号: 61522307)和吉林省科技发展计划重大科技攻关项目(批准号: 0202GX-201210120)资助

摘要 汽车经济性行驶优化通过改善车辆行驶轨迹并结合整车能量管理, 能够有效降低汽车能源消耗。当车辆通过特定路段时, 不同的驾驶策略对应不同的燃油消耗, 考虑经济性的汽车行驶优化就是通过一定的优化策略对车辆驾驶进行决策和综合优化, 从而达到降低能耗的目的。本文介绍了汽车经济性行驶优化及其相关辅助技术的发展历程、技术现状, 回顾了大多数策略研究的主要工作。对未来智能交通系统下的车辆行驶优化进行了简要的概述, 并指出车辆行驶优化的发展趋势和面临的挑战。

关键词 经济性行驶优化 驾驶辅助 智能交通系统 燃油经济性

1 引言

汽车在给人们带来方便与快捷的同时, 也给世界各国能源供应和环境保护带来了巨大压力。2006年全球交通运输业石油消耗占全球总量的67%, 二氧化碳排放量占总量的52.4%^[1]。我国已成为世界第一汽车产销国, 预计到2020年汽车保有量将超过2亿辆。按当前汽车燃油经济性水平估计, 车用燃油年消耗量将突破4亿吨。因此, 如何有效提高能源利用率、降低能源消耗、减少尾气排放是国家和行业所面临的一大挑战。一方面, 汽车轻量化和电动化是降低车辆能源消耗的方向; 另一方面, 经济性行驶优化通过改善车辆行驶轨迹并结合整车能量优化, 能够有效降低汽车能源消耗。当车辆通过特定路段时, 不同的驾驶策略对应不同的燃油消耗, 通过一定的优化策略对车辆驾驶进行决策和综合优化, 可以达到降低能耗的目的。

目前以提高能效为目的的车辆行驶优化在车辆上的应用主要为启发式指导。通过驾驶辅助系统, 提供驾驶员经济性行驶的必要信息与指导, 包括预测交通流、减少制动、提前换挡以及在短时停车时关闭发动机等。车载行驶优化辅助方式按照对驾驶员的指导时间分成3类^[2]:

- 行车前辅助系统: 在给驾驶员一般行驶建议之外, 这种驾驶辅助系统集成于导航系统当中, 指导驾驶员以最经济的行驶路径驾驶。

引用格式: 郭露露, 高炳钊, 陈虹. 汽车经济性行驶优化. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 560–570, doi: 10.1360/N112015-00290

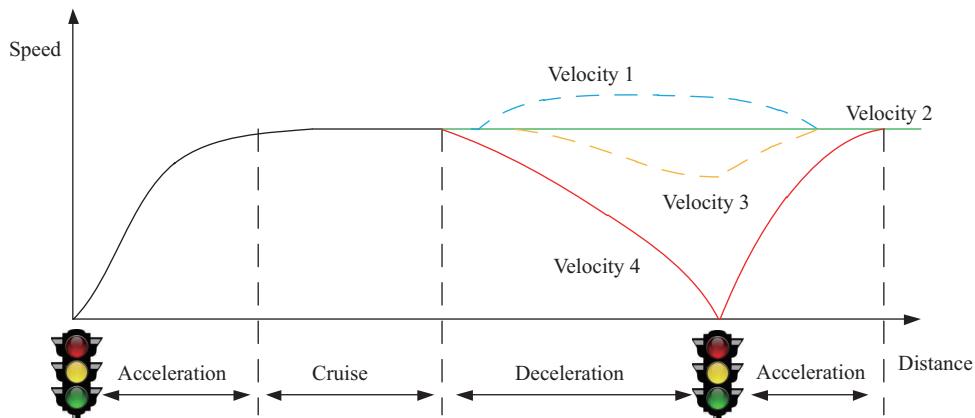
图 1 (网络版彩图) 车辆接近十字路口时的不同轨迹^[4]

Figure 1 (Color online) Time-space diagram representing different vehicle trajectories approaching an intersection [4]

- 在线行驶辅助系统: 在线行驶辅助系统是先进驾驶辅助系统 (ADRS) 的扩展, 一般分成 3 类: 在线评估系统、在线提示系统和预测巡航控制器。在线评估系统通过对驾驶员的实际操作和当前车辆的性能状况进行在线经济性评估, 给出驾驶员反馈信息; 在线提示系统通过对前方道路信息和交通事件进行预测性优化, 实时提供给驾驶员最优操作建议; 而预测巡航控制器则应用在自动驾驶当中, 此时车辆完全自主驾驶 [3].

- 行车后评估系统: 在行车后, 该系统对过去一段时间的行驶数据进行分析, 给出驾驶员节油数据, 以进一步提高驾驶员对于经济性行驶的积极性¹⁾.

