

# 无人驾驶车辆路径跟踪混合控制策略研究\*

李兆凯 刘新宁 彭国轩 孙雪 陈涛

(长安大学,西安 710018)

**【摘要】**针对单一控制算法无法同时满足无人驾驶车辆对路径跟踪精度和控制器求解速度需求的问题,提出一种基于线性二次型调节器(LQR)和模型预测控制(MPC)的混合控制策略。该策略在低速工况下使用线性二次型调节器、在高速工况下使用模型预测控制算法进行路径跟踪控制,在此基础上设计基于有限状态机(FSM)的控制算法切换机制,并通过遗传算法(GA)对控制参数进行优化,基于CarSim和MATLAB/Simulink仿真平台对混合控制策略进行仿真验证,并进一步完成了实车试验。试验结果表明,所设计的混合控制策略能够在提高跟踪精度的基础上缩短计算时间,与单一控制算法相比,平均横向误差和平均航向误差分别减小了26.3%和39.6%,平均计算时间缩短了10.9%。

**关键词:**路径跟踪 线性二次型调节器 模型预测控制 有限状态机 遗传算法

**中图分类号:**U467.1 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230737

## Research on Hybrid Control Strategy for Path Tracking of Autonomous Vehicles

Li Zhaokai, Liu Xinning, Peng Guoxuan, Sun Xue, Chen Tao

(Chang'an University, Xi'an 710018)

**【Abstract】**For the fact that single control algorithm cannot simultaneously meet the requirements of autonomous vehicles for path tracking accuracy and controller solving speed, this paper proposed a hybrid control strategy based on Linear Quadratic Regulator (LQR) and Model Predictive Control (MPC). The strategy used an LQR in the low-speed condition and an MPC algorithm in the high-speed condition, on the basis of which a switching mechanism of the control algorithm based on a Finite State Machine (FSM) was designed and the control parameters were optimized by Genetic Algorithm (GA). The hybrid control strategy was simulated and verified based on CarSim and MATLAB/Simulink simulation platforms, and the real vehicle test was further completed. The experimental results show that the designed hybrid control strategy can reduce the computation time on the basis of improving the tracking accuracy, and the average lateral error and average heading error are reduced by 26.3% and 39.6%, respectively, and the average computation time is reduced by 10.9% compared with the single control algorithm.

**Key words:** Path tracking, Linear Quadratic Regulator (LQR), Model Predictive Control (MPC), Finite State Machine (FSM), Genetic Algorithm (GA)

**【引用格式】**李兆凯,刘新宁,彭国轩,等.无人驾驶车辆路径跟踪混合控制策略研究[J].汽车技术,2024(3):37-46.

LI Z K, LIU X N, PENG G X, et al. Research on Hybrid Control Strategy for Path Tracking of Autonomous Vehicles[J]. Automobile Technology, 2024(3): 37-46.

## 1 前言

近年来,无人驾驶领域相关技术得到高速发展,感知、定位、决策、规划和控制等领域的技术不断取得新的突破,车辆横向控制作为承上启下的关键一环,其控制性能对车辆路径跟踪精度有很大影响。然而,单一控制算法很难保证车辆在不同工况下的跟踪精确性与行驶

稳定性,且由于无人驾驶车辆对控制实时性的要求较高,传统单一控制器在使车辆稳定跟踪目标路径的同时,难以保证控制器结构简单、求解效率高。

为兼顾控制器的控制精度与计算效率,应根据不同工况选择不同的控制方法。常见的路径跟踪控制方法有PID控制<sup>[1]</sup>、纯跟踪控制<sup>[2]</sup>、斯坦利(Stanley)跟踪控制<sup>[3]</sup>、线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)控

\*基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978075)。

通信作者:李兆凯(1986—),男,陕西榆林人,副教授,工学博士,研究方向为机器视觉与智能车辆,lizhao-kai@chd.edu.cn。

制<sup>[4]</sup>、模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)<sup>[5]</sup>等。此外,事件触发<sup>[6]</sup>、强化学习<sup>[7]</sup>、迭代学习<sup>[8]</sup>等方法也在跟踪控制领域得到广泛应用。赵熙俊等<sup>[9]</sup>设计了一种基于鲁棒PID的路径跟踪反馈控制器,在非结构化路面上,该控制器具有较好的实时性,但固定的控制参数导致跟踪效果较差,对于不同车速和目标路径需进行不同的参数设置。Wang等<sup>[10]</sup>设计了一种基于优化前视距离的纯追踪算法,可减小横向误差和航向误差,转向角度变化平稳,计算实时性好,但纯跟踪算法在高速曲线行驶或快速变道等工况下稳定性变差,导致跟踪精度下降。崔冰波等<sup>[11]</sup>提出一种基于斯坦利算法的增益系数自适应路径跟踪控制器,提高了车辆对不同曲率路径的自适应能力,但在高速工况下,车辆动力学特性和惯性效应增强,响应时间较短,当车辆出现大角度偏离时,算法可能无法及时纠正偏离,导致跟踪误差增大。胡杰等<sup>[12]</sup>基于路径跟踪误差模型设计LQR控制器,提出一种基于车速的权重系数模糊调节策略以提高控制器对不同车速的适应性,但未考虑车辆高速行驶时的动力学约束,在极端工况下车辆易出现侧偏失稳现象。Liu等<sup>[13]</sup>基于车辆坐标系设计了自适应MPC路径跟踪控制器,提高了车辆通过较大曲率道路的跟踪精度,但该算法在不断循环优化的求解过程中可能带来较大的计算量,当车速较高时可能无法及时控制车辆。

针对单一控制策略在不同车速工况下不能兼顾跟踪精度与计算实时性的问题,本文提出一种基于LQR和MPC的无人驾驶车辆路径跟踪混合控制策略。车速较低时,车辆运动状态变化较缓慢,行驶过程较安全,采用结构简单且计算效率较高的LQR控制算法,以缩短控制器求解时间;车速较高时,车辆的运动状态变化较快且动力学特性较明显,采用MPC算法,以提高路径跟踪的稳定性并保证跟踪精度。在此基础上,引入基于有限状态机(Finite State Machine, FSM)的稳定切换控制器,通过实时监控车辆工况,选择不同的控制算法。此外,为保证两种控制算法之间的平稳切换,添加中速工况,该工况下控制器输出结果为两种控制算法输出结果的加权值,并通过遗传算法(Genetic Algorithm, GA)确定最优加权系数。

## 2 车辆动力学模型

在进行车辆动力学建模时,作如下假设:

- 忽略转向系统,模型输入为前轮转角;
- 忽略悬架系统,认为车辆为刚性,车辆只做平行

于地面的平面运动;

