基于预见性自适应巡航控制的重型载货汽车燃油经济性优化研究*

叶凯华[1] 李骏[2] 黄健彬[3] 汤涛[3]

（1.广西亦度汽车科技有限公司，柳州 545616；2.东风柳州汽车有限公司，柳州 545005；3.桂林电子科技大学，桂林 541004）

【摘要】针对重型载货汽车在爬坡工况下燃油消耗量大的问题，综合发动机转速、扭矩等参数建立了兼顾精度与实时性的燃油消耗量预测模型，并提出一种基于预见性自适应巡航控制（PACC）的分层架构：上层利用动态规划（DP）算法规划全局最优经济车速；下层基于模型预测控制（MPC）算法进行二次速度规划，在确保安全跟车的同时进一步提高经济性。实车试验结果表明，该方法可使载货汽车燃油消耗量平均降低1.5%。

关键词：重型载货汽车 预见性自适应巡航控制 动态规划 模型预测控制 燃油经济性

中图分类号：U461.8 **文献标志码：**A **DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20260024

Research on Fuel Economy of Heavy-Duty Trucks Based on Predictive Adaptive Cruise Control

Ye Kaihua[1], Li Jun[2], Huang Jianbin[3], Tang Tao[3]

(1. Guangxi Yidu Automobile Technology Co., Ltd., Liuzhou 545616; 2. Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd., Liuzhou 545005; 3. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

【**Abstract**】To address the issue of high fuel consumption in heavy-duty truck druing hill-climing conditions, a fuel comsumption predicton model balancing accuracy and real-time performance is developed by inregrating parameters such as engine speed and torque. This paper proposes a fuel-saving strategy for heavy trucks using Predictive Adaptive Cruise Control (PACC) on sloped roads. A hierarchical architecture is developed: the upper layer employs Dynamic Programming (DP) for global economic speed planning, while the lower layer uses Model Predictive Control (MPC) for secondary planning to ensure safe following and energy efficiency. A fuel consumption model considering engine torque and speed is integrated. Vehicle test demonstrates an average fuel reduction of 1.5% per kilometer.

Key words: Heavy-duty trucks, Predictive Adaptive Cruise Control (PACC), Dynamic Programming (DP), Model Predictive Control (MPC), Fuel economy

【引用格式】叶凯华, 李骏, 黄健彬, 等. 基于预见性自适应巡航控制的重型载货汽车燃油经济性优化研究[J]. 汽车工程师, 2026(7): 44-48.

YE K H, LI J, HUANG J B, et al. Research on Fuel Economy of Heavy-Duty Trucks Based on Predictive Adaptive Cruise Control[J]. Automotive Engineer, 2026(7): 44-48.

1 前言

重型载货汽车质量大、运行环境复杂，通过智能化手段提升其燃油经济性是目前需重点解决的问题[1]。预见性自适应巡航控制（Predictive Adaptive Cruise Control，PACC）技术作为一种融合

*基金项目：广西创新驱动发展专项（AA22068001，AA23062031）；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2025KY0239）。

通信作者：李骏（1978—），男，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为汽车设计、智能驾驶等，lij@dflzm.com。

地理信息与动力学优化方法的先进控制手段，通过预知前方路段的坡度变化与交通流状态，为实现载货汽车的深度节能提供了可能[2]。

早期的燃油经济性优化研究主要集中于单车巡航模式下的坡度适应性。Li 等[3]通过多目标模型预测控制（Model Predictive Control，MPC）框架，探讨了在满足跟车安全性的前提下优化燃油效率的方法。Weißmann 等[4]提出了一种结合动态规划（Dynamic Programming，DP）与 MPC 的混合架构，利用 DP 算法进行离线全局经济速度规划，再由 MPC 算法实现实时轨迹跟踪。随着高精地图与云控制技术的发展，PACC 系统能够获取更长预测时域的道路特征。Li 等[5]验证了基于高精地图的预见性控制在实车燃油经济性提升方面的显著作用。针对载货汽车特有的动力学约束，Hellström 等[6]指出，利用坡度预测信息提前调整发动机输出扭矩，可有效避免爬坡工况下的能量浪费。

