

融合自适应曲线预瞄的驾驶机器人 转向操纵粒子群优化滑模控制

蒋一辰, 陈刚

(南京理工大学机械工程学院, 210094, 南京)

摘要: 为提高不同工况下驾驶机器人操纵试验车辆的转向精度和自适应能力,提出了一种基于自适应曲线预瞄的驾驶机器人转向操纵粒子群优化滑模控制方法。首先建立了试验车辆动力学模型和驾驶机器人转向机械手动力学模型,并构建了驾驶机器人转向操纵试验车辆的集成系统动力学模型,接着研究了一种融合路径曲率和车速的驾驶机器人转向操纵自适应曲线预瞄方法,其预瞄点位置能够根据车速和路径曲率做出自适应调整。在此基础上,设计了用于驾驶机器人转向操纵的粒子群优化滑模控制器,并进行了稳定性分析,同时利用粒子群算法在线优化滑模控制切换项的反馈增益系数,以减小控制抖振。仿真及试验结果表明,所提出的方法能够在不同工况下根据路径曲率和车速做出自适应调整,实现驾驶机器人操纵车辆的精确转向控制。

关键词: 驾驶机器人;转向控制;自适应曲线预瞄;滑模控制;粒子群优化

中图分类号: U461.6 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202103020 **文章编号:** 0253-987X(2021)03-0175-11



OSID 码

Particle Swarm Optimization Sliding Mode Steering Control of Driving Robot Integrated with Adaptive Curve Preview

JIANG Yichen, CHEN Gang

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To improve the steering control accuracy and adaptability of robot-driven vehicle (UDRV) under different conditions, a sliding mode control method with particle swarm optimization (PSO) for the steering control of driving robot based on adaptive curve preview is proposed. Firstly, the dynamics models for the test vehicle and the steering manipulator of driving robot are established, then the two models are coupled together to obtain an integrated system dynamics model of the test vehicle manipulated by driving robot. An adaptive curve preview method is proposed, which can make adaptive adjustment for the preview point according to the curvature of the path and the speed of the vehicle. Based on the above, the sliding mode controller with PSO for steering manipulator of driving robot is designed, then the stability analysis is carried out. With the help of PSO, the feedback gain coefficient of the sliding mode controller's switch item is adjusted online to reduce the control chattering. The simulation and test results show that the proposed method can effectively conduct adaptive adjustment according

收稿日期: 2020-06-15。 作者简介: 蒋一辰(1997—),男,硕士生;陈刚(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675281);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30918011101);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20_0110)。

网络出版时间: 2020-11-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20201109.1541.004.html>

to the path curvature and vehicle speed under different conditions, and the steering control accuracy of UDRV is verified.

Keywords: driving robot; steering control; adaptive curve preview; sliding mode control; particle swarm optimization

汽车试验具有重复性强、工作环境恶劣、危险性大等特点,需要试验员掌握丰富的经验,极大地增加了试验的培训和人工成本;此外在其他特种作业领域,包括抢险救灾、恶劣环境下的物资运输等,采用人类驾驶员驾驶汽车,有可能危及生命安全。驾驶机器人是指无需对车辆进行任何改装,就能安装在驾驶室内操纵车辆的特种作业机器人,其特点是经过车辆性能自学习后,可适用于多种车型,能够广泛应用于特种作业领域^[1]。目前,国外主要是日本三重大学^[2]、新西兰奥克兰大学^[3]、英国 ABD 公司等涉足该领域并掌握一定的技术;国内主要是南京理工大学^[1,4-7]、东南大学^[8]、北京航空航天大学^[9]等掌握该技术。

当驾驶机器人操纵试验车辆时,有必要对车速和转向控制进行研究。Wong 等利用纯跟踪和矢量跟踪等方法,通过 PID 控制驾驶机器人进行了多工况下的路径跟踪仿真试验,但是 PID 的 3 个参数不能实现自调节^[3]。陈刚等提出了一种具有自学习能力的驾驶机器人模糊神经网络车速控制方法,但是仅适用于小干扰条件下的非线性控制场合^[4]。王纪伟等提出了一种基于模糊免疫 PID 的驾驶机器人车辆路径跟踪方法,但是存在不确定性干扰时,跟踪精度和稳定性较差,且试验工况单一^[6]。Chen 等提出了一种适用于驾驶机器人的自适应转向控制方法,但是未涉及车速变化时的转向操纵研究^[7]。Norouzi 等将滑模控制和反演控制相结合以控制驾驶机器人车辆转向,但参数寻优采取的是离线方法^[10]。

在转向操纵控制方法上,吴俊等提出了一种基于期望角速度的路径规划方法和基于横向误差的转向切换控制方法,但是仅适用于道路曲率较小的工况^[5]。马芳武等提出了一种预瞄时间自调整的单点预瞄方法,但缺少对于车速适应性的论证^[11]。Norouzi 等利用 3 次和 5 次函数分别来进行转向路径规划,但是相比于形式简洁的预瞄理论,横向误差减小并不显著,且仅涉及了单移线工况^[12]。刁勤晴等提出了一种基于动态双点预瞄的纵横向控制方法,该方法能够根据车速和路径曲率调节预瞄距离,但预瞄模型过于复杂^[13]。

在驾驶机器人转向操纵的研究过程中,需要兼

顾转向精度以及对于车速和道路曲率变化的适应能力。最小化横向误差的转向控制策略大多存在诸如入弯角偏小、过度转向、方向盘来回转动频繁等问题;以单点预瞄为代表的预瞄方法大多对车速和弯曲道路的自适应能力较弱。滑模控制由于具有优良的稳定性、鲁棒性和快速响应特性^[14],十分适用于驾驶机器人操纵的车辆这一非线性系统。但是,基于经验或离线寻优的滑模控制器设计会在趋近速度或者抑制抖振其中一方面做出让步,在处理上界不定的干扰时表现较差,且在长时间运行后,无法对工作点的变化做出自适应调整。通过将自适应曲线预瞄方法、粒子群优化算法(PSO)和滑模控制器结合起来,提高了对于车速和道路曲率的适应能力,且能够实时整定参数。根据以上分析,首先构建了具有耦合特性的驾驶机器人转向操纵试验车辆的系统动力学模型,接着研究了一种融合路径曲率和车速的驾驶机器人转向操纵自适应曲线预瞄方法,其预瞄点位置能够根据车速和路径曲率做出自适应调整;然后结合转向机械手动力学模型设计了滑模控制器,并进行了稳定性分析,利用粒子群算法在线优化滑模控制切换项的反馈增益系数,以减小控制抖振;最后,通过试验和仿真验证了提出方法的有效性。

