

DOI: 10.3901/JME.2017.14.049

速比离散型车辆加速-滑行式节油巡航策略*

徐少兵¹ 刘学冬² 李升波¹ 杜雪瑾² 林庆峰² 成波¹

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084;

2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191)

摘要: 巡航过程的节油驾驶是汽车经济性驾驶技术的重要组成,其核心问题是节油巡航策略的辨识。为此,量化地求解了速比离散型变速器车辆的加速-滑行式(Pulse-and-glide, PnG)节油巡航策略。将节油策略的辨识构建为一最优控制问题;由于发动机的油耗呈强非线性,且PnG策略的加速阶段与滑行阶段动力学特性不一致,导致该问题属于非线性切换型最优控制。采用拼接策略将该非连续问题转化为加速和滑行两段光滑子问题的组合,通过伪谱法实现对积分型性能函数和微分型状态空间方程的代数转化,从而将原最优控制问题转化为非线性规划问题,并进而实现发动机输出转矩、变速器档位、模式切换时刻等参数的数值优化。结果表明:对所研究的车辆,平均巡航速度在中速范围内,PnG策略相对匀速巡航具有显著的节油效果,最高节油率接近25%。最后分析PnG策略实现节油的物理机理,并对节油效果进行了实车试验验证。

关键词: 燃油经济性; 巡航策略; 最优控制; 伪谱法

中图分类号: TP273

Fuel-saving Pulse-and-glide Cruising Strategy for Road Vehicles with Discrete Gear Ratio

XU Shaobing¹ LIU Xuedong² LI Shengbo¹ DU Xuejin² LIN Qingfeng² CHENG Bo¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: The fuel-saving cruising technique is the momentous part of economical driving, of which the key issue is how to identify the fuel-saving operating strategies. The pulse-and-glide (PnG) cruising strategy for road vehicles with discrete gear ratio transmission is presented aiming to minimize the fuel consumption in cruising scenarios. The optimization of PnG cruising strategy naturally casts into the optimal control framework. The studied vehicle is featured with strong nonlinear fuel characteristics in engine and different dynamics in the pulse and the glide modes. Those features lead to a non-smooth switching problem, for which the multi-phase knotting technique is employed to cut this problem into two smooth sub-phases, i.e., accelerating and coasting. The pseudo-spectral method is employed to convert the differential type space state equation and integral type performance index. The associated nonlinear programming is finally solved to achieve optimal engine torque, transmission gear ratio, and switching time of pulse and glide. The optimization results show that for the studied vehicle, the PnG strategy can save fuel when cruising at middle speed as compared to the constant speed (CS) operation, and the highest fuel saving rate can reach up to 25%. The mechanism of PnG is discussed, and the fuel saving performance is verified by the real-vehicle tests.

Key words: fuel economy; cruising strategy; optimal control; pseudo-spectral method

0 前言

能源安全、环境保护和消费者需求促使着汽车不断提高燃油经济性^[1]。2012年国务院颁布的《节

能与新能源汽车产业发展规划》指出,乘用车平均百公里油耗至2020年须从2010年的7.71 L降至5 L。这将极大地挑战道路车辆现有的节能技术。实际上,汽车的行驶油耗不仅与车辆本体(如发动机、传动系、轻量化等)相关,而且很大程度上取决于驾驶员的驾驶策略^[1-2]。经济性驾驶技术是依托这一理念发展的一类汽车节能方法,它以驾驶操作与车辆

* 国家自然科学基金(51575293, 51622504)和十三五国家重点研发计划(2016YFB0100906)资助项目。20161128收到初稿,20170324收到修改稿

性能/道路条件/交通流状态之间的优化与协调为核心,在不改变车辆结构的前提下,通过改变人或自动驾驶系统对车辆的控制策略,在满足出行需求的同时达到降低车辆行驶过程油耗的目的。研究表明:经济性驾驶的节油潜力可达 15%以上^[3],是一类应用成本低、节油效果明显的实用化技术。例如,LI 等^[4]研究了加速工况的经济驾驶操控策略,提出“阶梯型”节油加速控制准则,可以显著提高燃油经济性;针对坡道巡航工况,文献[5]设计了两种具有解析反馈率的高实时性节油控制器,在典型坡道工况下相对 PID 控制可节油 10%以上。

巡航是车辆最常见的驾驶任务之一,城市工况下巡航约占总驾驶过程的 35%左右,而对于稀疏交通流这一比例将更高^[6-7]。目前,最常见的巡航策略为恒定速度(Constant speed, CS)策略,即车辆保持期望车速匀速行驶。这一方法几乎是所有非竞赛驾驶员和巡航控制装置所采取的巡航方式。然而,LI 等^[8-9]针对装备无级变速器(Continuously variable transmission, CVT)车辆的研究发现:车用内燃机的油耗特性呈特殊的凹形,使得发动机油耗与功率的关系呈现“S”型非线性。因“S”型油耗曲线中凹弧的存在,最优速度轨迹存在奇异弧段,这导致周期性地加速-滑行式(Pulse and glide, PnG)策略比匀速巡航更为节油。这一工作也首次量化地给出装备 CVT 车辆的 PnG 策略最优操作规则。进一步,LEE 等^[10]通过轮毂试验台的实车测试验证了 PnG 策略的节油能力,表明与匀速行车相比最佳工况的节油率可达 30%以上,体现出该策略巨大的节油潜力。

当期望以某一“平均速度”巡航时,PnG 策略的车速不是恒定的,车辆处于周期性的加速-滑行波动状态,需要动态地控制发动机和变速器。实际上,PnG 策略的实施具有严苛的限制条件,并非以任意加速度和减速度操作车辆均具有省油效果^[10]。研究表明:只有选择合适的发动机输出转矩和变速器档位才能到达节油目的,而不当的控制可能导致该策略比 CS 策略更加耗油^[8-11]。现有研究仅针对速比连续的车辆,一个目的是简化系统的最优控制难度^[8-9]。实际上,多数车辆的变速器档位是离散的,对于装备有级变速器(如 MT、AMT)的车辆,在 PnG 策略中加速和滑行阶段使用的档位、动力学模型均不同,节油巡航问题属于典型的非线性切换型控制问题,PnG 型策略的精确优化更为困难^[12]。另外,受限于离散档位约束,发动机无法像 CVT 型车辆一样工作在最优曲线之上,此时 PnG 策略的操作规律以及是否仍具有节油效果均不明晰,需要进一步探讨。

