

基于预见位姿信息的铰接式车辆 LQR – GA 路径跟踪控制

孟宇 汪钰 顾青 白国星

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对铰接式车辆的特殊转向结构和行驶特性,为提高其路径跟踪控制精度和反应速度,提出了一种基于预见信息的线性二次型最优控制(Linear quadratic regulator, LQR)策略,并应用遗传算法(Genetic algorithm, GA)对状态量权重矩阵进行优化求解,获得最优 LQR 状态反馈控制器,实现铰接式车辆精确路径跟踪控制,由位置偏差、行驶方位偏差和曲率偏差来反映控制效果。ADAMS – Matlab/Simulink 联合仿真结果:位置偏差为 0.03 m,偏差误差为 1.3%,行驶方位偏差误差为 0.19%,曲率偏差收敛于 0.003 m^{-1} 。联合仿真和试验验证结果表明,所提出的控制方法可有效提高控制精度,实现铰接式车辆的精确、稳定路径跟踪。

关键词: 铰接式车辆; 预见信息; 线性二次型最优控制; 遗传算法; 路径跟踪

中图分类号: TP273+.1; U463.32+.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)06-0375-10

LQR – GA Path Tracking Control of Articulated Vehicle
Based on Predictive Information

MENG Yu WANG Yu GU Qing BAI Guoxing

(College of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Articulated vehicle is one of the utmost members of intelligent mining equipment and working under terrible conditions, which has the special steering structure and driving characteristics. In order to improve the tracking accuracy and response speed of the articulated vehicle, a linear quadratic regulator (LQR) strategy based on predictive information was proposed and a genetic algorithm (GA) was used to optimize the state quantity matrix, and the optimal LQR state feedback controller was obtained to realize the precise path tracking control of the articulated vehicle. The control result was reflected by the displacement deviation, the heading deviation and the curvature deviation. In the co-simulation (ADAMS – Matlab/Simulink) results, the displacement deviation was 0.03 m, the deviation error was 1.3%, the heading deviation error was 0.19%, and the curvature deviation converged to be 0.003 m^{-1} . The co-simulation and experiment results showed that the proposed control method can effectively improve the control precision. The control strategy proposed can achieve the precise and stable path tracking of articulated vehicles, which was an alternative control method.

Key words: articulated vehicle; predictive information; linear quadratic regulator; genetic algorithm; path tracking

0 引言

铰接式车辆具有中央铰接点连接,前后车体可相对转动的结构特点,在低矮巷道和复杂工况行驶,具有灵活、机动、高效等突出优点。铰接式车辆的路径跟踪是智能矿山领域的研究热点。针对铰接车的路径跟踪控制,赵翾等^[1]针对铰接式车辆使用

Ackermann 公式与指数趋近律设计滑模控制进行路径跟踪,HEMAMI 等^[2]设计了一种基于误差动力学的路径跟踪控制器,PETROV 等^[3]在铰接式车辆中应用了线性反馈控制,BIGRAS 等^[4]提出一种基于线性矩阵不等式的控制框架,RIDLEY 等^[5]将极点配置方法应用于铰接车中,NAYL 等^[6]设计了一种采用切换模型的预测控制方案,邵俊恺等^[7]提出一

收稿日期: 2017 – 12 – 15 修回日期: 2018 – 03 – 07

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA060408)和国家重点研发计划项目(2016YFC0802905)

作者简介: 孟宇(1981—),男,副教授,博士,主要从事汽车电子及自动化、机器视觉和智能车辆研究,E-mail: myu@ustb.edu.cn

种基于强化学习的控制算法。其中文献[2-3]没有给出具体的误差分析,文献[1,4-7]的研究结果中位置偏差有较大超调,最大偏差大于0.5 m。过大的位置偏差可能会导致车辆在狭长、低矮巷道行驶时碰撞巷道壁,且最终稳定跟踪精度也有待提高。实现高精度的稳定路径跟踪控制是保证无人驾驶铰接车安全自主行驶的关键,有必要对其开展深入研究。

线性二次型最优控制(LQR)是一种稳定的控制方法,可利用较小的控制能量使系统状态变量维持在零值附近^[8],且同时可以对不稳定系统进行整定,对于铰接车多自由度运动、且行驶环境噪声信号复杂的情况具有突出优势。为提高铰接式车辆路径跟踪的跟踪精度,本文结合铰接式车辆的运动学和动力学特点,基于其误差动力学模型提出一种基于预见信息的线性二次型最优控制(LQR)方法。拟利用航迹推算方法对铰接车的下一采样时刻进行位姿估计,将预见位姿信息作为控制器的部分输入可有效提高控制对象的反应速度。同时,将利用全局优化算法遗传算法对 Q 、 R 矩阵进行优化,获得最优反馈控制率,实现铰接车的精确路径跟踪,并利用Simulink和ADAMS联合仿真验证控制策略的有效性,且在模型样机中进行试验验证。

1 路径跟踪控制策略

1.1 铰接式车辆运动学模型

通过对铰接式车辆运动学特性分析,建立运动学模型,了解其位姿的实时变化情况以及运动变量间的关系,可确定铰接式车辆路径跟踪控制变量。铰接式车辆模型^[9]如图1所示,前后车体由中间铰接连接,且具有铰接点转向的特殊行驶特点,在全局坐标系 $X-Y$ 中,前后桥中点坐标分别为 $P_f(X_f, Y_f)$ 和 $P_r(X_r, Y_r)$;前后车体质心车速分别为 v_f, v_r ;铰接点到前后桥中点长度分别 L_f, L_r ;前后车体滑移角为 α, β ;前后车体航向角分别为 θ_f, θ_r ,前后车体的航向角速度分别表示为 $\dot{\theta}_f, \dot{\theta}_r$,且定义铰接角

$$\gamma = \theta_r - \theta_f$$

由于铰接式车辆行驶速度较低,一般小于28 km/h^[10],轮胎变形对行驶影响可忽略不计,假设 $\alpha = \beta = 0$ ^[11],可得铰接式车辆运动几何关系

$$\begin{cases} -\dot{x}_f \sin \theta_r + \dot{y}_r \cos \theta_r = 0 \\ -\dot{x}_f \sin (\theta_r + \gamma) + \dot{y}_r \cos (\theta_r + \gamma) + \\ \dot{\theta}_r (L_f + L_r \cos \gamma) + \dot{\gamma} L_f = 0 \\ -v_f + v_r \cos \gamma + \dot{\theta}_r L_r \sin \gamma = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\dot{\gamma}$ ——铰接角速度