目前车辆行驶优化策略主要以经验规则为基础, 通过道路实车实验的方法总结、分析得到车辆经济型操控策略。在不考虑怠速情况下, 车辆行驶过程一般分为加速、巡航和减速阶段, 如图 1 所示。按照驾驶经验, 忽略前车、换道等其他情况时, 车辆在经济性行驶时应当减少制动, 增加滑行距离, 在信号灯信息可以获取时, 通过提前进入滑行阶段以避免制动; 当车辆在加速过程中轻踩油门、平稳加速; 当车辆处于巡航阶段时, 通过适当放宽前后车间距约束, 在保证安全的前提下适当减少制动频次以减少能耗。经验型驾驶策略来源于实车实验总结, 对驾驶员的指导主要以经济性驾驶原则指导为主, 具有良好的可操作性。

以经验规则为基础的启发式策略没有考虑车辆动态特性, 多数是以辅助提示为主的指导原则, 因此从最优的角度来看经验型策略不具有最优性。理论型最优行驶驾驶策略是指基于车辆的物理模型(含纵向动力学模型及发动机模型)通过理论计算的方法求解出经济性行驶策略^[5], 逐渐引起了人们的关注。本文根据前期研究和论文调研介绍了理论型车辆行驶优化及其相关辅助技术的发展历程、技术现状, 并对大多数策略研究的主要工作进行回顾。对未来智能交通系统下的车辆行驶优化进行简要的概述。

2 车辆经济性行驶优化及其相关技术的研究现状

车辆经济性行驶优化一般基于车辆当前状况及道路信息对车辆在未来一段时间的优化, 通过合理匹配车辆运动与道路条件、交通状态、车辆性能之间的关系, 在满足出行的前提下达到节能减排的目

1) Fiat. Fiat eco: Drive. <http://fiat.com/ecodrive/>. 2012.

的。根据信息获取程度的不同,下面从3个方面对经济性行驶优化进行介绍:不考虑道路和交通信息的单车行驶优化、考虑道路和交通信息的单车行驶优化及基于车-车、车-路通信的多车行驶优化。

2.1 不考虑道路和交通信息的单车行驶优化

目前实际应用于汽车上的行驶优化系统多数为没有考虑道路和交通信息的单车优化系统。主要集中于改善发动机工作点、挡位在线优化以及驾驶员油门和制动踏板操作合理化等^[6~8]。

对于混合动力汽车,动力源和结构的改变给车辆行驶优化带来能量管理的问题。混合动力汽车能量管理系统(energy management system)根据驾驶员的操作,在满足车辆动力性能的前提下实现车载多能量源的最优分配,提高车辆的燃油经济性和排放性能^[9~12]。汽车工作模式的优化管理核心在于发动机和电动机工作转矩的分配,同时考虑变速器的挡位优化。通常情况下,混合动力汽车能量管理系统对转矩分配和挡位同时进行优化,目前有很多文献对此有了深入的研究^[13~15]。

智能巡航系统(intelligent cruise control system)是20世纪70年代末提出的一种新型汽车智能驾驶系统,该系统利用雷达探测主车与目标车辆间的相对速度、相对距离、相对方位角等信息,并将其传递给主控ECU。ECU由此判断主车行驶状况以及与目标车辆间的相对运动关系和位置关系,调节主车的行驶速度,从而使得两车保持安全距离,并在前方交通状况良好时自动以设定车速巡航。该系统能降低62%^[16]追尾碰撞事故,且在无事故发生时能大大降低驾驶员劳动强度,也被称为自适应巡航控制系统(ACC)^[17]。但是这种巡航技术主要针对驾驶舒适性和行驶安全性,没有考虑车辆行驶的经济性。随着对车辆燃油经济性要求的提高,基于经济性的巡航控制方法逐渐被提出。文献[18]基于车辆行驶经济性,在自适应巡航控制过程中研究车辆加速过程的经济性策略,通过建立装备无级变速器(continuously variable transmission, CVT)和汽油发动机的车辆解析模型,构建出以发动机油耗为性能指标的最优控制问题。结果显示,当车辆平均巡航速度较低或较高时,应采取匀速行驶策略;当平均巡航速度为中速时,“加速-滑行”策略更为经济,相对匀速巡航策略,采用这种巡航策略最大可节油13%。

综上所述,不考虑车辆外界信息的车辆行驶优化主要考虑车辆自身的动力学特性,在满足驾驶员需求的前提下优化车辆自身行驶状态,以降低车辆能源消耗。

2.2 考虑道路和交通信息的单车行驶优化

随着交通信息在车辆行驶优化系统的应用,车辆通过获取交通信息,结合车辆动力学及经济性能要求,可以实现车辆行驶轨迹和挡位的优化^[19, 20]。文献[21~25]通过使用道路标志、信号以及交通流的信息,对城市工况下的车辆行驶轨迹进行了优化,结果显示,这些道路、交通信息对于车辆最优行驶轨迹有很大的影响。

预测能量管理(predictive energy management)是以混合动力汽车能量管理为基础,参考道路与交通信息而形成的新的能量管理策略。全球定位系统(global positioning system, GPS)及地理信息系统(geographic information system, GIS)在车辆上的应用,使得预测能量管理系统获取前方交通流、道路坡度、路段长度、限速等信息^[26],通过发动机/电机的转矩或功率分配以及挡位的配合,提高车辆的燃油经济性^[27~29]。

预测巡航控制系统(predictive cruise control system)通过获取交通灯信息,适当放宽巡航速度的跟踪要求,以减少车辆在交通路口的停车时间^[30, 31]。如图2所示。在满足车间距的安全要求前提下,可以适当提高行驶速度,使车辆到达路口时,可以顺利通过路口;相反,在满足车间距的安全要求前提

