

汽车经济性驾驶技术及应用概述

李升波, 徐少兵, 王文军, 成 波*

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084, 中国)

摘 要: 汽车经济性驾驶是道路交通节能减排的重要方向。该技术以驾驶人与车辆 / 道路 / 交通流的优化与协调为核心, 通过重塑驾驶员习惯、辅助驾驶员操作以及车辆自动化控制等手段, 满足出行需求的同时降低行驶过程的油耗。该文综述了汽车经济性驾驶技术的发展历史、技术现状与理论难点; 介绍了节油驾驶策略的实验型和理论型辨识方法。其应用可分为 3 类: 易于实施、适合政府层面推动的驾驶员教育; 最具产品化前景、值得业界关注的节油驾驶辅助; 将是经济性驾驶技术的理想载体的自动驾驶。

关键词: 汽车工程; 经济性驾驶; 驾驶员辅助; 燃油经济性

中图分类号: U 471.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2014.02.002

Overview of ecological driving technology and application for ground vehicles

LI Shengbo, XU Shaobing, WANG Wenjun, CHENG Bo*

(State Key Lab of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The ecological driving technology of ground vehicles is critical for energy-sustainable road transportation. This technology, centered on the optimization and the coordination of driver, vehicle, road infrastructure and traffic flow, aims to reduce the fuel consumption of vehicles in travelling by reshaping drivers' habits, assisting driving manipulation and implementing vehicular automation, etc. This paper summarizes the key aspects of vehicular eco-driving technology, including its history, the state of arts and the theoretical challenges. Two major identification methods of the eco-driving strategies are reviewed, i.e. the experiment based method and the optimization based method. The applications can be classified into the eco-driving education, the eco-driving assistance, and the eco-vehicular automation. The first item is easy to be implemented and suitable for government promotion; the second item has most promising market prospect; and the last item will become proper carrier for eco-driving technology with the popularity of vehicular automation.

Key words: vehicle engineering; ecological driving; driving assistance; fuel economy

收稿日期 / Received: 2014-04-01

基金项目 / Supported by: 国家自然科学基金资助项目 (51205228); 清华大学自主科研计划 (2012THZ0)

第一作者 / First author: 李升波 (1982—), 男 (汉), 山东, 助理研究员。E-mail: lishbo@tsinghua.edu.cn

* 通信作者 / Corresponding author: 成波 (1962—), 男 (汉), 江苏, 教授。E-mail: chengbo@tsinghua.edu.cn

降低车辆的能源消耗是汽车工业永恒的主题。汽车的行驶油耗不仅与车辆自身的性能相关,而且很大程度上取决于驾驶员操作行为。研究表明:经济性驾驶技术通过改善驾驶员决策以及对油门、挡位、制动的操控,可节约 15% 左右的燃油,已成为汽车节能领域的重要发展方向^[1]。经济性驾驶是道路交通部门进一步节能减排的一个重要技术途径。

本文依托论文调研和前期研究的基础,主要针对与驾驶员对油门、挡位和制动的操作相关的汽车经济性驾驶,及其相关辅助技术的发展历程、技术现状和未来前景进行了分析、评价和总结。

1 经济性驾驶的背景及内涵

自 2000 年以来,中国的汽车工业进入高速发展期。汽车的高速增长直接导致了能源消耗的激增,同时也造成大量有害尾气和颗粒物排放,因此汽车工业正面临着巨大的节能减排压力。2013 年中国汽车产量达 2211 万辆,销量 2198 万辆,相比 2012 年分别提高 10.8% 和 13.9%;同年末,全国民用汽车保有量达到 1.37 亿辆,比上年末增长 13.7%^[2]。2012 年中国石油总消耗约 4.9 亿吨,进口依赖度高达 57.8%,而汽车消耗量约 1.86 亿吨,占总量的 37.8%,比 2005 年增加约 46%^[3]。为此,国务院颁布的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020)》规定:乘用车平均 100 km 油耗到 2015 年须从 2010 年的 7.71 L 降至 6.9 L,到 2020 年进一步降至 5 L。这将有效促进汽车节能、减排技术的发展。

汽车的行驶油耗不仅取决于车辆本体的性能,而且与驾驶员的驾驶方式密切相关。降低车辆行驶油耗的技术可分为 4 类:

- 1) 节能的发动机和整车设计;
- 2) 驾驶员的经济性驾驶;
- 3) 智能化的交通管理;
- 4) 替代能源利用和电动化驱动系。

表 1 为汽车主要节能技术及潜力。由表 1 可知:汽车的经济性驾驶可达到 15% 的节油潜力。国外类似研究也表明经济性驾驶具有的节油潜力可达 10%~15%^[1,4-5],这将为道路交通的节能减排开辟一条新的途径。自 2000 年以来,欧、美、日等国的政府部门、研究机构和汽车企业积极注入资金,资助经济性驾驶技术的研发,例如美国 Intelli-Drive 项目^[6],日本的 Energy-Saving ITS (Intelligent Transportation Systems) 项目^[7]和欧洲的 Eco-Will 项目^[8]。

狭义上说,经济性驾驶仅与驾驶员对油门、挡位和制动的操作相关。它是指在不改变已有车辆动力结

表 1 汽车主要节能技术及潜力

技术		节油潜力 / %
发动机技术	汽油机增压	1.8~4.8
	缸内直喷	10~20
	怠速启停	5~8
	停缸技术	3.9~5.5
节能的发动机和整车设计	多挡化	1.4~3.4
	变速器技术	双离合器
		2.7~7.5
	无级变速器	0.7~2.7
	轻量化	2~8
	小排量乘用车	20
	柴油乘用车	20
	其他	降低空气阻力
		2~3
		低滚阻轮胎
		1~2
经济性驾驶		15
智能化的交通管理(电子收费、导航等)		15
电动化驱动(如混合动力)		10~40

注:《中国汽车节能战略研究》阶段成果报告,北京 2012-11-01。

构的前提下,从改善驾驶人的决策和行为出发(尤其是操作车辆油门、挡位、制动的方式),依托驾驶习惯改进、驾驶操作辅助、“人-车-路”协调等手段,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的。

广义上说,经济性驾驶不仅涉及驾驶员对车辆的操控,也与车辆的保养维护、出行决策等密切相关^[1]。保养维护主要强调如何保持车辆的良好状态,使得发动机(油路、气路、润滑、冷却)、传动系、轮胎等部件保持低摩擦状态,以降低行驶阻力和提高机械效率;出行决策则强调出行需根据交通流特点,选择合适的出行时间和合适的路线,以较低的能耗到达目的地。

本文主要关注狭义上的车辆经济性驾驶技术。

2 经济性驾驶策略

汽车处于良好的状态是节能的先决条件,而具有省油能力的车辆操控策略是经济性驾驶技术的核心。目前,经济性驾驶策略主要来源于两类:经验总结法和理论求解法。所得到的策略不仅同发动机和传动系的特性相关,而且也取决于道路环境和交通流工况。

