DOI: 10.3901/JME.2021.06.121

基于迭代动态规划的网联电动汽车 经济性巡航车速优化*

董昊轩 殷国栋 庄伟超 陈 浩 周毅晨 汪 奕
(东南大学机械工程学院 南京 211189)

摘要: 为提升网联电动汽车的能量效率,针对变坡度和变限速的交通场景,提出一种结合滚动优化与迭代动态规划(Iterative dynamic programming, IDP)的滚动距离域车速规划策略(Receding distance horizon velocity planning, RDHVP),实现了电动汽车(Electric vehicle, EV)能量优化与动态交通约束的时空解耦,快速优化求解经济性巡航车速。依据动态交通场景变限速特性,设计了基于道路限速分段的 EV 能量优化问题,在距离域上实现全程优化问题分段滚动优化,以避免限速变化引起的车辆控制力大幅度波动。基于动态规划原理,设计了包含状态量/控制量边界和网格大小缩放策略的 IDP 算法,以快速计算获取权衡计算速度和最优性的巡航车速。采集真实道路信息,建立仿真模型,验证所设计策略的有效性。结果表明,相较于传统恒定车速巡航策略和常规动态规划方法,提出的方法能够大幅度提高 EV 能量效率和巡航车速优化计算速度。

关键词: 网联汽车; 经济性驾驶; 交通信息物理系统; 滚动优化; 迭代动态规划

中图分类号: U461

Economic Cruising Velocity Optimization Using Iterative Dynamic Programming of Connected Electric Vehicle

DONG Haoxuan YIN Guodong ZHUANG Weichao
CHEN Hao ZHOU Yichen WANG Yan

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189)

Abstract: To improve the energy efficiency of connected electric vehicle (EV), a receding distance horizon velocity planning strategy (RDHVP) is proposed, for optimizing economic cruising velocity at dynamic traffic environment with varying slopes and velocity limitations. The RDHVP strategy uses receding optimization strategy and iterative dynamic programming (IDP) algorithm, which can decouple the spatio-temporal coupling of energy optimization and dynamic traffic constraints, to achieve energy-saving cruising velocity fast optimization. Considering varying velocity limitations, the energy-optimal control problem of EV is staged by velocity limitations. The RDHVP strategy can realize staged problem receding optimization in distance domain, to avoid sharply changed vehicle force caused by varying velocity limitations. The IDP algorithm is formulated based on the principle of dynamic programming with consideration of boundary and grid scaling strategy, which can quickly solve the optimization problem and obtain the energy-optimal cruising velocity profile. Finally, to verify the effectiveness of proposed strategy, the simulation model is formulated using collected real traffic information. The results show the RDHVP strategy improves energy efficiency and reduces computing time significantly, compared with the conventional constant speed cruising strategy and regular dynamic programming optimization method.

Key words: connected vehicle; eco-driving; transportation cyber physical systems; receding optimization; iterative dynamic programming

0 前言

随着交通领域带来的能源消耗和环境污染问题

日益严重,世界各国制定了严格的汽车节能减排目标和法规,促使汽车需要不断提高能量效率^[1-2]。汽车能量效率不仅与车辆本体有关^[3-4],还受制于车辆驾驶行为^[5]。经济性驾驶技术便是通过控制车辆行驶速度,来提高能量效率的方法^[6]。经济性驾驶技术因应用成本低(无须改变车辆本体结构^[5])、适用范围广(适用于各种汽车类型及交通环境^[7])、节能效果

* 江苏省重点研发计划(BE2019004)、国家杰出青年科学基金(5205121)和国家自然科学基金(51805081, 51975118)资助项目。20200401 收到初稿, 20201014 收到修改稿

好(节油潜力可达 15%以上^[8])等优势,备受政府管理者、科研人员和用户的关注。此外,近年来蓬勃发展的交通信息物理系统为经济性驾驶技术发展带来了巨大潜力。交通信息物理系统通过集成计算、通信及控制技术将信息基元与物理元素融为一体,利用先进通讯技术实现车与车、车与路、车与云等之间的数据交互,并融合强大的云计算,保证网联车辆与交通设施间可以开展大规模实时优化与协同控制^[9],为经济性驾驶技术提供了丰富的车路信息和高效计算保障。