1 驾驶机器人系统结构

驾驶机器人的总体结构如图 1 所示,机械腿和机械手组合完成加速、制动、转向、换挡等一系列动作,实现精确转向和车速跟踪的功能。

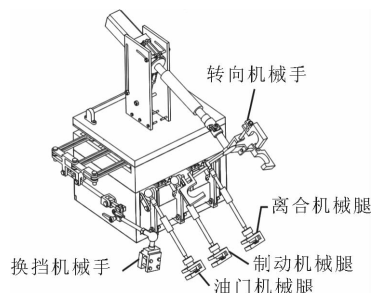


图 1 驾驶机器人总体结构

转向机械手结构如图 2 所示,转向力矩电机采用的是无刷直流旋转电机,作为整个机械手的动力来源,其动力经过减速器和万向节后,驱动由卡盘夹

持的方向盘。机械手通过调节装置能够实现姿态调节和长度调节,以适应不同的驾驶室布置。

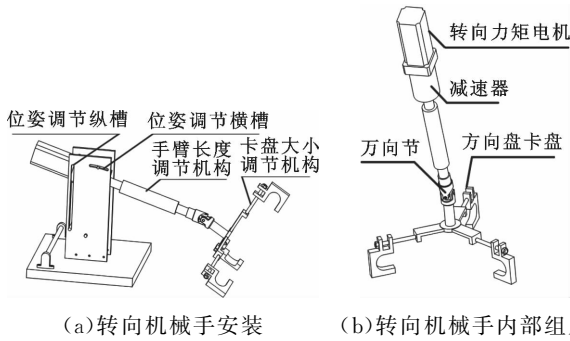


图 2 转向机械手结构

2 驾驶机器人转向操纵建模

2.1 试验车辆动力学模型

遵循 Ackermann 转向的车辆可以简化为单轨模型,前轮等效转角为 δ ,同时忽略悬架作用和转向时的车轮载荷转移,限定横向加速度在 $0.4g$ 以下,得到如图 3 所示的二自由度模型,以质心为原点,建立车辆坐标系 xCy ,并得到如下方程式

$$\left. \begin{aligned} k_1 \left(\beta + \frac{a\omega_r}{u} - \delta \right) + k_2 \left(\beta - \frac{b\omega_r}{u} \right) &= m(\dot{v} + u\omega_r) \\ ak_1 \left(\beta + \frac{a\omega_r}{u} - \delta \right) - bk_2 \left(\beta - \frac{b\omega_r}{u} \right) &= I_z \dot{\omega}_r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为前后轮的侧偏角刚度; β 为质心侧偏角; a 为汽车前轴到质心的距离; b 为汽车后轴到质心的距离; ω_r 为横摆角速度; δ 为前轮转角; u 为纵向车速; v 为横向车速; I_z 为汽车绕 z 轴的转动惯量。

上述方程可以写作状态空间

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \\ a_{11} &= \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u}; a_{12} = \frac{ak_1 - bk_2}{I_z}; b_1 = -\frac{ak_1}{I_z} \\ a_{21} &= \frac{ak_1 - bk_2}{mu^2} - 1; a_{22} = \frac{k_1 + k_2}{mu}; b_2 = -\frac{k_1}{mu} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

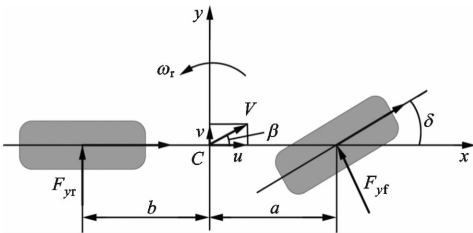


图 3 试验车辆动力学模型

2.2 驾驶机器人转向机械手动力学模型

转向机械手结构简图如图 4 所示,在这里忽略

十字轴万向节传动的不等速性,近似认为输出端和输入端转速相等。

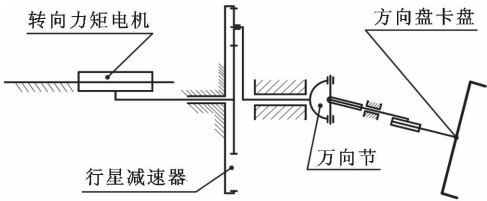


图 4 转向机械手结构简图

机械手整体可视作单自由度系统,设电机旋转角为 θ ,电枢电流产生的电磁转矩为 T_m ,负载转矩为 T_h ,黏性阻尼造成的摩擦阻力矩为 T_f 。根据动量矩定理,可得

$$T_m - T_h - T_f = J\ddot{\theta} \quad (3)$$

式中: J 是负载等效到电机输出轴的转动惯量。

进一步完善上式所示的转矩平衡方程可得

$$K_T i_a - T_h(t) - D \frac{d\theta(t)}{dt} = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (4)$$

式中: K_T 为电机转矩系数; i_a 为电枢电流; D 为电机输出轴端黏性摩擦系数。

电枢回路的电压平衡方程为

$$u_a(t) = L \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a + K_b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

式中: u_a 为电枢电压; L 为电枢绕组电感; R_a 为电枢绕组电阻; K_b 为反电动势系数。

由于折算前后系统动能不变,等效转动惯量 J 可以由下式给出

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} J \omega^2 &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_{si}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} J_{si} \omega_i^2 \\ J &= \sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{v_{si}}{\omega} \right)^2 + \sum_{i=1}^n J_{si} \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: ω_i 为机构中第 i 个构件的角速度; v_{si} 为其质心速度,此处为 0。

将各构件间的传动比代入上式,可以求得等效转动惯量为

$$J = J_1 + J_2 i_{21}^2 + J_3 i_{31}^2 + J_4 i_{41}^2 \quad (7)$$

式中: i_{n1} ($n=2,3,4$) 为各构件转速与电机输出端转速的比值; J_1 为太阳轮转动惯量; J_2 为行星轮转动惯量; J_3 为万向节转动惯量; J_4 为卡盘转动惯量。

根据式(4)、式(5)和式(7),可得到转向机械手动力学模型,写作状态空间为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{D}{J} x_2 + \frac{K_T}{J} x_3 - \frac{T_h}{J} \\ \dot{x}_3 &= -\frac{K_b}{J} x_2 - \frac{R_a}{L} x_3 + \frac{1}{L} u_a + \Delta E \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: x_1 为电机转角 θ ; x_2 为旋转角速度 $\dot{\theta}$; x_3 为电枢绕组的电流 i_a ; ΔE 为模型不确定性和外部干扰之和, 且假设 ΔE 有界, 即满足 $|\Delta E| \leq M$ 。