- 忽略空气动力学的作用;
- 忽略轮胎侧偏刚度的变化;
- 不考虑轮胎模型的非线性区域。

最终将车辆简化为包括横向移动、纵向移动和横向摆动的车辆动力学模型,如图1所示。图中, $XOY$ 为大地坐标系, $xoy$ 为车身坐标系, $\delta_f$ 为前轮转角, $\dot{\varphi}$ 为横摆角速度, $v_f$ 为前轮速度, $a_f$ 、 $a_r$ 分别为前、后轮侧偏角, $F_{lf}$ 、 $F_{lr}$ 分别为前、后轮所受纵向力, $F_{cf}$ 、 $F_{cr}$ 分别为前、后轮所受侧向力, $a$ 、 $b$ 分别为质心到前、后轴的距离。

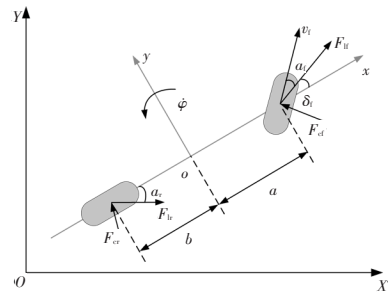


图1 车辆动力学模型

根据牛顿第二定律建立车辆沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的受力平衡方程:

$$\begin{cases} ma_x = m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\varphi}) = 2F_{lf} \cos \delta_f - 2F_{cf} \sin \delta_f + 2F_{lr} \\ ma_y = m(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\varphi}) = 2F_{lf} \sin \delta_f + 2F_{cf} \cos \delta_f + 2F_{cr} \\ I_z \ddot{\varphi} = 2a(F_{lf} \sin \delta_f + F_{cf} \cos \delta_f) - 2bF_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ 为整车质量, $a_x$ 为纵向加速度, $a_y$ 为侧向加速度, $I_z$ 为绕 $z$ 轴的转动惯量。

由于不考虑轮胎模型的非线性区域,故前、后轮所受的纵向力和侧向力为:

$$\begin{cases} F_{lf} = C_{lf} s_{f_l} \\ F_{lr} = C_{lr} s_{r_l} \\ F_{cf} = C_{cf} (\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}}) \\ F_{cr} = C_{cr} (\frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_{lf}$ 、 $C_{lr}$ 分别为前、后轮轮胎纵向刚度, $s_{f_l}$ 、 $s_{r_l}$ 分别为前、后轮轮胎滑移率, $C_{cf}$ 、 $C_{cr}$ 分别为前、后轮轮胎侧偏刚度。

不同坐标系下车辆的横、纵向车速并不相同,为将车辆在车身坐标系下的车速转换到大地坐标系下,作如下坐标系转换:

$$\begin{cases} \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

正常行驶工况下,车辆前轮转角及轮胎侧偏角一般较小,假设 $\cos \delta_f = 1$ 、 $\sin \delta_f = \tan \delta_f = \delta_f$ ,综合式(1)~式(3)可得车辆动力学方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2\left[C_{it}s_f - C_{ct}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right)\delta_f + C_{lr}s_f\right] \\ m\ddot{y} = m\dot{x}\dot{\varphi} + 2\left[C_{it}s_f\delta_f + C_{ct}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right) + C_{cr}\left(\frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}\right)\right] \\ I_z\ddot{\varphi} = 2\left[aC_{it}s_f\delta_f + aC_{ct}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right) - bC_{cr}\left(\frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}\right)\right] \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

### 3 LQR 控制器设计

#### 3.1 基于Frenet坐标系的横向运动误差模型

Frenet坐标系常用于描述车辆在道路上的运动,使用曲线弧长 $s$ 作为纵向坐标,表示车辆相对起始点沿曲线行驶的距离,使用偏移量 $d$ 作为横向坐标,表示车辆相对道路中心线的横向偏移量。基于Frenet坐标系建立车辆横向运动误差模型,如图2所示。

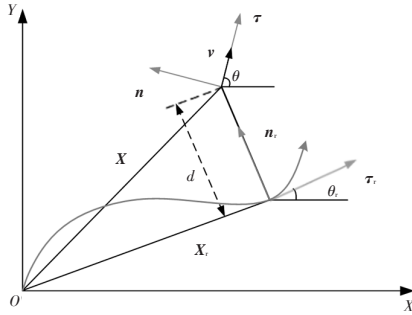


图2 车辆横向运动误差模型

图2中, $\mathbf{X}$ 为实际位矢, $\mathbf{v}$ 为实际速度, $\mathbf{n}$ 为实际位置处的单位法向量, $\boldsymbol{\tau}$ 为实际位置处的单位切向量, $\theta$ 为实际位置处的航向角, $\mathbf{X}_t$ 为目标点的位矢, $\mathbf{n}_t$ 为目标点的单位法向量, $\boldsymbol{\tau}_t$ 为目标点的单位切向量, $\theta_t$ 为目标点的航向角, $d$ 为偏移量。

根据几何关系可得:

$$d = (\mathbf{X} - \mathbf{X}_t) \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

对 $d$ 进行求导并进一步化简<sup>[4]</sup>:

$$\dot{d} = |\mathbf{v}| \sin(\varphi + \beta - \theta_t) = \dot{y} \cos(\varphi - \theta_t) + \dot{x} \sin(\varphi - \theta_t) \quad (6)$$

令横向误差 $e_d = d$ 、航向误差 $e_\varphi = \varphi - \theta_t$ ,选择系统的状态量为 $\mathbf{e}_\pi = (e_d, \dot{e}_d, e_\varphi, \dot{e}_\varphi)^\top$ 、控制量为 $\mathbf{u}_1 = [\delta_f]$ ,将式(6)代入式(4)可得系统状态空间方程<sup>[15]</sup>为:

$$\dot{\mathbf{e}}_\pi(t) = \mathbf{A}_1(t)\mathbf{e}_\pi(t) + \mathbf{B}_1(t)\mathbf{u}_1(t) + \mathbf{C}_1(t)\dot{\theta}_t(t) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{e}_\pi(t)$ 为 $t$ 时刻状态量, $\mathbf{u}_1(t)$ 为 $t$ 时刻控制量, $\dot{\theta}_t(t)$ 为 $t$ 时刻目标航向角变化率, $\mathbf{A}_1(t)$ 、 $\mathbf{B}_1(t)$ 、 $\mathbf{C}_1(t)$ 为 $t$ 时刻系数矩阵。

#### 3.2 反馈控制

在反馈控制中,首先忽略式(7)的最后一项:

$$\dot{\mathbf{e}}_\pi(t) = \mathbf{A}_1(t)\mathbf{e}_\pi(t) + \mathbf{B}_1(t)\mathbf{u}_1(t) \quad (8)$$

采用向前欧拉法和中点欧拉法对状态空间方程式(8)进行离散化处理:

$$\mathbf{e}_\pi(k+1) = \mathbf{A}_1(k)\mathbf{e}_\pi(k) + \mathbf{B}_1(k)\mathbf{u}_1(k) \quad (9)$$