为此,本文聚焦于速比离散型车辆的加速-滑行

式节油巡航策略,包括其建模和优化方法,同时从发动机特性上解释 PnG 型巡航策略的节油机理,主要工作如下。

- (1) 速比离散型车辆 PnG 策略优化问题的解析化建模。
- (2) 通过 Legendre 伪谱拼接法实现该最优控制问题的转化和求解。
- (3) 分析速比离散时 PnG 的节油效果,并揭示其节油物理机理。
- (4) 实车试验验证。

1 节油巡航控制的问题构建

PnG 型巡航策略是一种动态的巡航策略,如图 1 所示。当驾驶员期望以某一平均速度巡航时,车辆先从较低速度加速至较高速度,记为加速阶段,然后再滑行至较低速度,记为滑行阶段。一个加速阶段和滑行阶段组成一个完整的 PnG 过程,并需保证其平均速度等于期望巡航速度。PnG 策略辨识指寻找出最优的加速与滑行速度轨迹,也即如何精确地控制发动机、变速器,以最小化油耗。本文将该策略辨识问题转化为一最优控制问题。其性能指标为油耗相关函数,状态方程服从车辆动力学,约束源于车辆的性能极限和 PnG 的特性。

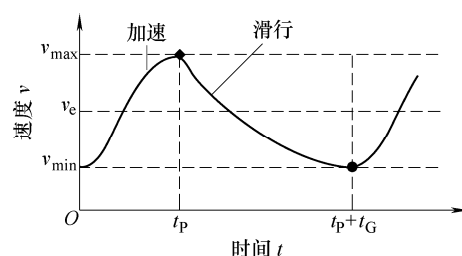


图 1 PnG 型巡航策略示意图

在 PnG 策略的滑行阶段,车辆可采用空档或带档滑行。若采用空档滑行,记为 PnG-N,发动机处于怠速状态,存在怠速油耗,但发动机对车辆无反拖阻力矩。该策略的劣势在于加速和滑行阶段档位不一致,需要频繁换档,不仅存在安全隐患,而且会加速机械部件磨损。为克服 PnG-N 的劣势,可采用带档滑行策略,且设置滑行时的档位与加速时一致,记为 PnG-G,此时发动机存在较大的反拖阻力矩,但是由于采用电控喷油的现代发动机的减速停油功能^[13-14](即当完全释放油门踏板、发动机转速高于一定阈值,则停止喷油),滑行阶段的喷油率为零。两者在滑行阶段的阻力和油耗上各有优劣,并不能直接区分两种策略的节油潜力,因此本文将分别优化这两类策略。

虽然两种策略的滑行方式不同,但是本质上属于一类问题。本文仅针对 PnG-G 策略进行建模, PnG-N 作为 PnG-G 的特例,仅简述其建模过程。由于 PnG 策略中速度波动范围一般较小,为了避免问题过于复杂,本文设定加速过程和滑行过程中间均不进行档位切换。

1.1 性能指标

在巡航中,采用百公里油耗作为衡量不同巡航策略的经济性评价指标,定义如下

$$J = \frac{\int_0^{t_p} F_p dt + \int_{t_p}^{t_p+t_G} F_G dt}{s_p + s_G} \quad (1)$$

式中, t_p 、 F_p 、 s_p (t_G 、 F_G 、 s_G) 分别代表加速阶段(滑行阶段)的时间、发动机瞬时喷油率和距离。下面分别对 F_p 和 F_G 进行建模。

发动机喷油率 F_p 的解析表达由试验标定的油耗数据拟合得

$$F_p(T_e, w_e) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^i \kappa_{i,j} T_e^{i-j} w_e^j \quad (2)$$

式中, T_e 和 w_e 为发动机转矩和转速, $\kappa_{i,j}$ 为拟合系数。记发动机功率为 P_e , 由 $b_e = F_p/P_e$ 可得发动机燃油消耗率 b_e , 如图 2 所示。发动机最大转矩拟合为

$$T_{\max}(w_e) = \sum_{i=0}^4 k_{\max,i} w_e^i \quad (3)$$

式中, $k_{\max,i}$ 为拟合系数。

拟合结果如图 2 中虚线所示。发动机不同转速下最高效率点的集合记为转速经济性曲线 EL, 如图 2 所示。

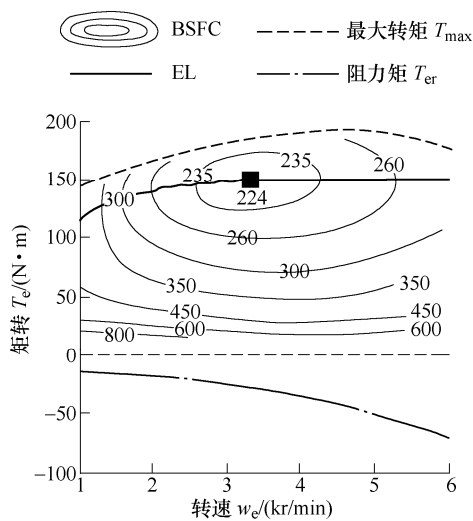


图 2 发动机万有特性图

实际上,发动机动态过程中,由于气缸充量系数降低、燃油雾化变差等因素的影响,试验标定的稳态油耗无法准确表达动态喷油率,其误差与发动

机转速的变化剧烈程度密切相关,因此本文引入如下修正^[15]

$$T_{ed} = T_e \left(1 - \gamma_d \frac{dw_e}{dt} \right) \quad (4)$$

式中, γ_d 为动态修正系数, T_{ed} 为动态输出转矩。

在滑行阶段,当油门踏板完全松开、发动机转速高于阈值(设定为 1 000 r/min)时,发动机具有减速停油功能。本文研究 PnG-G 策略时,假定滑行阶段满足减速停油的条件,因此其喷油率 F_G 为零。

1.2 状态方程

所研究的车辆动力系统包括发动机、离合器和变速器。考虑到建模的简洁性和准确性,假设:①忽略发动机和变速器旋转部件的高阶动态特性,以及传动系的间隙和扭转;②换档在瞬间完成,忽略离合器的脱离和滑磨;③不同传动比的传动效率一致。