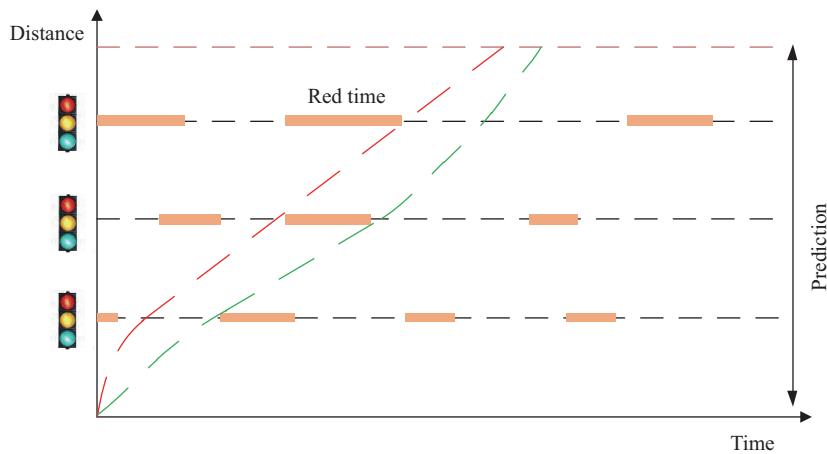


图 2 (网络版彩图) 红灯时空分布示意图, 车辆不停车连续通过交通路口

Figure 2 (Color online) Schematics map of red lights distributed over space-time. The graphic shows how a car passes two consecutive traffic intersection without having to stop at a red

下, 车辆可以适当减少车速以降低刹车率, 适当增加滑行距离, 使车辆到达路口时停车。结果显示, 这种巡航控制策略在满足行驶安全的前提下, 可以减少车辆制动距离并能够减少车辆的停车时间, 达到减低能耗的目的。文献 [32] 对电动汽车进行在线轨迹规划, 车辆在相邻的两个路口之间行驶时, 以电动汽车电能的消耗为性能指标, 电动机的驱动力和整车制动力为控制变量, 把电动汽车轨迹规划整理为一个最优控制问题。当车辆在两个路口之间行驶时, 行驶过程被划分为加速、滑行、再生制动、混合制动等多个阶段, 求解出显式最优电动机转矩的解。结果显示, 通过最大程度上使用电动汽车制动能回收, 车辆的能效得到提高。

2.3 基于车 – 车、车 – 路通信的多车行驶优化

车联网和地理信息系统在汽车以及交通系统中的充分应用, 使车辆不再是交通系统中的单独个体, 而是与外界车辆和基础设施有着信息联系的具有高度自动化的行驶工具。此时, 车辆行驶优化从单个车辆轨迹和能量优化逐渐扩展到多车行驶优化。

协调自适应巡航控制 (cooperative adaptive cruise control) 是在自适应巡航控制的基础上, 通过车辆间的无线通信, 交换车辆的位置和速度信息, 实现车辆之间的协调行驶优化^[33,34]。协调自适应巡航控制使得车辆行驶之间具有高度的统一性, 目前在汽车编队控制中得到了广泛的应用。文献 [5,35,36] 对协调自适应巡航控制进行了仿真研究, 假设通信时间延迟可以忽略, 在列队中的每一辆车可以同时得到行驶指令, 结果显示, 在协调自适应巡航控制下, 道路通行率得到提高。

3 经济性行驶优化的问题构建与求解

综上所述, 车辆行驶优化技术主要针对车辆行驶经济性, 一般以车辆在未来一段时间的驱动力或驱动转矩为控制变量, 适当简化车辆动力学模型, 把轨迹规划整合成一个典型的最优控制问题进行求解。此外, 城市交通系统本身具有随机性、时变性等特点, 因此在实际应用当中还需考虑随机交通流信息的影响, 而随机优化问题将发挥重要的作用。本文主要针对理论型行驶优化策略 (请参考文献 [30] 中的图 1), 车载优化系统通过获取前方交通信号、道路坡度、前车行驶状态、车辆动态等信息, 建立车

辆最优控制模型并实时计算最优行驶轨迹以控制车辆。由于可以实时滚动获取信息, 因此可以一定程度上缓解随机性带来的影响。下面将对行驶优化的最优控制问题构建及求解进行详细的阐述。

3.1 经济性行驶优化的最优控制问题构建

车辆经济性行驶优化一般是以某一路段为优化范围进行构建最优控制问题, 设车辆的燃油消耗率为 $G_{\text{fuel}}(x, u, t)$, 构建如下最优控制问题:

$$\begin{aligned} \min J &= \int G_{\text{fuel}}(x, u, t) dt, \\ \text{s.t.} \quad &\dot{x} = f(x, u, t), \\ &C(x, u, t) \leq 0, \\ &\phi(x_0, x_f) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $f(x, u, t)$ 为车辆的动力学模型; x 为状态变量, u 为控制变量; $C(x, u, t)$ 为约束; $\phi(x_0, x_f)$ 为初始末端状态约束。下面分别从性能指标、状态方程和约束 3 个方面进行详细阐述。