2.3 驾驶机器人转向操纵试验车辆集成系统

动力学模型

在转向操纵过程中, 转向机械手电机存在大量的换向运动, 齿隙的存在会对这种可逆转装置造成回差, 使得输入和输出的转角不再服从线性关系。对于方向盘到汽车转向轮之间的传动, 由于从动部分的阻尼和转动惯量远大于主动部分, 因此该传动过程可以做线性化处理, 而对于从转向机械手电机到方向盘之间的传动过程, 假设驱动部分处在齿隙期间时, 从动部分输出恒定, 因此可以使用齿隙的迟滞非线性模型^[15]

$$\theta_c(t) = f(\theta_z(t)) =$$

$$\begin{cases} \frac{\theta_z(t) - \theta_b}{i}, & \dot{\theta}_z(t) > 0 \text{ 且 } \theta_c(t^-) = \frac{\theta_z(t^-) - \theta_b}{i} \\ \theta_c(t^-), & \text{其他} \\ \frac{\theta_z(t) + \theta_b}{i}, & \dot{\theta}_z(t) < 0 \text{ 且 } \theta_c(t^-) = \frac{\theta_z(t^-) + \theta_b}{i} \end{cases}$$

(9)

式中: θ_c 为从动部分转角; θ_z 为主动部分转角; t^- 表示过程发生的前一时刻; θ_b 为消除单侧齿隙所需的转角; i 为主动到从动部分的传动比。

将各级传动比 i_{n1} 和各级传动中的单侧齿隙转角 θ_b 代入, 经过多层嵌套, 可以求得迟滞模型下从转

向机械手电机转角 θ 到方向盘转角 α 之间的非线性关系 $\alpha = F(\theta)$, α , θ 和 δ 之间的速比关系为

$$\alpha = F(\theta) = i_{sw} \delta \quad (10)$$

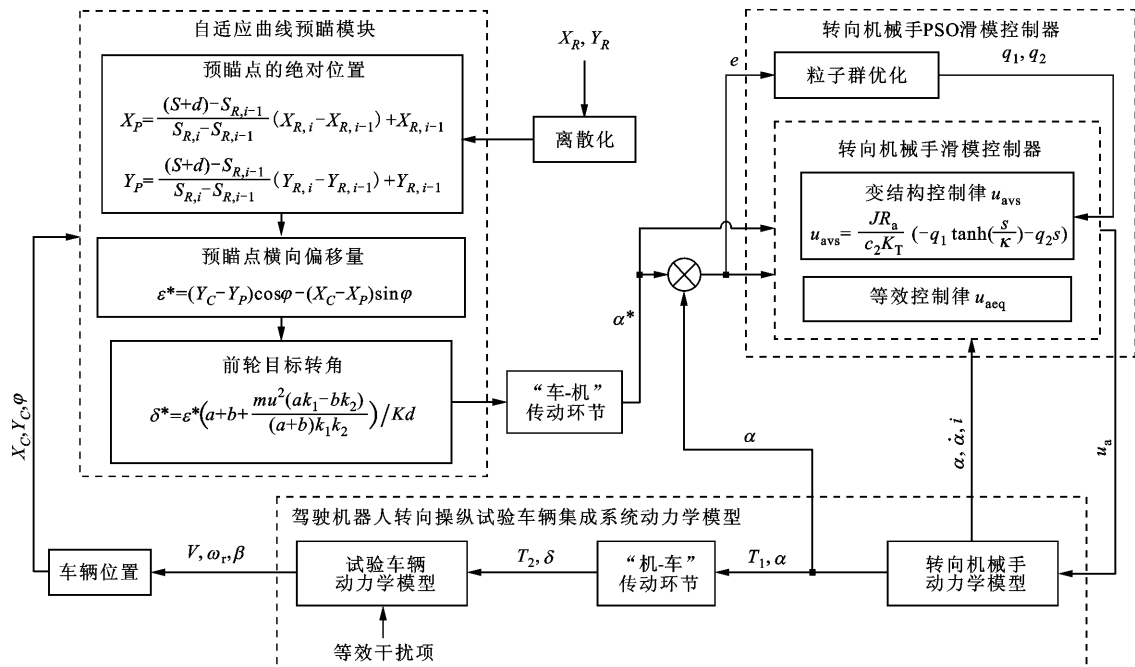
式中: i_{sw} 为转向系传动比。

最后, 根据试验车辆动力学模型和转向机械手动力学模型, 由式(2)、式(8)和式(10)可推导出具有耦合特性的驾驶机器人转向操纵试验车辆集成系统动力学模型

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{D}{J}x_2 + \frac{K_T}{J}x_3 - \frac{T_b}{J} \\ \dot{x}_3 = -\frac{K_b}{L}x_2 - \frac{R_a}{L}x_3 + \frac{1}{L}u_a + \Delta E \\ \dot{x}_4 = a_{41}F(x_1) + a_{44}x_4 + a_{45}x_5 \\ \dot{x}_5 = a_{51}F(x_1) + a_{54}x_4 + a_{55}x_5 \\ a_{41} = -\frac{ak_1}{I_z i_{sw}}; a_{44} = \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u}; a_{45} = \frac{ak_1 - bk_2}{I_z} \\ a_{51} = -\frac{k_1}{mu i_{sw}}; a_{54} = \frac{qk_1 - bk_2}{mu^2} - 1; a_{55} = \frac{k_1 + k_2}{mu} \end{cases} \quad (11)$$

3 驾驶机器人转向操纵控制方法

驾驶机器人转向操纵控制系统框图如图5所示, 主要包括自适应曲线预瞄模块、转向机械手 PSO 滑模控制器、驾驶机器人转向操纵试验车辆集成系统动力学模型。转向机械手 PSO 滑模控制器的



车—试验车辆; 机—转向机械手。

图5 驾驶机器人转向操纵控制系统框图

输入为机械手的目标转角、实际转角和转速以及实际的电枢电流,通过嵌入粒子群优化,将切换项中的系数 q_1 和 q_2 输入转向机械手驱动电机滑模控制模块,最终输出电枢电压 u_a 。驾驶机器人转向操纵过程中,首先利用自适应曲线预瞄方法,结合目标路径 (X_R, Y_R) 和车辆位置 (X_C, Y_C, φ) ,计算出预瞄点 P 在大地坐标系中的位置 (X_P, Y_P) 以及 P 相对于车辆的横向偏移量 ϵ^* ,再根据 ϵ^* 得到前轮目标转角 δ^* ,将对应信息输入机械手控制器得到电枢电压控制率 u_a ,该控制率包括等效控制率 u_{aeq} 和变结构控制率 u_{avs} ,其中 u_{aeq} 由转向机械手逆模型得到, u_{avs} 中的反馈增益系数 q_1 和 q_2 通过粒子群优化得到。转向机械手输出的实际转角 α 和转矩 T_1 经传动和延迟环节,输出前轮转角 δ 和转向力矩 T_2 以驱动车辆转向。最后通过车速 V 、横摆角速度 ω_r 和质心侧偏角 β 计算下一时刻的车辆位置并反馈给自适应曲线预瞄模块。