加速阶段,车辆先从较低速度 $v_{0,p}$ 加速至较高速度 $v_{f,p}$ 。距离 s 、速度 v 及加速度 a 满足

$$\dot{s} = v \quad \dot{v} = a \quad (5)$$

根据力平衡方程得

$$\frac{i_0 \eta_T}{r_w} i_g T_{ed} = \delta_{i_g} M \dot{v} + k_a v^2 + k_f \quad (6)$$

式中, i_g 、 i_0 分别为变速器和主减速器的传动比; r_w 为轮胎有效半径; η_T 为传动效率, δ_{i_g} 表示旋转部件转动惯量换算系数; $k_a = 0.5 C_D \rho_a A_v$ 、 $k_f = Mg f$ 分别为空气阻力和滚动阻力, C_D 为空气阻力系数, ρ_a 为空气密度, A_v 为车辆的迎风面积, f 为滚动阻力系数, M 、 g 分别为车辆质量和重力加速度。

发动机转速 w_e (r/min) 和车辆速度 v 满足

$$w_e = k_w v i_g, k_w = 30/(\pi r_w) \quad (7)$$

式中, k_w 为简化系数。

考虑到在加速阶段传动比恒定,式(4)可简化得

$$T_{ed} = T_e (1 - \gamma_d i_g \dot{v}) \quad (8)$$

将式(6)、(8)代入式(5),可得加速阶段的状态方程

$$\begin{cases} \dot{s} = v \\ \dot{v} = \frac{i_g i_0 \eta_T T_e / r_w - k_a v^2 - k_f}{\delta_{i_g} M + i_0 \eta_T \gamma_d k_w i_g^2 T_e / r_w} \end{cases} \quad (9)$$

在滑行阶段,车辆从较高速度 $v_{0,G}$ 滑行到较低速度 $v_{f,G}$,其运动方程为

$$\begin{cases} \dot{s} = v \\ \dot{v} = \frac{i_0 i_g T_{er}(w_e)}{\delta_{i_g} M r_w \eta_T} - \frac{k_a v^2 + k_f}{\delta_{i_g} M} \end{cases} \quad (10)$$

式中, T_{er} 为发动机阻力矩为发动机转速的函数, 通过二次多项式拟合为

$$T_{\text{er}}(w_e) = a_0 + a_1(w_e/6\ 500) + a_2(w_e/6\ 500)^2 \quad (11)$$

式中, a_0 、 a_1 和 a_2 为拟合系数, 拟合结果见图 2 中点划线。

1.3 约束集合

PnG 策略中, 发动机转速、输出转矩需满足物理性能约束, 变速器传动比属于离散点集, 即

$$\begin{cases} w_{\text{emin}} \leq w_e \leq w_{\text{emax}} \\ 0 < T_e \leq T_{\text{max}}(w_e) \\ i_g \in \{i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{g4}, i_{g5}\} \end{cases} \quad (12)$$

同时, PnG 策略的平均速度 \bar{v} 需要等于驾驶员期望巡航速度 v_e , 即

$$\bar{v} = \frac{s_P + s_G}{t_P + t_G} = v_e \quad (13)$$

加速阶段的初速度 $v_{0,P}$ (末速度 $v_{f,P}$) 等于滑行阶段的末速度 $v_{f,G}$ (初速度 $v_{0,G}$)

$$\begin{cases} v_{0,P} = v_{f,G} = (1 - \beta)\bar{v} \\ v_{f,P} = v_{0,G} = (1 + \beta)\bar{v} \end{cases} \quad (14)$$

式中, β 为设定的速度波动系数。

需要说明的是, 加速阶段和滑行阶段的历时 t_P 、 t_G , 距离 s_P 、 s_G 均是自由的待优化变量。除发动机参数外, 车辆模型参数如表 1 所示。

表 1 车辆主要参数

参数	数值
修正系数 $\gamma_d / (\text{s}^2/\text{rad})$	0.003
怠速喷油率 $F_I / (\text{g/s})$	0.153 5
主减速比 i_0	3.863
传动系效率 η_T	0.9
车轮半径 r_w / m	0.307
空气密度 $\rho_a / (\text{kg/m}^3)$	1.226
风阻系数 C_D	0.316
迎风面积 A_f / m^2	2.22
车辆质量 M / kg	1 600
道路滚阻系数 f	0.028
发动机最小转速 $w_{\text{min}} / (\text{r/min})$	1 000
发动机最大转速 $w_{\text{max}} / (\text{r/min})$	6 000
阻力矩拟合系数 a_0, a_1, a_2	-16, 19.5, -84.5
最大转矩拟合系数 k_{max}	117.41, 213.51, -257.37, 298.88, -211.89
变速器速比 i_g	3.620, 1.925, 1.285, 0.933, 0.692
i_g 下的旋转质量换算系数 δ_{i_g}	1.322, 1.112, 1.067, 1.049, 1.041

1.4 最优控制问题及特征

在上述模型基础上, 构建带档滑行式 PnG-G 策略的油耗最优控制问题如下

$$\min J = \frac{\int_0^{t_P} F_P dt + \int_{t_P}^{t_P+t_G} F_G dt}{s_P + s_G}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= v \\ \dot{v} &= \begin{cases} \frac{i_g i_0 \eta_T T_e / r_w - k_a v^2 - k_f}{\delta_{i_g} M + i_0 \eta_T \gamma_d k_w i_g^2 T_e / r_w} & \text{加速阶段} \\ \frac{i_0 i_g T_{\text{er}}}{\delta_{i_g} M r_w \eta_T} - \frac{k_a v^2 + k_f}{\delta_{i_g} M} & \text{滑行阶段} \end{cases} \\ T_{\text{er}}(w_e) &= a_0 + a_1(w_e/6\ 500) + a_2(w_e/6\ 500)^2 \\ w_e &= k_w v i_g \\ \bar{v} &= v_e \\ v_{0,P} &= v_{f,G} = (1 - \beta)\bar{v} \\ v_{f,P} &= v_{0,G} = (1 + \beta)\bar{v} \\ w_{\text{emin}} &\leq w_e \leq w_{\text{emax}} \\ 0 &< T_e \leq T_{\text{max}}(w_e) \\ i_g &\in \{i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{g4}, i_{g5}\} \end{aligned} \quad (15)$$