目前,经济性驾驶研究主要分为两个方面:城市路口通行控制和巡航车速控制。城市路口通行控制主要通过获取信号灯相位配时、周围车辆状态等交通信息,合理规划车速,避免频繁加速/制动、怠速停车,实现车辆节能与高效地通过信号灯路口。PENG 等^[10]设计了一种基于规则算法的经济性驾驶协同控制系统,适用于固定配时和自适应配时信号灯路口,并在真实交通环境中进行了试验测试;LIN 等^[11]研究了适用于两个信号灯路口通行控制方法,采用 Legendre 伪谱法优化车速,结果表明该方法可以推广到多路口通行控制。上述方法为简化研究,均假设路口无其他车辆,但这不符合实际交通状态^[12]。所以, YE 等^[13]考虑被控车辆周围存在其他车辆的场景,设计基于数据驱动算法的前车运动状态预测模型,优化车速以改善油耗。YANG 等^[14]估计路口待行队列通行时间,设计适应拥堵交通状态的经济性驾驶方法,提高车辆节能效率和路口通行效率。

相比于城市路口通行控制,巡航车速控制主要是针对高速公路、郊区道路、城市快速道路等无信号灯路口的交通场景,侧重于优化车辆巡航速度,避免非必要的加速和减速操作,以提高能量效率。目前,最常见的巡航控制为恒定速度策略(Constant speed, CS),即车辆保持期望恒定车速行驶,这一方法被广泛应用在现有汽车巡航控制系统^[15]。另外,通过优化计算获取的光滑变化速度策略、加速-滑行式速度策略等节能优势明显^[16]。巡航车速控制早期研究主要针对理想交通场景,但考虑到真实交通场景特点,现有研究多考虑道路坡度、弯道曲率、前车状态等影响。ZHUANG 等^[17]设计一种考虑道路坡度的节能巡航控制策略,采用动态规划算法来提高电动汽车(Electric vehicle, EV)节能效果及电池寿命。DING 等^[18]讨论了适用于弯道行驶的经济性车速优化策略,研究表明在入弯时适当的减速、弯道中保持最优车速行驶、出弯时适当的加速可以提高

燃油汽车节油效率。WANG 等^[19]借助于车联网通讯和车载雷达采集的前车状态信息,设计考虑多交通状态(巡航行驶、跟车行驶、路口通行)的巡航车速切换控制方法,可以有效降低混合动力汽车油耗和排放。ZHANG 等^[20]提出了基于模型预测控制的混合动力汽车巡航速度控制策略,考虑到智能网联汽车技术普及率较低,设计了前车运动状态预测模型,保证适用于混合交通场景。然而,现有经济性巡航车速优化研究过于理想化,或者考虑的交通场景影响因素较为单一,少有综合考虑变化的道路坡度和最高限速这类时空耦合影响的研究。导致优化结果在实际应用时,存在无法按照优化车速行驶的情况,经济性效果较差,甚至影响汽车行驶安全。

另外,现有研究中,经济性驾驶控制方法主要分为两种:规则类和优化类,其中文献[10, 13-14, 16]等属于基于规则算法的控制方法,文献[8, 11, 15, 17-20]等采用的动态规划、模型预测控制、伪谱法属于优化类方法。规则类的方法主要是利用已有驾驶经验(如缓慢加速、避免频繁加速/制动、减少怠速等)设计车速控制方法,可以便捷地应用于实际,但是由于交通条件动态变化,导致其普遍适用性较差,节能效果有限。优化类方法,主要是利用交通信息,合理优化车速,极大地提高了能量效率,但是因为计算方法较为复杂,优化速度慢,很难应用于实际。

本文聚焦于汽车巡航速度优化问题,考虑到现有巡航控制研究多针对较为理想或单一的交通场景,但实际中道路坡度复杂多变,最高限速也不尽相同。另外,现有优化类算法计算效率低,难以应用于实际。所以,本文基于交通信息物理系统获取的动态道路坡度和交通限速信息,设计滚动距离域车速规划策略(Receding distance horizon velocity planning, RDHVP),解耦能量优化与交通约束时空耦合影响关系。依据道路限速,在距离域将全程问题分段化,并进行滚动优化,计算能量最优巡航车速。为保证优化效果和提高计算效率,本文设计一种迭代动态规划算法(Iterative dynamic programming, IDP),实现能量最优巡航车速快速求解。最后,采集南京林业大学至红枫科技园路段信息,仿真验证所提出方法在能量效率和计算效率方面的优势。

1 经济性巡航优化问题

1.1 问题描述

实际交通场景中,受道路类别、自然环境、铺

设时间等因素影响, 道路坡度和最高限速复杂多变(图 1)。道路坡度属于空间耦合因素, 与行驶路段自然环境有关(如山地道路、平原道路等); 最高限速除了与自然环境相关外, 还与道路类别(混凝土和沥青道路、一级和二级道路等)、时间(如临时施工、恶劣天气等引起的道路限速降低等)相关联, 属于时空耦合因素。已有研究表明, 坡度和限速是影响巡航车速优化关键因素^[21], 所以若能利用交通信息物理系统提前获取行驶道路的交通状态, 合理解耦车速优化影响因素, 再加上高效的优化算法, 在出行前和出行中实现经济性巡航车速快速优化, 则可以有效降低汽车能耗。