3.1 自适应曲线预瞄方法

如图6所示,以试验车辆质心为原点 C ,建立车辆坐标系 $x_C y$ 。车辆在行驶中的任一时刻均可看作沿着曲率半径为 R ,曲率中心为 G 的轨迹 L 行驶。其中 G_x 为 G 在 x 轴上的投影, P' 为 P 在 GG_x 上的投影。假设沿着 x 轴正方向有一个参考点 T , d 为 T 到 C 点的距离;设预瞄点 P 为 L 上一点,满足 $\widehat{CP}$ 长度等于 d , ϵ^* 为 P 到 x 轴的距离,即预瞄点横向偏移量。

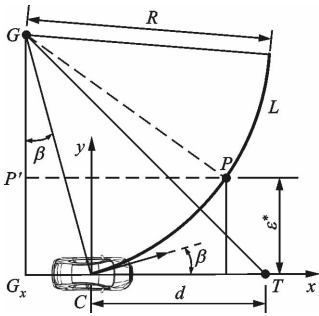


图6 车辆坐标系下稳态行驶图

当 $\widehat{CP}$ 长度不变时,道路越弯曲, $|\epsilon^*|$ 越大, P 在 $x_C y$ 系中的横坐标越小,这同人类驾驶员在弯曲道路上前视距离变短相一致。相比于单点预瞄,自适应曲线预瞄中预瞄点和试验车辆的相对位置关系对车速和弯曲道路具有更强的适应性。

预瞄距离 d 由下式给出

$$d = d_p + \xi t_p u \quad (12)$$

式中: d_p 为基础预瞄距离; ξ 为时间系数; t_p 为预瞄时间。

在稳态圆周工况下,令 $\dot{v}=0, \dot{\omega}_r=0$, 式(1)可以写作

$$\left. \begin{aligned} k_1(\beta u + a\omega_r - \delta u) + k_2(\beta u - b\omega_r) &= mu^2 \omega_r \\ ak_1(\beta u + a\omega_r - \delta u) - bk_2(\beta u - b\omega_r) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\text{式中: } \omega_r = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{R}; \beta \approx \tan \beta = \frac{v}{u}.$$

解方程组(13)可得

$$v = \left[b + \frac{amu^2}{(a+b)k_2} \right] \omega_r \quad (14)$$

令 $K = b + \frac{amu^2}{(a+b)k_2}$, 根据式(13)和式(14),可以得到对应曲率半径 R 的前轮目标转角为

$$\delta^* = \frac{1}{\sqrt{R^2 - K^2}} \left[a + b + \frac{mu^2(ak_1 - bk_2)}{(a+b)k_1k_2} \right] \quad (15)$$

利用几何关系,可以表征出预瞄点横向偏移量为

$$\epsilon^* = GG_x - GP' = R \cos \beta - R \cos \left(\beta + \frac{d}{R} \right) = R \left(\cos \beta - \cos \beta \cos \frac{d}{R} + \sin \beta \sin \frac{d}{R} \right) \quad (16)$$

考虑到 $d \ll R$, 有 $\cos \frac{d}{R} \approx 1, \sin \frac{d}{R} \approx \frac{d}{R}$, ϵ^* 可以简化为

$$\epsilon^* \approx R \cos \beta - R \cos \beta + d \sin \beta = d \sin \beta \quad (17)$$

根据式(13),可以推得

$$\sin \beta = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} = \omega_r \left[b + \frac{amu^2}{(a+b)k_2} \right] / \omega_r R = \frac{K}{R} \quad (18)$$

联立式(15)(17)和(18),得到 δ^* 和 ϵ^* 之间的关系为

$$\begin{aligned} \frac{\delta^*}{\epsilon^*} &= \left(a + b + \frac{mu^2(ak_1 - bk_2)}{(a+b)k_1k_2} \right) / d \sin \beta \sqrt{R^2 - K^2} = \\ &= \left(a + b + \frac{mu^2(ak_1 - bk_2)}{(a+b)k_1k_2} \right) / \frac{Kd}{R} \sqrt{R^2 - K^2} = \\ &= \left((a+b) + \frac{mu^2(ak_1 - bk_2)}{(a+b)k_1k_2} \right) / Kd \sqrt{1 - \frac{K^2}{R^2}} \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $K = \frac{au^2 m}{(a+b)k_2} + b$, 一般情况下, $|K| \ll R$, 上式可以简化为

$$\frac{\delta^*}{\epsilon^*} = \left(a + b + \frac{mu^2(ak_1 - bk_2)}{(a+b)k_1k_2} \right) / Kd \quad (20)$$

式(17)中的 ϵ^* 是在车辆坐标系下推导的,下面

需要在大地坐标系下表征出 ϵ^* 。

如图7所示,在大地坐标系下,汽车质心坐标为 (X_C, Y_C) , 参考点坐标为 (X_T, Y_T) , 预瞄点坐标为 (X_P, Y_P) 。 P 为目标路径上到汽车质心路程恰好等于预瞄距离 d 的一点, 利用坐标系旋转矩阵, 可以得到 P 在车辆坐标系 x_Cy 中的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P - X_C \\ Y_P - Y_C \end{bmatrix} \quad (21)$$

根据上式, P 在车辆系中的纵坐标为

$$y_P = (X_C - X_P)\sin\varphi + (Y_P - Y_C)\cos\varphi \quad (22)$$

ϵ^* 即为 y_P 的相反数, 可以表示为

$$\epsilon^* = -y_P = (X_P - X_C)\sin\varphi + (Y_C - Y_P)\cos\varphi \quad (23)$$

车辆位置由 X_C, Y_C 和 φ 确定, 这3个参数和质心侧偏角 β 、横摆角速度 ω_r 以及车速 V 之间的关系可以通过如下方程式确定

$$\left. \begin{aligned} X_C &= \int_0^t V \cos(\varphi + \beta) d\tau \\ Y_C &= \int_0^t V \sin(\varphi + \beta) d\tau \\ \varphi &= \int_0^t \omega_r d\tau \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

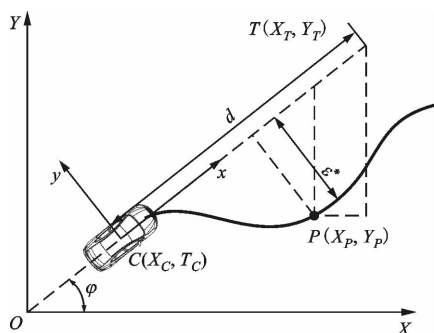


图7 大地坐标系下的曲线预瞄示意图

将目标路径离散化, 考虑到个别路段存在路径曲率无定义的情况, 这里采用微元法, 用直线来代替每一小段曲线的弧长, 求和得到最终的曲线长度。具体地, 首先定义目标路径上各点的信息为 $(X_{R,i}, Y_{R,i}, S_{R,i})$, 其中 $X_{R,i}$ 和 $Y_{R,i}$ 表示目标路径上各点在大地坐标系下的横纵坐标, $S_{R,i}$ 表示该点到起始点 $(X_{R,1}, Y_{R,1})$ 的曲线长度。当汽车离开起始点后, 假设它始终沿着规划路径行驶, 行驶路程为 S 。点集上必将存在且唯一存在相邻的两点 $(X_{R,i}, Y_{R,i}, S_{R,i})$ 和 $(X_{R,i-1}, Y_{R,i-1}, S_{R,i-1})$, 使得 $S_{R,i-1} \leq S + d \leq S_{R,i}$, 利用线性差值, 确定预瞄点 $P(X_P, Y_P, S_P)$ 的信息为

$$\left. \begin{aligned} X_P &= \frac{(S+d) - S_{R,i-1}}{S_{R,i} - S_{R,i-1}} (X_{R,i} - X_{R,i-1}) + X_{R,i-1} \\ Y_P &= \frac{(S+d) - S_{R,i-1}}{S_{R,i} - S_{R,i-1}} (Y_{R,i} - Y_{R,i-1}) + Y_{R,i-1} \\ S_P &= S + d \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