2.1 车辆的保养与使用

随着车辆运行时间的增加,车辆的易耗易磨部件均会发生变化。出于降低行车油耗的目的,车辆必须

合理保养, 其核心思想是减少车辆的行驶阻力和内部摩擦, 从而降低车辆的油耗^[1,8]。车辆的保养大多有成型的标准, 典型措施包括:

- 1) 提高发动机效率, 如定期更换润滑油、空气滤清器等;
- 2) 降低行驶阻力, 如合理调整轮胎前束, 保持适当胎压等;
- 3) 有助于降低能耗的其他措施, 如驾驶员应合理使用空调、减少不必要载重等。

2.2 经验型驾驶操作策略

经验型驾驶操作策略指通过道路实车实验的方法总结、分析得到的车辆省油型操控策略。车辆在运行过程中主要存在 4 种行驶状态: 怠速、启动/加速、巡航、减速。图 1 是城市工况的不同行驶状态所占能耗比^[9]。由图 1 可知, 启动/加速过程占比最大, 达到 38%; 其次是巡航过程, 约为 35%。这说明城市工况中, 采用经济性的加速和巡航策略对降低能耗具有积极意义。

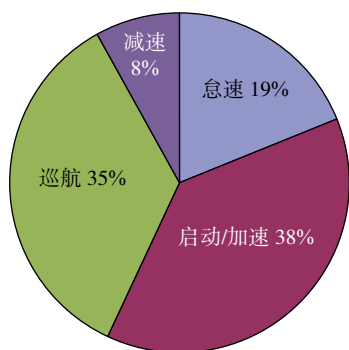


图 1 城市工况车辆各行驶状态的能耗比

不少富有经验的驾驶员对省油型驾驶策略进行了定性总结^[1], 例如:

- 1) 加速过程中, 应轻踩油门踏板, 平稳加速;
- 2) 巡航过程中, 保持合理车距, 避免频繁制动加速; 保持经济车速, 选择合适挡位;
- 3) 怠速过程中, 尽量减少怠速时间;
- 4) 减速过程中, 尽量采用滑行, 减少制动次数。

上述 4 种工况的驾驶策略可归为 2 类机理:

- 1) 避免发动机工作在低效率区域;
- 2) 避免不必要的怠速和制动能耗。

另外, 学者们也通过定量的实验方法研究了车辆的经济性驾驶策略。以对经济性影响最大的加速过程为例, 文献 [10] 对 19 230 份驾驶数据进行因素分析指出: 加速和怠/低速 ($< 2 \text{ m/s}$) 是导致驾驶员油耗差异的

2 个最重要工况, 激进加速 ($> 1.5 \text{ m/s}^2$) 过程对油耗影响的显著性是正常加速过程的 2.5 倍。Vlieger 等人研究了真实交通环境中记录的行车数据, 结果显示: 激进加速和制动会导致油耗提高 30%~40%^[11]。因此, 为降低行车油耗必须避免激进的加速过程, 然而过于温和的加速对节油也不总是有利的。Shawarby 等人^[12]通过对温和、正常、激进 3 个等级的加速过程分析显示: 由于温和加速过程的加速时间长且发动机易工作于低效率区, 当车速从零加速到 100 km/h, 其总燃油消耗是激进加速过程的近 3 倍。Johansson 等人^[13]则认为驾驶员应采取合适的中度加速度, 快速平稳地加速到目标车速, 并尽快切换到高档位。

经验型驾驶策略来源于实车实验总结, 对驾驶员的指导能力强, 但是存在如下不足:

1) 经验型策略不具有最优性。经济性驾驶策略是随着车辆种类 (如柴油车、汽油车、电动车、混合动力车等)、车辆参数 (如排量、载荷等)、外部环境 (如道路、交通状况) 等因素变化的, 对于特定工况不是最佳的, 普适性也差。

2) 经验型策略属于定性描述, 节油机理不清楚。经验型驾驶策略一般以非定量形式表述, 如“缓慢加速”、“提前换挡”等。实际上, 经济性驾驶策略在不同速度、道路和交通条件下是动态变化的, 定性描述的模糊性导致经验型策略难以用于驾驶辅助系统的设计。同时, 经验型策略大多通过统计分析得到, 其节油机理有待进一步清晰化。

3) 经验型策略的获取成本高, 迁移性差。实车实验需要大量的车辆、人员、设备等投入, 同时需反复测试不同的策略, 因此获得策略的成本高。更重要的是由于车辆配置以及设计的差异, 对一款车辆的实验结果往往无法直接迁移至其它车型。

2.3 理论型驾驶操作策略

针对经验型驾驶策略的节油能力弱、模糊性大和实验成本高的缺点, 一些学者提出了“最优节油驾驶策略”概念^[14-18], 期望最大程度地发挥经济性辅助驾驶技术的潜力, 探寻油耗最优的理论型经济性驾驶策略。

理论型节油策略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驾驶策略^[5,18-19]。该类方法相对“实验法”的优势为:

- 1) 策略的辨识成本低, 可避免大量的实车实验;
- 2) 策略存在最优性, 且容易动态地与交通要素相匹配。

一个典型的理论型驾驶策略辨识问题如图 2 所示。

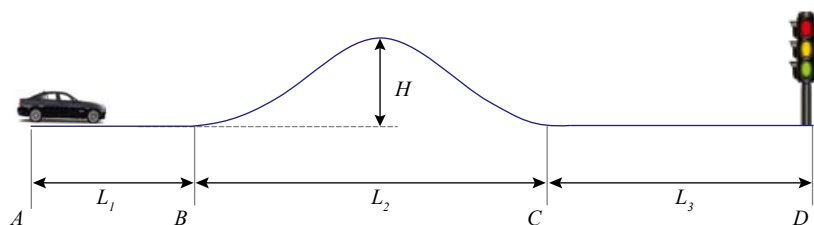


图 2 动态约束下的经济性驾驶问题

图 2 表明: 车辆需从 A 点以最低油耗行驶至 D 点, 且必须避免在 D 点处遇到红灯。一般来说, 动态约束工况的油耗最优操控策略是一个复杂的最优控制问题, 其问题构建和数值求解是核心问题。

目前, 这一研究主要针对一些理想工况, 通常以发动机油耗为性能指标, 以油门踏板开度、变速器挡位、制动压力为控制变量, 建立一个最优控制问题。所构建的问题包含 3 部分:

- 1) 性能指标, 即行驶过程中的总油耗;
- 2) 状态方程, 服从车辆动力学特性;
- 3) 约束集合, 包括道路约束、交通流约束以及车辆性能约束等。

$$\begin{aligned} \min J &= \int G_{\text{fuel}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt, \\ \text{Subject to} \\ \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= f_{\text{vehicle}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \\ \mathbf{C}_{\text{vehicle}}(P_e, T_e, n_e, i_g, P_b, a) &\leq 0, \\ \mathbf{C}_{\text{envir}}(i_{\text{road}}, v_{\text{max}}, t_{\text{light}}, v_f) &\leq 0, \\ \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_f) &= 0. \end{aligned}$$

