

基于横纵向双预瞄PID补偿的智能车辆运动控制

王鸿 查云飞 邓健贤 胡安琪 黄逊

(福建理工大学,福州 350118)

【欢迎引用】王鸿,查云飞,邓健贤,等.基于横纵向双预瞄PID补偿的智能车辆运动控制[J].汽车文摘,2025(4):37-41.

【Cite this paper】WANG H, ZHA Y F, DENG J X, et al. Intelligent Vehicle Motion Control Based on Horizontal and Longitudinal Dual Presight PID Compensation[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(4): 37-41.

【摘要】为了解决智能车辆在轨迹跟踪过程中存在模型参数不确定、建模误差及外界干扰导致的跟踪精度及行驶稳定性变差的问题,本文提出了一种基于横纵向双预瞄PID补偿的智能车辆运动控制方法。首先,基于路径跟踪误差模型建立了线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)横向运动控制器,以预瞄点横向偏差为输入量,通过横向预瞄PID控制器实现转角补偿;其次,基于不依赖模型的模糊理论设计了纵向运动控制器实现车速跟踪,以预瞄点的纵向偏差为输入量,通过建立预瞄PID控制器进行车速补偿;最后,通过匀加速双移线工况对该方法进行了仿真验证。仿真结果表明,基于横纵向双预瞄PID补偿的智能车辆运动控制器在高速、大曲率的双移线工况具备更高的跟踪精度和行驶稳定性。

关键词:智能车辆;运动控制;预瞄PID;转角补偿;车速补偿

中图分类号:U463.6 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250042

Intelligent Vehicle Motion Control Based on Horizontal and Longitudinal Dual Presight PID Compensation

Wang Hong, Zha Yunfei, Deng Jianxian, Hu Anqi, Huang Xun

(Fujian University of Technology, Fuzhou 350118)

【Abstract】To address the issues of poor tracking accuracy and driving stability caused by uncertain model parameters, modeling errors, and external disturbances, this paper proposes a motion control method for intelligent vehicles based on horizontal and longitudinal dual preview PID compensation. Firstly, an LQR (Linear Quadratic Regulator lateral motion controller) is established using a path tracking error model to address angle compensation. This is achieved through a lateral previewing PID controller, utilizing the lateral deviation of the preview point as input. Secondly, a longitudinal motion controller is designed based on model-independent fuzzy theory to track vehicle speed. A previewing PID controller is established to compensate for vehicle speed using the longitudinal deviation of the preview point as input. Finally, the proposed method is validated through simulation under with uniform accelerated double lane shift. Simulation results demonstrate that the intelligent vehicle motion controller based on horizontal and longitudinal dual preview PID compensation achieves higher tracking accuracy and driving stability under conditions of high speed and large curvature during double lane shifts.

Key words: Intelligent vehicles, Motion control, Preview PID, Angle compensation, Speed compensation

0 引言

智能汽车通过环境感知、路径规划、决策和控制技术实现智能驾驶,是智能交通系统的关键组成部分^[1]。其发展目标包括解决日益严重的交通安全问题、减轻驾驶员负担、减少交通拥堵并最大限度地提高道路利用率^[2]。其中,车辆运动控制作为智能驾驶

汽车的关键技术之一,得到了学术界和工业界的广泛关注与深入研究^[3]。

智能车辆运动控制通过设计横、纵向控制器实现对目标轨迹的精确跟踪,其算法的性能直接影响行驶安全性与舒适性^[4]。现有轨迹跟踪算法可分为无模型与有模型2类:前者如比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制^[5]、模糊控制^[6]等方法适

用于低速、低曲率工况,但普遍缺乏对车辆动力学特性的深入考量;后者基于车辆运动学或动力学模型进行设计,其中线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)^[7]因其良好的实时性和鲁棒性被广泛应用。研究表明,通过引入前馈补偿、自适应调整权重矩阵及模糊参数优化等方法可有效提升LQR性能。然而,现有方法仍存在模型简化误差与执行延迟等问题,特别是在高速大曲率工况下易导致控制性能下降的情况。