图 1 变化的道路坡度和交通限速

1.2 最优控制问题

本文以装备 4 个轮毂电机的 EV 为研究对象, 借助于交通信息物理系统获取道路坡度和限速信息, 合理规划巡航车速, 使其安全、节能与高效地到达目的地。为降低最优控制问题复杂度及求解难度, 汽车节能目标通过将 EV 电池能耗设定为目标函数实现; 高效通行目标通过设定最小车速约束实现; 舒适与安全通行目标通过设定驱动/制动力约束实现。定义全程行驶时间为 T , 状态量为距离和车速 $\mathbf{x} = (d, v)^T$, 控制量为车辆控制力(驱动力为正值, 制动力为负值) $u = F_v$, 则最优控制问题为

$$\underset{u \in U}{\text{Minimize}} J(\mathbf{x}(t), u(t)) = \int_0^T P_b(t) dt \quad (1)$$

s.t.

$$\begin{aligned} v(0) &= v_s \\ d(0) &= 0 \\ v &\in [v_{\min}, v_{\max}] \\ u &\in [F_{bc}, F_{dc}] \\ \dot{\mathbf{x}}(t) &= f(\mathbf{x}(t), u(t)) \end{aligned}$$

式中, P_b 为电池功率, 驱动输出功率为正值, 制动回收功率为负值; v_s 为初始车速; $v_{\min}$ 和 $v_{\max}$ 分别为提高通行效率的最低车速和满足道路限速要求的最高车速; F_{dc} 和 F_{bc} 分别为驱动力和制动力约束, 驱动力和制动力约束满足舒适性和路面附着系数需

求, 另外还需要满足电机最大驱动力和再生制动力约束; $\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), u(t))$ 为车辆纵向动力学状态方程, 用于描述车辆纵向运动与控制输入的关系

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), u(t)) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{g f \cos \theta(t)}{\delta v(t)} - \frac{g \sin \theta(t)}{\delta v(t)} - \frac{C_D A \rho v(t)}{2m\delta} \end{pmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{m\delta} \end{pmatrix} u(t) \quad (2)$$

式中, m 为车辆质量; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数; C_D 为空气阻力系数; A 为汽车纵向迎风面积; ρ 为空气密度; θ 为道路坡度。

汽车能耗采用电池能量消耗表示, 因 EV 具备再生制动能量回收功能, 所以电池能量双向流动, 即存在驱动过程放电输出和再生制动过程充电回收。电池功率 P_b 计算时忽略电线损耗和能量转换装置损耗, 但考虑附件消耗功率, 计算式为

$$P_b = P_a \eta_b^{-1} + \sum \frac{F_m r_w n}{9.55} \eta_m^{-\text{sgn}(F_m)} \eta_b^{-\text{sgn}(F_m)} \quad (3)$$

式中, P_a 为车载附件功率; η_b 为电池工作效率; F_m 为电机输出力, 驱动力为正值, 制动力为负值, 由车辆控制力和驱动/再生制动力分配策略决定; r_w 为车轮滚动半径; n 为电机(车轮)转速; $\text{sgn}()$ 为符号函数; η_m 为电机工作效率, 与电机转速和转矩有关, 采用效率查表法获取。本文所用电机效率和转矩曲线如图 2 所示。另外, EV 动力电池采用内阻模型描述充放电特性, 其电能消耗采用安时累积法计算, 具体建模计算方法见文献[22]。

图 2 电机效率和转矩特性

EV 驱动过程整车驱动力由 4 个轮毂电机提供; 制动过程的需求力由各车轮电机和摩擦制动系统承担。故车辆控制力与电机输出力、摩擦制动力之间的关系为

$$F_v = \begin{cases} \sum F_m i_g i_0 & \text{驱动} \\ \sum F_m i_g i_0 + F_{br} & \text{制动} \end{cases} \quad (4)$$

式中, i_g 和 i_0 分别为变速器和主减速器传动比; F_{bf} 为整车摩擦制动力。各车轮驱动/制动力与驱动和再生制动力分配策略有关。本文只考虑 EV 纵向动力学控制, 所以驱动力采用均分策略, 即各车轮分配的驱动转矩相同。车辆制动力采用文献[23]提出的理想再生制动策略, 前后轴制动力依据理想制动力曲线分配, 同轴左右轮制动力平均分配, 每个车轮优先利用电机制动力, 不足部分由摩擦制动力补充。