该问题中, 状态变量为行驶距离 s 、速度 v , 记为 $\mathbf{x} = (s, v)^T$, 控制变量为发动机输出转矩 T_e 以及变速器速比 i_g , 记为 $\mathbf{u} = (T_e, i_g)^T$ 。该最优控制问题具有非线性性能函数和状态方程, 且加速和滑行阶段的状态方程不一致, 因此是典型的非连续多段问题。本文拟采用伪谱拼接法进行求解。

2 优化方法

伪谱法是一种全局配点法, 可以将光滑的最优控制问题(Optimal control problem, OCP)转化为非线性规划(Non-linear programming, NLP)问题。作为伪谱法的扩展, 伪谱拼接法可高效的处理非光滑 OCP^[16]。伪谱法的基本原理为: 在正交配点处将连续 OCP 离散化, 并通过全局插值多项式逼近状态和控制变量, 从而将 OCP 转化为 NLP 问题^[17-19]。与传统配点法、打靶法等直接法相比, 伪谱法具有更高的求解精度和收敛速度^[17]。针对末端约束的 OCP, 相较于 Gauss 和 Radau 伪谱法, Legendre 伪谱法具有更好的收敛效果, 并且配点包含端点, 可以更加方便地处理端点约束^[18]。因此本文采用 Legendre 伪谱法(Legendre pseudospectral method, LPM)求解。由于伪谱法对于非光滑问题的谱精度较低, 而过度增加配点数会降低计算效率。因此本文采用伪谱拼接法求解非光滑问题^[16], 其基本思想是将该非光滑问题切分为光滑的两段, 其中加速模式

和滑行模式各对应一段, 然后分别对各段离散和转化, 从而将该非光滑问题转化为一个 NLP 问题, 进而实现其数值求解。为方便描述, 将初始时间记为 t_0 , 加速终端时间 t_P 及 PnG 终端时间 t_P+t_G 记为 $t_{q,q=1,2}$ 。采用伪谱拼接法求解的具体步骤如下。

(1) 时域变换。将加速阶段和滑行阶段的时域 $[t_{q-1}, t_q]$ 分别转化至标准时域 $[-1, 1]$

$$\tau = \frac{2t - (t_q + t_{q-1})}{t_q - t_{q-1}} \quad \tau \in [-1, 1] \quad q=1, 2 \quad (16)$$

(2) 配点和离散化。LMP 的配点为 LGL 点, 即 Legendre 正交多项式一阶导数的根和 $\tau = -1, 1$ 两点。每段可设置不同数目的配点, 记为 $N_q + 1$, 配点记为 $\tau_{q,i}$, 其中 $i = 0, 1, \dots, N_q$ 、 $q = 1, 2$ 。将状态变量距离 s 、速度 v 离散化为

$$\mathbf{X}_q = \begin{pmatrix} S_{q,0} & S_{q,1} & \dots & S_{q,N_q} \\ V_{q,0} & V_{q,1} & \dots & V_{q,N_q} \end{pmatrix} \quad (17)$$

将发动机输出转矩 T_e 、反拖阻力矩 T_{er} 分别离散化为 $T_{1,i}$ 、 $T_{2,i}$ 。

(3) 状态方程转化。由于状态变量可通过 Lagrange 多项式逼近, 因此对状态的微分运算可转化为对插值基函数的微分运算。由此可将加速阶段车辆运动方程式(9)转化为 LGL 配点处的等式约束

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{N_1} D_{ki}^1 S_{1,i} = \frac{t_1 - t_0}{2} V_{1,k} \\ \sum_{i=0}^{N_1} D_{ki}^1 V_{1,i} = \frac{t_1 - t_0}{2} \frac{i_g i_0 \eta_T T_{1,k} / r_w - k_a V_{1,k}^2 - k_f}{\delta_{i_g} M + i_0 \eta_T \gamma_d k_w i_g^2 T_{1,k} / r_w} \end{cases} \quad (18)$$

滑行阶段的车辆运动方程式(10)可同理转化。

(4) 性能函数转化。性能函数中积分项可通过 Gauss-Lobatto 积分方法转化

$$J = \frac{(t_1 - t_0) \sum_{i=0}^{N_1} w_{1,i} F_P + (t_2 - t_1) \sum_{i=0}^{N_2} w_{2,i} F_G}{2S_{2,N_2}} \quad (19)$$

式中, w 为 Gauss-Lobatto 积分权重^[18]。

(5) 增加连接约束。为确保速度和距离的连续性, 在两段之间增加连接约束

$$\begin{cases} S_{1,N_1} - S_{2,0} = 0 \\ V_{1,N_1} - V_{2,0} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

经过上述步骤, 可将节油巡航优化问题转化为一个 NLP 问题

$$J = \frac{(t_1 - t_0) \sum_{i=0}^{N_1} w_{1,i} F_P + (t_2 - t_1) \sum_{i=0}^{N_2} w_{2,i} F_G}{2S_{2,N_2}}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{N_q} D_{ki}^q S_{q,i} &= \frac{t_q - t_{q-1}}{2} V_{q,k} \\ \sum_{i=0}^{N_1} D_{ki}^1 V_{1,i} &= \frac{t_1 - t_0}{2} \frac{i_g i_0 \eta_T T_{1,k} / r_w - k_a V_{1,k}^2 - k_f}{\delta_{i_g} M + i_0 \eta_T \gamma_d k_w i_g^2 T_{1,k} / r_w} \\ \sum_{i=0}^{N_2} D_{ki}^2 V_{2,i} &= \frac{t_2 - t_1}{2} \left(\frac{i_g i_0}{\delta_{i_g} M r_w} \frac{T_{2,k}}{\eta_T} - \frac{k_a V_{2,k}^2 + k_f}{\delta_{i_g} M} \right) \\ T_{2,k} &= a_0 + a_1 (W_{2,k} / 6\ 500) + a_2 (W_{2,k} / 6\ 500)^2 \\ W_{q,k} - k_w V_{q,k} i_{gq} &= 0 \\ S_{2,N_2} / t_2 - v_e &= 0 \\ S_{1,N_1} - S_{2,0} &= 0 \\ V_{1,N_1} = V_{2,0} &= (1 + \beta) v_e \\ V_{1,0} = V_{2,N_2} &= (1 - \beta) v_e \\ w_{\min} &\leq W_{q,k} \leq w_{\max} \\ 0 < T_{q,k} &\leq T_{\max} (W_{q,i}) \\ i_g &\in \{i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{g4}, i_{g5}\} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, $W_{q,i}$ 为离散化的发动机转速。该 NLP 问题中, 待优化变量包括行驶距离 $S_{q,k}$ 、车辆速度 $V_{q,k}$ 、发动机输出转矩 $T_{1,k}$ 和 $T_{2,k}$ 、变速器速比 i_g 、加速终端时间 t_1 及 PnG 终端时间 t_2 , 其中, $k, i = 0, 1, \dots, N_q$, $q = 1, 2$ 。本质上, 该问题属于高维稀疏带约束非线性优化问题, 本文采用技术成熟的 SNOPT 求解器进行求解^[20]。