其中: J 为经济性指标; G_{fuel} 为发动机瞬时喷油率; $f_{\text{vehicle}}(\cdot)$ 为车辆的动力学模型; \mathbf{x} 为状态变量, \mathbf{u} 为控制变量; $\mathbf{C}_{\text{vehicle}}$ 为车辆约束, 包括发动机功率 P_e 、力矩 T_e 、转速 n_e 、变速器速比 i_g 、制动器压力 P_b 、车辆加速度 a 等; $\mathbf{C}_{\text{envir}}$ 为环境约束, 包括: 道路坡度 i_{road} 、限速 v_{max} 、交通灯 t_{light} 、前车速度 v_f 等约束; $\boldsymbol{\varphi}(\cdot)$ 为初始和终端边界。

2.3.1 最优驾驶问题的构建

构建节油驾驶问题的关键是解析化建立性能指标、状态方程和约束集合的数学函数。性能指标为发动机总油耗, 多是瞬时喷油率的时间积分。发动机的瞬时喷油率受多种因素影响, 如油门开度、冷却液温度、进气压力、进气温度、力矩负载等^[20]。由于研究领域的不同, 对油耗估计的精度要求也不同。交通工程中, 多采用车速和加速度的统计函数估计^[21]; 发动机电控中, 多精确至每个气缸的每次喷油量^[20]。经济性驾驶领域对油耗精度的追求介于两者之间, 现阶段主要采用 2 类模型:

1) 功率需求型模型^[22-23]。该模型的应用最为普遍, 采用车辆的速度、加速度, 结合道路坡度等计算车辆瞬时功率需求, 进而查表得到汽车行驶油耗。其优点在于模型简洁, 易于实验获取; 缺点是无法直接反映的发动机的喷油特性, 模型精度较低。典型的模型如 SIDRA 模型^[22]、Biggs 模型^[23]。

2) 基于万有特性图的油耗模型。该类模型通过发动机的转速和转矩查询万有特性图得到瞬时喷油率^[24]。其优点是模型直接与发动机状态相关, 且稳态工况精度高, 但不足之处在于估计动态油耗会存在一定误差。实际上, 发动机在动态工况中, 由于进气道真空度降低, 油膜蒸发变差, 气缸充量系数降低等因素, 达到相同的力矩和转速的喷油量会略高于静态喷油量。由欧洲 COST 346 项目支持的关于发动机动态油耗及排放的实验显示, 在 ETC(European Transient Cycle) 循环中利用 MAP 图计算总油耗, 所测试的 3 种发动机估计误差均小于 4%^[25]。为降低动态过程的油耗估计误差, 典型方法是利用力矩或者转速变化率对稳态油耗进行修正, 如文 [15]。

状态方程需服从车辆的纵向动力学特性。兼顾模型的简洁性和准确性, 一般忽略发动机以及传动系的高阶动态特性、机械间隙和扭转变形等。不少研究多以加速度为控制变量, 以功率需求型模型估计发动机油耗, 仅优化车速和加速度曲线^[17,19]。但该类模型忽略了车辆动力系(如挡位)的影响, 一般只适合准确度要求较低的工况, 如: 交通灯网络约束的多车操作策略^[26]。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^[15]。

约束集合主要来自于道路、交通流以及车辆自身的性能约束。道路约束包括坡道、弯道以及路面附着能力等; 交通流约束包括前车、交通灯、限速等; 车辆自身性能约束包括发动机最大功率/转速/转矩、变速器挡位、制动器压力上限等。另外, 驾驶员对舒适性的要求也可能成为约束。一般来说, 约束集合的类型复杂多样, 包括整型约束、非线性约束和动态时变约束等,

这也使得问题求解变得异常困难^[27-28]。

2.3.2 最优驾驶策略的求解

以最小化油耗为目标的车辆经济性驾驶问题中, 性能指标和状态方程多为非线性函数, 同时存在整型控制变量(挡位), 含非线性、时变等约束, 目前多采用数值方法进行求解。主要方法包括: 1) 间接法, 如变分法和极大值原理; 2) 离散动态规划; 3) 直接求解法, 如伪谱法。间接法需要求解两点边值微分方程组, 计算复杂、初值依赖度高, 一般只适用于低维、极值弧切换结构简单的问题^[26]; 而传统的直接法则收敛速度较慢, 且无法保证非线性规划的解与原最优控制问题的解是一致的^[28]。因此, 现阶段求解节油驾驶问题主要依赖于动态规划法和伪谱法。

动态规划法是经济性驾驶问题中最常用的求解方法。该方法由美国学者贝尔曼在 1956 年提出^[29]。离散动态规划是一种有效的求解复杂问题的方法, 其基本思想是将动态优化决策问题分解为相互联系的离散的

多步决策问题。其优点是适用范围广, 不足之处主要在于“维数灾难”^[30], 对于高维问题, 存储和计算量均成指数级增长。另外, 动态规划中离散密度无明确指导原则, 依赖于研究者的经验。

笔者所在团队将伪谱法应用于经济性驾驶策略的求解^[18,31]。伪谱法是近年发展起来的最优控制问题高效求解方法, 1995 年 Elnagar 首次将伪谱法应用于微分方程描述的最优控制^[31], 证明该方法可高效地将最优控制问题转化为非线性规划问题。自 2000 年以来, Fahroo、Ross、Gong、Rao 等人对伪谱法的转化原理、收敛速度、收敛性等方面做了深入的探究, 奠定了该方法的理论基础^[32-36]。伪谱法的优势在于它具有很高的收敛精度, 即谱精度^[37], 对于无穷可微函数, 谱精度为 $O(N^{-m})$, 其中 m 为正整数, N 表示配点个数。这对于经济性驾驶策略的实时在线求解是十分有利的。针对第 2.3 节提出的动态经济性驾驶的例子, 针对不同初速度 v_0 , 通过伪谱法求解结果如图 3 所示^[38]。