针对上述问题,本文提出一种解耦式横纵向协同控制方法:首先,基于二自由度动力学模型推导出跟踪误差状态方程;其次,构建LQR横向控制器,并针对纵向动力学非线性特性设计模糊车速跟踪控制器;同时,引入双预瞄PID机制补偿模型不确定性与外界干扰。通过Simulink/Carsim联合仿真平台验证,该方法有效提升了车辆在高速复杂工况下的跟踪精度与系统鲁棒性。与传统LQR控制方案相比,本研究的创新性体现在纵向模糊控制架构设计、横纵向补偿机制协同及参数自适应优化3方面。

1 车辆动力学模型

建立二自由度车辆动力学模型,如图1所示。

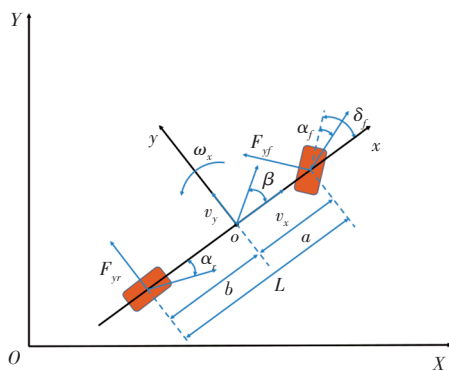


图1 二自由度动力学模型

推导出车辆状态空间方程为:

$$\begin{cases} m(\dot{v}_y + v_x \omega_r) = F_{yf} \cos \delta_f + F_{yr} \\ I_z \dot{\omega}_r = a \cdot F_{yf} \cos \delta_f - b \cdot F_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{yf} 、 F_{yr} 分别为前轴、后轴的侧向力, m 为整车质量, δ_f 是车轮转角, v_x 是车辆纵向车速, v_y 是车辆横向车速, ω_r 是车辆横摆角速度, a 是质心到车辆前轴的距离, b 是质心到车辆后轴的距离, I_z 是车辆绕 z 轴的转动惯量。

在路径跟踪过程中为了减小横向偏差 e_y 和航向偏差 e_φ ,建立路径跟踪误差模型,如图2所示。图2中, φ_d 为期望航向角, φ 为车辆的实际航向角。

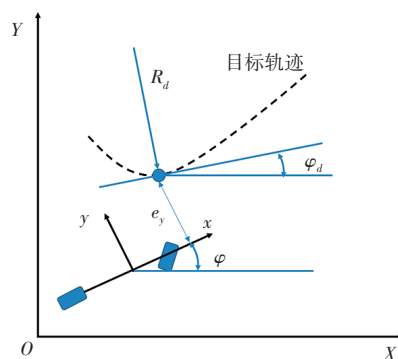


图2 路径跟踪误差模型

由于侧向加速度 a_y 受到纵向速度 v_x 和向心加速度 $v_x \omega$ 的影响,车辆的实际加速度为 $a_y = \dot{v}_y + v_x \omega$,带入动力学微分方程,可得误差状态空间方程^[8]:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{mv_x} & \frac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{m} & \frac{C_{\alpha f} a - C_{\alpha r} b}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{C_{\alpha f} a - C_{\alpha r} b}{I_z v_x} & \frac{C_{\alpha f} a - C_{\alpha r} b}{I_z} & \frac{C_{\alpha f} a^2 + C_{\alpha r} b^2}{I_z v_x} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{C_{\alpha f} a}{I_z} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} \dot{e}_y \\ \ddot{e}_y \\ \dot{e}_\varphi \\ \ddot{e}_\varphi \end{bmatrix}, U = [\delta_f].$$

2 横、纵向运动控制器设计

2.1 横向运动控制器设计

LQR控制器是以离散系统为控制对象,首先需要将跟踪误差模型离散化,采用双线性变换(Tustin法)将连续跟踪误差模型离散化^[9]为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [X^T Q X + U^T R U] \quad (3)$$