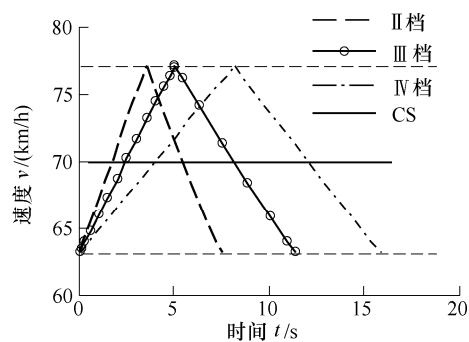
3 优化结果与分析

3.1 数值优化结果

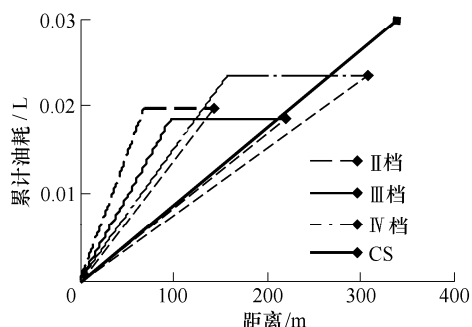
为说明上述方法对 PnG 策略的优化效果, 选择平均巡航速度为 70 km/h、速度波动系数 β 设置为 10% 时 PnG-G 策略的优化结果进行阐述。伪谱法求解过程中, 加速阶段的配点个数设置为 15, 滑行阶段的配点个数设置为 8。优化结果显示, 其最优性能指标 J 为 7.66 L/(100 km), 最优档位为 IV 档, 并以 10^{-6} 的精度满足等式约束。若使用 II 档和 III 档, 最优性能指标分别为 13.63 L/(100 km) 和 8.57 L/(100 km)。三种情况对应的车辆速度、累计油耗、发动机工作点如图 3 所示。

由图 3a 可知, 车辆首先从较低速度 63 km/h 加速至较高速度 77 km/h, 然后再滑行至 63 km/h, 且平均速度等于期望巡航速度 70 km/h, 档位越高, 加速和滑行阶段加速度越小, 滑行距离也越长。需要说明的是, 图中速度曲线并非绝对的直线, 只是

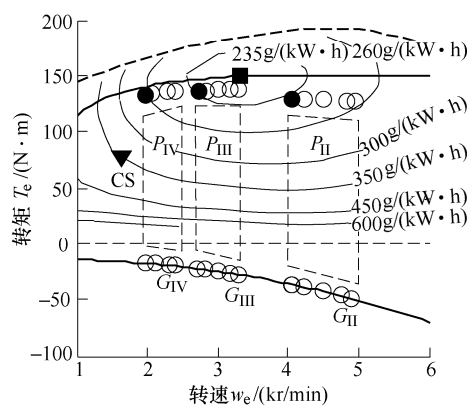
近似直线, 其原因是速度波动范围小, 且加速过程和滑行过程发动机输出转矩变化平缓。



(a) 不同档位对应的速度曲线



(b) 不同档位对应的累计油耗



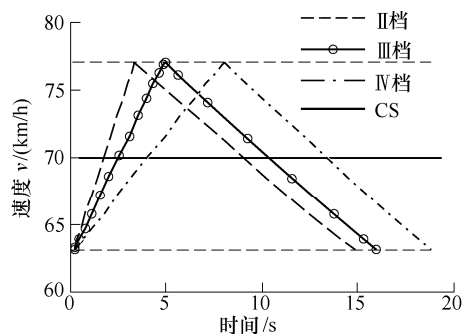
(c) 不同档位对应的发动机工作点分布

图 3 PnG-G 策略优化结果(β 为 10%, \bar{v} 为 70 km/h, 加速和滑行均采用 II、III 或 IV 档)

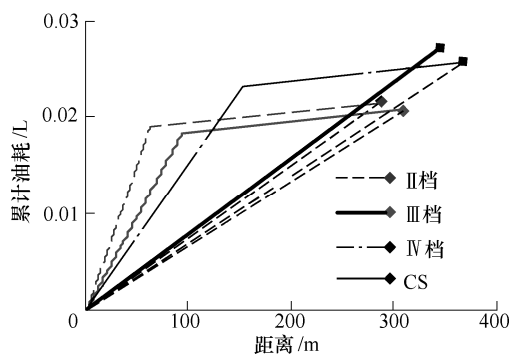
图 3b 展示了三种档位对应 PnG-G 策略的累计油耗。加速阶段, 油耗逐渐提高, 滑行阶段, 发动机停止喷油, 累计油耗保持恒定。该曲线的端点与原点连线的斜率等价于“百公里油耗”。采用 IV 档斜率最低, 因此最为经济, 而 II 档对应的经济性最差。采用 III 档和 IV 档均比 CS 巡航策略更为经济。这一现象可通过图 3c 所示的发动机工作点分布进行解释。采用 II 档, 不仅加速过程发动机燃油效率较低, 而且滑行过程反拖阻力矩最大; 采用 III 档, 发动机燃油效率最高, 但反拖阻力矩居中; 采用 IV 档, 发动机燃油效率居中, 但反拖阻力矩最小。因此, 采用 II 档节油效果最差; 采用 III 和 IV 档效果