将表征车辆位置信息的 X_C, Y_C 和 φ 以及 P 的坐标代入式(23), 即可求得 ϵ^* 。根据式(20), 最终得到前轮目标转角为

$$\delta^* = \epsilon^* \left(a + b + \frac{mu^2(ak_1 - bk_2)}{(a+b)k_1k_2} \right) / Kd \quad (26)$$

3.2 融合自适应曲线预瞄的滑模控制

转向机械手的旋转角度来源于自适应曲线预瞄模块, 转向控制的目标就是通过调节输入转向机械手电机的电压来实现对目标转角的跟踪, 首先定义转向机械手卡盘的转角误差为

$$e = \alpha - \alpha_d = F(x_1) - F(x_d) \quad (27)$$

式中: α 为机械手实际转角; α_d 为机械手目标转角, 且 α_d 具有二阶导数; x_d 为电机目标转角。

系统为三阶, 此时的滑模面实际上为一滑形, 但在文中仍称其为滑模面, 并定义为

$$s = c_1 e + c_2 \dot{e} + c_3 \int_0^t e dt \quad (28)$$

式中: $c_i (i=1, 2, 3)$ 为滑模面系数。

如果要达到理想的滑模控制, 需满足 $\frac{ds}{dt} = 0$, 即

$$c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_d) + c_2(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_d) + c_3(x_1 - x_d) = 0 \quad (29)$$

将式(8)代入式(29), 得到

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c_1 \dot{e} + c_2 \ddot{e} + c_3 e = c_1(x_2 - \dot{x}_d) + c_2(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_d) + c_3(x_1 - x_d) \\ &= c_1(x_2 - \dot{x}_d) + c_3(x_1 - x_d) - c_2 \ddot{x}_d - c_2 \frac{D}{J} x_2 - c_2 \frac{K_b K_T}{J R_a} x_2 - c_2 \frac{K_T L}{J R_a} \dot{x}_3 + c_2 \frac{K_T}{J R_a} u_a \end{aligned} \quad (30)$$

根据指数趋近律的设计思想, 设计

$$\dot{s} = -q_1 \tanh\left(\frac{s}{\kappa}\right) - q_2 s \quad (31)$$

式中: q_1 和 q_2 为切换项的反馈增益系数; κ 为边界层厚度系数。

区别于传统指数趋近律中使用符号函数 sgn , 在这里选用软饱和的双曲正切函数 $\tanh$, 其连续光滑的性质可以有效降低滑模控制的抖振。将式(31)代入式(30), 得到 u_a 的控制率为

$$\begin{aligned} u_a &= -\frac{c_1 J R_a}{c_2 K_T} (x_2 - \dot{x}_d) - \frac{c_3 J R_a}{c_2 K_T} (x_1 - x_d) + \\ &\quad \frac{J R_a}{K_T} \ddot{x}_d + \frac{D R_a}{K_T} x_2 + \frac{T_b R_a}{K_T} + K_b x_2 + L \dot{x}_3 + \end{aligned}$$

$$\frac{JR_a}{c_2 K_T} \left[-q_1 \tanh\left(\frac{s}{\kappa}\right) - q_2 s \right] \quad (32)$$

将上述控制率分为两部分,等效控制率为

$$u_{\text{eq}} = -\frac{c_1 JR_a}{c_2 K_T} (x_2 - \dot{x}_d) - \frac{c_3 JR_a}{c_2 K_T} (x_1 - x_d) + \frac{JR_a}{K_T} \ddot{x}_d + \frac{DR_a}{K_T} x_2 + \frac{T_h R_a}{K_T} + K_b x_2 + L \dot{x}_3 \quad (33)$$

变结构控制率为

$$u_{\text{avs}} = \frac{JR_a}{c_2 K_T} \left[-q_1 \tanh\left(\frac{s}{\kappa}\right) - q_2 s \right] \quad (34)$$

3.3 转向控制稳定性分析

在驾驶机器人的转向操纵过程中,如果系统不稳定,直接表现就是在受到干扰后方向盘频繁地大幅度来回转动,这会极大削弱车辆的横向稳定性,因此有必要进行转向控制的稳定性分析,使系统具有良好的动态品质。其次,滑模控制还需要满足存在性和可达性的要求,存在性条件规定了系统的运动必须趋向于滑模面,可达条件规定了滑模面在整个状态空间都有较强的“吸引力”,因此需满足

$$\left. \begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} s\dot{s} &= 0 \\ s\dot{s} &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

综合上述要求,定义 Lyapunov 函数为 $V =$

$\frac{1}{2}s^2$,对该式求导,并将式(30)代入得

$$\dot{V} = s\dot{s} = s \left[c_1 (x_2 - \dot{x}_d) + c_3 (x_1 - x_d) - \frac{c_2 D}{J} x_2 - \frac{c_2 T_h}{J} - c_2 \ddot{x}_d - \frac{c_2 K_b K_T}{JR_a} x_2 - \frac{c_2 K_T L}{JR_a} \dot{x}_3 + \frac{c_2 K_T}{JR_a} u_a \right] \quad (36)$$

将式(8)和式(32)代入整理得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s[-q_1 \tanh(s) - q_2 s + C\Delta E] \leq \\ & -q_1 |s| - q_2 s^2 + |C| |s| M = \\ & |s| (-q_1 - q_2 |s| + |C| M) \end{aligned} \quad (37)$$

式中 C 为常数,由转向机械手的动力学模型决定。

令 $q_1 > |C|M$,即可推出 $\dot{V} = s\dot{s} \leq 0$,再根据 Lyapunov 函数 V 正定,转向机械手控制系统的设计满足滑动模态的存在性、可达性和稳定性的要求,所以能够渐进趋近于滑模面 s 。