车辆经济性行驶优化以燃油消耗为性能指标, 根据控制变量的选取不同其表达形式也不同。当选取控制变量为驱动/制动力而不考虑车辆挡位的优化时, 以瞬时功率为性能指标。对任何车辆传动系统, 车辆驱动功率满足关系:

$$P_{\text{dem}}(t) = F_w(t)v(t), \quad (2)$$

其中 $v(t)$ 为车速, $F_w(t)$ 为牵引力。该性能指标模型简洁, 进行优化控制问题求解时不需考虑车辆内部动力学尤其是挡位的影响, 方便求解; 但是精度不高, 无法直接反应车辆的实际燃油消耗。功率型性能指标一般用于车辆上层行驶优化, 在实际应用当中, 还需车辆传动、发动机等底层控制进行配合, 以进一步提高燃油经济性。当考虑车辆内部动力学时, 一般选取发动机转矩和挡位为控制变量, 此时发动机的工作点和车辆行驶状态建立起直接的联系, 因此车辆燃油消耗可以直接选取发动机燃油消耗量。为解析化性能指标, 将发动机万有特性进行拟合, 考虑到发动机万有特性图为静态特性, 因此在实际求解时需要加入发动机动态特性。一般情况下, 车辆行驶优化的目标函数还会包括参考平均速度和加速度等因素, 即需要满足驾驶员对于车辆行驶平均速度的要求、车辆行驶舒适性等^[37~40]。值得注意的是, 对于混合动力汽车和电动汽车, 车辆行驶优化问题的性能指标还需考虑能量回收、电池电量等因素。

车辆行驶优化一般选取车速 $v(t)$ 为状态变量, 当考虑道路坡度对于行驶优化的影响时, 还需要加入位移 $s(t)$ 为状态变量。在车辆上层轨迹规划当中, 不考虑车辆高阶动态特性、机械间隙和扭转变形等因素时, 车辆动力学方程一般表达为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= v(t), \\ M\ddot{v}(t) &= F_w(t) - F_b(t) - F_{\text{res}}(s(t), t), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, M 为整车质量 (考虑整车旋转质量换算系数), $F_b(t)$ 为制动力, $F_{\text{res}}(s(t), t)$ 为车辆行驶需克服的阻力, 包括滚动阻力、空气阻力和坡道阻力。注意, 假设前方道路信息和位置关系为已知, 坡道阻力为行驶位移的函数。对准确度要求较高的工况, 如单一车辆的油耗最优加速过程, 则必须考虑发动机和动力系典型动力学特性的影响。对于混合动力汽车或纯电动汽车, 电池电量 SOC 也作为一个状态变量。一般车辆行驶优化采用简化的电池电量模型^[41~43]:

$$I = (V_{\text{oc}} - \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4R_{\text{int}}P_{\text{bat}}})/2R_{\text{int}},$$

$$\dot{SOC} = I/Q_{max}, \quad (4)$$

其中, I 为回路电流, V_{oc} 为电池电压, R_{int} 为电池内阻, P_{bat} 为蓄电池输出功率, Q_{max} 为电池容量. 当电池工作在充电模式时, 电池的输出端功率为负值, 则根据上式可知, 此时电池电流为负值. 值得指出的是, 电池的电压和内阻在充放电时为不同的值, 且电池的电压和内阻会随着电池电量而变化.

车辆行驶优化约束集合主要来自车辆自身的性能约束和道路、交通等的外部约束, 车辆自身约束主要为发动机、传动和制动等物理意义上的限制. 而道路约束主要为前后车间距、交通灯、限速以及换道等问题^[4]. 在行驶优化当中, 约束的建立对于行驶优化的结果有至关重要的影响. 对于混合动力汽车和电动汽车, 还需考虑电池等由于电支路的引入所带来的问题, 如电池健康管理、制动能量回收等. 由上可知, 车辆行驶优化是一个复杂的非线性优化问题, 而车辆控制的快速性的要求又为求解增加了难度.

3.2 经济性行驶优化的最优控制问题求解

车辆行驶优化问题由于其性能指标和状态方程的非线性特征, 加上约束随着实时行驶环境而不断变化, 车辆行驶优化问题求解难度较大. 目前求解此类问题的主要方法分为几类: (1) 传统最优控制方法, 如变分法和极大值原理等; (2) 全局优化算法, 如动态规划法等; (3) 实时最优控制算法, 如模型预测控制等高级算法.

传统优化算法如极大值原理对于问题的复杂度要求较高, 一般适用于低维、结构简单的问题. 在车辆行驶优化中, 通过采用功率需求型性能指标, 整车驱动力和制动力为控制变量, 忽略车辆内部动力学的影响, 构建相对简单的车辆行驶优化的控制问题. 文献 [32] 采用极大值原理对纯电动汽车进行行驶优化, 通过简化车辆模型, 忽略车辆挡位的变化, 求解出驱动力和制动力的最优解. 结果显示, 通过此种方法可减少 14% 的电能消耗. 极大值原理作为典型的最优控制问题求解方法, 在求解过程当中, 通过与技术处理的结合, 可以大幅减少在线运算时间, 也为车辆行驶优化的在线应用提供了条件.

对于复杂的行驶优化控制问题, 动态规划是求解最优解的有效工具^[44, 45]. 动态规划算法将多阶段过程优化问题转化为一系列单步问题, 利用各步间的关系逐步递推求解, 具有广泛的适用性. 但是在实时优化控制当中, 动态规划算法的应用也受到计算时间的限制, 通过该方法求解实际最优问题时, 可以通过降低维数的方式减少计算时间.