2 经济性巡航车速规划

为实现经济性巡航车速规划高效优化, 本文提出一种滚动距离域车速规划策略。RDHVP 策略将路程按照限速段划分, 求解每段最优车速, 依次滚动优化, 获取全程能量最优巡航车速。另外, 设计一种包含控制量/状态量边界和网格大小迭代策略

的迭代动态规划算法, 实现每段优化问题快速求解。

2.1 RDHVP 策略原理及优化问题离散化

RDHVP 策略按照限速在距离域将全局问题划分阶段。定义全程距离为 D , 限速阶段为 n , 每段限速区域长度为 D_i , 下标 i 表示第 i 阶段 ($i = 1, 2, \dots, n$), 则 $D = \sum_{i=1}^n D_i$ 。基于 RDHVP 策略原理, 将每阶段优化问题在距离域上离散化, 降低优化问题维度。定义距离间隔为 Δd , 则第 i 阶段问题可按照 Δd 离散为 N_i 步, 即 $N_i = D_i/\Delta d + 1$ 。第 i 阶段状态量为车速 $x_i = v_i$, 控制量为车辆牵引力 $u_i = F_i$, 每阶段车速状态终值 $v_i(N_i)$ 是下一阶段的车速状态初 $v_{i+1}(0)$, 每阶段控制量终值 $u_i(N_i)$ 是下一阶段的控制量初值 $u_{i+1}(0)$ 。依次求解每个阶段的最优车速 $v_{opt,i}$ 和控制力 $u_{opt,i}$, 最后合并便是全程的最优车速 v_{opt} 和控制力 u_{opt} 序列。RDHVP 策略原理见图 3。

图3 RDHVP 策略原理图

基于 RDHVP 策略原理, 在第 i 阶段, 采用欧拉法将优化问题(1)在距离域离散化, 可得

$$\text{Minimize}_{u_i \in U} J_i(x_i(k), u_i(k), \Delta d) = \sum_{k=1}^{k=N_i} P_{b,i}(k) t_i(k) \quad (5)$$

s.t.

$$\begin{aligned} v_i(k+1) &= \sqrt{v_i^2(k) + 2\Delta d a_i(k)} \\ t_i(k+1) &= \frac{v_i(k+1) - v_i(k)}{a_i(k)} \\ v_i(k) &\in [v_{\min,i}, v_{\max,i}] \\ u_i(k) &\in [F_{bc,i}(k), F_{dc,i}(k)] \\ x_i(1) &= v_{i-1}(N_{i-1}) \\ u_i(1) &= u_{i-1}(N_{i-1}) \end{aligned}$$

式中, $a_i(k)$ 为第 i 阶段中第 k 步的加速度或减速度, $a_i(k) = \frac{u_i(k) - C_r(k)}{m\delta}$ 。 C_r 为滚动阻力、坡度阻力、空气阻力之和, 计算公式为

$$C_r(k) = mgf \cos \theta(k) + mg \sin \theta(k) + 0.5 C_D A \rho v^2(k) \quad (6)$$

2.2 迭代动态规划算法

现有经济性驾驶研究中, 动态规划算法在全局优化问题求解方面表现出了巨大的优势^[17-18], 特别是处理一些复杂非线性优化问题。动态规划算法基于 Bellman 最优性原理^[24], 针对距离划分的优化问题(5), 可以在每阶段逆向推导求解每步最优车速, 实现全局问题求解。在第 i 阶段优化过程中, 状态变量依据 Δv 划分为 M_i 个网格, 控制变量依据 Δu 划分为 Z_i 个网格。每一步代价函数定义为当前能量消耗与之前能量消耗之和。因此, 定义第 N_i 代步价函数

$$J_i(x_i(N_i), u_i(N_i), \Delta d) = \arg \min_{u_i(N_i) \in U} P_{b,i}(N_i) t_i(N_i) \quad (7)$$

则第 k 步代价函数为

$$J_i(x_i(k), u_i(k), \Delta d) =$$

$$\arg \min_{u_i(k)=F_i(k)} \left\{ \overbrace{P_{b,i}(k)t_i(k)}^{\text{当前第}k\text{步能耗}} + \overbrace{\sum_{k=1}^{N_i} P_{b,i}(k+1)t_i(k+1)}^{k\text{步之前能耗之和}} \right\} \quad (8)$$