在控制策略优化方面，研究人员针对实时性与精度的平衡开展了大量工作。Hellström 等[7]利用全局优化算法解决了长途货运场景下的经济速度规划问题。Kamal 等[8]针对多变坡度路段提出了一种分层控制策略，增强了系统在极端工况下的鲁棒性。Lee 等[9]进一步引入多目标约束，在降低燃油消耗量的同时兼顾车辆的驾驶舒适性。此外，Vajedi 等[10]和 Han 等[11]研究了路面分辨率及地图精度对预见性控制效果的影响，结果表明，精细化的地图数据能够显著提升燃油经济性。针对动力总成的协同优化，Saerens 等[12]提出了车速规划与换挡策略的耦合控制方案。近期，Wang 等[13]和 Wu 等[14]的研究表明，通过优化能量流分配与瞬态响应逻辑，PACC 系统在重型商用车上的节能潜力可进一步释放。

尽管 PACC 技术在节能方面展现出巨大潜力，但目前的研究在全局燃油经济性提升与瞬时安全跟车约束的深度融合方面仍存在提升空间。尤其是在处理长距离且坡度波动剧烈的复杂路段时，如何保证算法在有限算力条件下的最优解输出是亟待解决的问题。针对上述挑战，本文提出一种基于 DP-MPC 的双层 PACC 策略：上层控制器通过地图处理模块提取前方路段的坡度信息，利用 DP 算法确定全局最优经济车速；下层控制器基于 MPC 算法进行二次规划，实现巡航与跟车模式的灵活切换。

2　PACC 系统建模与目标建立

本文提出的 PACC 系统控制算法流程如图 1 所示：经地图预处理后，利用 DP 算法结合动力学模型进行多目标寻优，最终输出最优控制序列。

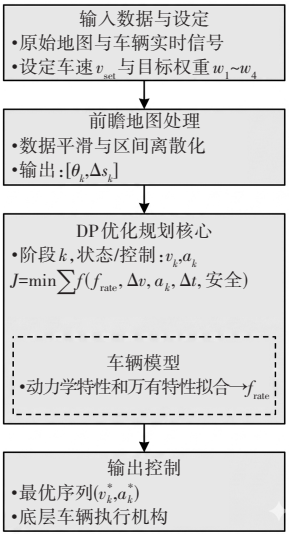


图 1　PACC 系统控制算法流程

2.1　地图处理与道路信息获取

预见性控制的优势在于能够利用前瞻信息提前调整车辆状态。本文利用地图处理模块对预先采集的一段 22.5 km 的高等级公路数据进行解析。该模块的核心功能是接收车辆底盘信号，实时检索当前位置前方一定距离内的道路坡度。

为保证控制算法的实时性与稳定性，地图处理模块对原始坡度数据进行平滑与降采样处理，如图 2 所示。原始数据以 10 Hz 的频率记录，由于道路微小起伏产生的噪声可能引起控制量的频繁波动，因此采用分段插值法对坡度信息进行平滑处理。处理后的地图将 22.5 km 路径划分为若干个控制区间，每个区间内的坡度视为恒定，从而为上层 DP 算法提供简洁的离散输入环境。

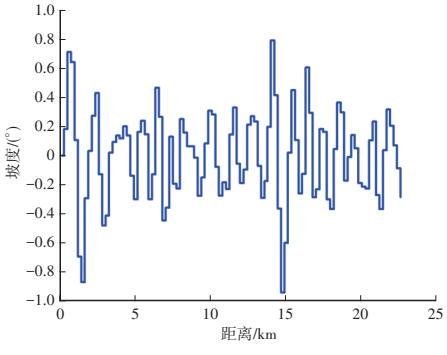


图 2　道路坡度数据

2.2 燃油消耗量预测模型

为了在规划过程中量化燃油消耗情况，本文基于某重型载货汽车的动力总成特性建立了基于试验数据的燃油消耗量预测模型，以车辆的纵向动力学方程为基础计算所需的牵引力。车辆的驱动形式为6×4，前、后轴距分别为3 800 mm、1 350 mm，车身长度7.39 m、宽度2.55 m、高度3.68~3.80 m，整车质量8.8 t，总质量24.995 t，牵引总质量39.5 t。车辆受到的阻力F_{res}包含滚动阻力、空气阻力和坡道阻力：