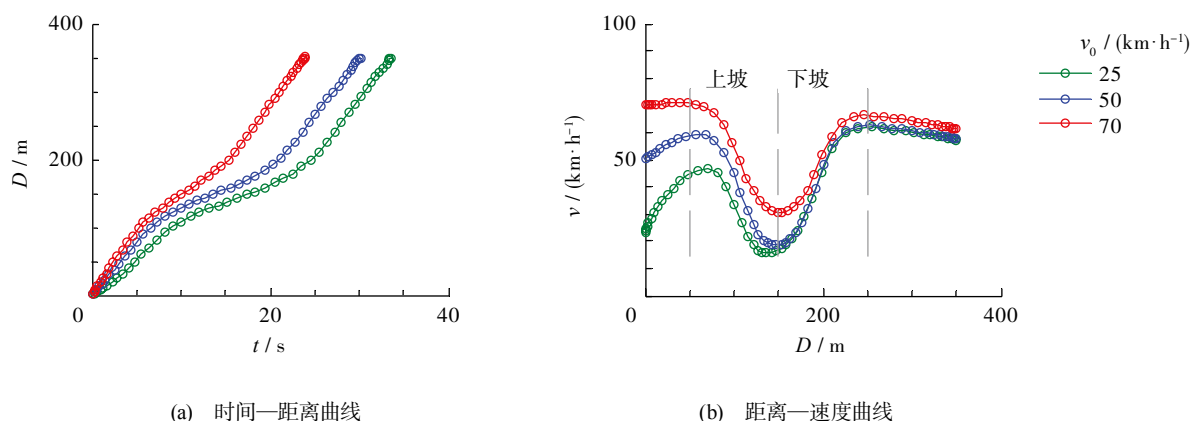


图 3 伪谱法求解示例

2.3.3 典型经济性驾驶策略

针对巡航工况, 最早的一篇研究文献来源于 Johns Hopkins 大学的 E Gilbert^[39]。该研究从数学上严格证明了在巡航工况下, 周期控制 (Periodic Control) 优于“准松弛稳态 (QRSS, Quasi-Relaxed Steady State)”法。从机理上说, 匀速行车策略也属于一类 QRSS, 而后者通常被误认为具有“油耗最优性”, 这一研究首次推翻了这一错误认识。文献^[14]首次指出发动机万有特性不具备全局“凸”性, 短限时域的最优解是一类切换控制 (Single Switching Control), 而不是固定油门开度策略。

Li 和 Peng 等^[15]以 CVT(Continuous Variable Transmission) 型车辆为研究对象, 分析了发动机油耗曲线的“S”型非线性, 利用伪谱法求解出跟车工况下的

最优解, 结果表明: 匀速前车工况下, 最优解是一种周期性的“加速 - 滑行” (PnG, Pulse and Glide) 策略。该论文从机理角度分析了 PnG 策略的形成原因。发动机最佳经济性曲线对应的油耗 - 功率关系如图 4 所示, L 和 H 为其下切线的两切点, 两点之间存在一段凹弧, 其余部分则为凸弧。当平均车速对应的功率 C 处于凹弧段时, 此时采用 PnG 策略, 发动机在 H 和 L 点之间切换, 等效工作点为 E 点。根据凹函数的性质可知, 采用 PnG 策略对应的等效瞬时喷油率低于匀速策略。从能量的角度看, 在 PnG 策略加速阶段, 发动机以较高效率将燃油能量转化为机械能, 用于加速车辆并将能量以动能形式存储于车身, 在滑行阶段再释放动能, 整体上能量转换效率高于发动机恒工作于 C 点的效率^[15]。

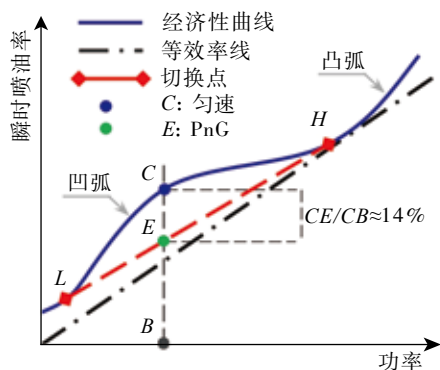


图 4 PnG 策略节油机理分析示意图

文献 [16] 利用轮毂试验台验证了该策略的省油能力。文献 [18] 首次利用这一策略设计了自动跟车控制器，仿真表明：与传统准稳定态跟车对比，该控制器可节油 20% 以上。文献 [40] 进一步研究认为：当平均巡航速度 v_{avg} 较低或较高时，均应采取匀速 (constant speed, CS) 行驶策略；当中速时，“加速-滑行” (PnG) 策略更为经济，相对于匀速策略，最大节油率达 13%，其速度波动策略如图 5a 所示，节油效果如图 5b 所示。

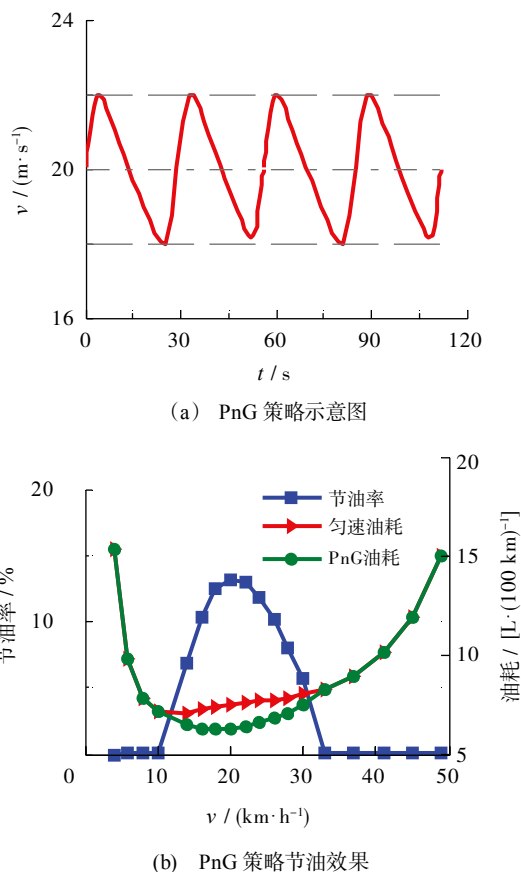


图 5 周期性 PnG 策略和节油效果

对于加速工况，笔者研究了 CVT 型车辆的加速过程，认为过于激烈或过于平缓的加速度均会造成油耗变差；最优加速度与发动机特性和当前车速密切相关，低速时可采取较大加速度，高速时应尽量平缓加速。Kuriyama 等^[17] 仿真分析了电动汽车在上下坡工况下最优速度曲线，通过动态规划法求解出该工况的加速度和速度曲线。Asadi 等^[26] 通过简化的模型求解出在交通信号灯约束下最优速度，在避免等待红灯的前提下给出油耗最优和时间最优的仿真结果。Mensing 等^[24] 对新欧洲行驶循环 (New European Drive Cycle, NEDC) 标准测试工况进行速度优化，认为应采取合适的加速度和较低的“最大速度”。

综上所述，理论法可高效地求解“最优”的节油驾驶策略，成本远低于实验法。目前的研究尚处于起步阶段，多针对单一行车工况和理想车辆模型，对不同类型车辆（如内燃机型、混合动力、电动汽车等）和不同工况（如加速、巡航、制动、超车等）下的节油策略均有待进一步深入研究。