相近, 优化结果显示该例下采用 IV 档最优。比较 CS 与 PnG 可发现, CS 策略中发动机稳定地工作在较低效率区, 而 PnG 策略在加速阶段发动机工作在最佳经济性曲线附近(并非重合), 对应的发动机燃油效率高于 CS 策略, 这也是 PnG 型策略能够节油的主要原因, 对此将在第 4 节详细说明。

对于 PnG-N 策略, 其优化问题本质上是 PnG-G 策略优化的特例, 即空档滑行时, 发动机处于怠速状态, 喷油率为非零的常数, 记为 F_I , 而发动机反拖阻力矩 $T_{ed} = 0$ 。此时仍可通过该方法进行优化。该例中, PnG-N 策略的优化结果显示最优性能指标为 6.70 L/(100 km), 加速过程的最优档位为 III 档, 其优化结果及采用 II、IV 档的结果如图 4 所示。



(a) 不同档位对应的 PnG 速度曲线



(b) 不同档位对应的累计油耗

图 4 PnG-N 策略优化结果(β 为 10%, \bar{v} 为 70 km/h, 加速采用 II、III 或 IV 档, 滑行采用空档)

由图 4a 可知, PnG-N 策略中, 滑行阶段发动机怠速, 无反拖阻力矩, 因此采用不同档位时的滑行速度曲线平行。由图 4b 可知, 空档滑行时, 发动机仍怠速喷油, 因此累计油耗缓慢增加。由于滑行阶段无反拖阻力矩, 不同 PnG 策略的经济性主要(但非唯一的)取决于加速过程的发动机燃油效率, 而采用 III 档可使得发动机工作于高效率点附近(可参考图 3c, 加速阶段两者发动机工作点接近), 因此采用 III 档经济性最好。本例中对两种策略的求解结果表明, 该方法可有效地优化 PnG 型巡航策略。

3.2 PnG 策略节油能力分析

在上述方法的基础上, 进一步优化了平均速度

在 $[30, 140]$ km/h 范围内, 不同平均速度下的 PnG-G、PnG-N 策略, 其百公里油耗 J 、相对 CS 策略的节油率 η_F 如图 5 所示, 其中节油率 η_F 定义为

$$\eta_F = \frac{J_{CS} - J_{PnG}}{J_{CS}} \times 100\% \quad (22)$$

式中, J_{CS} 和 J_{PnG} 分别代表 PnG 和 CS 的百公里油耗。

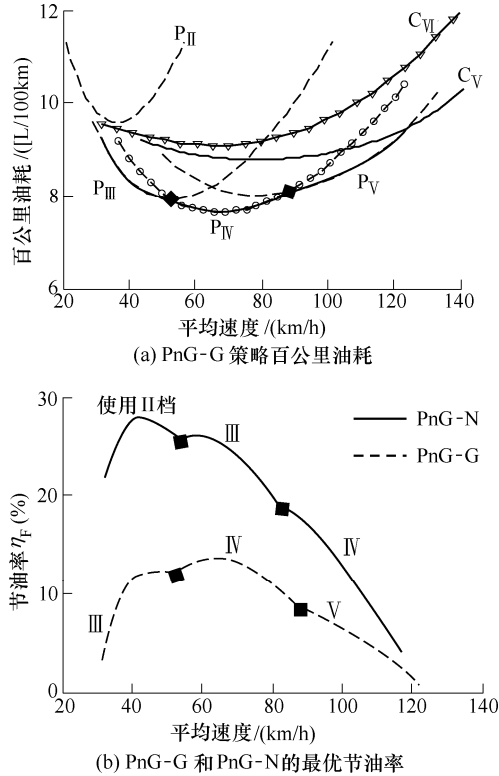


图 5 两种策略节油率比较 (β 为 10%, $\bar{v} \in [30, 120]$ km/h)

图 5a 显示了不同档位下, PnG-G 策略和 CS 策略的百公里油耗, 图中 $C_{\#} / P_{\#}$ 表示采用 # 档的 CS/PnG-G 策略。对于 PnG-G 策略, 其下包络线代表该策略的最低油耗曲线。当 $\bar{v} \in [30, 124]$ km/h, 该包络线低于曲线 C_{IV} 和 C_V , 说明在此范围内 PnG-G 比 CS 策略的油耗低, 更为经济。其他速度范围内, PnG-G 策略不仅不可以节油, 反而更费油。因此, PnG 策略并非总是有效的, 若不考虑车辆的特性(如发动机油耗特性、载荷)而一味的在任何速度下都采用该策略, 则有可能适得其反。

PnG-G 策略的节油率如图 5b 所示, 由图可知, 最大节油率可达 13%, 当 $\bar{v} \in [40, 80]$ km/h, 节油率均超过 10%。当 $\bar{v} \in [30, 57]$ 、 $[57, 86]$ 和 $[86, 124]$ km/h 时, 应分别采取 III、IV 和 V 档加速和滑行。同时, PnG-N 策略在不同平均速度下的节油率如图 5b 所示。对比两种策略可以发现, 当 $\bar{v} \in [30, 124]$ km/h, PnG-N 的经济性优于 PnG-G, 其节油率几乎

是 PnG-G 的 2 倍。

PnG-N 策略虽然具有更好的节油率, 但也存在一定的缺点: ① 在发动机怠速过程, 燃油燃烧条件变差, 会产生污染性尾气; ② 当开始滑行时, 必须将档位降至空档, 加速开始时, 又须从空档升至高档, 频繁的换挡加速了离合器等传动部件的磨损, 并且存在一定的安全隐患。

4 节油机理分析

本节将重点阐述该策略的节油机理。由于车辆动力性的要求(爬坡、最大速度), 所装备的发动机的最大功率一般远大于中速巡航所需功率。例如本文所研究发动机的最大功率超过 100 kW, 最高效率点的功率为 52 kW, 而当车辆以 60 km/h 巡航时, 所需功率仅为 10.3 kW(对应图 6 中的 A 点)。因此当车辆以中等功率匀速巡航时, 发动机负荷率较低, 工作在低效率区域, 如图 6 中, CS 点集为 $\bar{v} \in [30, 120]$ km/h 时匀速行驶的发动机工作区域。