实时最优控制算法如模型预测控制, 能够实时根据车辆行驶环境的变化而改变控制策略. 模型预测控制, 又称为滚动时域控制, 是近年来被广泛讨论的一种反馈控制策略. 模型预测控制的机理可以描述为: 在每一采样时刻, 根据获得的当前测量信息, 在线求解一个有限时域开环优化问题, 并将得到的控制序列的第一个元素作用于被控对象. 在下一个采样时刻, 重复上述过程, 用新的测量值实时更新优化问题并重新求解. 在车辆行驶优化中, 由于车辆行驶环境不断变化, 根据行驶条件实时更新控制作用具有一定必要性. 因此, 近年来模型预测控制被广泛应用于车辆行驶优化当中^[30, 31, 46]. 由于在每一时刻都需要计算出预测时域内的最优控制序列, 考虑行驶优化问题的复杂度, 模型预测控制方法一般作为车辆行驶优化的框架, 和其他求解方法结合使用. 为减少实时计算时间, 文献 [47] 提出基于极小残差法的模型预测控制方法 (C/GMRES), 该方法通过将原始最优控制问题转化为线性方程组, 使用极小残差法进行高效求解, 并逐渐应用到车辆行驶优化当中^[31, 48]. 在离散控制系统当中, 伪谱法通过对数值积分进行合理配点 (如 Gauss-Legendre 配点), 在保证求解精度的同时, 最大程度上降低最优控制问题的求解次数, 并最终将最优控制问题转化为非线性规划问题. 文献 [4] 将该方法应用于经济性驾驶策略的求解当中, 并明显降低求解时间. 值得指出的是, 在车辆行驶优化时, 考虑车辆对于在线优

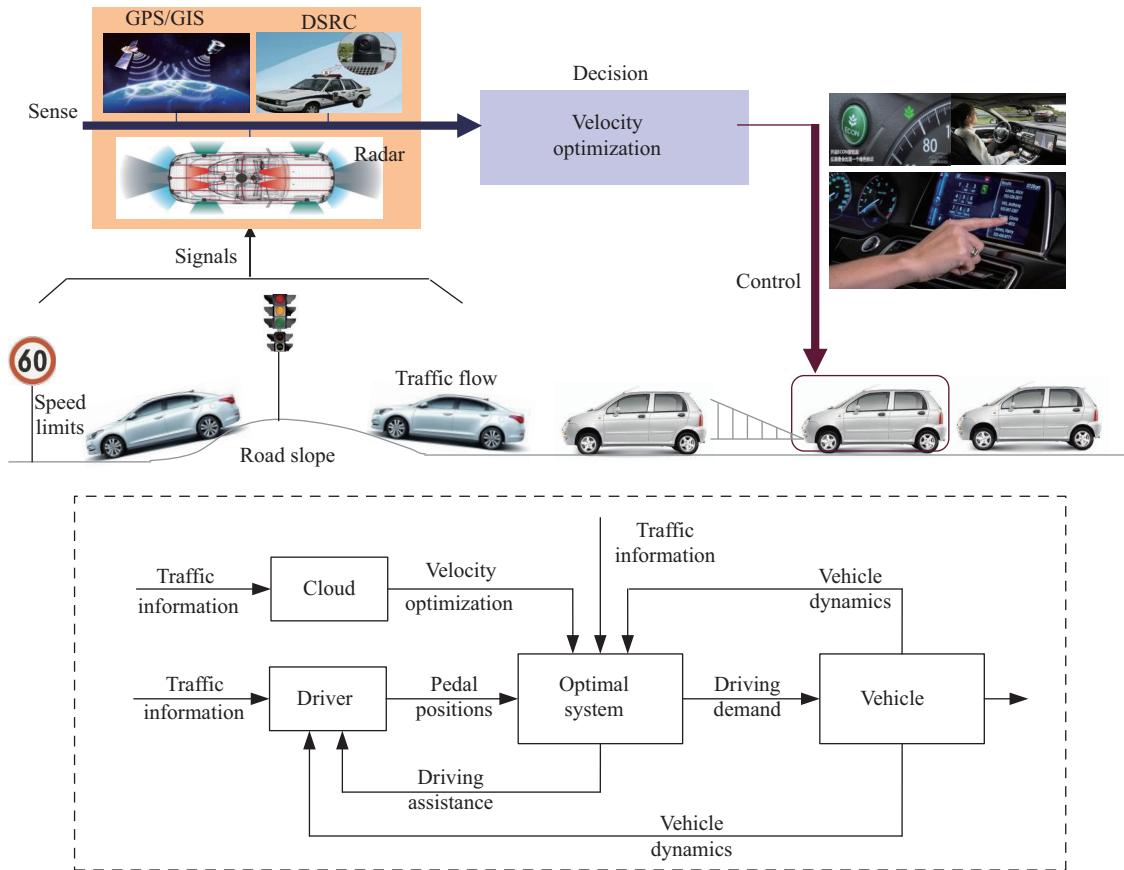


图 3 (网络版彩图) 车辆行驶优化控制框图
Figure 3 (Color online) Control block diagram for velocity optimization

化计算时间的要求, 可以通过技术性的手段对求解方法进行改善, 在实际工程应用当中, 求解次优以降低计算负担已经成为解决此问题的重要思想.