$$F_{res}=M_v gf\cos\theta+M_v g\sin\theta+\frac{1}{2}\rho AC_d v^2 \tag{1}$$

式中：M_v为车辆的总质量，g为重力加速度，f为滚动阻力系数，θ为道路坡度，ρ为空气密度，A为车辆迎风面积，C_d为空气阻力系数，v为车速。

通过对该车型配备的Z14NS6B600型发动机（峰值扭矩2 750 N·m）的万有特性曲线[15]进行二阶多项式拟合，基于发动机的转速n和扭矩T得到瞬时燃油消耗率f_{rate}的预测公式[15]为：

$$f_{rate}=k_1T^2+k_2T+k_3n^2+k_4n+k_5 \tag{2}$$

式中：k_1为扭矩平方项系数，表征燃油消耗率随扭矩变化的非线性曲率；k_2为扭矩一次项系数，表征燃油消耗率随扭矩变化的线性趋势；k_3为转速平方项系数，表征燃油消耗率随转速变化的非线性曲率；k_4为转速一次项系数，表征燃油消耗率随转速变化的线性趋势；k_5为常数项，是拟合曲面的基准偏移量。

该模型能够在巡航过程中实时估算不同速度序列下的燃油消耗率，为寻找全局最优经济车速提供评价指标。

2.3 优化目标函数构建

PACC系统的控制目标是在保证行车安全与效率的前提下实现最优燃油经济性。因此，本文构建了包含燃油消耗率、速度波动、行驶时间及跟车距离的多目标优化函数，目标函数J为：

$$\begin{aligned}J=\min\sum_{k=1}^{N}[&w_1 f_{rate}(k)+w_2(v(k)-v_{set})^2\\&+w_3a(k)^2+w_4\Delta t(k)]\end{aligned} \tag{3}$$

式中：$f_{rate}(k)$为第k步的燃油消耗率，$v(k)$为第k步的实际车速，v_{set}为设定的巡航车速，$a(k)$为第k步的加速度，$\Delta t(k)$为第k步所需时间，w_1~w_4为各项目标的加权系数，N为总步数。

在跟车场景下，函数还额外引入了安全车距误差项惩罚（即权重与安全车距的乘积），确保下层控制始终保持与前车的安全距离。通过调整各权重系数，系统能够在不同的驾驶需求下自动切换侧重点。

3 基于DP-MPC的双层控制策略

3.1 基于DP算法的上层全局优化

上层控制器的核心任务是根据前方道路的坡度分布，在长时域内规划出满足动力学约束且燃油消耗量最低的全局最优经济车速序列。动态规划算法通过将连续路段离散化为若干空间步长，将复杂的最优控制问题转化为多阶段决策过程。

在DP算法计算过程中，状态变量定义为车辆的位置s，控制变量为行驶速度v。其决策过程遵循贝尔曼最优性原理，通过逆向递归计算每个状态点的最小累积代价。每一阶段的转移代价L综合了燃油消耗率f_{rate}和行驶时间惩罚，其状态转移方程和递归目标函数表示为：

$$\begin{cases}J_k(x_k)=\min\{L(x_k,u_k)+J_{k+1}(x_{k+1})\}\\ \text{s.t. } v_{min}\leqslant v_k\leqslant v_{max},\ T_{min}\leqslant T_k\leqslant T_{max}\\ L(x_k,u_k)=\dot m_{fuel}(v_k,T_k)\cdot\Delta t+\beta\cdot\Delta t\end{cases} \tag{4}$$

式中：Δt为离散步长；U为控制量的可行域；v_k为第k阶段的车速；v_{min}、v_{max}分别为道路允许的最低和最高车速；T_k为发动机输出扭矩；T_{min}、T_{max}分别为发动机在相应转速下的最小和最大扭矩限值；$\dot m_{fuel}(v_k,T_k)$为发动机瞬时燃油消耗率，由发动机稳态油耗MAP图插值得到；J_k为代价函数；x_k为状态变量；u_k为控制变量；β为行驶时间惩罚系数，用于平衡油耗与行驶效率，β越大，算法越倾向于以更高车速行驶以降低时间成本。

算法通过在全域范围内搜索最优路径，输出能够根据坡度变化提前“加速冲坡”或“减速滑行”的参考速度序列v_{ref}。

3.2 基于MPC算法的下层二次规划

下层控制器采用MPC算法，以上层规划的经济车速序列v_{ref}为参考，结合实时传感器获取的前车距离与相对速度进行短时域内的二次速度规划。MPC算法利用线性化状态空间模型预测未来预测时域内的车辆状态。为了平衡经济性、安全性与舒适性，构建了二次规划形式的目标函数：

$$\begin{aligned}J_{mpc}=\sum_{i=1}^{P}\Big[&\left\|\hat v(k+i)-v_{ref}(k+i)\right\|_Q^2+\\&\left\|\Delta d(k+i)-d_{safe}\right\|_R^2+\left\|a(k+i)\right\|_S^2\Big]\end{aligned} \tag{5}$$