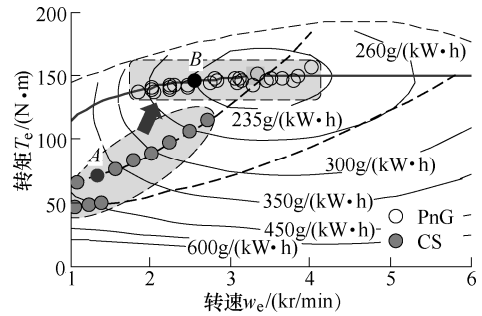


图 6 CS 与 PnG 巡航策略的发动机工作点分布 ($\bar{v} \in [30, 124]$ km/h)

PnG 策略可以显著改善发动机燃油效率。以 A 点为例, 其代表以 60 km/h 匀速巡航时对应的发动机工作点, 发动机燃油效率仅为 21%, 低效率直接导致了 CS 策略的低燃油经济性。PnG 策略在其加速阶段, 采用较低档位以提高发动机转速, 使之达到 $[2\ 000, 4\ 000]$ r/min, 并维持车辆加速以使得发动机工作于高负荷、高效率区域, 从而使得发动机工作点从 A 点转移至 B 点, 效率从 21% 提高至 33%。在加速阶段虽然发动机输出功率大于巡航需求功率, 车辆处于加速状态, 但可以将燃油化学能“高效地”转化为动能, 并存储于车身, 这部分动能是不会消失的, 在滑行阶段车辆依靠存储的动能滑行, 将加速阶段的能量释放。整体上, 发动机处于“高效率地间歇性工作”, 有别于匀速巡航的“低效率地稳定工作”, 从而使得 PnG 策略的平均效率高于匀速巡航策略。然而, 由于 PnG-G 策略中的发动机反

拖阻力矩、PnG-N 策略中的发动机怠速油耗以及动态扭矩损失等因素, PnG 策略的实际节油率一般低于理想状态。

5 节油效果实车试验验证

本节将通过实车试验进一步验证所提出的 PnG 型巡航策略的节油效果。试验车辆、场景和数据采集设备如图 7 所示。本试验在一专用的汽车测试场进行, 试验路况为一段长度约 1 km、宽度约 15 m 的平直道路。试验车辆为一款装配 2.0 L 发动机和 6 档变速器的乘用车。车辆状态参数(如车速、油门开度)、发动机状态参数(含瞬时喷油率、转速、输出扭矩、摩擦阻力矩)、变速器参数(档位)均通过车辆 CAN 总线采集, 其中瞬时喷油率由喷油脉宽转化而得。车辆空调等辅助设备均关闭。由于该试验车不具有自动驾驶功能, 变速器和发动机也没有自动控制接口, 因此在试验过程中, 由专业的汽车测试工程师进行人为控制。试验步骤设计如下。

步骤 1: 试验员分别以 20 km/h、30 km/h、40 km/h、50 km/h、60 km/h、70 km/h 的速度保持匀速行驶, 以测得各稳态速度下的油耗。试验过程中, 要求试验员尽可能维持匀速, 避免幅度过大的速度调节动作。



图 7 试验车辆、数据采集设备和试验场景

步骤 2: 对试验员进行波动型巡航操作的培训, 向其介绍“加速-滑行”式巡航特点、机理以及对发动机和变速器的控制方法, 使试验员提前掌握操作的要求和注意事项。

步骤 3: 让试验员分别以 20 km/h、30 km/h、40 km/h、50 km/h、60 km/h、70 km/h 的平均速度、 ± 5 km/h 的波动幅度进行“加速-滑行”式巡航。具体操作方法以 40 km/h 的平均速度为例: ① 车辆起步后过渡至 35 km/h, 保持匀速运行 5 s, 让系统稳定下来; ② 进行加速操作, 采用“恒定油门开度”的方法, 将油门踩至固定的开度, 保持不变, 待速度达到 45 km/h 时, 开始滑行过程; ③ 滑行操作中, 油门踏板完全松开, 变速器挂空档, 待车速降低至 35 km/h 时滑行结束; ④ 重复加速-滑行操作 15 次,

完成 60 km/h 的试验。加速过程的油门开度范围根据发动机 BSFC 图和提出的控制方法确定, 本试验车对应的最佳油门开度为 30% 左右。

试验得到的一组波动型巡航和匀速巡航的车速轨迹、发动机输出扭矩、喷油率如图 8 所示。在波动型巡航中, 车速在 34 km/h 至 46 km/h 之间波动, 平均速度约为 40 km/h, 发动机输出扭矩在 0 和约 100 N·m 之间切换, 一个周期大约 18 s; 匀速巡航中, 车速和发动机输出扭矩基本保持恒定, 后者约为 25 N·m。整体上, 两者的平均速度接近, 发动机输出扭矩与时间轴围成的面积也近似, 表明发动机总输出能量接近, 但前者燃油效率高于后者。

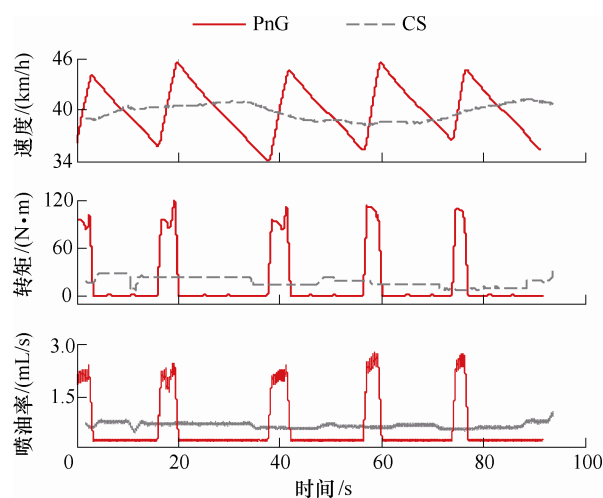


图 8 波动型巡航和稳态巡航的试验数据

不同平均速度下波动型巡航和稳态巡航的百公里油耗如图 9 所示。以 40 km/h 的平均速度为例, 两者的百公里油耗分别为 5.98 L 和 6.71 L, 因此波动巡航节油率为 10.9%。整体上, 平均速度为 20 km/h 时节油率最高, 达到 25%, 节油率随着速度增加而降低, 在 60 km/h 时波动型巡航丧失节油效果, 最优操作变为匀速巡航。这一试验结果与理论计算结果趋势高度一致, 进一步验证了: ① 加速-滑行式巡航确实具有节油效果, 节油率趋势与理论计算一致; ② 提出的发动机和变速器控制方法可以有效