为了使车辆获得较好的跟踪精度且前轮转角尽量小,设计如下目标函数:

$$J(\mathbf{e}_\pi(k), \mathbf{u}_1(k)) = \sum_{k=0}^{+\infty} \left( \|\mathbf{e}_\pi(k)\|_{\mathbf{Q}_1}^2 + \|\mathbf{u}_1(k)\|_{\mathbf{R}_1}^2 \right) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{Q}_1$ 为状态量权重矩阵, $\mathbf{R}_1$ 为控制量权重矩阵。

式(10)右侧第1项反映车辆的跟踪精度,第2项反映前轮转角的大小。

通过构造哈密顿方程<sup>[15]</sup>求解目标函数可得:

$$\mathbf{u}_1(k) = -\mathbf{c}(k)\mathbf{e}_\pi(k) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{c}(k)$ 为反馈矩阵。

#### 3.3 前馈控制

反馈控制忽略了式(7)最后一项,因此需要加入前馈控制使系统误差收敛至零:

$$\mathbf{u}_1(k) = -\mathbf{c}(k)\mathbf{e}_\pi(k) + \delta_{ff}(k) \quad (12)$$

式中: $\delta_{ff}(k)$ 为前馈控制补偿转角。

当系统趋于稳定时, $\dot{\mathbf{e}}_\pi(t) = 0$ ,为了使 $\mathbf{e}_\pi(t)$ 尽可能趋向于零,将式(12)代入式(9)可得:

$$\delta_{ff}(k) = \frac{\dot{\theta}_t(k)}{v_x(k)} \left[ a + b + bc_3(k) - \frac{mv_x^2(k)}{a+b} \left( \frac{b}{C_{ct}} + \frac{a}{C_{cr}} c_3(k) - \frac{a}{C_{cr}} \right) \right] \quad (13)$$

式中: $c_3(k)$ 为反馈矩阵的第3列。

### 4 MPC 控制器设计

#### 4.1 线性时变模型建立

令线性时变系统的状态量 $\tilde{\boldsymbol{\xi}} = (\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X)^\top$ ,控制量 $\mathbf{u}_2 = [\delta_f]$ ,输出量 $\boldsymbol{\eta} = (\varphi, Y)^\top$ ,状态空间方程为:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}(t) = \mathbf{f}(\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t), \mathbf{u}_2(t)) \quad (14)$$

式中: $\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t)$ 为 $t$ 时刻状态量, $\mathbf{u}_2(t)$ 为 $t$ 时刻控制量。

将式(14)在 $t$ 时刻进行线性化和离散化处理,得到离散的线性时变状态空间方程:

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k+1) = \mathbf{A}_2(k)\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) + \mathbf{B}_2(k)\mathbf{u}_2(k) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{A}_2(k)$ 、 $\mathbf{B}_2(k)$ 为系数矩阵。

#### 4.2 预测方程

构建新的状态量为:

$$\boldsymbol{\xi}(t|k) = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\xi}}(t|k) \\ \mathbf{u}_2(t-1|k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

得到新的状态空间表达式:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi}(t+1|k) = \tilde{\mathbf{A}}_{t,k}\boldsymbol{\xi}(t|k) + \tilde{\mathbf{B}}_{t,k}\Delta\mathbf{u}_2(t|k) \\ \boldsymbol{\eta}(t|k) = \tilde{\mathbf{C}}_{t,k}\boldsymbol{\xi}(t|k) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\Delta\mathbf{u}_2(t|k)$ 为线性时变系统的控制增量, $\boldsymbol{\eta}(t|k)$ 为输出量, $\tilde{\mathbf{A}}_{t,k}$ 、 $\tilde{\mathbf{B}}_{t,k}$ 、 $\tilde{\mathbf{C}}_{t,k}$ 为系数矩阵。

假设系统控制时域为  $N_c$ 、预测时域为  $N_p$ 、系数矩阵为  $\tilde{A}_{i,k} = \tilde{A}_k$ 、 $\tilde{B}_{i,k} = \tilde{B}_k$ 、 $\tilde{C}_{i,k} = \tilde{C}_k$ , 则系统的输出为:

$$Y(k) = [\eta(k+1|k) \cdots \eta(k+N_p|k)]^T \quad (18)$$

系统在预测时域内的输出方程可改写为:

$$Y(k) = \psi_k \xi(k|k) + \Theta_k \Delta U(k) \quad (19)$$

式中:  $\psi_k = [\tilde{C}_k \tilde{A}_k \cdots \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p}]^T$ ,  $\xi(k|k) = \xi(k)$ ,

$$\Delta U(k) = [\Delta u_2(k|k) \cdots \Delta u_2(k+N_c|k)]^T,$$

$$\Theta_k = \begin{bmatrix} \tilde{C}_k \tilde{B}_k & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p-1} \tilde{B}_k & \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p-2} \tilde{B}_k & \cdots & \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_k \end{bmatrix}.$$

### 4.3 目标函数设计

为使车辆稳定跟踪目标轨迹且转向平稳,目标函数的设计需考虑跟踪精度与控制增量的变化。同时,为防止出现目标函数无解导致计算超时的情况,还应加入松弛因子。因此,设计如下目标函数:

$$J(\xi(k), u_2(k-1), \Delta U(k)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(k+i|k) - \eta_{ref}(k+i|k)\|_{Q_2}^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u_2(k+i|k)\|_{R_2}^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (20)$$

式中:  $\eta_{ref}$  为系统的参考输出量,  $Q_2$  为输出量的权重矩阵,  $R_2$  为控制增量的权重矩阵,  $\rho$  为松弛因子的权重系数,  $\varepsilon$  为松弛因子。

式(20)右侧第1项表示车辆对目标轨迹的跟踪情况,第2项表示前轮转角的变化情况,使车辆在保证跟踪精度的同时,具有较好的行驶稳定性。

### 4.4 构建约束条件

在实际系统中,控制输入和状态变量往往受到物理约束、安全约束、性能约束等的限制。对于无人驾驶车辆,不仅要考虑控制量和控制增量约束,还应考虑车辆实际的动力学约束:

a. 轮胎侧偏角约束。过大的轮胎侧偏角会导致轮胎附着力达到附着极限<sup>[16]</sup>,根据轮胎的侧偏特性,当轮胎侧偏角在  $[-5^\circ, 5^\circ]$  范围内时,侧偏力与侧偏角呈线性关系。因此,轮胎侧偏角约束为  $-5^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 。

b. 质心侧偏角约束。质心侧偏角是保证车辆稳定行驶的关键因素<sup>[17]</sup>。在良好路面上,质心侧偏角可以达到  $\pm 12^\circ$ 。因此,质心侧偏角约束为  $-12^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$ 。

c. 附着条件约束。车辆的动力性能不仅取决于驱动电机,还受限于道路附着系数  $\mu$ 。因此,车辆纵向加速度  $a_x$  和横向加速度  $a_y$  约束为  $\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \leq \mu g$ 。