4 未来智能交通系统下车辆行驶优化

智能交通系统 (ITS) 是通信、信息和控制技术在交通系统中集成应用的产物. 智能交通是指将先进的信息技术、通信技术、电控技术及计算机处理技术等综合运用于交通运输管理体系, 通过对交通信息的实时采集、传输和处理, 借助各种科技手段和设备. 建立起一种实时、准确、高效的综合运输管理系统, 使交通运输服务和管理智能化, 实现交通运输的集约式发展 [49, 50]. 智能交通作为未来城市交通的主要发展趋势, 受到世界各国的重视. 而美国、欧洲、日本等世界主要发达国家在智能交通技术领域进行了大量的前期研究工作并取得了一系列成果, 如美国交通部的智能驾驶项目、欧洲的 eSafety 计划, 日本 CVIS 项目和 Smart Way 计划等.

交通系统的智能化和车辆行驶的自动化与智能化为车辆行驶优化提供了更大的发展空间. 在智能交通系统下, 依托高速通信设施和统一的通信协议, 车辆行驶优化不再是单个车辆的轨迹规划, 而是形成了以人 - 车、车 - 车、车 - 路为基础的高层系统优化. 此时以单一车载控制系统为核心的计算单元已不满足大数据优化的要求, 因此基于云端优化的行驶优化逐渐受到人们的关注. 文献 [51, 52]

对于未来智能交通系统下的车辆行驶优化提出构想，云端基于车辆动态特性和获取的车–车、车–路等大数据，对数据进行分析，实时优化车辆行驶轨迹，通过高速网络通信，实时控制车辆。由于以单一云端计算为核心的行驶优化系统对数据传输要求较高，基于云端的轨迹规划一般很难考虑车辆内部动力学影响，因此基于云端–车载行驶优化控制系统具有更高的可行性，其主要架构如图 3 所示。在智能交通系统下，实时获取交通流等交通信息，通过云端计算对车辆运动轨迹进行规划，采用辅助驾驶等手段提示驾驶员合理操作以提高整车经济性能。在此基础上，车载优化系统参考云端计算结果，根据车辆动态特性及车辆周边交通信息，考虑发动机和动力系典型动力学特性的影响，在不违背驾驶员意图的情况下，对动力、传动等系统进行整车能效优化以提高经济性。

随着智能交通的不断发展，未来车辆行驶优化将不仅仅考虑车辆行驶的经济性，也将考虑车辆行驶的安全性以及对于整个交通系统通行率的影响。基于无线通信、传感探测等技术进行车一路信息获取，通过车–车、车–路信息交互和共享，实现车辆和基础设施之间智能协同与配合，达到优化利用系统资源、提高道路交通安全、缓解交通拥堵的目标。因此，车辆行驶优化如何对智能交通系统的上层调度进行配合，实现车辆行驶优化与交通系统智能化的整合与提升，是当前研究的技术热点之一^[53, 54]。

5 结语

汽车经济性行驶优化作为汽车智能化的产物，有良好的发展前景，但是该技术尤其是与智能交通融合的行驶优化系统的真正实现还面临着一系列的挑战：首先，车辆行驶优化理论需要进一步完善。车辆内部动力具有高度非线性特性，尤其是考虑车辆的换挡过程及发动机动态特性时，行驶优化的最优控制问题往往具有高度的复杂性，而现有的控制求解算法和硬件均不满足高效、实时的要求。同时，汽车在行驶优化当中首先应当满足安全性的要求，在复杂的交通工况下如考虑行人、前车等因素下，车辆行驶优化的潜力受到很大制约。其次，当前交通环境条件以及现有的通信技术还不满足车辆行驶优化的高速、实时要求，因此，车辆行驶优化已经不仅仅是汽车本身优化的问题，更是交通、通信、电子等多个行业的综合作用的结果。所以，要真正使车辆行驶优化从理论走向工程，还需要各个行业之间的相互支撑。最后，在汽车驾驶从完全依靠驾驶员到汽车自动驾驶的发展过程中，必然会存在人–车协同问题。当前车辆行驶优化系统主要基于语音辅助方式，因此只能依靠驾驶员的经济性驾驶自觉性达到节油效果。所以如何完善车辆行驶优化系统以有效引导驾驶员进行合理操作也是一个研究热点。

参考文献

- 1 Williamson S S. Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. New York: Springer, 2013
- 2 Seewald P, Josten J, Zlocki A, et al. User acceptance evaluation approach of energy efficient driver assistance systems. In: Proceedings of the 9th ITS European Congress, Dublin, 2013. 1–8
- 3 Roth M, Radke T, Lederer M, et al. Porsche InnoDrive — an innovative approach for the future of driving. In: Proceedings of the 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, 2011
- 4 Xia H. Eco-approach and departure techniques for connected vehicles at signalized traffic intersections. Dissertation for Ph.D. Degree. Riverside: University of California, Riverside, 2014
- 5 Li S B, Xu S B, Wang W J, et al. Overview of ecological driving technology and application for ground vehicles. J Automot Safety Energy, 2014, 5: 121–131 [李升波, 徐少兵, 王文军, 等. 汽车经济性驾驶技术及应用概述. 汽车安全与节能学报, 2014, 5: 121–131]
- 6 Qin H, Long S X, Yu K. Simulation research on the shift schedule in the auto with automated manual transmission based on cruise gear shift program. Advanced Mater Res, 2013, 712: 2160–2163