动态规划算法包含问题划分、创建离散网格空间、逆向求导、正向计算等过程，具体步骤如图 4 所示。动态规划计算效率及优化效果与问题步长、网格空间大小、网格密度有关。问题步长越小、网格空间越大、网格越小则优化效果越好。但是随着问题维度(即状态量和控制量个数)、问题划分密度和网格密度增大，动态规划求解过程计算时间和存

储需求呈指数级增长，带来了巨大求解负担，这一现象被称为“维度灾难”^[25]。“维度灾难”问题在数据存储和计算速度方面带来了极大的挑战，严重制约动态规划算法应用。

为提高巡航车速优化计算速度，本文在优化问题简化处理的基础上，基于动态规划理论设计一种可以实现状态量和控制量网格缩放的两步迭代策略。该策略第 1 次迭代目标是降低状态量和控制量边界范围，缩小网格空间大小，减少计算和存储负担；第 2 次迭代目标是降低网格密度，提升优化性能。IDP 计算流程如图 4 所示。

图 4 IDP 算法计算流程

图 4 中， v_{optL} 和 v_{optU} 分别为最优速度序列的最小车速和最大车速； u_{optL} 和 u_{optU} 分别为最优控制量序列的最小值和最大值； Δv 和 Δu 分别为初始速度

状态量和控制量网格大小； I_{max} 为最大迭代次数。

如图 4 所示，IDP 具体计算流程如下：第 1 次迭代时代入初始状态量边界(v_{min} 和 v_{max})与控制量边

界($u_{\min}$ 和 $u_{\max}$), 及初始网格大小 Δv 和 Δu , 依据动态规划算法计算得到最优状态变量 v_{opt} 、控制变量 u_{opt} ; 接着更新状态量和控制量边界范围, 及状态量和控制量网格大小, 进入第 2 次迭代计算。状态量和控制量最小和最大值更新依据第 1 次优化结果(即 v_{optL} 、 v_{optU} 、 u_{optL} 和 u_{optU})计算, 另外考虑到最优控制点可能位于优化结果边界再加上一个网格的区间内, 所以引入状态量和控制量边界缩放系数 λ 和 ζ , 合理调节边界范围。状态量和控制量边界缩放规则为

$$v_{\max}^2 = \min(v_{\text{optU}} + \lambda \Delta v^1, v_{\max}) \quad (9)$$

$$v_{\min}^2 = \max(v_{\text{optL}} - \lambda \Delta v^1, v_{\min}) \quad (10)$$

$$u_{\max}^2 = \min(u_{\text{optU}} + \zeta \Delta u^1, u_{\max}) \quad (11)$$

$$u_{\min}^2 = \max(u_{\text{optL}} - \zeta \Delta u^1, u_{\min}) \quad (12)$$

式中, $\min(\cdot)$ 和 $\max(\cdot)$ 分别为取最小值和最大值函数。第 2 次迭代时, 网格大小 Δv^2 和 Δu^2 在初始网格大小 Δv 和 Δu 基础上, 通过缩放因子 κ 和 ω 更新, 即

$$\Delta v^2 = \kappa \Delta v \quad (13)$$

$$\Delta u^2 = \omega \Delta u \quad (14)$$

所设计的边界和网格缩放过程如图 5 所示。从网格缩放规则可以看出, 初始网格 Δv 和 Δu 大小影响第 1 次迭代计算速度和第 2 次迭代边界范围, λ 和 ζ 取值也影响网格边界范围, κ 和 ω 取值影响网格密度。所以, 上述 6 个值需要选择权衡计算效率和节能效果的组合。

图 5 边界和网格缩放过程

2.3 RDHVP 策略流程

综合第 2.1 节设计的阶段划分原理及第 2.2 节设计的 IDP 算法, 归纳实现经济性巡航车速快速优化的 RDHVP 策略流程如下所述。

(1) 信息获取。利用交通信息物理系统, 获取全程路程长度 D 、变限速次数 n 、全程限速值($v_{\max,1}$, $v_{\max,2}$, $\dots$, $v_{\max,n}$)及对应距离长度($D_1, D_2, \dots, D_n$)。

(2) 滚动阶段划分。依据限速阶段, 将路径全程依据距离划分为 n 段, 确定每段长度 D_i 及对应的

最低限速 $v_{\min,i}$ 和最高限速 $v_{\max,i}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(3) 问题离散化。定义距离长度 Δd , 将每阶段问题划分为 N_i 步, 即 $N_i = D_i / \Delta d + 1$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(4) 初始化, $i := 1$ 。

(5) 车辆状态初始化。定义阶段初始车速 $v_i(1) = v_{i-1}(N_{i-1})$, 初始控制量 $u_i(1) = u_{i-1}(N_{i-1})$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(6) 优化求解。执行 IDP 算法, 输出第 i 阶段最优状态序列 $v_{\text{opt},i}$ 和控制序列 $u_{\text{opt},i}$, 提取终端状态量 $v_i(N_i)$ 和控制量 $u_i(N_i)$ 。