选取前桥中点 $P_f(X_f, Y_f)$ 为整车状态参考点,

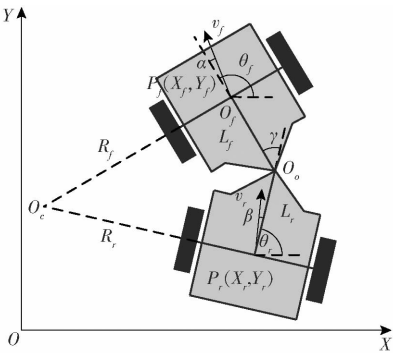


图1 铰接式车辆模型

Fig.1 Articulated vehicle model

可以得到整车运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \\ \dot{\theta}_f \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_f & 0 \\ \sin \theta_f & 0 \\ \frac{\sin \gamma}{L_f \cos \gamma + L_r} & \frac{L_r}{L_f \cos \gamma + L_r} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可知,通过控制车速和铰接角可以实现对铰接式车辆位姿状态的实时控制。本文所用35 t铰接式车辆模型部分结构参数如表1所示。

表1 铰接式车辆模型基本参数

Tab.1 Main parameters of articulated vehicle model

参数	数值
铰接点到前桥中点长度 L_f/m	1.68
铰接点到后桥中点长度 L_r/m	3.44
铰接角变化范围 $\gamma/(\circ)$	$[-45, 45]$
轮胎半径 r/m	0.96
轮间距 B/m	2.3

1.2 预见位姿推算模型

在控制中根据车辆当前行驶的位姿状态信息,利用航迹推算技术建立预见位姿状态模型,进行下一时刻采样点位置的位姿估计,在车辆路径跟踪中加入预见信息,可提高路径跟踪控制的反应速度^[12]。

铰接式车辆行驶曲线和参数定义示意图如图2所示,曲线A为车辆行驶曲线;前车体中点为P,预见车辆位置点为P';前后车体转向中心分别为 O_r, O_f ;前后车体的航向角分别为 θ_f, θ_r ,转向半径分别为 R_f, R_r ^[13]。

通过铰接车的运动学模型分析,得到前车体航向角变化速度为

$$\dot{\theta}_f = \frac{v_f \sin \gamma + L_r \dot{\gamma}}{L_f \cos \gamma + L_r} \quad (3)$$

假定采样间隔为 Δt ,前车体的预见航向角为

$$\theta'_f = \theta_f + \dot{\theta}_f \Delta t = \theta_f + \frac{v_f \sin \gamma + L_r \dot{\gamma}}{L_f \cos \gamma + L_r} \Delta t \quad (4)$$

假定车辆逆时针转动为正方向,计算可得前车体的

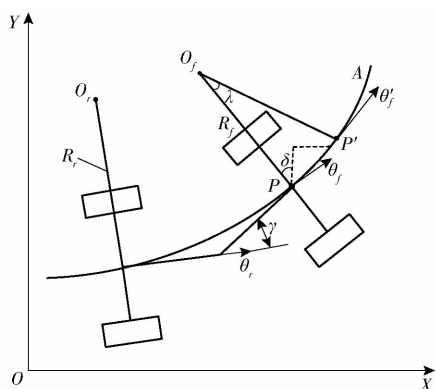


图2 铰接式车辆行驶曲线和参数定义

Fig. 2 Articulated vehicle modeling configuration

转向半径为

$$R_f = \frac{v_f(L_r + L_f \cos \gamma)}{v_f \sin \gamma + L_r \dot{\gamma}} \quad (5)$$

为区分车辆转动和直线行驶状态,设置车体转动状态量 t_s ,且满足以下条件

$$t_s = \begin{cases} 1 & (\gamma > \varepsilon) \\ -1 & (\gamma < -\varepsilon) \\ 0 & (-\varepsilon < \gamma < \varepsilon) \end{cases} \quad (6)$$

其中,设置的阈值 ε 通常取值较小,当铰接角 γ 处在该阈值范围内,认为车体没有转动。如图2所示,车体由 $P(x, y)$ 点移动到 $P'(x', y')$ 所用时间为 Δt ,前车体的转向角速度为 ω_f ,则前车体转过角度为

$$\lambda = |\omega_f| \Delta t \quad (7)$$

且由几何关系可得车体移动距离

$$l_{pp'} = 2R_f \sin \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

可推算下一时刻车辆前车体中点坐标 $P'(x', y')$ 为^[13]

$$x' = \begin{cases} x + v_f \Delta t \cos \theta_f & (\theta_f = \theta'_f) \\ x + l_{pp'} \cos \delta & (0 < \theta_f < \pi/2) \\ x - l_{pp'} \cos \delta & (\pi/2 \leq \theta_f \leq \pi) \\ x + l_{pp'} \cos \delta & (-\pi/2 \leq \theta_f \leq 0) \\ x - l_{pp'} \cos \delta & (-\pi < \theta_f < -\pi/2) \end{cases} \quad (9)$$

$$y' = \begin{cases} y + v_f \Delta t \sin \theta_f & (\theta_f = \theta'_f) \\ y + l_{pp'} \sin \delta & (0 < \theta_f < \pi/2) \\ y + l_{pp'} \sin \delta & (\pi/2 \leq \theta_f \leq \pi) \\ y - l_{pp'} \sin \delta & (-\pi/2 \leq \theta_f \leq 0) \\ y - l_{pp'} \sin \delta & (-\pi < \theta_f < -\pi/2) \end{cases} \quad (10)$$

$$\delta = \begin{cases} 0 & (\theta_f = \theta'_f) \\ \theta_f + t_s(\lambda/2) & (0 < \theta_f < \pi/2) \\ \pi - \theta_f - t_s(\lambda/2) & (\pi/2 \leq \theta_f \leq \pi) \\ -\theta_f - t_s(\lambda/2) & (-\pi/2 \leq \theta_f \leq 0) \\ \pi + \theta_f + t_s(\lambda/2) & (-\pi < \theta_f < -\pi/2) \end{cases} \quad (11)$$

式中 δ ——预见航向角与当前航向角偏差

1.3 误差动力学模型

铰接角和车速是路径跟踪控制的控制变量,本文重点是实现铰接角的实时控制。需要建立合适的偏差量作为控制输入,并能够完整地反映跟踪控制精度。车辆匀速行驶速度为 v ,根据车辆行驶中的实际路径和理想路径的偏差情况建立的行驶示意图如图3所示^[5]。

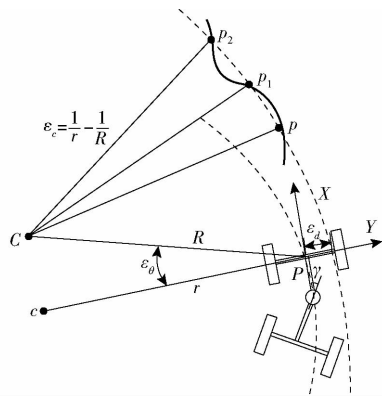


图3 铰接式车辆行驶示意图

Fig. 3 Graphical representation of driving of articulated vehicle

偏差定义与分析如下^[3]:

(1)位置偏差 ε_d :铰接车参考定位点 p 与参考轨迹上对应点 P (与参考轨迹距离最近)的横向位置差值

$$\dot{\varepsilon}_d = v \varepsilon_\theta \quad (12)$$

(2)行驶方向偏差 ε_θ :铰接车定位参考点 p 的航向角(速度方向与车辆坐标系 x 轴之间的夹角)与参考轨迹上对应点 P 的航向角(对应点的切线与车辆坐标系 x 轴之间的夹角)的差值

$$\dot{\varepsilon}_\theta = v \varepsilon_c + \dot{\gamma} \frac{L_r}{L_r + L_f \cos \gamma} \quad (13)$$

(3)曲率偏差 ε_c :铰接车定位参考点 p 与参考轨迹上对应点 P 的曲率差值

$$\dot{\varepsilon}_c = \frac{v(L_f + L_r \cos \gamma) \dot{\gamma} + L_r(L_r + L_f \cos \gamma) \ddot{\gamma} + (L_f L_r \sin \gamma) \dot{\gamma}^2}{v(L_r + L_f \cos \gamma)^2} \quad (14)$$

整理式(12)~(14),根据 $L = L_f + L_r$,可得

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_d \\ \dot{\varepsilon}_\theta \\ \dot{\varepsilon}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \dot{\gamma} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{L_r}{vL} \end{bmatrix} \ddot{\gamma} \quad (15)$$

铰接式车速较低,且铰接角变化较小,对铰接角速度的变化率通常可以忽略,对式(15)简化,得到铰接车误差动力学方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_d \\ \dot{\varepsilon}_\theta \\ \dot{\varepsilon}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L_r}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \dot{\gamma} \quad (16)$$

在恒速运动情况下,铰接车误差动力学模型为单输入的线性时不变模型,通过控制偏差量可实现对车辆铰接角的实时控制。

1.4 转向运动分析与数学建模

铰接车的 ADAMS 模型仅能反映车辆的运动学和动力学特性,为了使仿真过程符合铰接车的实际转向过程,对铰接车的转向机构进行运动分析和建模。铰接车的转向机构为电机驱动的液压转向系统,将转向系统分为 4 个环节,并分别针对各个环节

建立了比例电磁阀模型、阀芯受力平衡模型、阀控液压缸-负载模型及转向系统运动学模型,分别推导了电磁阀控制压力与占空比关系、液控力与阀芯位移关系、活塞输出位移与阀芯输入位移关系以及活塞输出位移与车辆铰接角关系,最终确定了电信号即占空比与输出铰接角的关系,并最终获得匀速转向的转向机构数学模型。铰接车转向系统数学仿真模型如图 4 所示,仿真结果如图 5 所示,铰接角速度为 0.14 rad/s,完全符合实车的转向特性。

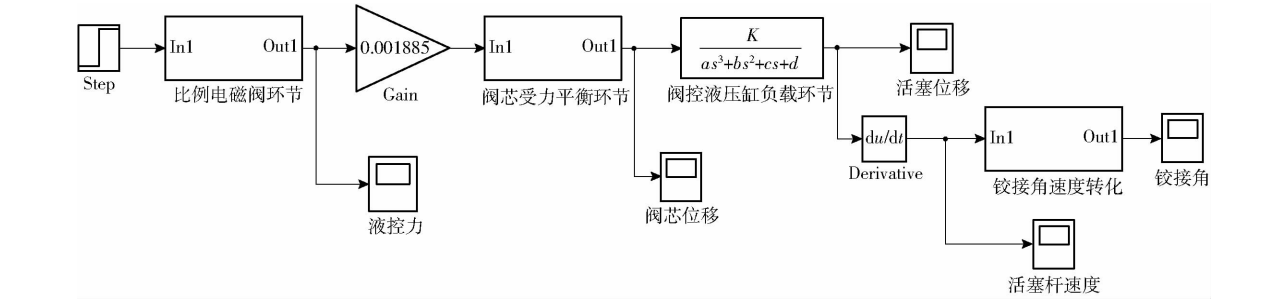


图 4 转向系统仿真模型
Fig. 4 Steering system simulation model

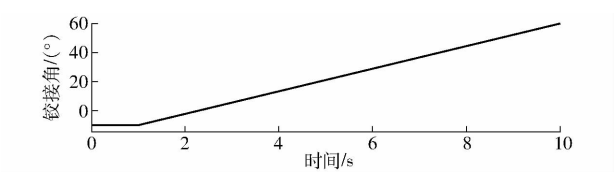


图 5 转向模型仿真结果
Fig. 5 Steering model response in simulation

2 路径跟踪控制器

针对以上分析,建立路径跟踪控制系统如图 6 所示。根据铰接式车辆的运动学模型分析进行速度和铰接角控制来实时控制车辆的行驶位姿状态。由式(16)可看出,在恒速情况下,铰接车的误差动力学模型为线性时不变模型,而铰接车在地下巷道行驶过程中车速较低且很少出现较大幅度的加减速情

况,因此本研究中车辆以 3 m/s 的速度匀速行驶,采用 PID 速度控制建立速度控制器,使车速维持恒稳,再以恒速条件下的线性时不变的误差动力学模型作为铰接角控制模型。对于铰接角的控制,根据车辆的当前行驶位姿信息进行下一采样点的位姿估计可以得到预见位姿信息,且通过当前行驶状态和预见行驶状态与理想路径的偏差可获得车辆的当前状态跟踪偏差和预见状态跟踪偏差,建立线性时不变的单输入偏差状态方程进行 LQR - GA 控制,实现理想铰接角输入。通过 PID 速度控制和 LQR - GA 铰接角控制实现铰接式车辆车的实时路径跟踪。

2.1 LQR 控制器

LQR 最优控制可利用较低成本使系统达到预期性能指标,且也可以同时对不稳定系统进行整定,

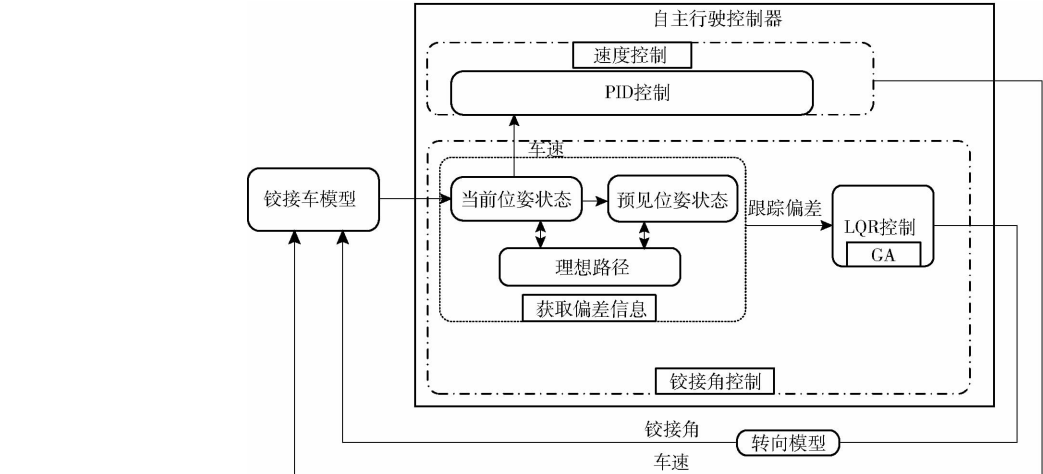


图 6 路径跟踪控制系统
Fig. 6 Path tracking control system

对线性时不变系统的状态反馈控制问题中,往往可取得良好控制效果,已被应用于许多工程和科学领域^[14-16],同时也被运用于众多复杂系统^[17-20]。建立线性系统模型为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) + Du(t) \end{cases} \quad (17)$$