## 4.5 优化求解

为了便于目标函数在上位机中的迭代求解,将MPC优化问题转化为二次规划问题。通过求解带约束的优化问题可得到一组控制增量序列:

$$\Delta U(k) = (\Delta u_2(k), \Delta u_2(k+1), \cdots, \Delta u_2(k+N_c))^T \quad (21)$$

将该序列的首个元素作为实际控制增量即可得到目标前轮转角控制量。

## 5 混合控制器设计

### 5.1 混合控制策略

根据LQR和MPC的优缺点<sup>[18]</sup>,设计如图3所示的混合控制策略。稳定切换控制器根据不同车速确定加权系数  $\lambda$  和控制器运行标志位  $f_c$ ,控制算法选择器通过  $f_c$  确定当前工作的控制器。低速工况下仅LQR控制器工作;中速工况下两种控制器同时工作;高速工况下仅MPC控制器工作。混合控制器输出量为两种控制器计算结果加权值。LQR控制器输出结果为  $\delta_l$ , MPC控制器输出结果为  $\delta_m$ , 加权系数为  $\lambda$ , 最终输出的前轮转角  $\delta_r$  为:

$$\delta_r = \lambda \delta_l + (1 - \lambda) \delta_m \quad (22)$$

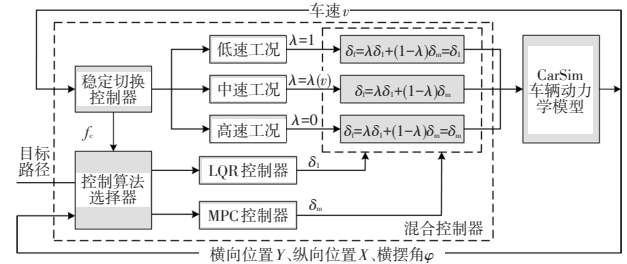


图3 混合控制策略结构

### 5.2 稳定切换控制器

#### 5.2.1 划分工况

根据车速将行驶过程划分为3种工况:车速小于45 km/h时,车辆处于低速工况;车速在45~55 km/h范围内时,车辆处于中速工况;车速大于55 km/h时,车辆处于高速工况。

#### 5.2.2 基于有限状态机的稳定切换控制器设计

根据前文所述,建立如图4所示的稳定切换控制器。该控制器使用有限状态机来判断车辆当前所处工况,实现算法切换策略的执行。有限状态机相比于传统if-else条件判断语句,可扩展性更强,其状态可以灵活添加、修改或删除,以适应不同的需求。有限状态机采用米利(Mealy)型结构,包含低速、中速、高速3种工况,可根据车速和当前工况决定下一工况,并根据不同工况选择相应的加权系数和即将工作的控制器。

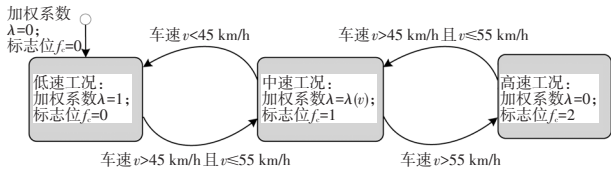


图4 稳定切换控制器

车辆处于低速工况时,加权系数 $\lambda=1$ ,此时 $f_c=0$ ,仅LQR控制器工作,输出的前轮转角为LQR控制器计算结果;车辆处于中速工况时,加权系数 $\lambda$ 根据当前时刻的车速确定,此时 $f_c=1$ ,LQR控制器和MPC控制器同时工作,输出的前轮转角为LQR控制器和MPC控制器计算结果的加权和;车辆处于高速工况时,加权系数 $\lambda=0$ ,此时 $f_c=2$ ,仅MPC控制器工作,输出的前轮转角为MPC控制器计算结果。

### 5.2.3 基于遗传算法求解中速工况加权系数

当车辆处于中速工况时,加权系数的值由车辆当前时刻车速确定,二者具有某种函数映射关系。多项式函数可以适应不同数据变化趋势,通过选择适当的多项式次数和系数,可以拟合各种形状,包括线性、非线性、凸性、凹性等,具有较强的灵活性。多项式次数过低,可能导致曲线出现较多的振荡或抖动,在某些情况下可能无法提供足够的平滑性。多项式次数过高,可能导致过拟合问题,且具有更高的复杂度,尤其是在处理大量数据时,需要更多的计算时间和计算资源。为了保证两种控制算法的平稳切换,本文设计了基于五次多项式的加权系数-车速计算公式:

$$\lambda(v) = a_0v^5 + b_0v^4 + c_0v^3 + d_0v^2 + e_0v + f_0 \quad (23)$$

式中: $v$ 为当前车速, $a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, f_0$ 为五次多项式系数。

令 $v_1=(v-45)/10$ ,对式(23)作变换:

$$\lambda_1(v_1) = a_1v_1^5 + b_1v_1^4 + c_1v_1^3 + d_1v_1^2 + e_1v_1 + f_1 \quad (24)$$

式中: $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ 为五次多项式系数。

考虑3种车速工况下加权系数公式连续性,当 $45 \text{ km/h} \leq v \leq 55 \text{ km/h}$ ,即 $0 \leq v_1 \leq 1$ 时作如下约束: $\lambda_1(0)=1$ ;  $\lambda_1'(0)=0$ ;  $\lambda_1(1)=1$ ;  $\lambda_1'(1)=0$ ;  $\lambda_1'(v_1) \leq 0$ 。

化简可得: $a_1=4+c_1+2d_1$ ;  $b_1=-2c_1-3d_1-5$ ;  $e_1=0$ ;  $f_1=1$ ;  $5a_1v_1^4+4b_1v_1^3+3c_1v_1^2+2d_1v_1+e_1 \leq 0$ 。

因此,在满足约束条件的前提下选择不同的 $c_1$ 和 $d_1$ ,即可得到不同的多项式系数,进而得到不同的加权系数。不同加权系数对算法切换稳定性影响不同,加权系数过快或过慢地从0过渡到1都易使车辆失稳,因此需寻求一组最优五次多项式系数。遗传算法可模拟生物进化过程,采用种群方式在解空间中进行全局搜索,找到全局最优解或近似最优解,故选择遗传算法对多项式系数进行优化。遗传算法优化流程如图5所示。