式中: Q 和 R 分别表征状态误差与控制能耗权重。

通过哈密顿函数 H 及极值条件推导最优控制输入为:

$$U^*(t) = R^{-1} B \lambda(t), \lambda(t) = -P X \quad (4)$$

求解里卡蒂(Riccati)方程 $PA + A^T P - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$,得矩阵 P ,最终控制律为:

$$U(t) = -K X(t) = -R^{-1} B^T P X(t) \quad (5)$$

增益矩阵 $K = [k_1, k_2, k_3, k_4]$ 对应路径跟踪误差模型的4个状态量的增益权重。

2.2 纵向运动控制器设计

纵向控制器的设计采用了基于模糊逻辑的控制

策略。具体设计如下：

(1)输入变量：

车速偏差 E_v 的基本论域为 $[-6\text{ m/s}, 6\text{ m/s}]$ ；

车速偏差变化率 E_c 的基本论域为 $[-8\text{ m/s}^2, 8\text{ m/s}^2]$ 。

(2)输出变量：

输出为踏板开度 $pedal \in [-1, 1]$ ，其中负值对应制动，正值对应驱动。

(3)模糊域设置：

输入和输出的模糊域均设置为 $[-3, 3]$ ，以便进行模糊化处理和推理计算。

(4)模糊逻辑控制：

基于车速偏差 E_v 和车速偏差变化率 E_c ，通过模糊规则库进行推理，计算出踏板开度的模糊输出；经过解模糊化处理，得到精确的踏板开度值，用于控制车辆的加速或制动。

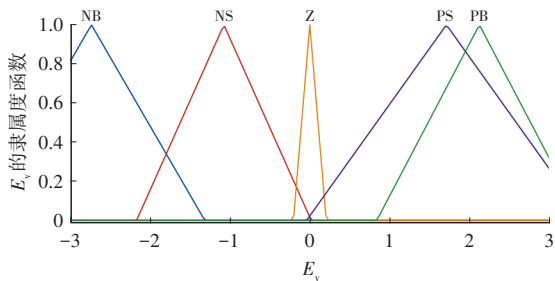
该模糊控制策略能够有效处理纵向动力学中的非线性特性，并通过模糊规则的灵活设计适应不同驾驶工况，从而提高车速跟踪的精度和系统的鲁棒性。

采用三角形隶属度函数，将输入变量、输出量的模糊子集均划分为5个模糊子集，具体表述为负大(NB)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正大(PB)。输入、输出变量隶属度函数如图3所示。

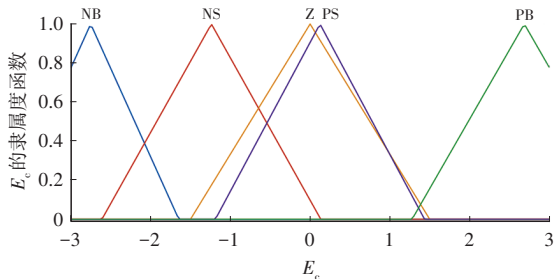
根据车速偏差与车速偏差变化率、踏板开度的模糊关系，建立了25条模糊规则，如表1所示。

2.3 横纵向双预瞄PID控制器设计

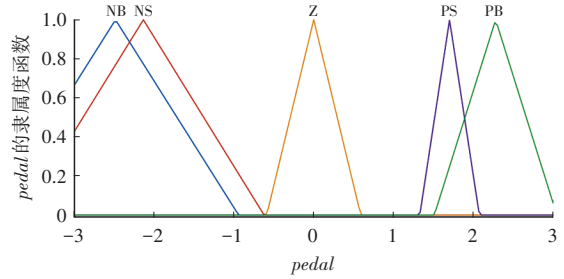
横纵向双预瞄PID控制器的结构原理如图4所示。



(a)车速偏差 E_v 的隶属度函数



(b)车速偏差变化率 E_c 的隶属度函数



(c)踏板开度 $pedal$ 的隶属度函数

图3 输入、输出变量的隶属度函数

表1 纵向运动控制的模糊规则

踏板开度 $pedal$		车速偏差 E_v				
		NB	NS	Z	PS	PB
车速偏差变化率 E_c	NB	NB	NS	Z	PS	PS
	NS	NB	NB	Z	PS	PS
	Z	NB	NB	Z	PB	PB
	PS	NB	NS	Z	PB	PB
	PB	NB	NB	Z	PS	PB