式中 A ——系统状态矩阵, $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$
 B ——输入矩阵, $B \in \mathbf{R}^{n \times n}$
 C ——输出矩阵, $C \in \mathbf{R}^{p \times n}$
 D ——状态反馈矩阵, $D \in \mathbf{R}^{p \times m}$
 $u(t)$ 、 $X(t)$ 、 $Y(t)$ ——系统输入量、状态量以及输出量

根据式(17)以及表1中铰接式车辆模型参数可得铰接式车辆的矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.44 \\ 5.12 \\ 1 \\ 5.12 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$D = [0]$$

由此,可控可观性分析为

$$\begin{cases} \text{rank}[B \quad AB \quad A^2B] = 3 \\ \text{rank}[C \quad CA \quad CA^2] = 3 \end{cases} \quad (18)$$

矩阵均满秩证明该系统具有可控可观性,结合式(16)、(17),铰接式车辆的 LQR 控制器模型为线性时不变单输入系统模型为

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = A\varepsilon(t) + B\dot{\gamma} \\ Y(t) = \varepsilon(t) \end{cases} \quad (19)$$

通过控制系统输出偏差矩阵 $\varepsilon(t) = [\varepsilon_d(t) \quad \varepsilon_\theta(t) \quad \varepsilon_c(t)]$,可得到车辆的理想铰接角输入,建立最优性能指标

$$J(\dot{\gamma}) = J_1(t) + J_2(t) = \int_0^\infty [\varepsilon^T(t)Q\varepsilon(t) + \dot{\gamma}^T(t)R\dot{\gamma}(t)]dt \quad (20)$$

式中 Q ——系统状态量权重

R ——系统控制量权重

J_1 反映铰接车偏离平衡状态的程度, J_2 反映控制能量大小。控制目标是使最优性能指标取得最小值,即以最小的控制能量使路径跟踪偏差达到最小,建立反馈控制率 $u = -KX(t)$,满足 $K = R^{-1}B^TP$,建立 Riccati 方程

$$A^TP + PA + Q - PBR^{-1}B^TP = 0 \quad (21)$$

式中 P ——对称正定矩阵

通过求解最优 Q 、 R 矩阵可求得最优反馈控制率,实现理想铰接角输入。路径跟踪控制器的设计如图7所示。

其中,当前偏差量为当前时刻车辆位姿与理想

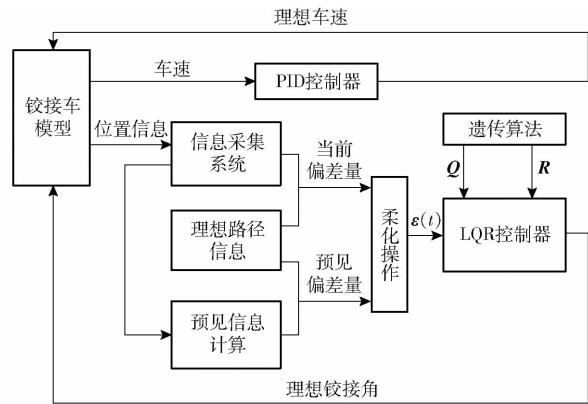


图7 铰接式车辆路径跟踪控制器

Fig.7 Articulated vehicle path tracking controller

路径中位姿的偏差,预见偏差量为下一时刻的预见位姿与理想路径位姿的偏差,为避免引入的预见信息量值过大,导致控制过度引起车辆抖动,在控制器中加入柔化操作环节,综合考虑当前偏差量信息和预见的偏差量信息,以提高控制器的稳定性和反应速度,即 LQR 控制器的最终输入为

$$\varepsilon(t) = a\varepsilon_1(t) + b\varepsilon_2(t) \quad (22)$$

其中 $\varepsilon_1(t) = [\varepsilon_{d_1}(t) \quad \varepsilon_{\theta_1}(t) \quad \varepsilon_{c_1}(t)]$

$$\varepsilon_2(t) = [\varepsilon_{d_2}(t) \quad \varepsilon_{\theta_2}(t) \quad \varepsilon_{c_2}(t)] \quad a + b = 1$$

式中 $\varepsilon_1(t)$ ——当前跟踪偏差矩阵

$\varepsilon_2(t)$ ——预见信息偏差矩阵

a 、 b ——柔化系数

$\varepsilon(t)$ ——LQR 控制器输入

2.2 GA 算法优化

遗传算法(GA)是一种用于解决最优化的一种搜索启发式算法,具有良好的全局搜索能力,并且利用其内在并行性,可以方便地进行分布式计算,加快求解速度。

在 LQR 控制中存在状态量权重矩阵 Q 和控制能量权重矩阵 R 的选取两个重要问题,不同的选取结果将直接影响控制效果,在传统优化方法中, Q 、 R 的计算通常会耗费较长时间且多依赖于专家经验^[21]。遗传算法作为一种全局优化算法,可对 Q 、 R 矩阵进行优化,克服传统 LQR 控制的缺点,LQR - GA 控制在倒立摆控制、复合电力系统和飞行器俯仰控制等^[22-24]问题中已取得较大进展。

利用遗传算法求解最优 Q 、 R 矩阵流程如图8所示,遗传算法主要用于对状态量权重矩阵分量进

行寻优,即对 $Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix}$ 的3个分量寻优。

评价函数选择为 LQR 控制的最优性能指标,当最优性能指标取得最小值时,即可达到最优控制效

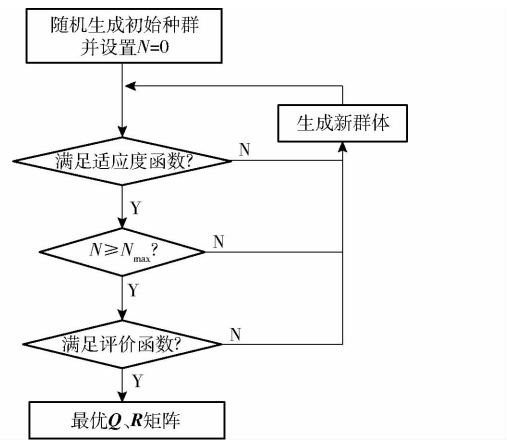


图8 遗传算法流程

Fig. 8 Block diagram of genetic algorithm scheme

果。且设置约束条件为

$$\begin{cases} \varepsilon_d(t) \leq \max \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta(t) \leq \max \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_c(t) \leq \max \varepsilon_c \end{cases} \quad (23)$$