3.4 粒子群优化滑模切换项

利用粒子群算法优化式(34)中的 q_1 和 q_2 ,可以取得较理想的抑抖效果和趋近速度。滑模控制是令系统从初始状态迅速趋向滑模面,然后在滑模面上做滑模运动,因此在这里选择性能指标,即适应度函数为

$$\min F_{\text{fit}} = \sigma |s| \quad (38)$$

式中 σ 为常数,且大于 0。

根据上文得到的 $q_1 > |C|M$,设定粒子群第一维度的搜索空间为 $(0, |C|M + \chi)$,其中 χ 的值较小,这样的设定方式在应对大干扰或者偏离平衡位置较远时,可以在搜索空间的上界附近取值,避免系统失稳;在平衡点附近时,可以在搜索空间的下界附近取值,削弱高频抖振。在第二维度的搜索空间的设定上,首先给出一个相对宽泛的空间,然后在此基础上改变干扰的上界,观察每次迭代过程中第二维度群体最优的分布情况,以此来进一步缩小第二维度的搜索空间。

粒子的速度更新公式和位置更新公式分别为

$$\mathbf{V}_{k+1} = \omega \mathbf{V}_k + C_1 r(\mathbf{P}_{\text{best}} - \mathbf{V}_k) + C_2 r(\mathbf{G}_{\text{best}} - \mathbf{V}_k) \quad (39)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + \mathbf{V}_{k+1} \quad (40)$$

式中 k 为迭代次数; $\mathbf{V}$ 为粒子的速度矢量; $\mathbf{P}$ 为粒子的位置矢量; ω 为惯性因子; C_1 和 C_2 为加速因子; r 为 $(0,1)$ 之间的随机数; $\mathbf{P}_{\text{best}}$ 为个体最优解空间; $\mathbf{G}_{\text{best}}$ 为群体最优解空间。

通过一定次数的迭代后,粒子群优化算法给出当前时刻的最优切换项系数 q_1 和 q_2 ,整个流程如下:

步骤 1:设置粒子群规模,对粒子速度和位置进行随机初始化;

步骤 2:计算滑模变量 s 和等效控制率 u_{eq} ;

步骤 3:更新粒子的状态,经过一定次数的迭代后,得到当前时刻最优的变结构控制率 u_{avs} ;

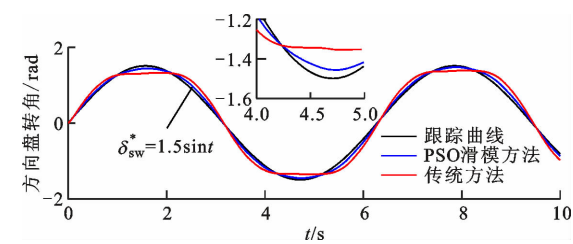
步骤 4:将等效控制率 u_{eq} 和变结构控制率 u_{avs} 求和,作为下一时刻的输入;

步骤 5:如果系统继续运动,返回步骤 2 进行循环;否则,整个过程停止。

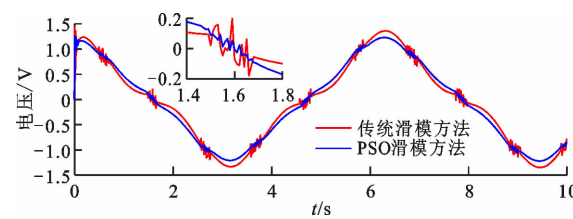
4 试验与仿真验证

为了验证提出方法抑制抖振的能力,下面分别使用粒子群优化滑模控制方法与传统滑模方法来控制转向机械手跟踪 $\delta_{\text{sw}}^* = 1.5 \sin t$ 的方向盘转角变化曲线,并附加了干扰 $0.3 \sin(3t)$,最终得到了全过程的方向盘实际转角和用于控制转向机械手力矩电机的电枢电压曲线,如图 8 所示。首先可以看出在跟踪过程中,PSO 滑模的跟踪效果明显优于传统滑模,其次在控制量对比上,PSO 滑模的抖振幅值在 $\pm 0.1 \text{ V}$ 以内波动,相比于传统滑模削弱了 50% 以上。综上,提出方法显著提升了抑制抖振的效果。

为了验证提出方法在转向操纵控制上的有效



(a)跟踪效果对比



(b)控制量对比

图8 控制方法效果对比

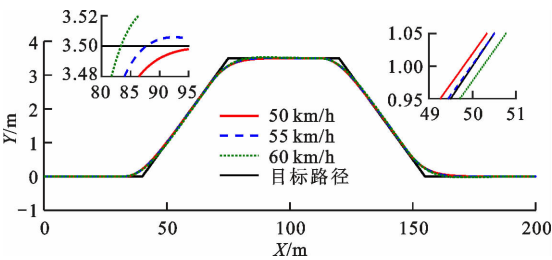
性,制作了驾驶机器人转向机械手样机,并将其安装在试验车辆上,如图9所示,实车主要性能参数如表1所示。根据乘用车双移线试验标准^[16],在交通部公路交通试验场由专业驾驶员进行了双移线试验,并由2名试验员随车采集数据。试验中,车辆位置和方位角由CDY-3车辆动态测试仪测量,车速由OES-Ⅱ非接触速度传感器测量。

表1 实车主要性能参数

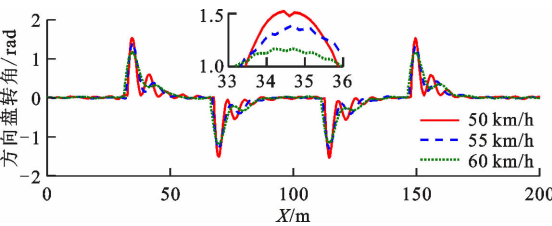
类别	参数	数值	参数	数值
试验车辆	m/kg	1 800	$k_1/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-51 480
	$I_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 549	$k_2/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-87 416
	a/m	1.256	i_{sw}	17.24
	b/m	1.368		
控制器	c_1	1	ξ	0.8
	c_2	2	σ	2
	c_3	1	ω	0.6
	d_p/m	0.5	C_1	2
	t_p/s	0.5	C_2	2
	κ	0.1		
转向机械手	$J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.003 6	i_{41}	0.125
	$J_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.007 4	D	0.05
	$J_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.009 76	$L \cdot \text{H}^{-1}$	0.000 8
	$J_4/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.047	R_a/Ω	0.075
	i_{21}	0.25	K_b	0.085
	i_{31}	0.125	K_T	1



图9 驾驶机器人安装图



(a)跟踪效果对比



(b)方向盘转角变化对比

图10 不同速度下驾驶机器人转向操纵效果

由图10a可以看出,随着车速的变化,3条实际行驶轨迹基本一致,且与目标路径在大范围内重合,验证了提出方法在车速变化时具有较好的自适应能力。理论上在拐点处,方向盘会产生较大的转角,从图10b所示的仿真结果来看,3种速度下的方向盘转角分别有4个幅值较大的波峰或波谷,正好对应4个拐点,转角变化趋势符合转弯规律。此外,为保证跟踪精度,车速增加时,控制器会适当减小转角,以免在高速情况下产生较大的超调量。