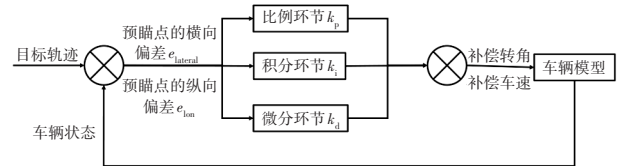


图4 横纵向双预瞄PID控制器结构

以车辆正前方一点为预瞄点 $P^{[10]}$ ，预瞄距离 d 随车速 v_x 自适应变化为：

$$d = 0.01v_x^2 + 0.1v_x + 1.5 \quad (6)$$

根据单点预瞄驾驶员模型^[11]，预瞄点坐标 (x_p, y_p) 由车辆质心位置 (x_0, y_0) 与航向角 φ_0 确定为：

$$\begin{cases} x_p = x_0 + d \sin \varphi_0 \\ y_p = y_0 + d \cos \varphi_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： φ_0 为当前车辆的航向角， x_p 为预瞄点的纵向位置， y_p 为预瞄点的侧向位置。

预瞄点横向偏差和纵向偏差的计算公式为：

$$\begin{cases} e_{\text{lateral}} = y_1 - y_p \\ e_{\text{lon}} = x_1 - x_p \end{cases} \quad (8)$$

式中： e_{lateral} 为横向偏差， e_{lon} 为纵向偏差， x_1 为G点的纵向位置， y_1 为G点的侧向位置。

根据图4，推导出了横纵向双预瞄PID的控制律为：

$$\delta_p = k_p e_{\text{lateral}}(k) + k_i \sum_{n=0}^k e_{\text{lateral}}(n) + k_d (e_{\text{lateral}}(k) - e_{\text{lateral}}(k-1)) \quad (9)$$

$$V_{x-} = k_p e_{\text{lon}}(k) + k_i \sum_{n=0}^k e_{\text{lon}}(n) + k_d (e_{\text{lon}}(k) - e_{\text{lon}}(k-1)) \quad (10)$$

式中： δ_p 是控制器输出的车轮补偿转角， V_{x_c} 是控制器输出的补偿车速， k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例、积分、微分系数， $e_{lateral}$ 、 e_{lon} 分别为 k 时刻的预瞄点的横向、纵向偏差。

3 横纵向运动控制仿真

3.1 仿真工况设置

为了验证本文提出的基于横纵向双预瞄PID补偿的车辆运动控制器的控制效果，在Simulink/Carsim搭建了联合仿真平台。仿真中使用的车辆主要参数如表2所示。仿真工况设定为72~95 km/h的匀加速工况，路面附着系数为0.85的沥青路面，目标轨迹选择大曲率的双移线轨迹。该双移线工况的道路峰值曲率达到了0.027，属于大曲率工况(弯道半径 ≤ 100 m)，可用于测试轨迹跟踪控制对道路曲率的适应性，对比LQR-模糊控制、双预瞄PID-LQR-模糊控制两种算法的轨迹跟踪精度和行驶稳定性的性能差异。

表2 车辆参数

参数	数值
整车质量 m/kg	700
质心高度 h/m	0.43
质心到前轴距离 a/m	0.945
质心到后轴距离 b/m	1.055
轴距 L/m	2
前轮轮距 T_f/m	1.445
后轮轮距 T_r/m	1.445
转动惯量 $I_z/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	750
前轮侧偏刚度 $C_{\alpha f}/\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$	55 462
后轮侧偏刚度 $C_{\alpha r}/\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$	53 480

3.2 匀加速双移线工况轨迹跟踪验证

通过Carsim/Simulink联合仿真，72~95 km/h匀加速双移线工况轨迹跟踪仿真结果如图5所示。通过图5a可知，LQR-模糊控制算法的跟踪轨迹最大横向误差达到了1.81 m，明显偏离目标路径；而基于双预瞄PID-LQR-模糊控制算法最大横向偏差为0.92 m，降幅达到了49.1%，路径跟踪精度进一步得到提升。由图5b可知，LQR-模糊控制算法在匀加速过程中存在明显的稳态车速跟踪误差，双预瞄PID-LQR-模糊控制算法能够将最大车速误差控制在 ± 0.2 km/h以内。由图5c可知，LQR-模糊控制算法的最大航向偏差为 14.3° ，而基于双预瞄PID-LQR-模糊控制算法在高速、大曲率工况能够保持稳定的跟踪轨迹，最大航向偏差为 7.33° ，降低了48.7%，行驶稳定性得到了进一