2024年 第3期

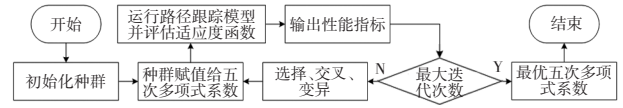


图5 遗传算法优化流程

确定优化目标为多项式系数 $c_1$ 和 $d_1$ ,综合考虑郭孔辉教授提出的评价车辆操纵性能的总方差法<sup>[19]</sup>,建立基于车辆行驶稳定性和跟踪精确性的适应度函数。

#### 5.2.3.1 行驶稳定性

设横摆角速度评价指标为:

$$J_{s1} = \int_0^t \left[ \frac{\dot{\phi}(t)}{\dot{\phi}_m} \right]^2 dt \quad (25)$$

设侧向加速度评价指标为:

$$J_{s2} = \int_0^t \left[ \frac{a_y(t)}{a_{ym}} \right]^2 dt \quad (26)$$

式中: $\dot{\phi}(t)$ 为 $t$ 时刻的横摆角速度, $a_y(t)$ 为 $t$ 时刻的侧向加速度, $\dot{\phi}_m$ 为横摆角速度阈值, $a_{ym}$ 为侧向加速度阈值, $t$ 为时间。

对式(25)、式(26)进行加权平均得到行驶稳定性适应度函数:

$$J_s = \sqrt{\frac{\omega_{s1}J_{s1}^2 + \omega_{s2}J_{s2}^2}{\omega_{s1} + \omega_{s2}}} \quad (27)$$

式中: $\omega_{s1}, \omega_{s2}$ 分别为横摆角速度和侧向加速度加权值。

#### 5.2.3.2 跟踪精确性

设横向误差评价指标为:

$$J_{e1} = \int_0^t \left[ \frac{f(t) - y(t)}{E_m} \right]^2 dt \quad (28)$$

设航向误差评价指标为:

$$J_{e2} = \int_0^t \left[ \frac{v_x(t)\dot{\beta}(t)}{\dot{\beta}_m} \right]^2 dt \quad (29)$$

式中: $f(t)$ 为 $t$ 时刻的目标横向位移, $y(t)$ 为 $t$ 时刻的实际横向位移, $v_x(t)$ 为 $t$ 时刻的纵向车速, $\dot{\beta}(t)$ 为 $t$ 时刻的质心侧偏角速度, $E_m$ 为横向误差标准阈值, $\dot{\beta}_m$ 为质心侧偏角速度标准阈值。

对式(28)、式(29)进行加权平均得到跟踪精确性适应度函数:

$$J_e = \sqrt{\frac{\omega_{e1}J_{e1}^2 + \omega_{e2}J_{e2}^2}{\omega_{e1} + \omega_{e2}}} \quad (30)$$

式中: $\omega_{e1}, \omega_{e2}$ 分别为横向误差和航向误差加权值。

对式(27)和式(30)进行加权平方根处理,得到综合适应度函数:

$$J = \sqrt{\frac{\omega_1J_s^2 + \omega_2J_e^2}{\omega_1 + \omega_2}} \quad (31)$$

式中: $\omega_1, \omega_2$ 分别为行驶稳定性和跟踪精确性加权值。

各项评价指标的标准阈值及加权值参考文献[20]、文献[21],具体标准阈值如表1所示。

表1 汽车动力学参数标准阈值

动力学参数	标准阈值
$\dot{\phi}_m / (^\circ) \cdot s^{-1}$	18
$a_{ym} / m \cdot s^{-1}$	3
$E_m / m$	0.4
$\dot{\beta}_m / (^\circ) \cdot s^{-1}$	1.2

设初始种群大小为10、最大迭代次数为100、交叉概率为0.9、变异概率为0.05,优化变量分别为 $c_1$ 和 $d_1$ ,将计算得到的五次多项式系数代入式(24)并结合低速工况和高速工况下的加权系数,得到如图6所示的加权系数变化曲线。

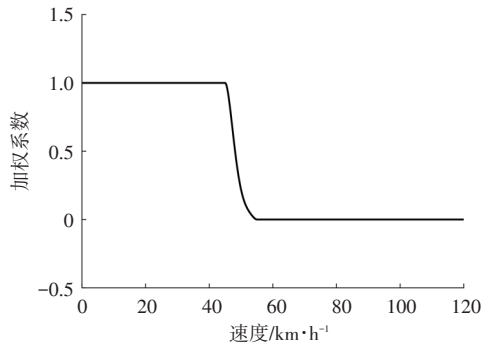


图6 加权系数变化曲线

## 6 联合仿真与实车试验

### 6.1 整车模型仿真参数

为了验证混合控制策略的效果,分别设计基于车辆动力学模型的LQR控制器和MPC控制器,通过CarSim和MATLAB/Simulink联合仿真验证控制算法的有效性。以无人驾驶方程式赛车作为实车模型,整车动力学参数如表2所示。

表2 整车动力学参数

动力学参数	数值
整车质量/kg	285
质心到前轴距离/mm	740
质心到后轴距离/mm	880
绕z轴转动惯量/kg·m²	405

### 6.2 仿真分析

在CarSim和MATLAB/Simulink联合仿真平台上进行仿真验证,选用双移线作为目标路径,道路附着系数设为0.85。同时,为了测试混合控制策略在工况切换时的稳定性,设计如图7所示的仿真速度变化曲线。

图8所示为仿真路径跟踪结果。由图8可知,路径跟踪混合控制器相较于LQR控制器具有更好的跟踪精

度,并且能够稳定跟踪目标位置与目标航向角。

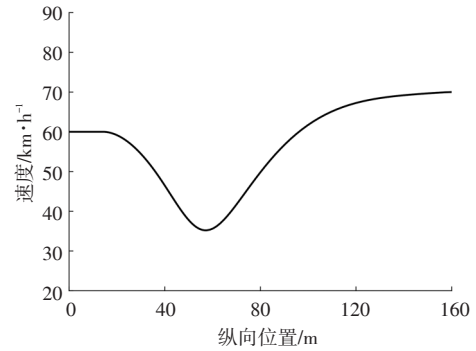
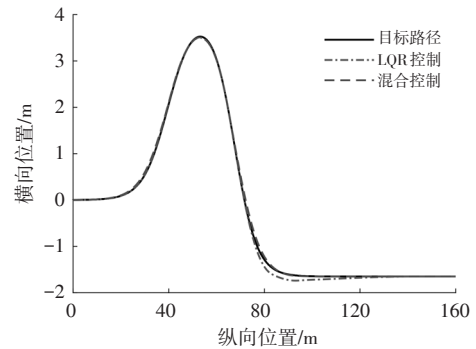
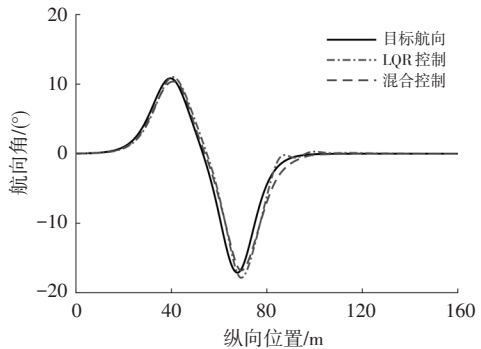