3 经济性驾驶技术应用

经济性驾驶技术的应用主要分为三类：驾驶员节油教育、节油驾驶辅助和经济性自动驾驶。

3.1 驾驶员节油教育

节油驾驶教育是一种最直接的经济性驾驶应用方式^[8]。其通过对驾驶员进行培训的方法，引导驾驶员逐渐改善驾驶行为和驾驶习惯，达到节油的目的。面向驾驶员教育的经济性驾驶策略通常来源于经验总结或实验统计，直观且易实施，例如：预测前向交通流、尽量平缓行车少制动、减少过长时间怠速等。培训驾驶员作为一种教育手段，其效果依赖于人的自觉性和主观能动性，而且由于驾驶员操控能力的限制，难以准确实施部分节油策略。应用过程中，经济性驾驶教育也带来一类负面影响，部分驾驶员以牺牲安全性为代价追逐极限油耗，例如：下坡时关闭发动机脱挡滑行。最早的经济性驾驶教育开始于 20 世纪 80 年代初，由美国能源部负责^[41]，重点关注大型货运车队，到 80 年代末已培训 8 000 多名驾驶员。实验表明：驾驶员教育的短期节油能力是十分可观的。美国对 400 辆汽车的调研表明，驾驶员教育（结合监控）可节油 10% 左右，欧盟和日本的其他项目也观测到类似的结果^[42-43]。然而驾驶员教育存在一定的局限性：

1) 尽管经济性驾驶易于理解，但实施过程受文化、传统和教育手段等因素制约，教育对改变驾驶员

行为能力有限。汽车不仅仅是一个运输工具, 而且承担了各类文化功能, 对动力性的追求是一个典型的例子。若企业或者个人对汽车动力性能的过分追求, 则大大削弱了车辆的燃油经济性。

2) 驾驶员教育效果具有“衰退性”。首先, 驾驶习惯具有一定的倾向性, 改变驾驶习惯非常困难, 即使短时期有所改变, 但长期效果也会逐渐衰退, 甚至会回归至固有特性^[42], 研究表明: 短期之内, 各类示范项目的确取得了理想的省油成绩, 至少 10% 以上, 但是长期效果均不尽如人意^[43]。

为了驾驶员全面了解自己的驾驶习惯以及不良操作, 另外一类手段得以日益重视, 即经济性驾驶报告反馈, 该系统通过“驾驶节油行为报告”的手段让驾驶员了解不同操作的能耗、不良行为以及综合驾驶状态^[5,44]。系统通过车载记录设备或者远程传输技术收集车辆状态参数, 驾驶结束后处理中心将对整个驾驶过程进行分析, 以综合报告形式展示有关耗油的不良操作, 并给出改进建议。这一措施可使驾驶员全局地了解个人操作习惯, 同时也有助于营运车辆公司的管理。

3.2 经济性驾驶辅助

经济性驾驶辅助是报告反馈方式的进一步提升, 它的基本思想是: 通过实时反馈、提示等手段辅助驾驶员全面掌握车辆的运行状态以及正确操作油门、制动和挡位, 以降低行车过程油耗^[4,45]。该方法可一定程度上削弱行车油耗与驾驶员个体习惯的关联性, 克服驾驶员教育方法的缺陷。目前, 主要实施方法包括: 实时油耗及状态反馈^[45]、节油操作视觉提示^[4]和反馈式油门踏板引导^[46]。

3.2.1 实时油耗及状态反馈

驾驶过程的油耗信息实时反馈是一种强化驾驶员节油意识的手段, 它通过反馈信息引导驾驶员主动调整驾驶习惯, 从而降低车辆的燃油消耗^[45]。反馈信息包括综合驾驶经济性等级、瞬时油耗、总油耗等, 一般通过视觉的方法向驾驶员直观的反馈。研究表明, 只有当个人能够真实的感受到行为带来的不良影响, 才会更主动的改变这种行为。驾驶过程中实时连续地向驾驶员主动提供油耗信息, 可帮助驾驶员及时了解各类驾驶操作的燃油耗费, 有利于驾驶员主动地修正驾驶操作。实践表明这一技术简洁且有效, 部分产品已经得到应用, 如奔驰的 ECO Display 系统 (如图 6 所示)^[47]。

3.2.2 节油操作视觉提示

信息反馈虽可以让驾驶员了解油耗状态, 但是无法直接指导驾驶员正确的操作, 驾驶操作的视觉提示



图 6 奔驰油耗信息反馈装置

系统旨在解决该类问题^[4]。该系统依托车辆动力学模型和发动机油耗特性, 根据车辆的负荷、车速等状态计算合理的挡位和油门位置, 从而给予驾驶员正确的操作建议。典型的系统如图 7 所示的金龙客车的 ECO-driving 系统, 可显示经济性驾驶状态, 提供换挡操作建议^[48]。



图 7 经济性操作提示装置

3.2.3 反馈式油门踏板引导

主动反馈式油门踏板可向驾驶员脚部提供触觉反馈, 不影响驾驶员注意力的前提下引导驾驶员采取正确的油门踏板操作, 达到省油或安全驾驶目的^[46,49-50]。该系统可提供微振动反馈、力反馈等交互手段, 引导驾驶员踩/松油门踏板, 从而实现保持合适的速度或采取经济性的加速度。其原理如图 8 所示。控制器根据车辆状态计算出经济性踏板区域, 并根据踏板当前状态向驾驶员提供适当触觉反馈, 以避免过大的加速度或者巡航速度。典型的反馈手段包括微震动反馈和力反馈, 以微震动反馈为例, 踏板内置电机可规律的向外输出“缓加-急减”的反馈力以引导驾驶员踩踏板, 输出“急加-缓减”的反馈引导驾驶员松踏板。最具代表性的成果是 Nissan 的经济性踏板技术, 实验表明该技术可提高燃油经济性 5%~10%^[50]。

3.3 省油型车辆自动驾驶

经济性驾驶策略的最理想载体是具有自动化驾驶功能的智能车辆。其主要方案是: 依托智能化车辆的原有硬件 (含传感器、控制器和执行器), 部分或者全部

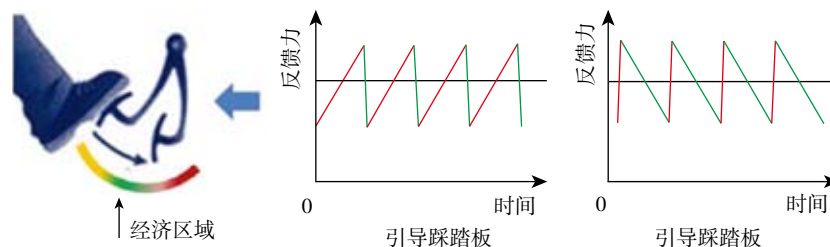


图 8 反馈式油门踏板原理示意图

代替驾驶员，自动实施省油型行车策略。这一技术路线具有潜在的优势：1) 与智能化车辆的结构共用，不会增加车辆额外的硬件成本；2) 具有“叠加意义”的省油能力，不影响车辆本身节油技术的实施，同时可最大程度发挥经济性驾驶的节油潜力。总体而言，受环境感知技术、车辆执行器等技术限制，现阶段完全地自动驾驶还不成熟，但是在稀疏交通流以及高速跟车工况下，巡航或自适应巡航系统完全具有实施经济性驾驶的基础。