为进一步对比提出方法和其他方法的转向控制精度,采用不同的预瞄和控制方法,进行了双移线路况试验。干扰和误差主要来自于路面不平度、转向系统传动误差、模型简化误差等,在这里合成一个等效干扰 ΔE_{eq} 并作用在方向盘上,等效干扰服从正态分布,即 $\Delta E_{\text{eq}} \sim N(0, \pi/6)$,车速控制在50 km/h,最终得到的试验结果如图11所示。

从图11a和11b可以看出,由人类驾驶员操纵

首先,为了验证提出方法对车速的自适应能力,

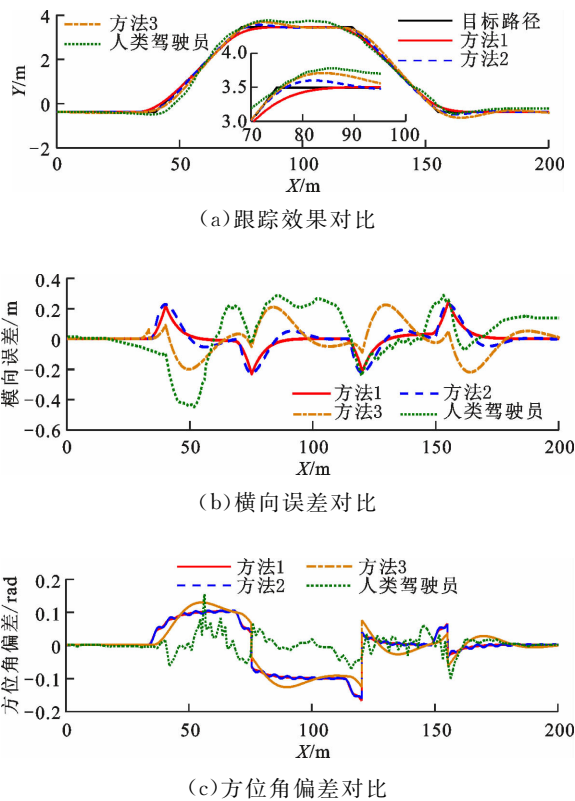


图 11 双移线工况试验结果对比

车辆的横向误差^[11,13]明显大于其他方法,其余 3 种方法的最大横向误差在 0.2 m 左右,且均出现在拐点处。相比于另外两种控制方法,本文提出方法(以下简称方法 1)具有更好的误差控制效果,如图 11b 所示,在应对相同干扰源时,方法 1 的最大横向误差比曲线预瞄+模糊 PID(以下简称方法 2)小 10% 左右,整体横向误差明显小于单点预瞄+PSO 滑模(以下简称方法 3),鲁棒性较强且误差收敛速度最快。图 11c 中的方位角偏差^[17]定义为大地坐标系中试验车辆的方位角 φ 与目标路径中心线和 x 轴夹角之间的差值。整个行驶过程中,上述几种方法的方位角偏差均在 ± 0.15 rad 以内,试验车辆的姿态控制还是较为理想的。方法 1 的方位角偏差明显小于方法 3,略小于方法 2,但大于由人类操纵车辆的方位角偏差,说明了自适应曲线预瞄能够显著改善转向过程中试验车辆的姿态,使其更加符合道路的变化,但是和人类驾驶员仍有一定差距。

为了验证提出方法对于路径曲率的适应性,设计了蛇形绕桩试验工况^[18],标桩间距 30 m,控制车速在 65 km/h。如图 12 所示,方法 1 的行驶轨迹基本同目标路径重合,仅在明显拐点处存在较大的横向误差和方位角偏差,最大横向误差约为 0.8 m,最大方位角偏差约为 0.25 rad,方法 2 的跟踪效果稍

稍劣于方法 1,而方法 3 的横向误差和方位角偏差普遍偏大,最大横向误差比方法 1 高出约 15%,最大方位角偏差比方法 1 高出约 30%。图 12c 给出了方法 1 中预瞄点 P 在车辆坐标系中的坐标变化,在平直路段,纵向预瞄距离(P 点横坐标 x_P)变大,横向预瞄距离(P 点纵坐标的绝对值 $|y_P|$)变小;在弯曲路段,上述变化趋势相反。在单点预瞄中,纵向预瞄距离固定,仅有横向预瞄距离根据路径的弯曲程度变化,这也是提出方法在大曲率条件下优于单点预瞄的原因所在。通过以上的对比,验证了方法 1 对于道路曲率变化具有良好的适应性。

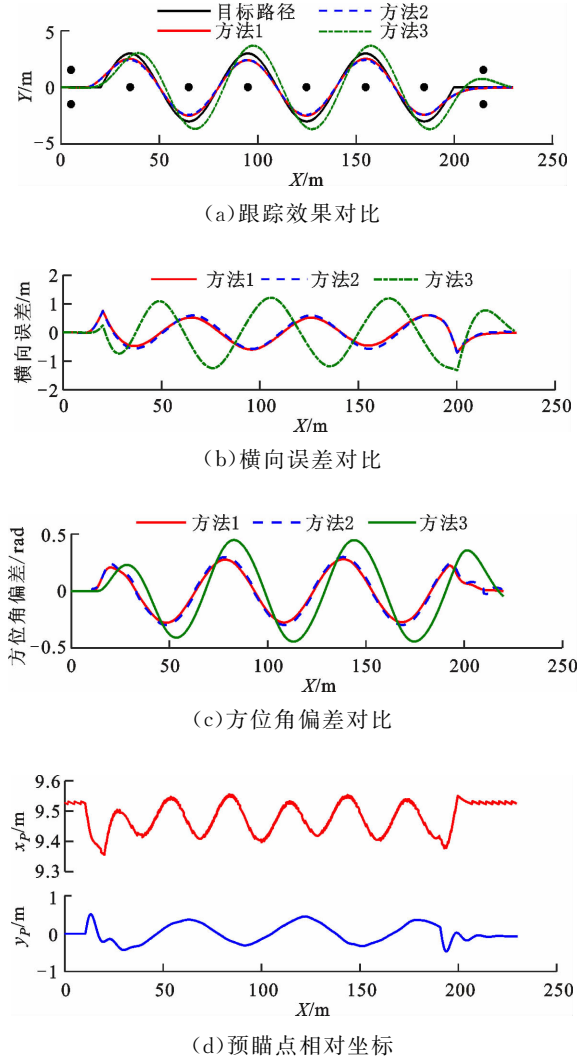


图 12 蛇形工况试验结果对比

表 2 给出了上述试验工况下车辆行驶轨迹的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)。可以看出,在较简单的双移线工况下,方法 1~3 中横向误差对应的 MAE 值和 RMSE 值相差不大,也就是说转向操纵精度相差不大,而复杂的蛇形工况下,方法 1 和 2 横向误差对应的 RMSE 值约为方法 3 的