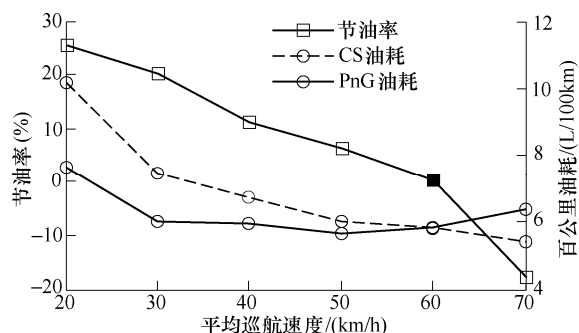


图 9 波动型巡航相对稳态巡航的试验节油效果

实现节油巡航控制。需要说明的是,前述车辆模型与本试验车动力系参数不一致,因此具体的节油率数据只能在趋势上吻合,难以精确地一一对应。

6 结论

本文研究了速比离散型变速器车辆的加速滑行式(PnG)节能巡航策略,包括问题的构建、转化和求解,分析了PnG策略节油潜力和物理机理。

(1) 对于装备有级变速器的车辆,由于速比离散,PnG策略加速与滑行阶段具有不同的动力学特性,且发动机油耗具有强非线性,因此巡航策略辨识本质上为一个非线性切换型最优控制问题。通过Legendre伪谱拼接法可有效地将该最优控制问题转化为一个非线性规划问题,从而实现数值求解。

(2) 与匀速巡航相比,PnG策略在中速工况具有更好的燃油经济性。PnG巡航策略的节油源于发动机喷油的强非线性,发动机间歇性地工作于高负荷、高效率区域,保证巡航过程需求功率的同时,降低了平均油耗。实车试验结果进一步表明了PnG策略的有效性。

考虑到PnG型巡航策略需要周期性的精确控制发动机和变速器,所以自动驾驶系统是该策略的最佳实现载体。实际上,PnG策略的实施受到车辆动力系磨损、交通环境和驾驶舒适性的限制,一般仅适合于稀疏交通流工况。另外,为避免速度的大幅周期波动,也可通过其他储能装置(如电池、飞轮、超级电容等)替代车身动能的波动。

参 考 文 献

- [1] BARKENBUS J N. Eco-driving: An overlooked climate change initiative[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 762-769.
- [2] BARTH M, BORIBOONSOMSIN K. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2009, 14(6): 400-410.
- [3] 李升波, 徐少兵, 王文军, 等. 汽车经济性驾驶技术及应用概述[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(2): 121-131. LI Shengbo, XU Shaobing, WANG Wenjun, et al. Overview of ecological driving technology and application for ground vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(2): 121-131.
- [4] LI S, XU S, HUANG X, CHENG B, et al. Eco-departure of connected vehicles with V2X communication at signalized intersections[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (12): 5439-5449.
- [5] XU S, LI S, CHENG B, et al. Instantaneous feedback control for fuel-prioritized vehicle cruising system on highways with varying slope[J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems. 2017, 18(5): 1210-1220.
- [6] TONG H Y, HUNG W T, CHEUNG C S. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, 50(4): 543-554.
- [7] ERICSSON E. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2001, 6(5): 325-345.
- [8] LI S E, PENG H. Strategies to minimize the fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2012, 226(3): 419-429.
- [9] LI S E, PENG H, LI K, et al. Minimum fuel control strategy in automated car-following scenarios[J]. IEEE Trans. Vehicular Technology, 2012, 61(3): 998-1007.
- [10] LEE J, NELSON D J, LOHSE-BUSCH H. Vehicle inertia impact on fuel consumption of conventional and hybrid electric vehicles using acceleration and coast driving strategy[R]. SAE, 2009-01-1322, 2009.
- [11] IOANNOU P A, CHIEN C C. Autonomous intelligent cruise control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1993, 42(4): 657-672.
- [12] LABINAZ G, BAYOUMI M M, RUDIE K. A survey of modeling and control of hybrid systems[J]. Annual Reviews in Control, 1997, 21: 79-92.
- [13] SHAKOURI P, ORDYS A, DARNELL P, et al. Fuel efficiency by coasting in the vehicle[J]. International Journal of Vehicular Technology, 2013, 2013(1): 1-14.
- [14] SUZUKI T, MORIMOTO Y, HAMADA H, et al. Fuel cut-off control system in fuel injection internal combustion engine with automatic power transmission: U.S., 4539643[P]. 1985-09-03.
- [15] 格里什克维奇. 电子计算机在汽车设计与计算中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 1983. GRISHKEVICH. Computer applications in automotive design and calculation[M]. Beijing: China Communications Press, 1983.
- [16] ROSS I M, FAHROO F. Pseudospectral knotting methods for solving non-smooth optimal control problems[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004,

27(3): 397-405.

- [17] 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.
- [18] XU S, LI S E, DENG K, et al. A unified pseudospectral computational framework for optimal control of road vehicles[J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2015, 20(4): 1499-1510.
- [19] GARG D, PATTERSON M, HAGER W W, et al. A unified framework for the numerical solution of optimal control problems using pseudospectral methods[J]. Automatica, 2010, 46(11): 1843-1851.
- [20] GILL P E, MURRAY W, SAUNDERS M A. SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization[J]. SIAM Review, 2005, 47(1): 99-131.

作者简介: 徐少兵, 男, 1989 年出生, 博士。主要研究方向为智能车辆控制与决策、最优控制理论及应用。

E-mail: xsbing2008@foxmail.com

刘学冬, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为车辆经济性驾驶、混合动力车辆的周期性节能控制。

E-mail: buaalxd@foxmail.com

李升波(通信作者), 男, 1982 年出生, 副教授。主要研究方向为智能化汽车、车辆动力学控制、驾驶员行为及辅助、最优控制理论与应用等。

E-mail: lishbo@tsinghua.edu.cn

成波, 男, 1962 年出生, 教授, 博士研究生导师。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, 国家 863 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。主要研究方向为智能化汽车, 汽车安全技术, 驾驶行为建模与仿真, 汽车人机工程等。

E-mail: chengbo@tsinghua.edu.cn