经济性驾驶与智能化车辆的结合最早起源于节油型巡航控制 (cruise control, CC)^[51]，如瑞典 Linköping 大学 Hellstrom E^[52]。这些研究的基本思路是一致的，即：对于给定的运输任务（起点、终点、行车路线已知），采用动态规划 (dynamic programming, DP) 算法求解时变的经济性车速，以降低行车过程的油耗。然而，尽管 CC 的研究较多，但它的实际应用仍受到很大的限制。一个最主要的原因是 CC 仅适用于高速公路且交通流稀疏的工况，而实际的行车工况多难以满足这一要求。

自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC) 是 CC 的进一步扩展，将适用范围推广至跟车工况，其节油技术的研究更具应用价值。这一技术的早期探讨主要集中于节油的可行性^[53]。道路实验表明，当 ACC 车辆占车流量达 10% 时，省油型策略最大降低整体道路油耗约 8%^[53]（注：非单一车辆）。省油型 ACC 的研究关键在于省油型驾驶技巧的选取。目前，广泛采用的 2 类策略是：1) 动力系协调策略：其基本思想是协调控制发动机和变速器，调整发动机工作点，使之工作于低油耗区；2) 平滑加速度策略：其基本思想是平滑车辆的纵向加速度，减少急加速和急制动，降低发动机因动态工况造成的不必要燃油消耗。

针对挡位连续的 CVT 车辆，日本 Nissan 公司的 Ino J 等人探索了发动机和变速器联合作动策略^[54]。该法同时控制油门开度和 CVT 速比，使发动机工作在最佳燃油经济线附近，以获得较小的发动机瞬时油耗。重庆大学的秦大同等人对该问题进行了类似研

究^[55]。针对挡位离散的 AMT (Automated Mechanical Transmission) 车辆，Li 等人曾提出油门和 AMT 联合动作的下位控制方法，利用加速过程提前升挡、减速过程提前降挡等方式降低车辆油耗^[56]。仿真表明，与基于逆模型法的控制方法相比，该法可降低油耗约 6%。与传动系协调策略相比，平滑加速度策略更加简洁、直观。美国 UC Berkeley 大学的 Zhang J 提出非线性滤波器的平滑策略，利用滤波器平滑车间状态轨迹，使自车无紧急加速或紧急制动过程^[53]。仿真表明，前车紧急加速工况中，该策略可省油 5%~6%。

为建立实用化的节油型 ACC，笔者曾提出同时具备自动跟车行驶、低燃油消耗和符合驾驶员特性三类功能的自适应巡航控制算法，这对于全面提升行车安全性、改善车辆燃油经济性、减轻驾驶疲劳强度具有重要的意义^[57-59]。该研究建立了一类车辆多目标协调式自适应巡航控制系统的体系结构，以二次型代价函数和线性不等式为框架，设计跟踪性能目标、燃油经济性目标和驾驶员感受目标的数学量化方法，同时利用模型预测控制理论实现了控制器的综合设计^[57,59]。实验表明：该方法可分别节约约 5.3%（城市道路工况）和 2.5%（高速公路工况），且有效保障了系统的跟踪性能和乘坐舒适性^[59]。

3.4 车联网时代的经济性驾驶

车联网是未来道路交通系统发展的一个重要方向。车辆的能耗不仅取决于车辆本身、驾驶操作和出行习惯，更受制于交通网络的效率和交通管理技术。进入车联网时代，DSRC、4G-LTE 等通讯手段的应用，有望进一步提升经济性驾驶的经济价值与社会意义，因此正得到政府部门、整车企业、甚至通信运营商的高度关注。图 9 描述了车联网时代经济性驾驶的一幅图景。

该图景下，依托车内网、车际网和车载移动互联网，按照规定的通信协议实现车-车、车-路、车-网之间数据交互，实现道路交通中各要素信息共享。这种信息共享将极大促进包含经济性驾驶技术在内的车辆

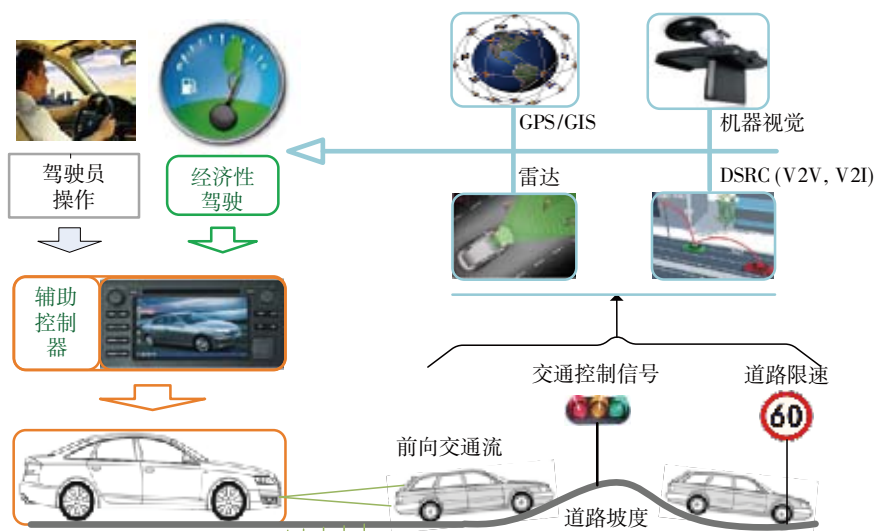


图9 车联网时代的经济性驾驶

控制和交通管理的二次革命^[60]。而且,车联网技术平台将单一车辆的辅助与控制提升至路网最优化的层级,有望从全局意义上提高道路交通网络的能耗效率^[61]。

4 结语: 难点与发展方向

综上所述,汽车经济性驾驶技术具有理想的节油效果,也已取得初步的工程应用效果,但目前仍存在较多难点有待进一步研究。两个最大的难点问题是:

1) 经济性驾驶策略的理论辨识仍有待进一步探索,这是进一步提升节油能力的关键。对于以内燃机为动力的车辆,最优经济性驾驶本质上是一个特殊的非线性最优控制问题,并含有整型约束、动态时变约束,同时由于发动喷油控制的强非线性,最优控制问题 Hessian 矩阵非严格正定,因此构造的最优控制问题可能不满足 Legaudre-Lebsch 条件,其数值和理论求解均异常困难。而且,随着新型动力结构日渐增加(如混合动力等),车辆动力学特性建模也日益复杂,且不可避免存在大不确定性,加上实际交通流复杂动态时变(尤其是人车混杂的交通流),这些因素使得最优行车策略问题更加棘手。

2) 经济性技术的应用中,驾驶员操作习惯的“个体差异性”与“操控不准确性”是实施操作辅助的障碍。对于驾驶员教育而言,这两个特性均直接影响短期和长期的省油效果。不仅如此,这两类特性也直接影响实时油耗反馈、操作视觉提示、主动式踏板反馈的使用效果。研究表明:若驾驶员缺乏认同感,甚至会拒绝使用已有良好效果的经济性辅助系统。而且,操作辅助过程不可避免占用驾驶员的感知资源,加重驾驶负担,影响行车