步的提升。

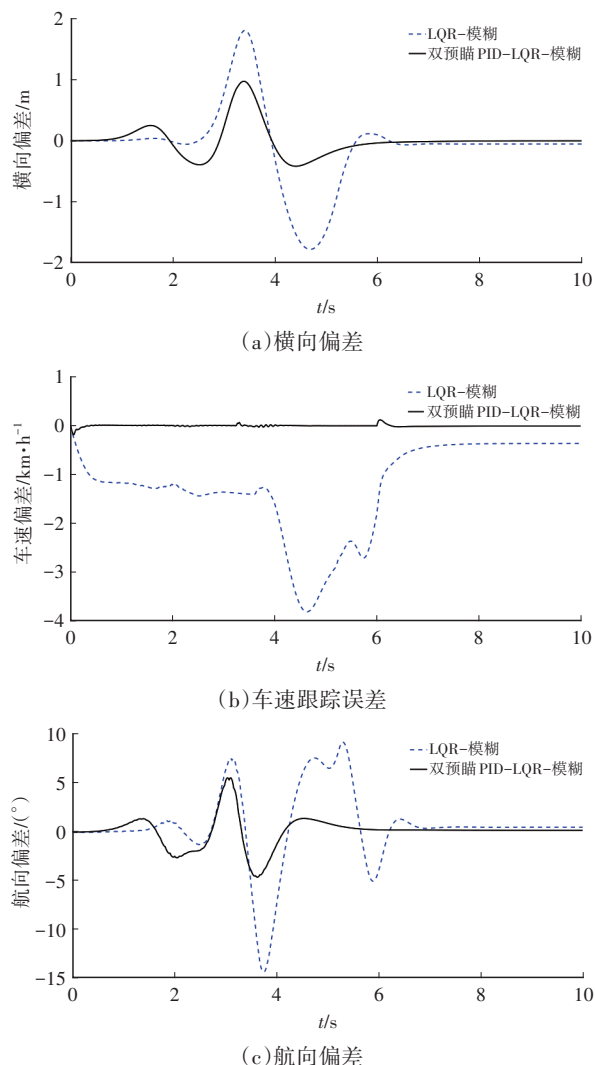


图5 72~95 km/h匀加速双移线工况仿真结果

4 结束语

本文针对智能驾驶轨迹跟踪中高速大曲率工况下控制性能下降的问题，提出一种横纵向双预瞄PID协同控制方法，通过结合LQR横向控制器和模糊纵向控制器，引入预瞄点偏差补偿机制，实现了高速大曲率工况下的高精度跟踪。仿真结果表明，与传统方法相比，本文所提方法的横向偏差降低49.1%，航向偏差减少48.7%，车速误差控制在 ± 0.2 km/h内，验证了本文方法在高速大曲率工况下表现出优异的鲁棒性和适应性，能够有效应对复杂道路曲率变化和外部干扰。与传统LQR-模糊控制方法相比，本方法在控制性能和稳定性方面均实现了显著提升。