1/4~1/5,也就是说方法 3 中的单点预瞄对路径曲率的适应性较差,同时说明提出的自适应曲线预瞄方法的应用在有着显著的积极作用。另外,在方位角偏差对应的 MAE 值和 RMSE 值对比中,可以看出方法 1 略优于方法 2,方法 1 和 2 明显优于方法 3,说明自适应曲线预瞄可以显著改善转向时试验车辆的姿态,同时粒子群优化的滑模控制对于转向过程的优化也有一定的积极作用。

表 2 行驶轨迹误差的统计分析

参数	指标	工况	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
横向误差	MAE	工况 1	0.034 0	0.052 7	0.068 3	0.138 9
		工况 2	0.287 1	0.308 3	0.633 6	
	RMSE	工况 1	0.004 1	0.007 4	0.009 8	0.032 7
		工况 2	0.118 8	0.138 2	0.558 8	
方位角偏差	MAE	工况 1	0.030 8	0.041 0	0.045 1	0.023 2
		工况 2	0.138 4	0.158 1	0.227 0	
	RMSE	工况 1	0.052 6	0.060 2	0.064 9	0.031 8
		工况 2	0.169 1	0.186 6	0.270 3	

注:工况 1 为双移线工况;工况 2 为蛇形工况;方法 4 为人类驾驶员。

5 结 论

为提高不同工况下驾驶机器人操纵试验车辆的转向控制精度和适应性,提出了一种基于自适应曲线预瞄的驾驶机器人转向操纵 PSO 滑模控制方法,其预瞄点位置能根据路径曲率和车速做出自适应调节。通过分析驾驶机器人和试验车辆的动力学模型和特性,将二者耦合成驾驶机器人转向操纵试验车辆集成系统动力学模型。针对转向控制中的参数不确定性、建模误差和外部干扰,设计了转向机械手的滑模控制器,为了兼顾滑模控制器的趋近速度和抑抖能力,对指数趋近律做出了改进,并用粒子群算法优化变结构控制率的反馈增益系数。试验和仿真结果表明,提出方法具有较高的控制精度和自适应能力,方向盘转角变化符合转弯规律,横向误差比其他方法小 10%~15%,方位角偏差比其他方法小 10%~30%,验证了提出方法的有效性。

后续研究将考虑轮胎和路面对方向盘和转向机械手的反馈作用,另外还将根据跟踪路径的曲率,建立预瞄时间和车速的自调整模型。在性能指标方面,不仅仅局限于最小化滑模变量,还将融入驾驶员主观感受的评价指标,包括跟踪路径的最大通过速度、方向盘忙碌程度、车辆横向加速度等。

参考文献:

[1] CHEN G, ZHANG W. Hierarchical coordinated control method for unmanned robot applied to automotive test [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1039-1051.

[2] HIRATA N, MIZUTANI N, MATSUI H, et al. Fuel consumption in a driving test cycle by robotic driver considering system dynamics [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 3374-3379.

[3] WONG N, CHAMBERS C, STOL K, et al. Development of a robotic driver for autonomous vehicle following [J]. Intelligent Systems Technologies and Applications, 2010, 8(1/2/3/4): 276-287.

[4] 陈刚, 张为公, 王良模. 电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制方法及试验验证 [J]. 科学通报, 2017, 62(30): 3514-3524.

CHEN Gang, ZHANG Weigong, WANG Liangmo. Fuzzy-neural-network-based speed control method and experiment verification for electromagnetic direct drive robot driver [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(30): 3514-3527.

[5] 吴俊, 陈刚. 驾驶机器人车辆的多模式切换控制 [J]. 汽车工程, 2018, 40(10): 1215-1222.

WU Jun, CHEN Gang. Multi-mode switching control for robot driven vehicles [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(10): 1215-1222.

[6] 王纪伟, 陈刚, 汪俊. 基于模糊免疫 PID 的驾驶机器人车辆路径及速度跟踪控制 [J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(6): 686-692.

WANG Jiwei, CHEN Gang, WANG Jun. Vehicle path and speed tracking control of robot driver based on fuzzy immune PID [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(6): 686-692.

[7] CHEN G, CHEN S, LANGARI R, et al. Driver-behavior-based adaptive steering robust nonlinear control of unmanned driving robotic vehicle with modeling uncertainties and disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8183-8190.

[8] CHEN G, ZHANG W. Digital prototyping design of electromagnetic unmanned robot applied to automotive test [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 32: 54-64.

[9] 刘坤明, 徐国艳, 余贵珍. 驾驶机器人机械腿动力学建模与仿真分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1709-1714.

- LIU Kunming, XU Guoyan, YU Guizhen. Dynamic modeling and simulation analysis of robot driver's mechanical legs [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(8): 1709-1714.
- [10] NOROUZI A, MASOUMI M, BARARI A, et al. Lateral control of an autonomous vehicle using integrated backstepping and sliding mode controller [J]. Multi-body Dynamics, 2019, 233(1): 141-151.
- [11] 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.
- MA Fangwu, SHE Shuo, WU Liang, et al. The analysis of single-point preview driver model based on time coefficient [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(3): 340-345.
- [12] NOROUZI A, KAZEMI R, AZADI S. Vehicle lateral control in the presence of uncertainty for lane change maneuver using adaptive sliding mode control with fuzzy boundary layer [J]. Systems and Control Engineering, 2018, 232(1): 12-28.
- [13] 刁勤晴, 张雅妮, 朱凌云. 双预瞄点智能车大曲率路径的横纵向模糊控制 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(12): 1445-1452.
- DIAO Qinqing, ZHANG Yani, ZHU Linyun. A lateral and longitudinal fuzzy control of intelligent vehicles with double preview points for large curvature roads [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(12): 1445-1452.
- [14] 姜林, 龙离军, 赵军. 带有时变干扰的变结构近空间飞行器滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(3): 88-96.
- JIANG Ling, LONG Lijun, ZHAO Jun. Sliding mode control for variable structure near space vehicles with time-varying composite disturbance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(3): 88-96.
- [15] 田正民. 具有间隙迟滞非线性的智能小车运动控制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [16] International Organization for Standardization. Passenger cars; test track for a serve lane-change manoeuvre; Part 1 Double lane-change; ISO 3888-1 [S]. Geneva, Switzerland; ISO, 2018: 1-3.
- [17] 王家恩, 陈无畏, 王檀彬, 等. 基于期望横摆角速度的视觉导航智能车辆横向控制 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 108-115.
- WANG Jiaen, CHEN Wuwei, WANG Tanbing, et al. Vision guided intelligent vehicle lateral control based on desired yaw rate [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 108-115.
- [18] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车操纵稳定性试验方法: GB/T 6323—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 3-9.

(编辑 荆树蓉)