的安全性。因此,如何合理的设计驾驶辅助系统以有效引导驾驶员操作将是未来经济性驾驶的一个研究热点。

经济性驾驶的核心思想是不改变车辆原有动力系硬件的前提下,优化协调驾驶员(甚至自动控制器)的驾驶操作,使之与车辆、道路、交通流等要素相匹配,在满足出行需求的同时降低车辆的行驶油耗。从工程应用角度看,该思想可用于驾驶员教育、驾驶辅助和自动驾驶等诸多领域。驾驶员教育适用于政府层面推动,对于提高经济性驾驶认可度、共建可持续型交通具有重要意义。经济性驾驶辅助是现阶段最具有产品化前景的技术,各类汽车企业均应重视该类产品的研制与开发。伴随着汽车智能化的推进,自动或半自动无人驾驶车辆是理想的经济性驾驶技术载体。尤其考虑到车联网时代来临之后,这一技术可能具有更大经济价值和社会意义,值得进一步关注。

参考文献 (References)

- [1] Barkenbus J N. Eco-driving: An overlooked climate change initiative [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 762-769.
- [2] 工业和信息化部. 2013 年 1-12 月汽车工业经济运行情况 [EB/OL]. (2014-01-20). <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294132/n12858417/n12858612/15849151.html>. Ministry of Industry and Information Technology, the People's Republic of China. Automotive economic operation in 2013 [EB/OL]. (2014-01-20). <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294132/n12858417/n12858612/15849151.html>. (in Chinese)
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2012 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook: 2012 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012. (in Chinese)

- [4] Beusen B, Broekx S, Denys T, et al. Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course [J]. *Transp Res Part D: Transp and Envir*, 2009, **14**(7): 514-520.
- [5] Kamal M A S, Mukai M, Murata J, et al. Ecological driver assistance system using model-based anticipation of vehicle-road-traffic information [J]. *Intelligent Transport Systems*, IET, 2010, **4**(4): 244-251.
- [6] Row S J. IntelliDrive: Safer, Smarter, Greener [J]. *Public Roads*, 2010, **74**(1): 18-22.
- [7] Yonezawa M. Energy Saving ITS "Eco-driving support" estimation and results [C]// *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation System*. Vienna, Austria: IEEE, 2011.
- [8] Barić D, Zovak G, Periša M. Effects of Eco-Drive Education on the Reduction of Fuel Consumption and CO₂ Emissions [J]. *PROMET-Traffic & Transportation*, 2013, **25**(3): 265-272.
- [9] Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions [J]. *J Air & Waste Manag Assoc*, 2000, **50**(4): 543-554.
- [10] Ericsson E. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors [J]. *Transp Res Part D: Transp and Envir*, 2001, **6**(5): 325-345.
- [11] De Vlioger I. On board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(22): 3753-3761.
- [12] El-Shawarby I, Ahn K, Rakha H. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions [J]. *Transp Res Part D: Transp and Envir*, 2005, **10**(1): 13-30.
- [13] Johansson H. Impact of Eco Driving on emissions and fuel consumption [R]. 1999.
- [14] Ivarsson M, Åslund J, et al. Look-ahead control: Consequences of a non-linear fuel map on truck fuel consumption [J]. *IMEch-E Part D: J Auto Eng*, 2009, **223**(10): 1223-1238.
- [15] Li Eben S, Peng H. Optimal Strategies to Minimize Fuel Consumption of Passenger Cars during Car-Following Scenarios [J]. *IMEch-E, Part D: J Auto Eng*, 2012, **226**(3): 19-429.
- [16] Lee J, Nelson D, Lohse-Busch H. Vehicle Inertia Impact on Fuel Consumption of Conventional and Hybrid Electric Vehicles Using Acceleration and Coast Driving Strategy [J]. *SAE Int'l*, 2009, SAE No.: 2009-01-1322.
- [17] Kuriyama M, Yamamoto S, Miyatake M. Theoretical study on Eco-Driving Technique for an Electric Vehicle with Dynamic Programming [C] // *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2010 *Int'l Conf. IEEE*, 2010: 2026-2030.
- [18] Li Eben S, Peng H, et al. Minimum Fuel Control Strategy in Automated Car-Following Scenarios [J]. *Veh Tech, IEEE Trans*, 2012, **61**(3): 998-1007.
- [19] Nouveliere L, Braci M, Menhour L, et al. Fuel consumption optimization for a city bus [C]// *UKACC (UK Automatic Control Council) Int'l Conf on Control*. 2008: 1-6.
- [20] Van Basshuysen R, Schäfer F. Internal combustion engine handbook-basics, components, systems and perspectives [M]. USA: SAE International, 2004.
- [21] Ahn K, Rakha H, Trani A, et al. Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels [J]. *J Transportation Eng*, 2002, **128**(2): 182-190.
- [22] Akcelik R, Smit R, Besley M. Calibrating fuel consumption and emission models for modern vehicles [C]// *The IPENZ Transportation Group Conf*, Rotorua, New Zealand, 2012.
- [23] Biggs D C, Akcelik R. An energy-related model of instantaneous fuel consumption [J]. *Traffic Eng & Control*, 1986, **27**(6): 320-325.
- [24] Mensing F, Trigui R, Bideaux E. Vehicle trajectory optimization for application in ECO-driving [C]// *Vehi Power and Propulsion Conf (VPPC)*, 2011 *IEEE*. IEEE, 2011: 1-6.
- [25] Ericson C, Westerberg B, Egnell R. Transient emission predictions with quasi stationary models [R]. SAE Paper, 2005: 01-3852.
- [26] Asadi B, Vahidi A. Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time [J]. *IEEE Trans Control Syst Tech*, 2011, **19**(3): 707-714.
- [27] Hartl R F, Sethi S P, Vickson R G. A survey of the maximum principles for optimal control problems with state constraints [J]. *SIAM (Soc Indu and Appl Math) Review*, 1995, **37**(2): 181-218.
- [28] Hull D G. Conversion of optimal control problems into parameter optimization problems [J]. *J Guidance, Contr, and Dyn*, 1997, **20**(1): 57-60.
- [29] Bellman R. Dynamic programming and Lagrange multipliers [J]. *Proc National Academy of Sci USA*, 1956, **42**(10): 767.
- [30] Blackwell D. Discounted dynamic programming [J]. *Ann Math Statistics*, 1965: 226-235.
- [31] Elnagar G, Kazemi M A, Razzaghi M. The pseudospectral Legendre method for discretizing optimal control problems [J]. *IEEE Trans Automatic Control*, 1995, **40**(10): 1793-1796.
- [32] Fahroo F, Ross I M. Direct trajectory optimization by a Chebyshev pseudospectral method [J]. *J Guidance, Contr, and Dyna*, 2002, **25**(1): 160-166.
- [33] Fahroo F, Ross I M. Costate estimation by a Legendre pseudospectral method [J]. *J Guidance, Control, and Dynamics*, 2001, **24**(2): 270-277.
- [34] Gong Q, Ross I M, Kang W, et al. Connections between the covector mapping theorem and convergence of pseudospectral methods for optimal control [J]. *Comput Opti and Appl*, 2008, **41**(3): 307-335.
- [35] Garg D, Hager W W, Rao A V. Pseudospectral methods for solving infinite-horizon optimal control problems [J]. *Automatica*, 2011, **47**(4): 829-837.
- [36] Benson D. A Gauss pseudospectral transcription for optimal control [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [37] Trefethen L N. Spectral methods in Matlab [M]. SIAM, Philadelphia, 2000: 7-40.
- [38] XU Shaobing, DENG Kun, LI Shengbo, et al. Legendre pseudospectral computation of optimal speed profiles for vehicle eco-driving system [C]// *2014 IEEE Intelligent Vehi Symp*. June 8-11, 2014, Dearborn, Michigan, USA. (to be published).