图7 仿真验证速度变化曲线



(a)横向位置变化曲线



(b)航向角变化曲线

图8 仿真验证路径跟踪结果

表3、表4所示分别为LQR控制器和混合控制器的横向误差、航向误差的对比结果。由表3和表4可知,相较于LQR控制器,混合控制器的平均横向误差和最大横向误差分别降低了34.7%和22.6%,平均航向误差和最大航向误差分别降低了11.9%和9.9%。路径跟踪混合控制器在车辆驶出弯道时已切换至MPC算法,其对道路的提前预测保证了车辆平稳通过弯道,而LQR控制器未能预测前方道路,车辆在驶出弯道时产生超调,影响车辆行驶稳定性。

表3 横向误差平均值及最大值 m

参数	LQR控制器	混合控制器
平均横向误差	0.032 93	0.021 59
最大横向误差	0.171 21	0.132 53

表4 航向误差平均值及最大值 (°)

参数	LQR控制器	混合控制器
平均航向误差	0.740 39	0.651 75
最大航向误差	3.051 41	2.749 68

MPC控制器和混合控制器的计算时间对比结果如图9和表5所示。由图9和表5可知:中速工况下LQR控制器和MPC控制器同时工作,在计算资源有限的前提下混合控制器单次最大计算时间较长;混合控制器在低速工况下切换至LQR控制器,求解速度较快,降低了平均计算时间,混合控制器平均计算时间相较于MPC控制器降低了18.6%,改善了单一MPC控制器求解效率低的问题。

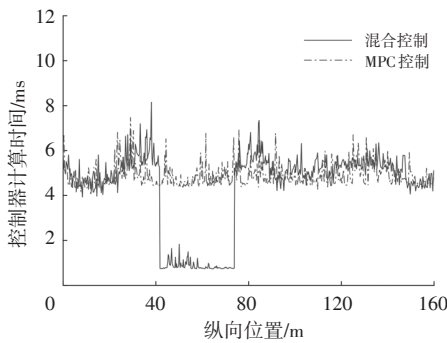


图9 仿真验证不同控制器计算时间对比结果

表5 仿真验证控制器计算时间统计结果 ms

参数	MPC控制器	混合控制器
平均计算时间	4.89	3.98
单次最大计算时间	7.48	8.15

图10、图11所示分别为车辆横摆角速度和侧向加速度变化情况。图10和图11表明,车辆在行驶过程中,无稳定切换控制器的混合控制策略在速度工况切换时易发生剧烈抖动,由于切换前、后不同控制算法输出的前轮转角存在较大差异,使横摆角速度和侧向加速度发生瞬时突变,严重影响行驶稳定性与乘坐舒适性。加入稳定切换控制器后,由于中速工况的存在,其可作为速度工况切换的缓冲区间,且在中速工况下输出的前轮转角为两种控制算法加权值,前轮转角未发生突变,横摆角速度和侧向加速度变化平稳,未出现较大波动,保证了两种控制算法平滑切换。

仿真结果表明,本文设计的路径跟踪混合控制策略可保证两种控制算法平滑切换且具有较短的计算时间与较好的控制精度。

### 6.3 实车试验

为验证混合控制策略在实车上的可行性,将所设计的混合控制器部署到无人驾驶方程式赛车上进行试验,如图12所示。整车搭载组合惯性导航系统等传感器,

并配备线控转向、线控制动等模块,通过开发底盘域控制器和整车控制器完成对车辆的横、纵向控制。整车电子电气架构如图13所示。

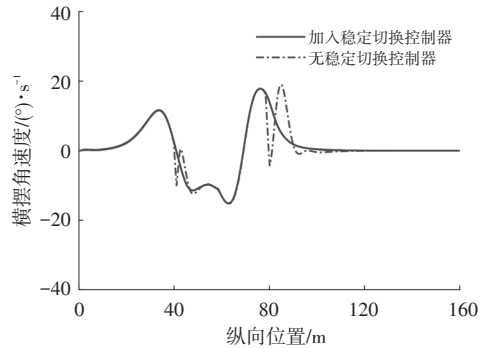


图10 仿真验证横摆角速度变化曲线

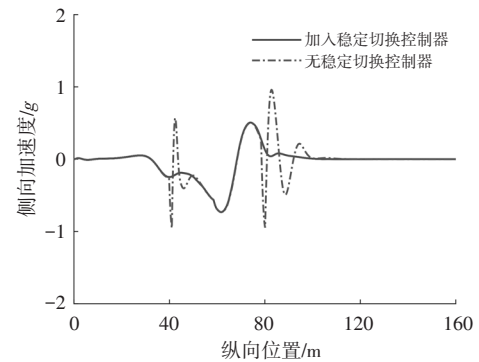


图11 仿真验证侧向加速度变化曲线

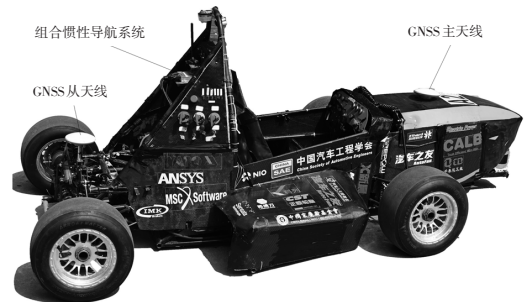


图12 无人驾驶方程式赛车

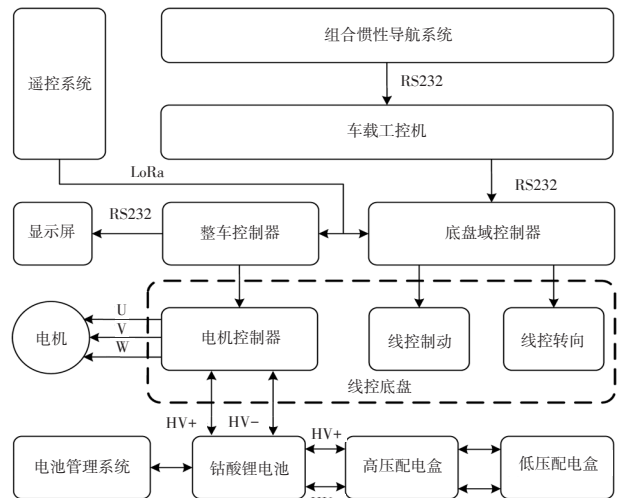


图13 整车电子电气架构

为获取车辆在路径跟踪时的目标路径点序列,实时采集组合惯性导航系统输出的车辆当前时刻工况信息,如图14所示,将其作为混合控制器的输入。实车试验的工况选择为换道工况,如图15所示。