(7) 阶段滚动, $i := i+1$ 。

(8) 滚动标志判断。若 $i \leq n$ 返回步骤(5), 若 $i > n$ 停止优化进入步骤(9)。

(9) 记录输出全程最优控制量序列 $u_{\text{opt}} = [u_{\text{opt},1}, u_{\text{opt},2}, \dots, u_{\text{opt},n}]$, 最优车速序列 $v_{\text{opt}} = [v_{\text{opt},1}, v_{\text{opt},2}, \dots, v_{\text{opt},n}]$ 。

需要说明的是, 上述过程中 $i = 1$ 是滚动优化第 1 阶段, 该阶段状态量和控制量初值为最初给定状态量和控制量 v_s 和 u_s 。通过 RDHVP 滚动计算, 即可获得全程最优控制量序列 u_{opt} 和车速序列 v_{opt} 。

3 仿真与结果分析

本节通过采集真实道路交通场景数据, 采用 MATLAB (R2018a) 建立仿真模型, 评价本文提出方法在巡航车速计算速度和节能效率的优势。试验用电脑配置 Intel Core i7-8700@3.20GHz CPU 和 16GB RAM。

3.1 仿真参数

本文选择的 EV 整车、电机及电池参数见表 1。另外, 路面附着系数定为 $\varphi = 0.8$, 保证舒适性的最大驱动力和最大制动力分别为 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 $-4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, EV 初始车速设定为 $v_s = 50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

表 1 电动汽车参数

类别	参数	数值
整车	质量/kg	1 421
	滚动阻力系数	0.016
	空气阻力系数	0.3
	迎风面积/ m^2	2.22
	转动惯量换算系数	1.022
	车轮滚动半径/m	0.325
	空气密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.206
	重力加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
	附件功率/W	300
	变速器传动比	1
动力电池	主传动比	1
	开路电压/V	360
	容量/ $(\text{A}\cdot\text{h})$	140
轮毂电机	工作效率	0.9
	峰值驱动功率/kW	20.75
	峰值制动功率/kW	-20.35
	峰值驱动转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	312.50
	峰值制动转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	-311.50
	峰值转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 600

3.2 测试道路

测试道路选取南京林业大学至红枫科技园，该路段包含城市普通道路、城市快速道路、郊区道路等多种交通环境，全长 20 km。途径钟山山脉，地势起伏变化明显，路段包含多段上下坡路况和平坦路况，道路坡度和道路限速等均不同。

在地图中调取所选路段的数据包，可以得到距离与海拔信息，并采用五点三次平滑算法[26]对数据信息进行平滑降噪处理。另外，获取到的离散地图数据点之间存在较大距离间隔，采用插值法补充离散点数据，处理后的道路海拔高度和坡度变化曲线如图 6 所示。因交通条件不同，测试路段全程限速在 $40 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，郊区道路限速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，城区道路限速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。另外因有两段道路有施工，所以存在 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的较低限速，全程限速如图 7 所示。

图 6 道路海拔及坡度

图 7 道路限速

3.3 IDP 性能分析

由第 2 节可知，IDP 计算速度与初始网格大小和缩放系数相关。本文通过随机参数测试获取最佳参数组合，随机测试所用参数如表 2 所示。计算获得的权衡计算速度和优化效果的参数组合如下： $\Delta v = 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\Delta u = 615 \text{ N}$ 、 $\lambda = 0.3$ 、 $\zeta = 0.25$ 、 $\kappa = 0.1$ 、 $\omega = 0.05$ ，算法运行时间 53.68 s，能量消耗 7.87 MJ。另外，为对比 IDP 算法最优性，采用传统动态规划算法(同样采用 RDHVP 策略)在网格较细条件下计

算对比结果，如车速网格 $\Delta v = 0.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，控制量网格 $\Delta u = 30 \text{ N}$ ，问题划分步长 $\Delta d = 5 \text{ m}$ 。常规动态规划算法计算时间 653.87 s，消耗能量 7.81 MJ。

表 2 IDP 优化计算参数

参数	数值范围
最大迭代次数 $I_{\max}$	2
问题划分步长 $\Delta d/\text{m}$	5
初始车速网格 Δv	$[1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}]$
初始控制量网格 Δu	$[30 \text{ N}, 925 \text{ N}]$
车速网格边界缩放系数 λ	$[0, 1]$
控制量网格边界缩放系数 ζ	$[0, 1]$
车速网格缩放因子 κ	$[0.1, 1]$
控制量网格缩放因子 ω	$[0.01, 1]$