- [39] Gilbert E. Vehicle cruise: improve fuel economy by periodic control [J]. *Automatic*, 1976, **12**: 159-166.
- [40] 徐少兵, 李升波, 成波. CVT 车辆经济性巡航策略的伪谱法优化 [J]. 控制理论与应用, 2014. (录用). XU Shaobing, LI Shengbo, CHENG Bo. Optimization for economical cruising strategy of CVT vehicle using pseudo spectral method [J]. *Contr Theory and Appl*, 2014. (to be published). (in Chinese)
- [41] Greene D. Driver energy conservation awareness training: review and recommendations for a national program [R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge Nation Laboratory, 1986.
- [42] Zarkadoulou M, Zoidis G, Tritopoulou E. Training urban bus drivers to promote smart driving: a note on a Greek eco-driving pilot program [J]. *Transp Res Part D*, 2007, **12**: 449-451.
- [43] Beusen B, Denys T. Long-term effect of eco-driving education on fuel consumption using an on-board logging device [C]// *Urban Transp XIV: Urban Transp and Envir in the 21st Century*. 2008.
- [44] Van Hiep D, Ohno M, Seki Y. Towards sustainable transportation through introduction of eco-drive management system for vehicle fuel efficiency [C]// *Proc E Asia Soc for Transp Studies*. 2013.
- [45] Sexton R J, Johnson N B, Konakayama A. Consumer response to continuous-display electricity-use monitors in a time-of-use pricing experiment [J]. *J Consumer Research*, 1987: 55-62.
- [46] Sakaguchi S, Shiomi M, Oomori M. Development of ECO pedal system assisting eco-driving [J]. *Soc Auto Eng Japan Proc* 2010, **48**(10): 1-6.
- [47] Mercedes-Benz. TechCenter: ECO Display [EB/OL]. (2014-02-25). http://techcenter.mercedes-benz.com/_en/eco_display/detail.html.
- [48] 蔡文演. 助力节能降耗大金龙十米以上公路客车免费标配“节油驾驶提醒系统” [J]. 交通世界, 2011(12): 90-92. CAI Wenyan. To promote energy saving, King long heavy buses equipped with “fuel-efficient driving alert system” [J]. *Transportation World*, 2011(12): 90-92. (in Chinese)
- [49] De Rosario H, Louredo M, Díaz I, et al. Efficacy and feeling of a vibrotactile Frontal Collision Warning implemented in a haptic pedal [J]. *Transp Res part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2010, **13**(2): 80-91.
- [50] Nissan. ECO Pedal [EB/OL]. (2014-02-25). http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/eco_pedal.html
- [51] Latteman F, Neiss K, Terwen S, et al. The predictive cruise control- A system to reduce fuel consumption of heavy duty trucks [J]. *SAE Trans*, 2004, **113**(2): 139-146.
- [52] Hellstrom E, Ivarsson M, Åslund J, et al. Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption [J]. *Contr Eng Prac*, 2008, **17**(2): 245-254.
- [53] Zhang J, Ioannou P. Longitudinal control of heavy trucks in mixed traffic: Environmental and fuel economy considerations [J]. *IEEE Trans Intelligent Transp Syst*, 2006, **7**(1): 92-104.
- [54] Ino J, Ishizu T, Sudou H. Adaptive cruise control system using CVT gear ratio control [J]. *SAE Trans* 2001, **110**(7): 675-680.
- [55] 王红岩, 秦大同, 舒红. 无级变速汽车自动驾驶系统模糊控制策略 [J]. 中国公路学报, 2001, **14**(1): 109-204. WANG Hongyan, QIN Datong, SHU Hong. Design for fuzzy controller of driving simulator of automobile with CVT system [J]. *Chin J Highway*, 2001, **14**(1): 109-204. (in Chinese)
- [56] Li Shengbo, Bin Yang, Li Keqiang. A control strategy of ACC system considering fuel consumption [C]// *Proc 2006 Adv Vehi Eng Control Conf*, Taipei, China, 2006: 851-855.
- [57] Li Shengbo, Li Keqiang, Wang Jianqiang, et al. MPC based vehicular following control considering both fuel economy and tracking capability [C]// *Vehi Power and Propulsion Conf*, 2008. IEEE, 2008: 1-6.
- [58] LI Shengbo, LI Keqiang, Rajamani R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control [J]. *Contr Syst Tech, IEEE Trans*, 2011, **19**(3): 556-566.
- [59] Li Shengbo, Li Keqiang, Wang Jianqiang. Economy-oriented vehicle adaptive cruise control with coordinating multiple objectives function [J]. *Vehi Syst Dyn*, 2013, **51**(1): 1-17.
- [60] Kosch T, Franz W. Technical Concept and Prerequisites of Car-to-Car Communication [C]// *Proc 5th Euro Cong Exh Intelligent Transport Sys Services*, Hannover, Germany, June 2005: 1-12.
- [61] Toh C. Future Application Scenarios for MANET-based Intelligent Transportation Systems [J]. *Future Gene Communication and Networking*, 2007, **2**: 414-417.

成波 教授

清华大学教授、清华大学苏州汽车研究院院长、汽车安全与节能国家重点实验室副主任。兼任北京汽车工程学会学术委员会主任、中国人类工效学会理事、国家“八六三”高技术项目计划主题专家、中国交通运输科技项目专家, 公安部交通管理专家委员会专家等。研究领域: 智能化汽车、汽车安全技术、驾驶行为建模与仿真、汽车人机工程等。

Prof. CHENG Bo

He is a professor of *Tsinghua University*, the dean of *Tsinghua University-Suzhou Automotive Research Institute*, and a deputy director of the *State Key Lab of Automotive Safety and Energy*. He also works as the chairman of *Academic Board of SAE-Beijing*, a member of *Council of Chinese Ergonomics Society*, a committee member of "National 863 Plan", a member of *Academic Committee of China Transportation Technology Project*, and a member of *Academic Committee of Ministry of Public Security Traffic Management*. His research interests include intelligent vehicles, active safety, driver behavioral modeling and simulation, vehicular ergonomics, etc.