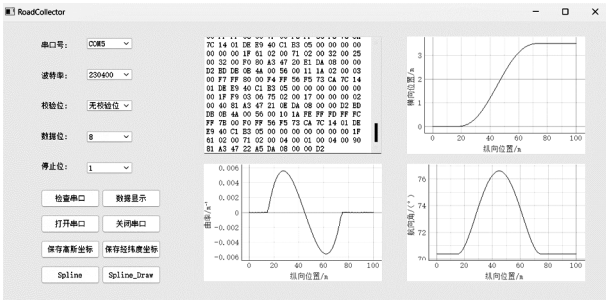


图14 目标路径



(a)换道路径



(b)换道过程

图15 实车试验过程

由6.2节的仿真结果可知,若不加入稳定切换控制器,车辆在速度切换时会出现较大摆动,高速时容易发生危险,因此实车试验部分在较低车速下进行,设计如图16所示的速度变化曲线。车速低于30 km/h时车辆处于低速工况,车速在30~40 km/h范围内时车辆处于中速工况,车速高于40 km/h时车辆处于高速工况。

图17所示为实车试验路径跟踪结果,图17表明路径跟踪混合控制器具有更好的跟踪精度,特别是在换道即将结束时,混合控制器的横向误差更小,且有效缓解了超调现象,行驶稳定性得到提升。

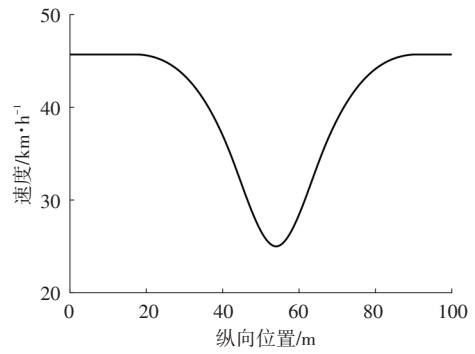
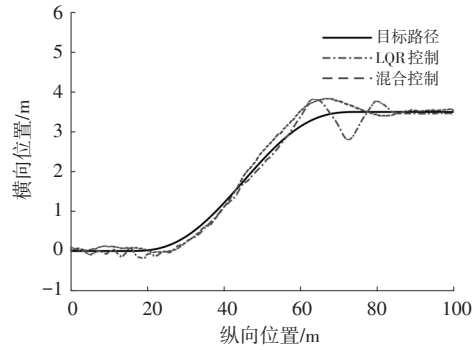
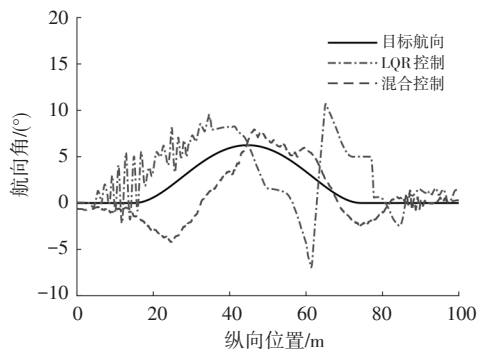


图16 实车试验速度变化曲线



(a)横向位置变化曲线



(b)航向角变化曲线

图17 实车试验路径跟踪结果

LQR控制器和混合控制器的横向误差、航向误差的对比结果分别如表6、表7所示。由表6和表7可知,相较于LQR控制器,混合控制器的平均横向误差、最大横向误差分别降低了26.3%和35.9%,平均航向误差、最大航向误差分别降低了39.6%和38.3%。

表6 实车试验横向误差平均值及最大值 m

参数	LQR控制器	混合控制器
平均横向误差	0.185 71	0.136 94
最大横向误差	0.705 06	0.451 89

表7 实车试验航向误差平均值及最大值 (°)

参数	LQR控制器	混合控制器
平均航向误差	2.922 43	1.765 01
最大航向误差	9.893 72	6.098 21

MPC控制器与混合控制器计算时间对比结果如图

18和表8所示。由图18和表8可知,相较于MPC控制器,混合控制器的平均计算时间缩短10.9%。车辆处于中速工况时,两种控制器同时工作,混合控制器的计算时间较MPC控制器长。由于中速工况的持续时间较短,混合控制器的平均计算时间较MPC控制器短。

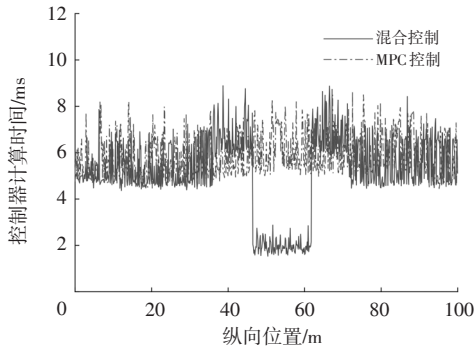


图18 实车试验不同控制器计算时间对比结果

表8 实车试验控制器计算时间统计结果 ms

参数	MPC控制器	混合控制器
平均计算时间	5.85	5.21
单次最大计算时间	8.65	8.97

图19、图20所示分别为车辆横摆角速度、侧向加速度变化情况。图19和图20表明,稳定切换控制器可保证控制算法平稳切换,车辆横摆角速度维持在 $-6.92\sim 6.92$  ( $^{\circ}$ )/s范围内,侧向加速度维持在 $-0.59\sim 0.59 g$ 范围内,横摆角速度和侧向加速度均未发生瞬时突变,保证了车辆的行驶稳定性。

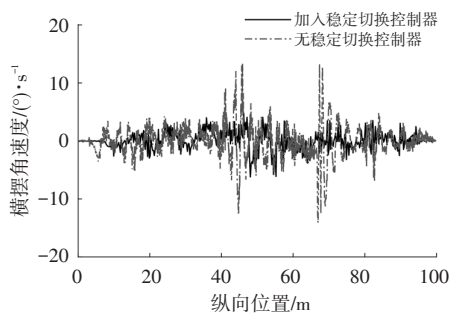


图19 实车试验横摆角速度变化曲线

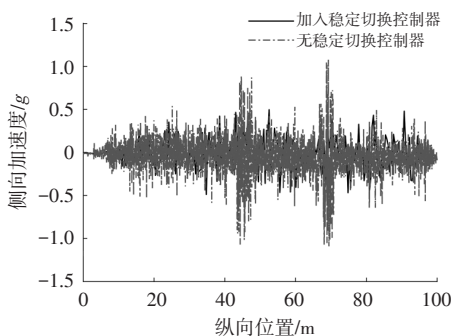


图20 实车试验侧向加速度变化曲线

实车试验结果表明,本文设计的混合控制策略具有更高的跟踪精度,且计算效率更高。稳定切换控制器保证了控制算法的平滑过渡,防止车辆失稳。

## 7 结束语

本文设计了一种基于线性二次型调节器和模型预测控制的无人驾驶车辆路径跟踪混合控制策略,通过有限状态机识别速度工况,根据不同工况选择不同控制算法,低速工况下采用LQR算法,高速工况下采用MPC算法,并加入中速工况作为过渡工况。在此基础上,设计稳定切换控制器,并基于遗传算法优化加权系数。通过CarSim和MATLAB/Simulink联合仿真平台进行仿真验证,最后使用无人驾驶方程式赛车进行实车试验。试验结果表明,该混合控制策略在提高路径跟踪性能与行驶稳定性的同时,进一步提高了计算效率。