(1) 编码方式

因为二进制编码通常会在目标函数中引入附加的多峰性,使得编码后的目标函数比原始问题更复杂,并且在函数优化和约束优化领域,实数编码比二进制和 Gray 编码更为有效,实数编码在基因型空间和表现型空间中是一致的,在本文中采用实数编码。

实数编码即用实数进行编码,实数来做染色体的基因,实数构成染色体,即用状态量权重矩阵的一个解空间构成一个染色体, $[q_1 \ q_2 \ q_3]$ 的每一个具体取值即作为一个染色体用于进化,其中每一个 q_1 、 q_2 、 q_3 都是一个基因。

(2) 群体取值范围

根据传统的 Q 矩阵的试算求解群体的取值范围,对于 $Q = \text{diag}(q_1 \ q_2 \ q_3)$,首先设 $q_1 = q_2 = q_3$,即将 3 个状态分量的权重取为相同的值,即取

$$Q = n \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

由于采用无限时间状态调节器的控制系统,其闭环系统是渐进稳定的, n 变化范围为 1 ~ 100,变化间隔为 10,系统的闭环极点位置。

表 2 显示了系统的闭环极点位置与状态反馈增益矩阵 K 随着 n 变化的趋势。由闭环极点位置变化可以判断, $n > 30$ 后继续增大对于主导极点的影响甚微,仅对于系统的辅助极点有一定影响,使其远离虚轴原点,对系统的性能影响不大,因此, n 应取较小值,即取 $n \leq 30$ 。状态反馈增益矩阵 K 的变化如表 2 所示,随着 n 增大而增大,对于状态变量的变化约束加强。

表 2 闭环极点位置及状态反馈矩阵 K 随 n 的变化

Tab. 2 Change of K with n in closed-loop pole position and state feedback matrix

n	极点值			n	反馈增益矩阵 K			
1	-1.008 5 + 1.054 9i	-1.008 5 - 1.054 9i	-0.825 3	1	1.000	3.036 0	4.108 7	
10	-2.057 7 + 1.471 0i	-2.057 7 - 1.471 0i	-0.868 8	10	3.162	6.143 4	4.386 2	
20	-2.600 9 + 1.499 8i	-2.600 9 - 1.499 8i	-0.872 1	20	4.472	7.742 1	4.465 5	
30	-2.999 0 + 1.425 4i	-2.999 0 - 1.425 4i	-0.873 2	30	5.477	8.914 3	4.515 4	
40	-3.326 6 + 1.287 1i	-3.326 6 - 1.287 1i	-0.873 8	40	6.324	9.879 2	4.553 6	
50	-3.610 8 + 1.086 8i	-3.610 8 - 1.086 8i	-0.874 1	50	7.071	10.716 6	4.585 3	
60	-3.865 0 + 0.796 1i	-3.865 0 - 0.796 1i	-0.874 4	60	7.746	11.465 6	4.612 8	
70	-4.096 9 + 0.179 4i	-4.096 9 - 0.179 4i	-0.874 5	70	8.366	12.149 0	4.637 3	
80	-5.093 9	-3.528 8	-0.874 7	80	8.944	12.781 0	4.659 7	
90	-5.648 4	-3.375 0	-0.874 8	90	9.486	13.371 7	4.680 3	
100	-6.115 1	-3.285 8	-0.874 8	100	10.000	13.928 0	4.699 5	

综合以上分析,取 $n \leq 30$,即群体中个体最大值为 30。

(3) 交叉方式

采用离散交叉的方式,即选定一个基因位,如选定 q_1 ,然后将选定的 2 个染色体在这个位置之后的基因进行交换。

(4) 变异

在任意一个基因位,如选定 q_1 ,随机产生 2 个整数相交换等来进行变异。

(5) 参数选取

设定种群数为 100,精英数为 10,交叉概率为

0.4,连续进化代数限制为 20,遗传算法迭代终止代数为 50,采用随机一致选择、顺序排序。

建立适应度函数为

$$L' = \frac{1}{J(\dot{\gamma})} \quad (25)$$

自适应函数值偏差预设为 0.01,为避免搜索陷入局部最小值点,设置自适应函数值 $L_1 = L' + 10$,遗传算法具体的迭代过程如图 9 所示。

从图 9 遗传算法迭代过程可看出,在迭代 8 代以后的适应度函数值等于平均适应度函数值,评价函数值已无明显变化,即至少迭代 8 代即可求出最

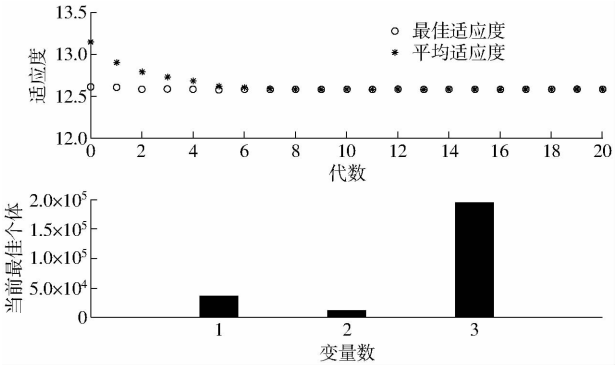


图9 遗传算法迭代过程

Fig. 9 Genetic algorithm iterative process

优解,即最优反馈控制率。

3 联合仿真分析

利用 ADAMS 与 Simulink 的联合仿真来初步验证提出的控制策略的有效性。在 Solidworks 中建立包括铰接车、左右转向液压缸、前后车体、左右转向推杆等的铰接车三维模型,为了弥补实体模型导入后丢失的原有属性,在导入 ADAMS 模型后,定义各个零部件的质量,并为其添加约束。在 ADAMS 模型中,考虑铰接式车辆运行的巷道环境,采用二维随机不平路面,并参考 E 级路面修改路面谱系数,建立约束和驱动,基于 ADAMS 的铰接式车辆模型如图 10 所示。