- 7 Hofman T, Dai C H. Energy efficiency analysis and comparison of transmission technologies for an electric vehicle. In: Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, 2010. 1–6
- 8 Mashadi B, Kazemkhani A, Lakeh R B. An automatic gear-shifting strategy for manual transmissions. Proc Inst Mech Eng Part I: J Syst Control Eng, 2007, 221: 757–768
- 9 Moreno J, Ortúzar M E, Dixon J W. Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks. IEEE Trans Industrial Electron, 2006, 53: 614–623
- 10 Bertness K I. Energy management system for automotive vehicle. US Patent, 6 909 287, 2005-6-21
- 11 Thounthong P, Rael S, Davat B. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. J Power Sour, 2009, 193: 376–385
- 12 Yan F, Wang J, Huang K. Hybrid electric vehicle model predictive control torque-split strategy incorporating engine transient characteristics. IEEE Trans Veh Tech, 2012, 61: 2458–2467
- 13 van Reeën V, Hofman T, Huisman R, et al. Extending energy management in hybrid electric vehicles with explicit control of gear shifting and start-stop. In: Proceedings of American Control Conference (ACC), Montreal, 2012. 521–526
- 14 Khodabakhshian M, Feng L, Wikander J. Optimization of gear shifting and torque split for improved fuel efficiency and drivability of HEVs. SAE Tech Paper, 2013, 2: 2013-01-1461-p
- 15 Montazeri-Gh M, Asadi M. Optimisation of AMT gear shifting strategy in hybrid electric vehicles. Int J Veh Auton Syst, 2009, 7: 1–17
- 16 Fancher P, Ervin R, Bogard S. A field operational test of adaptive cruise control system operability in naturalistic use. SAE Tech Paper, doi: 10.4271/980852, 1998
- 17 何玮. 汽车智能巡航技术发展综述. 北京汽车, 2006, 3: 36–39
- 18 Xu S B, Li S B, Cheng B. Optimization for economical cruising strategy of continuously variable transmission vehicle using pseudo-spectral method. Control Theory Appl, 2014, 6: 693–700 [徐少兵, 李升波, 成波. 无级变速器车辆经济性巡航策略的伪谱法优化. 控制理论与应用, 2014, 6: 693–700]
- 19 Santicioli F M, Costa E S, Eckert J J, et al. Gear shifting optimization strategy for Brazilian vehicles and traffic. In: Proceedings of the 22th International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirao Preto, 2013. 5912–5920
- 20 Casavola A, Prodi G, Rocca G. Efficient gear shifting strategies for green driving policies. In: Proceedings of American Control Conference (ACC), Baltimore, 2010. 4331–4336
- 21 Saerens B. Optimal control based eco-driving. Dissertation for Ph.D. Degree. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2012
- 22 Kim T S, Manzie C, Sharma R. Two-stage optimal control of a parallel hybrid vehicle with traffic preview. In: Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milano, 2011. 2115–2120
- 23 Dib W, Chasse A, Di Domenico D, et al. Evaluation of the energy efficiency of a fleet of electric vehicle for eco-driving application. Oil Gas Sci Tech Revue d'IFP Energies Nouvelles, 2012, 67: 589–599
- 24 Radke T. Energieoptimale Langsführung Von Kraftfahrzeugen Durch Einsatz Vorausschauender Fahrstrategien. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013
- 25 Boehme T J, Held F, Rollinger C, et al. Application of an optimal control problem to a trip-based energy management for electric vehicles. SAE Tech Paper, 2013, 2: 115–126
- 26 Lee S H, Walters S D, Howlett R J. Intelligent GPS-based vehicle control for improved fuel consumption and reduced emissions. In: Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. Berlin: Springer, 2008. 701–708
- 27 Salman M A, Chen J S, Chang M F. Predictive energy management system for hybrid electric vehicles. US Patent, 7 360 615, 2008-4-22
- 28 Borhan H A, Vahidi A, Phillips A M, et al. Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle. In: Proceedings of American Control Conference, St. Louis, 2009. 3970–3976
- 29 Hwang C H, Wu A C H. A predictive system shutdown method for energy saving of event-driven computation. ACM Trans Design Automat Electron Syst, 2000, 5: 226–241
- 30 Asadi B, Vahidi A. Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. IEEE Trans Control Syst Tech, 2011, 19: 707–714
- 31 Kamal M, Samad A, Mukai M, et al. Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy. IEEE Trans Control Syst Tech, 2013, 21: 831–841