式中：$\Delta d(k+i)$为实际车间距离，d_{safe}为基于时距法的

安全距离，$a(k+i)$为加速度项，$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{S}$分别为对应目标的权重矩阵，P为预测时域长度，k为当前时刻，$\hat{v}(k+i)$为第$(k+i)$步的预测车速，$v_{\mathrm{ref}}(k+i)$为第$(k+i)$步的参考车速。

下层控制器通过在每个控制周期内求解受约束的二次规划问题，仅执行第一次规划的控制量，从而在复杂的动态交通流中实现对经济速度的精确跟踪并确保跟车安全。

3.3 巡航与跟车模式切换机制

为了适应高速公路环境下不同的交通密度，本文设计了精细的模式切换逻辑，模式的选择主要取决于自车与前方障碍车辆的相对距离d_{rel}。预见性巡航控制（Predictive Cruise Control，PCC）模式：当d_{rel}大于设定阈值（如150 m）时，系统处于自由流状态，此时控制器完全遵循DP算法获得的经济速度运行，最大化利用重力势能，不再受前车约束。PACC模式：当d_{rel}减小至安全阈值内时，系统自动切换至跟车模式，此时下层MPC算法将提升安全间距项的权重，在保证不发生追尾的前提下，尽可能微调车速以贴合DP算法输出的经济曲线，兼顾安全性与经济性。

4 实车试验

本文基于前文所述的重型载货汽车开展了实车对比试验，以验证所提出算法的实际性能。试验车辆搭载了高性能线控底盘系统，具备完善的线控转向和制动系统接口，为算法的实时控制提供了物理基础。在算法部署方面，采用dSPACE AutoBox快速控制原型技术，通过MATLAB/Simulink环境完成算法逻辑建模，并利用代码自动生成技术将其部署至车载实时计算单元，确保了控制逻辑的稳定运行。

在试验执行过程中，控制指令与车辆状态反馈均基于底盘CAN总线进行高速通信，算法运行频率设定为50 Hz，保证了控制系统的实时响应能力。利用dSPACE ControlDesk监控软件进行数据记录，通过CAN接口同步采集并存储底盘上传的各类传感器原始数据及算法中间变量，为后续对控制精度、稳定性和鲁棒性等关键指标的定量对比分析提供了可靠的数据支撑。

试验道路选取本文预先采集的22.5 km数据路段，包含连续起伏坡道（最大坡度±3%）的典型高速路段。车辆目标巡航速度设定为70 km/h，既符合长途货运的经济车速，也可充分体现预见性控制在高速工况下的风阻优化优势。试验过程中，前车初始位置为本车前200 m处，为充分测试系统在不同交通密度下的模式切换能力，前车速度按如下工况设置：前200 s以85 km/h匀速行驶，模拟自由流状态；第200~400 s内线性减速至65 km/h，使相对距离跨越150 m的模式切换阈值；第400~600 s内保持65 km/h匀速，以测试密集交通流下的跟驰性能；第600~800 s内加速至90 km/h，模拟前车驶离场景，验证系统重新切换回PCC模式的能力。本车期望的稳态跟车间距设定为150 m，安全临界距离为70 m。

试验结果如图3所示，在400 s的实车测试中，PACC系统相较于传统自适应巡航控制（Adaptive Cruise Control，ACC）系统展现出稳定的节油特性。尽管实车环境存在风阻变化、机械传动损耗等随机扰动，但得益于下层MPC算法的实时反馈校正能力，车辆仍能精准跟踪最优速度序列。最终实车测试得的平均节油率（PACC系统相较于ACC系统的实时燃油消耗率降低比例）大部分处于0.8%~3.2%的波动范围内，燃油消耗量降低约1.5%。