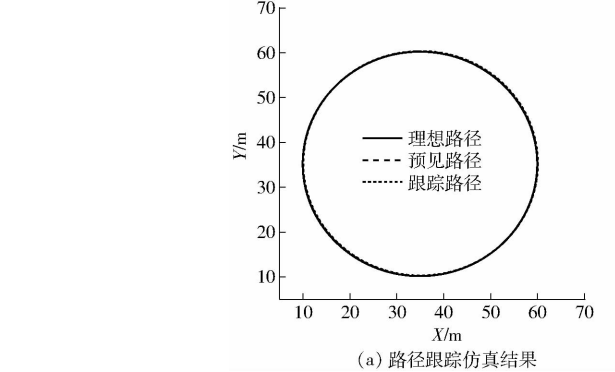


图10 基于 ADAMS 的 35 t 铰接式车辆模型

Fig. 10 35 t articulated vehicle model based on ADAMS

搭建 ADAMS 和 Simulink 的联合仿真模型,本研究中的联合仿真路线如图 11 所示。

根据图 6 所示的铰接式车辆路径跟踪控制策略进行联合仿真。在联合仿真中,对于铰接角的控制,



(a) 路径跟踪仿真结果

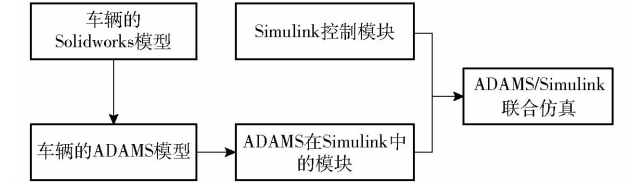


图 11 联合仿真流程

Fig. 11 Block diagram of unity simulation scheme

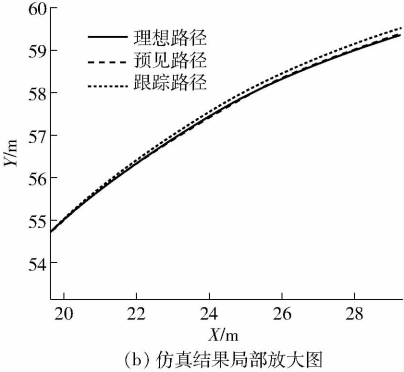
根据地下巷道铰接车的安全行驶要求,车辆一侧与巷道壁间距最小为 10 cm,且由于铰接车的结构限制,其前车体转角范围为 $[-45^{\circ}, 45^{\circ}]$,结合车身尺寸信息和规划理想路径信息,计算得 $\max \varepsilon_d = 10 \text{ cm}$, $\max \varepsilon_{\theta} = 12 \text{ rad}$, $\max \varepsilon_c = 0.0384 \text{ m}^{-1}$ 。

由 LQR-GA 算法获得的最优状态反馈增益最终选取为 $K = [1.4142 \quad 2.6315 \quad 4.0167]$,且柔化系数 $a = 0.9, b = 0.1$ 。

车辆跟踪的理想路径为圆心在全局坐标系原点,半径为 25 m 的圆形路径,车辆起点坐标为 (35, 10) m,车速选择 3 m/s,仿真时长设为 100 s,仿真结果如图 12~16 所示。图 12a 为铰接车跟踪理想路径效果图,在仿真时间 100 s 中,行驶路径与理想路径基本吻合且路径平滑,图 12b 为路径跟踪局部放大图,可看出,当预见路径的偏差为负,行驶路径偏差为正时,行驶的路径偏差有明显的减小趋势。反映了加入预见信息可补偿固有反应,加快反应速度。图 13 中车辆速度能在较短时间内达到并维持在 3 m/s,表明速度控制有效;图 14~16 为路径跟踪偏差情况。

图 14 所示为铰接车路径跟踪控制中加入预见信息和未加入预见信息的跟踪位置偏差效果图,通过对比可看出基于预见信息的路径跟踪可以有效减小位置偏差的超调,提高反应速度,横向位置偏差最大偏差量不到 0.2 m,最终偏差控制在 0.03 m,相对于轮距 2.3 m,误差仅为 1.3%,对于最终稳态误差虽然仍处于工作允许范围内,但仍有提高空间。

图 15 所示为铰接车路径跟踪控制中加入预见



(b) 仿真结果局部放大图

图 12 铰接车路径跟踪仿真结果

Fig. 12 Articulated vehicle path tracking based circular path

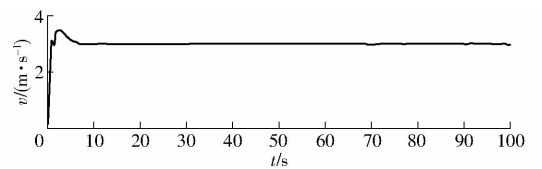


图 13 车速控制结果
Fig. 13 Speed control results

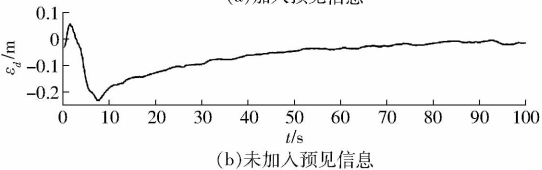
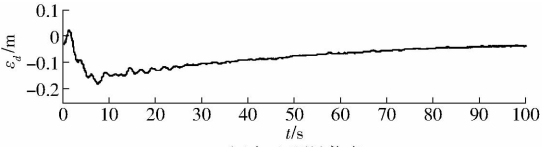


图 14 铰接车路径跟踪位置偏差
Fig. 14 Position error of articulated vehicle

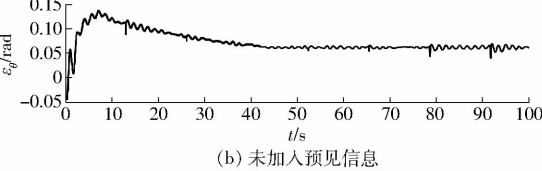
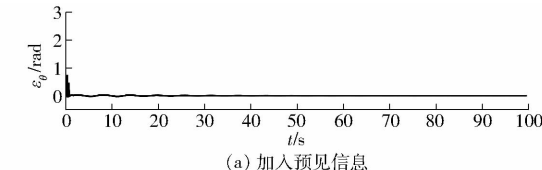


图 15 行驶方向偏差
Fig. 15 Deviation of driving direction

信息和未加入预见信息的跟踪行驶方向偏差效果图,行驶方向偏差最终稳定在 1.5×10^{-4} rad,相比于铰接车转向角极值 45° ,误差为 0.19%,通过对比可看出基于预见信息的路径跟踪对于行驶方向偏差的校正十分明显,加快了调节速度也减小了稳态误差,提高了车辆行驶的稳定性的。