- 32 Dib W, Chasse A, Moulin P, et al. Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications. *Control Eng Pract*, 2014, 29: 299–307
- 33 Naus G, Vugts R, Ploeg J, et al. Cooperative adaptive cruise control. In: Proceedings of IEEE Automotive Engineering Symposium, Eindhoven, 2009. 1
- 34 de Bruin D, Kroon J, van Klaveren R, et al. Design and test of a cooperative adaptive cruise control system. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma, 2004. 392–396
- 35 van Arem B, van Driel C J G, Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Trans Intell Transport Syst*, 2006, 7: 429–436
- 36 Schakel W J, van Arem B, Netten B D. Effects of cooperative adaptive cruise control on traffic flow stability. In: Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Funchal, 2010. 759–764
- 37 Lattemann F, Neiss K, Terwen S, et al. The predictive cruise control — a system to reduce fuel consumption of heavy duty trucks. *SAE Tech Paper*, 2004, 113: 139–146
- 38 Heppeler G, Sonntag M, Sawodny O. Fuel efficiency analysis for simultaneous optimization of the velocity trajectory and the energy management in hybrid electric vehicles. In: Proceedings of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Cape Town, 2014. 6612–6617
- 39 Hellstrom E, Ivarsson M, Aslund J, et al. Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Eng Prac*, 2009, 17: 245–254
- 40 Passenberg B, Kock P, Stursberg O. Combined time and fuel optimal driving of trucks based on a hybrid model. In: Proceedings of European Control Conference (ECC), Budapest, 2009. 4955–4960
- 41 Adhikari S. Real-time power management of parallel full hybrid electric vehicles. Dissertation for Ph.D. Degree. Melbourne: University of Melbourne, 2011
- 42 Sastry A M, Albano F, Wang C W, et al. Electric vehicle propulsion system and method utilizing solid-state rechargeable electrochemical cells. US Patent, 8 492 023, 2013-7-23
- 43 Guzzella L, Sciarretta A. Vehicle Propulsion Systems. 3nd ed. Berlin: Springer, 2013
- 44 Dib W, Serrao L, Sciarretta A. Optimal control to minimize trip time and energy consumption in electric vehicles. In: Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, 2011. 1–8
- 45 Miyatake M, Kuriyama M, Takeda Y. Theoretical study on eco-driving technique for an electric vehicle considering traffic signals. In: Proceedings of IEEE 9th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Singapore, 2011. 733–738
- 46 Sun C, Hu X, Moura S J, et al. Velocity predictors for predictive energy management in hybrid electric vehicles. *IEEE Trans Control Syst Tech*, 2015, 23: 1197–1204
- 47 Ohtsuka T. A continuation/GMRES method for fast computation of nonlinear receding horizon control. *Automatica*, 2004, 40: 563–574
- 48 Yu K, Yang J. Performance of a nonlinear real-time optimal control system for HEVs/PHEVs during car following. *J Appl Math*, 2014, 2014: 879232
- 49 Qureshi K N, Abdullah A H. A survey on intelligent transportation systems. *Middle-East J Sci Res*, 2013, 15: 629–642
- 50 Ruan S S, Gao H. Study of ITS development status and strategy. *Automobile Parts*, 2014, 11: 44–45 [阮帅帅, 高华. ITS发展现状及对策研究. 汽车零部件, 2014, 11: 44–45]
- 51 Li Z, Kolmanovsky I, Atkins E, et al. Cloud aided safety-based route planning. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), San Diego, 2014. 2495–2500
- 52 Li Z, Kolmanovsky I, Atkins E, et al. Cloud aided semi-active suspension control. In: Proceedings of IEEE Symposium on Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems (CIVTS), Orlando, 2014. 76–83
- 53 Wang G F, Song P F, Zhang Y L. Review on development status and future of intelligent transportation system. *Highway*, 2012, 5: 217–222 [王国锋, 宋鹏飞, 张蕴灵. 智能交通系统发展与展望. 公路, 2012, 5: 217–222]
- 54 Li Q Q, Xiong W, Li Y G. System architecture and enabling technologies of intelligent roadway system. *J Transport Syst Eng Inf Tech*, 2007, 8: 40–48 [李清泉, 熊炜, 李宇光. 智能道路系统的体系框架及其关键技术研究. 交通运输系统工程与信息, 2007, 8: 40–48]

Optimal ecodriving control of vehicles

Lulu GUO^{1,2}, Bingzhao GAO¹ & Hong CHEN^{1,2*}

1 State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;

2 Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

*E-mail: chenh@jlu.edu.cn

Abstract Optimal ecodriving is considered an efficient approach to reduce fuel consumption of vehicles by optimizing velocity and implementing energy management. Essentially, the idea is that there are different routes to choose from to complete a specific journey, which are not equivalent from an energy point of view. The objective is to find the optimal one with the highest energy efficiency. This paper summarizes optimal ecodriving and related technologies, including history, state of the art, and major strategies. Furthermore, the optimal ecodriving intelligent transportation system is mentioned, as well as its direction of development and theoretical challenges.

Keywords optimal ecodriving, driving assistance, intelligent transportation system, fuel economy



Lulu GUO received his B.S. degree from Jilin University, Changchun, China in 2014, where he is currently working toward his Ph.D. degree in Control Theory and Engineering. His current research interests include advanced vehicle powertrain control and energy management of HEVs.



Bingzhao GAO received his B.S. and M.S. degrees from Jilin University of Technology, China in 1998 and Jilin University, China in 2002, respectively. He earned his Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Yokohama National University, Japan, and Control Engineering from Jilin University, China in 2009. He is currently a professor at Jilin University. His research interests include vehicle powertrain control and vehicle stability control.



Hong CHEN received her B.S. and M.S. degrees in Process Control from Zhejiang University, Zhejiang, China in 1983 and 1986, respectively. In 1997, she received her Ph.D. degree in System Dynamics and Control Engineering from the University of Stuttgart, Stuttgart, Germany. Since 1999, she has been a professor at Jilin University, Changchun, China, where she currently serves as a "Tang Aoqing Professor" and director of the State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control. Her current research interests include model predictive control, optimal and robust control, nonlinear control, and applications in mechatronics focusing on automotive systems.