IDP 算法车速和转矩边界变化如图 8 所示。从图 8 可得，转矩最大值降低，最小值增大；车速最小值不变，但最大值下降。说明 IDP 算法可以在第 1 次迭代时减小网格空间大小，以降低第 2 次迭代计算量。第 1 次迭代耗时 8.19 s，但因网格较粗，优化节能效果较差(9.01 MJ)；第 2 次迭代耗时 45.49 s，此时网格较密，能量优化效果更好(7.87 MJ)。另外，相较于传统动态规划算法，IDP 算法节能性能仅下降 0.8%，但计算速度提升 91.79%，可以满足控制需求。

(a) 整车转矩边界

(b) 巡航车速边界

图 8 迭代过程中整车转矩与车速边界变化

3.4 能量效率与计算速度验证

为验证新提出方法的优势,采用第 3.3 节获得的最优参数组合,与传统 CS 策略和常规动态规划方法进行比较。CS 策略是较常见的巡航车速控制方法^[14],恒定巡航车速定义为本文提出方法优化车速

平均值($39.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)。常规动态规划方法将全程问题统一优化,计算参数与第 3.3 节对比用动态规划算法设置相同,一次性计算出全程最优控制序列。能量消耗和计算时间等见表 3,整车转矩、车速、功率结果分别如图 9~11 所示。

表 3 仿真结果比较

	计算时间/s	能量消耗/MJ		
		驱动消耗	再生制动回收	总能耗
CS 策略	—	12.29	-2.03	10.26
常规动态规划方法	1 628.47	9.38	-1.29	8.09
RDHVP 策略	53.68	9.23	-1.36	7.87
性能提升	RDHVP 策略计算时间较常规动态规划方法节省 96.70%		RDHVP 策略总能耗较 CS 策略提升 23.29% RDHVP 策略总能耗较常规动态规划方法提升 2.72%

图 9 整车转矩曲线

由表 3 可得, RDHVP 策略相较于常规动态规划方法,计算时间节省 96.70%,极大提升了巡航车速优化计算速度。主要是因为常规动态规划方法优化问题求解时车速网格边界为全程最大限速,而本文提出方法在每阶段优化时网格边界为该段限速,可以避免在各限速段边界处发生车辆控制力大幅度变化,降低额外的能量消耗;另外,迭代动态规划算法的应用可以进一步降低状态量和控制量网格空间大小,降低计算量。

本文提出方法能有效提升能量效率,如表 3 所示,相比于传统 CS 策略提升 23.29%。由图 9 可得,与 CS 策略相比,新提出方法通过对转矩调控,驱动输出转矩减小,再生制动次数也明显减少,能够有效降低能量效率损耗,表 3 数据也支持上述结论。另外,结合图 6、图 9、图 10 可得, RDHVP 策略借助于坡度变化,通过动能转化来降低效率损耗,所以车速波动也较大。

图 10 车速曲线

RDHVP 策略相较于常规动态规划方法的节能效果略有提升(2.72%)。尽管两种方法原理都属于动态规划,优化思路一致,转矩变化趋势相近,但所提出方法避免了过高的转矩波动(图 9),车速波动范围减小(图 10),动力电池功率变化也较为平滑(图 11),使得整车驱动消耗能量减少,再生制动回

收能量提升(表 3)。

图 11 动力电池功率曲线

综上所述, RDHVP 策略实现能量效率提升的原因主要是可以充分利用坡度变化, 合理控制汽车转矩, 降低驱动输出转矩, 减少制动次数, 以提高电机工作效率, 降低能量效率损耗。

4 结论

(1) 优化问题设计时转换车辆控制目标, 降低优化问题维度和求解难度。将舒适与安全通行目标设定为控制力约束, 节能目标利用电池能耗表示并定义为目标函数, 高效通行目标通过设置最低车速约束实现。

(2) 滚动距离域车速规划策略基于交通限速划分滚动优化阶段, 可以缩减车速状态量边界, 避免最高限速变化引起的车速波动, 有效降低汽车能量消耗, 获得了比常规动态规划方法更优秀的节能效果。

(3) 迭代动态规划算法能够该策略利用第 1 次迭代结果降低状态量和控制量边界范围, 减少计算和存储负担; 第 2 次迭代时降低网格密度, 提升优化性能。该算法可以有效减少计算时间, 同时获得接近采用精细网格的传统动态规划算法的优化结果。