本文的研究成果为智能驾驶车辆在高速大曲率工况下的轨迹跟踪控制提供了新的解决方案，未来研究可进一步考虑多预瞄点优化与执行器延迟补偿，以

拓展该方法在更极端工况下的适用性。

参 考 文 献

- [1] HAQUE T S, RAHMAN M H, Islam M R, et al. A Review on Driving Control Issues For Smart Electric Vehicles[J]. IEEE Access, 2021, 9(1):40-72.
- [2] ZHA Y, DENG J, QIU Y, et al. A Survey of Intelligent Driving Vehicle Trajectory Tracking Based on Vehicle Dynamics[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2023, 7 (2):1-11.
- [3] 张雷, 王子浩, 孙逢春, 等. 四轮轮毂电机驱动智能电动汽车转向失效容错控制研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 141-152.
- [4] LI Y, BI J, HAN W, et al. Tuning of PID/PIDD2 Controllers for Integrating Processes with Robustness Specification[J]. ISA Transactions, 2023, 140: 224-236.
- [5] 罗鹏, 李擎, 董禄. 车辆轨迹的预瞄与模糊分数阶比例—积分—微分控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (17): 7056-7063.
- [6] CHEN G, ZHAO X, GAO Z, et al. Dynamic Drifting Control for General Path Tracking of Autonomous Vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(3): 2527-2537.
- [7] 陈特, 陈龙, 徐兴, 等. 基于Hamilton理论的无人车路径跟踪控制[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39 (7): 676-682.
- [8] 胡杰, 钟鑫凯, 陈瑞楠, 等. 基于模糊LQR的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程, 2022, 44 (1):17-25+43.
- [9] JUNG H, JUNG D, CHOI S B. LQR Control of An All-Wheel Drive Vehicle Considering Variable Input Constraint[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 30(1): 85-96.
- [10] 马芳武, 余烁, 吴量, 等. 基于时间系数的单点预瞄驾驶员模型分析 [J]. 汽车工程, 2019, 41 (3): 340-345

(责任编辑 明慧)

《汽车文摘》2025年专项征稿启事

尊敬的汽车及相关技术领域专家学者、研发工程师、高校师生：

在全球汽车产业迎来深刻变革的今天,2025年将成为汽车技术发展的关键节点,新技术、新材料、新理念将不断涌现,推动汽车行业向更智能、更环保、更安全的方向发展。《汽车文摘》期刊作为中国汽车工程学会会刊,秉承“览全球汽车技术文献,指中国汽车技术之道”的使命,致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。在此,我们特别发布2025年专项征稿启事,聚焦以下十大技术方向,旨在征集具有前瞻性、综述性的高质量文章,以期汽车技术的创新与进步提供创新的方向和理论的支持。

1. 人工智能在汽车创新发展中的应用综述:征集探讨人工智能技术在车辆自动驾驶、智能座舱、智能控制以及仿真和优化中的应用综述文章。

2. 智能网联汽车信息安全技术综述:征集分析智能网联汽车面临的信息安全挑战及解决方案的综述文章。

3. 环境感知与智能决策技术综述:征集研究环境感知技术的未来发展,包括新型传感器技术、多模态感知融合算法的最新进展等前瞻综述。

4. 氢能技术在汽车产业中的应用综述:征集探讨氢能技术在汽车产业中的应用,包括氢燃料电池、氢内燃机以及氢能在汽车能源系统中的整合等综述文章。

5. 固态电池技术发展综述:征集研究固态电池技术的最新进展,包括材料科学、电化学性能和系统集成等方面的综述。

6. 汽车动力总成电动化技术综述:征集探讨电动化动力总成设计、控制和集成技术的综述文章。

7. 智能底盘技术发展综述:征集探讨智能底盘技术的最新进展,包括底盘控制系统、悬挂系统和驱动系统的智能化技术综述。

8. 自动驾驶法规与伦理问题综述:征集分析自动驾驶技术发展中的法规和伦理问题的综述文章。

9. 汽车共享经济与商业模式创新综述:征集探讨汽车共享经济的发展及其对传统汽车产业影响的综述。

10. 智能交通系统(ITS)技术发展综述:征集研究智能交通系统技术如车路协同、交通流量管理等综述。

征稿要求:

1. 投稿请注明“*****”技术方向专项征稿字样,本刊对符合征稿技术方向的稿件将优先审核,一经录用优先发表;
 2. 综述篇幅在8 000 ~ 15 000字,图文并茂,图、表和公式非原图要求标注引用文献;
 3. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数在200字左右;
 4. 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献,一般要求参考文献在20篇以上,一半左右为外文参考文献,且在文中标注所引用文献;
 5. 来稿保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
 6. 切勿一稿多投,《汽车文摘》投稿网址: <http://www.qcwz.cbpt.cnki.net>, 邮箱: autodigest@faw.com.cn。
- 《汽车文摘》期刊期待您的精彩综述文章,共同探索汽车技术的未来发展。感谢您对《汽车文摘》期刊的支持与贡献,让我们携手推动汽车技术的创新与进步。

《汽车文摘》编辑部