图 16 所示为铰接车路径跟踪控制中加入预见信息和未加入预见信息的跟踪曲率偏差效果图,通过对比可看出基于预见信息的路径跟踪减小了曲率

偏差的最大超调,且同样快速将曲率偏差调节至 0,波动范围小于 0.003 m^{-1} 。仿真结果证明了提出的控制策略的有效性,试验中将进一步验证。

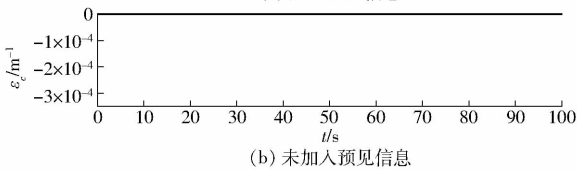
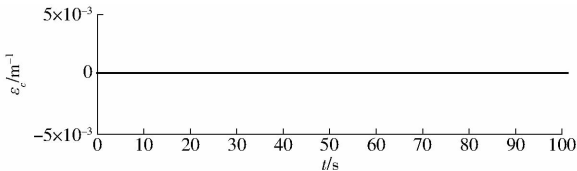


图 16 曲率偏差
Fig. 16 Curvature deviation

4 试验

为进一步验证本文中铰接车路径跟踪控制策略的有效性,采用 USTB CYV-Ⅱ 作为试验平台进行试验分析,车体结构和尺寸明细如图 17 所示。USTB CYV-Ⅱ 试验平台的车体结构与尺寸效仿铰接式车辆结构设计,运动学和动力学特性与铰接式车辆相符,可作为铰接式车辆路径跟踪控制策略的试验平台进行试验分析,试验场地选为楼道的部分区域,平面图如图 18 所示,跟踪路径选为有 2 个转弯的路径以充分验证控制系统性能。

USTB CYV-Ⅱ 的行驶过程如图 19 所示,由于地面过于光滑且转弯半径较小,为保证车辆良好跟踪理想路径,车速选为 1 m/s 匀速行驶。

跟踪结果及跟踪误差如图 20 所示,行驶路径与理想路径能够较好的贴合,且行驶路径较为平滑,车辆能够很好地沿着理想路径行驶,由局部放大图可知,预见位姿往往会呈现与理想路径间有更大的误差,从而使车辆能够得到一个更大的纠偏信号加快纠偏时间,使铰接车沿着理想路径行驶。图 21 为行驶速度和铰接角变化曲线,速度数据为控制器的输出数据,停车时由于车辆惯性导致了车辆滑行;铰接

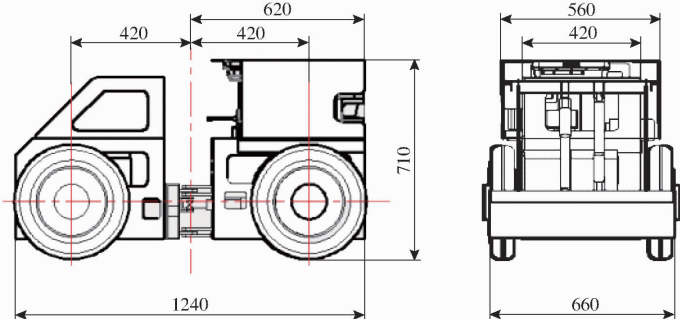
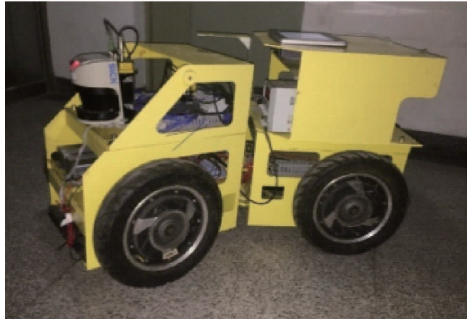


图 17 USTB CYV-Ⅱ 试验平台尺寸明细(单位:mm)
Fig. 17 Test platform dimension details of USTB CYV-Ⅱ

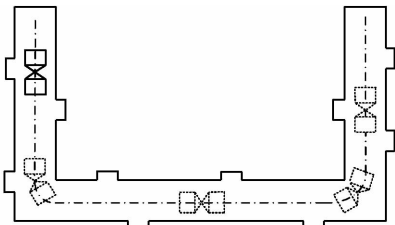


图 18 试验区平面示意图
Fig. 18 Test area plane



图 19 USTB CYV - II 的行驶过程

Fig. 19 Driving process of USTB CYV - II

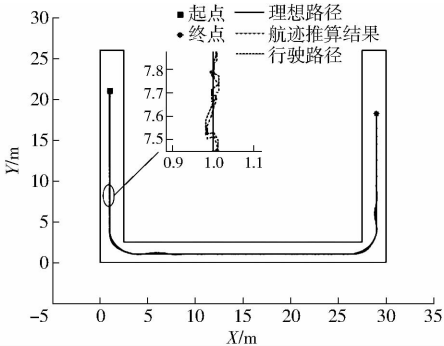


图 20 USTB CYV - II 跟踪路径

Fig. 20 Path tracking of USTB CYV - II

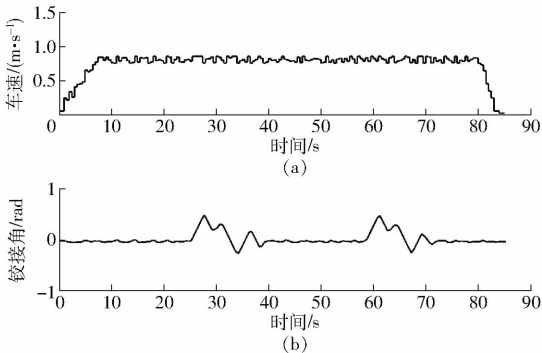


图 21 跟踪速度与铰接角变化

Fig. 21 Change of tracking speed and articulation angle

角变化平稳,两个弯道路段铰接角变化趋势相同,车辆具有较好的转弯特性。图 22a 为加入预见信息的位置偏差、行驶方向偏差和曲率偏差的变化情况,3 个偏差均在直线行驶和曲线行驶时出现抖振,是由于车辆响应速度较慢以及楼道地面较为光滑,车