参 考 文 献

- [1] HUANG Yuhan, NG E, ZHOU J, et al. Eco-driving technology for sustainable road transport: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 596-609.
- [2] GUO Qiangqiang, LI Li, BAN Xuegang. Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: a survey[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 101: 313-334.
- [3] LEI Yulong, JIA Yuzhe, FU Yao, et al. Car fuel economy simulation forecast method based on CVT efficiencies measured from bench test[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(83): 1-16.
- [4] WANG Qipu, YANG Chao, LIU Yahui, et al. City-bus-route demand-based efficient coupling driving control for parallel plug-in hybrid electric bus[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(58): 1-11.
- [5] VAHIDI A, SCARRETTA A. Energy-saving potentials of connected and automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 2018, 95: 822-843.
- [6] 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.
- [7] BARKENBU J. Eco-driving: An overlooked climate change initiative[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 762-769.
- [8] 徐少兵, 刘学冬, 李升波, 等. 速比离散型车辆加速-滑行式节油巡航策略[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 49-58.
- XU Shaobing, LIU Xuedong, LI Shengbo, et al. Fuel-saving pulse-and-glide cruising strategy for road vehicles with discrete gear ratio[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 49-58.
- [9] KARAGIANNIS G. Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2011, 13(4): 584-616.
- [10] PENG Hao, WU Guoyuan, BORIBOONSOMSIN K, et al. Eco-approach and departure (EAD) application for actuated signals in real-world traffic[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(1): 30-40.
- [11] LIN Qingfeng, LI S, DU Xuejin, et al. Minimize the fuel consumption of connected vehicles between two red-signalized intersections in urban traffic[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9060-9072.
- [12] BAKIBILLAH A, KAMAL M, TAN C, et al. Event-driven stochastic eco-driving strategy at signalized intersections from self-driving data[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(9): 8557-8569.
- [13] YE Fei, PENG Hao, QI Xuewei, et al. Prediction-based eco-approach and departure at signalized intersections with speed forecasting on preceding vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(4): 1378-1389.

- [14] 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, 2019, 2673(9): 277-286.
- [15] 徐少兵, 李升波, 赵芸辉, 等. CVT 型车辆经济性加速策略优化与分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 110-119.
- XU Shaobing, LI Shengbo, ZHAO Yunhui, et al. Optimization and analysis of economical accelerating strategy for CVT vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 110-119.
- [16] LI S, PENG Hui, LI Keqiang, et al. Minimum fuel control strategy in automated car-following scenarios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(3): 998-1007.
- [17] ZHUANG Weichao, QU Linghu, XU Shaobing, et al. Integrated energy-oriented cruising control of electric vehicle on highway with varying slopes considering battery aging[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(1): 155-165.
- [18] DING Feng, JIN Hui. On the optimal speed profile for eco-driving on curved roads[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(12): 4000-4010.
- [19] WANG Siyang, LIN Xianke. Eco-driving control of connected and automated hybrid vehicles in mixed driving scenarios[J]. Applied Energy, 2020, 271: 1-17.
- [20] ZHANG Shuwei, LUO Yugong, WANG Junmin, et al. Predictive energy management strategy for fully electric vehicles based on preceding vehicle movement[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(11): 3049-3060.
- [21] 付锐, 张雅丽, 袁伟. 生态驾驶研究现状及展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3): 1-12.
- FU Rui, ZHANG Yali, YUAN Wei. Progress and prospect in research on eco-driving[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 1-12.
- [22] WANG Juncheng, HE Ren, KIM Y. Optimal control of regenerative hydraulic composite braking system based on a voltage variable charging control scheme[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(2-3): 536-551.
- [23] 董昊轩, 郭金刚, 闫宽宽. 轮毂电机四轮独立驱动电动汽车再生制动控制策略[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(11): 1778-1784.
- DONG Haoxuan, GUO Jingang, YAN Kuankuan. Control strategy of regenerative braking for four-wheel-drive electric vehicles of in-wheel-motor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(11): 1778-1784.
- [24] BELLMAN R. Dynamic programming[J]. Science, 1966, 153(3731): 34-37.
- [25] ZHU Chong, LU Fei, ZHANG Hua, et al. A real-time battery thermal management strategy for connected and automated hybrid electric vehicles (CAHEVs) based on iterative dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8077-8084.
- [26] LIU Yuefei, FAN Xueping. A data assimilation method about Bayesian Fourier dynamic linear prediction of periodic extreme stresses for steel bridges[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 128: 82-92.

作者简介: 董昊轩, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能网联汽车能量优化控制。

E-mail: donghaox@foxmail.com

庄伟超(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为车辆动力学控制, 智能网联汽车。

E-mail: wezhuang@seu.edu.cn