### 参考文献

- [1] MONOT N, MOREAU X, BENINE- NETO A, et al. Automated Vehicle Lateral Guidance Using Multi- PID Steering Control and Look- Ahead Point Reference[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2021, 16(1): 38-55.
- [2] AHN J, SHIN S, KIM M, et al. Accurate Path Tracking by Adjusting Look- Ahead Point in Pure Pursuit Method[J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22 (1): 119-129.
- [3] 王鑫, 凌铭, 饶启鹏, 等. 基于改进Stanley算法的无人车路径跟踪融合算法研究[J]. 汽车技术, 2022(7): 25-31. WANG X, LING M, RAO Q P, et al. Research on Fusion Algorithm of Driverless Vehicle Path Tracking Based on Improved Stanley Algorithm[J]. Automobile Technology, 2022(7): 25-31.
- [4] WANG Z Q, SUN K Y, MA S Q, et al. Improved Linear Quadratic Regulator Lateral Path Tracking Approach Based on a Real-Time Updated Algorithm with Fuzzy Control and Cosine Similarity for Autonomous Vehicles[J]. Electronics, 2022, 11(22): 3703.
- [5] 关龙新, 顾祖飞, 张超, 等. 考虑系统复杂扰动的智能车模型预测路径跟踪控制[J]. 汽车工程, 2022, 44(12): 1844-1855. GUAN L X, GU Z F, ZHANG C, et al. Model Predictive Path Following Control of Intelligent Vehicles Considering System Complex Disturbances[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(12): 1844-1855.
- [6] ZHOU Z D, ROTHER C, CHEN J. Event-Triggered Model Predictive Control for Autonomous Vehicle Path Tracking: Validation Using CARLA Simulator[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(6): 3547-3555.

- [7] 贺伊琳, 宋若昉, 马建. 基于强化学习 DDPG 的智能车辆轨迹跟踪控制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 335-348.  
HE Y L, SONG R Y, MA J. Trajectory Tracking Control of Intelligent Vehicle Based on DDPG Method of Reinforcement Learning[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 335-348.
- [8] WANG Y G, ZHOU F Y, Zhao Y, et al. Iterative Learning Control for Path Tracking of Service Robot in Perspective Dynamic System with Uncertainties[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(6): 1-10.
- [9] 赵熙俊, 陈慧岩. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(5): 382-387.  
ZHAO X J, CHEN H Y. A Study on Lateral Control Method for the Path Tracking of Intelligent Vehicles[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(5): 382-387.
- [10] WANG R, LI Y, FAN J H, et al. A Novel Pure Pursuit Algorithm for Autonomous Vehicles Based on Salp Swarm Algorithm and Velocity Controller[J]. IEEE Access, 2020, 8: 166525-166540.
- [11] 张华强, 王国栋, 吕云飞, 等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 18-25.  
ZHANG H Q, WANG G D, LÜ Y F, et al. Agricultural Machinery Automatic Navigation Control System Based on Improved Pure Tracking Model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 18-25.
- [12] 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.  
HU J, ZHONG X K, CHEN R N, et al. Path Tracking Control of Intelligent Vehicles Based on Fuzzy LQR[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 17-25.
- [13] LIU J, YANG C. Adaptive Path Tracking Controller for Intelligent Driving Vehicles for Large Curvature Paths[J]. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, 2022, 6(2): 199-219.
- [14] 段敏, 孙小松, 张博涵. 基于模型预测控制与离散线性二次型调节器的智能车横纵解耦跟踪控制[J]. 汽车技术, 2022(8): 38-46.  
DUAN M, SUN X S, ZHANG B H. Horizontal and Vertical Decoupling Tracking Control Based on MPC and DLQR[J]. Automobile Technology, 2022(8): 38-46.
- [15] 马思群, 王兆强, 韩博, 等. 改进的 LQR 横向路径跟踪控制器[J]. 机械科学与技术(2022-08-31)[2023-09-22]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.10-03-8728.20220218>.  
MA S Q, WANG Z Q, HAN B, et al. Improved LQR Lateral Path Tracking Controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering(2022-08-31)[2023-09-22]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20220218>.
- [16] HU J J, XIONG S S, ZHA J L, et al. Lane Detection and Trajectory Tracking Control of Autonomous Vehicle Based on Model Predictive Control[J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(2): 285-295
- [17] 蔡英凤, 李健, 孙晓强, 等. 智能汽车路径跟踪混合控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(3): 289-298.  
CAI Y F, LI J, SUN X Q, et al. Research on Hybrid Control Strategy for Intelligent Vehicle Path Tracking[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(3): 289-298.
- [18] 李春, 王少峰, 刘明春, 等. 基于多目标优化的自动驾驶车辆轨迹跟踪控制[J]. 汽车技术, 2022(4): 8-15.  
LI C, WANG S F, LIU M C, et al. Research on the Trajectory Tracking Control of Autonomous Vehicle Based on the Multi-Objective Optimization[J]. Automobile Technology, 2022(4): 8-15.
- [19] 郭孔辉, 丁海涛, 宗长富, 等. 人一车闭环操纵性评价与优化的研究进展[J]. 机械工程学报, 2003(10): 27-35.  
GUO K H, DING H T, ZONG C F, et al. Progress of the Human-Vehicle Closed-Loop System Manoeuvrability's Evaluation and Optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003(10): 27-35.
- [20] 江浩斌, 韦奇志, 李傲雪, 等. 一种面向智能汽车的工况自适应路径跟踪控制方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(6): 1-11.  
JIANG H B, WEI Z Q, LI A X, et al. An Operating Condition Adaptive Path Tracking Control Method for Intelligent Vehicle[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(6): 1-11.
- [21] 宗长富, 郭孔辉. 汽车操纵稳定性的客观定量评价指标[J]. 吉林工业大学自然科学学报, 2000(1): 1-6.  
ZONG C F, GUO K H. Objective Evaluation Index for Handling and Stability of Vehicle[J]. Natural Science Journal of Jilin University of Technology, 2000(1): 1-6.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为 2023 年 9 月 22 日。