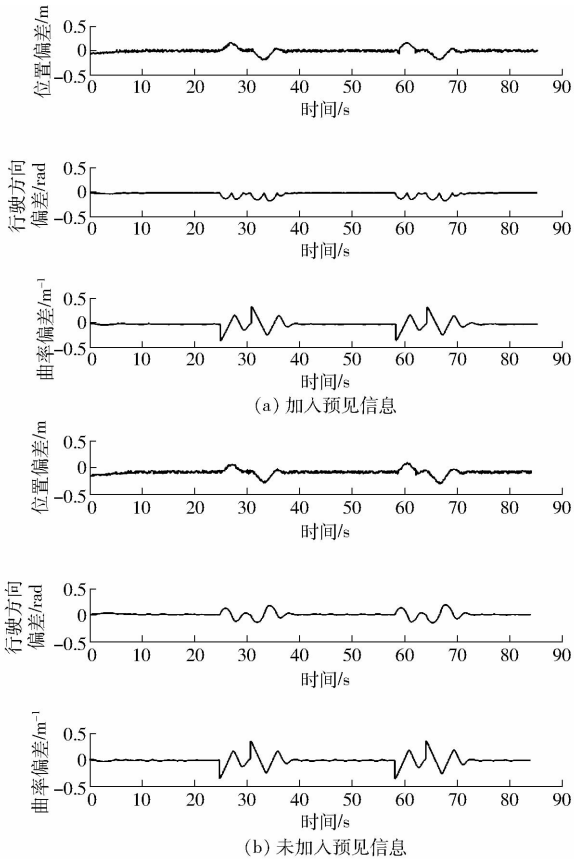


图 22 跟踪偏差

Fig. 22 Tracking error

辆出现侧滑导致,但仍符合铰接车的实际运行要求,在其他路段偏差均较小,其中,位置偏差基本维持在零值上下,波动约 $\pm 0.03\text{ m}$,与仿真结果一致,行驶方向偏差基本收敛于零值上下,波动约为 $\pm 0.004\text{ rad}$,曲率偏差基本在零值上下,最大值不超过 0.003 m^{-1} 。试验中起始偏差量均较小是因为车辆在理想路径起点开始行驶,而仿真中车辆起点不在理想路径上。图 22b 为未加入预见信息的跟踪偏差结果,由图 22a 和图 22b 的对比可看出,加入预见信息减小了位置偏差和行驶方向偏差的超调,对于行驶方向偏差的改善效果十分明显,对于曲率偏差的调节作用较小,与仿真结果吻合,加入预见信息对于路径跟踪控制有一定的调节作用。试验结果表明了本研究中的铰接式车辆的路径跟踪控制策略的有效性,可用于铰接车的路径跟踪。

5 结束语

提出了一种基于预见信息的铰接式车辆 LQR - GA 路径跟踪控制方法,通过引入预见信息提高控制系统的反应速度,加入柔化以防止控制量过大。同时,提出了一种基于跟踪偏差的 LQR - GA 路径跟踪控制方法,GA 算法对 LQR 中的状态量权重矩阵进行优化且达到了最优的控制效果。所提出的

控制策略在仿真和试验中均取得了较好的控制效果,路径的跟踪位置偏差的误差为1.3%,行驶方位偏差误差为0.19%,曲率偏差基本维持在零值,极大地改善了铰接车路径跟踪精度,试验结果符合车辆巷道行驶要求,可用于铰接式车辆路径跟踪控制。

参 考 文 献

- 1 赵翊,杨珏,张文明,等. 农用轮式铰接车辆滑模轨迹跟踪控制算法[J/OL]. 农业工程学报, 2015, 31(10):198-203. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151026&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.10.026.
- 2 ZHAO Xuan, YANG Jue, ZHANG Wenming, et al. Sliding mode control algorithm for path tracking of articulated dump truck[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):198-203. (in Chinese)
- 3 HEMAMI A, POLOTSKI V. Path tracking control problem formulation of an LHD loader[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17(2): 193-199.
- 4 PETROV P, BIGRAS P. A practical approach to feedback path control for an articulated mining vehicle[C]//2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001, 4: 2258-2263.
- 5 BIGRAS P, PETROV P, WONG T. A LMI approach to feedback path control for an articulated mining vehicle[C]//7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (Electrimacs), 2002:1-6.
- 6 RIDLEY P, CORKE P. Load haul dump vehicle kinematics and control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2003, 125(1): 54-59.
- 7 NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTFSSON T. Switching model predictive control for an articulated vehicle under varying slip angle[C]//2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), 2012: 890-895.
- 8 邵俊恺,赵翊,杨珏,等. 无人驾驶铰接式车辆强化学习路径跟踪控制算法[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(3):376-382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170348&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.048.
- 9 SHAO Junkai,ZHAO Xuan,YANG Jue,et al. Reinforcement learning algorithm for path following control of articulated vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):376-382. (in Chinese)
- 10 OGATA K, YANG Y. Modern control engineering[M]. 4th ed. Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 2002: 826-910.
- 11 SHIROMA N, ISHIKAWA S. Nonlinear straight path tracking control for an articulated steering type vehicle[C]//ICCAS-SICE, 2009: 2206-2211.
- 12 POLOTSKI V, HEMAMI A. Control of articulated vehicle for mining applications: modeling and laboratory experiments[C]// Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications, 1997: 318-323.
- 13 DRAGT B J, CRAIG I K, CAMISANI-CALZOLARI F R. Navigation of autonomous underground mine vehicles[C]//1st African. Control Conference, 2003: 3-5.
- 14 王亮,卢永锦. 引用预见信息的人机耦合优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(4):361-364.
- 15 WANG Liang, LU Yongjin. Optimal method of human-machine coupling with preview information[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(4):361-364. (in Chinese)
- 16 石峰,战凯,顾洪枢,等. 地下铲运机跟踪轨迹推算模型研究[J]. 有色金属:矿山部分, 2010, 62(6):66-69.
- 17 SHI Feng, ZHAN Kai, GU Hongshu, et al. A study on underground loader tracking track calculation model[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2010, 62(6):66-69. (in Chinese)
- 18 DA FONSECA NETO J V, ABREU I S, DA SILVA F N. Neural - Genetic synthesis for state-space controllers based on linear quadratic regulator design for eigenstructure assignment[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2010, 40(2): 266-285.
- 19 GARGOURI L, ZAAFOURI A, KOCHBATI A, et al. LQG/LTR control of a direct current motor[C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2002.
- 20 KO H S, LEE K Y, KIM H C. An intelligent based LQR controller design to power system stabilization[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(1): 1-9.
- 21 WANG L, NI H, ZHOU W, et al. MBPOA-based LQR controller and its application to the double-parallel inverted pendulum system[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 36: 262-268.
- 22 NIKNEZHADI A, ALLUÉFANTOVA M, KUNUSCH C, et al. Design and implementation of LQR/LQG strategies for oxygen stoichiometry control in PEM fuel cells based systems[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(9): 4277-4282.
- 23 HASANZADEH A, EDRINGTON C S, LIU Y, et al. An LQR based optimal tuning method for IMP-based VSI controller for electric vehicle traction drives[C]// Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE, 2011: 1-7.
- 24 USTA M A, AKYAZI Ö, AKPINAR A S. Aircraft roll control system using LQR and fuzzy logic controller[C]// 2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), IEEE, 2011: 223-227.
- 25 TSAI S J, HUO C L, YANG Y K, et al. Variable feedback gain control design based on particle swarm optimizer for automatic fighter tracking problems[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(1): 58-75.
- 26 OHRI J. GA tuned LQR and PID controller for aircraft pitch control[C]// 2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE), 2014: 1-6.
- 27 GHAZI R, KHAJEH A. GA-based optimal LQR controller to improve LVRT capability of DFIG wind turbines[J]. Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2013, 9(3): 167-176.
- 28 WONGSATHAN C, SIRIMA C. Application of GA to design LQR controller for an inverted pendulum system[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2008. IEEE, 2009: 951-954.