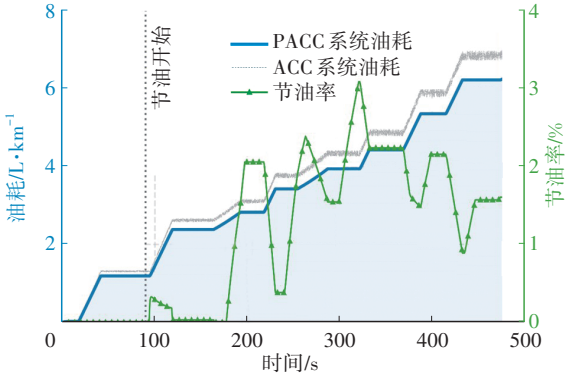


图3 燃油消耗量试验对比结果

5 结束语

本文针对重型载货汽车在爬坡工况下的燃油经济性优化需求，构建燃油消耗量预测模型，并提出了基于动态规划和模型预测控制双层架构的预见性自适应巡航控制策略。上层控制器利用动态规划算法在长时域内解算全局最优经济车速序列，通过“预见”地形起伏实现动能与势能的高效转化；下层控制器基于模型预测控制理论实现速度跟踪与安全跟车的实时逻辑切换。联合仿真与试验结果表明，该系统在10 Hz的实时解算频率下表现出优异的控制稳定性，能够在确保行车安全的前提下，使重型载货汽车的平均燃料消耗量降低1.5%，

验证了所提出的策略在充分利用道路坡度势能、兼顾瞬态安全性与长程经济性方面的优势。

参 考 文 献

[1] WEIßMANN A, GÖRGES D, LIN X H. Energy-Optimal Adaptive Cruise Control Combining Model Predictive Control and Dynamic Programming[J]. Control Engineering Practice, 2018, 72: 125-137.

[2] CHU H Q, GUO L L, GAO B Z, et al. Predictive Cruise Control Using High-Definition Map and Real Vehicle Implementation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11377-11389.

[3] LI S B, LI K Q, RAJAMANI R, et al. Model Predictive Multi-Objective Vehicular Adaptive Cruise Control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 556-566.

[4] LI Y, PAN C, WANG J, et al. Research on Energy Consumption Optimization of Predictive Cruise Control Considering the State of the Leading Vehicle[J]. Energy, 2024, 308.

[5] LI S Y, WAN K K, GAO B L, et al. Predictive Cruise Control for Heavy Trucks Based on Slope Information under Cloud Control System[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(4): 812-826.

[6] HELLSTRÖM E, IVARSSON M, ÅSLUND J, et al. Look-Ahead Control for Heavy Trucks to Minimize Trip Time and Fuel Consumption[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(2): 245-254.

[7] HELLSTRÖM E, ÅSLUND J, NIELSEN L. Design of an Efficient Algorithm for Fuel-Optimal Look-Ahead Control [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(11): 1318-1327.

[8] KAMAL M A S, MUKAI M, MURATA J, et al. Model Predictive Control of Vehicles on Urban Roads for Improved Fuel Economy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 831-841.

[9] LEE K, LEE C. String Stability Analysis and Design Guidelines for PD Controllers in Adaptive Cruise Control Systems[J]. Sensors, 2025, 25(11).

[10] VAJEDI M, AZAD N L. Ecological Adaptive Cruise Control for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Nonlinear Model Predictive Control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(1): 113-122.

[11] HAN J H, SCIARRETTA A, OJEDA L L, et al. Safe- and Eco-Driving Control for Connected and Automated Vehicles Using Analytical State-Constrained Optimal Solution[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3(2): 163-172.

[12] SAERENS B, RAKHA H A, DIEHL M, et al. A Methodology for Assessing Eco-Cruise Control for Passenger Vehicles[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 19: 20-27.

[13] WANG M, DAAMEN W, HOOGENDOORN S P, et al. Rolling Horizon Control Framework for Driver Assistance Systems. Part II: Cooperative Sensing and Cooperative Control[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 40: 290-311.

[14] 武子为, 秦玉英. 自适应巡航控制系统主动换道功能研究[J]. 汽车工程师, 2025(8): 42-48.
WU Z W, QIN Y Y. Research on Active Lane Change Function Based on Adaptive Cruise Control System[J]. Automotive Engineer, 2025(8): 42-48.

[15] HE S L, ZHENG Y, LI C, et al. Real-Time Economic Following Velocity and Gear Planning for Commercial Vehicles Based on the Bi-Level Optimization[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024: 1-20.

（责任编辑 斛 畔）

修改稿收到日期为2026年3月10日。