

文章编号: 2096-1618(2022)01-0021-07

# 智能车路径跟踪控制器的设计

王月红, 蒋 涛, 李 平, 周 楠  
(成都信息工程大学控制工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为解决 LQR 控制算法在智能车路径跟踪应用中参数难以选择且存在稳态误差的问题,提出一种基于遗传算法、前馈控制和线性二次型最优控制(genetic algorithm-feedforward control-linear quadratic regulator)的 GA-FFC-LQR 路径跟踪控制器。首先,根据车辆的受力情况建立车辆动力学模型,通过将车辆投影到自然坐标系下,建立以相对于期望路径的横向偏差和航向偏差为状态变量的误差动力学模型。基于此误差动力学模型,利用 LQR 控制理论设计智能车路径跟踪控制器,并结合期望路径的曲率信息设计路径跟踪的前馈控制器。然后,利用遗传算法优化控制器的  $Q$  矩阵,从而减小 LQR 控制器设计的复杂性和提高路径跟踪控制器的精度。最后通过 Carsim/Simulink 联合仿真平台测试设计的 GA-FFC-LQR 路径跟踪控制器。仿真测试结果表明,所设计的路径跟踪控制器能够保证智能车在不同道路下的路径跟踪性能,具有较好的跟踪精度。

**关键词:**智能车;路径跟踪;LQR;前馈控制;遗传算法

**中图分类号:**TP273

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcui.2022.01.004

## 0 引言

随着科学技术的不断发展,自动驾驶技术不断成熟,智能车在生活中得到广泛应用。路径跟踪控制是智能车实现自动驾驶的关键技术之一,其目的是控制智能车的油门、方向盘和刹车等执行机构,使智能车能够按照既定路线行驶<sup>[1-4]</sup>。

目前主流的路径跟踪控制算法主要有不依靠模型的 PID 控制算法<sup>[5-6]</sup>、基于运动学模型的纯跟踪算法<sup>[7-8]</sup>和基于动力学模型<sup>[9]</sup>的 MPC 控制算法<sup>[10-12]</sup>和 LQR 控制算法。在这些控制算法中,PID 控制算法由于没有考虑车辆的模型所以在实际的应用中效果并不理想;纯跟踪算法虽然是基于车辆的运动学模型进行设计的,但是未考虑车辆的受力情况,所以在道路曲率较大时效果不理想;MPC 控制算法虽然是基于车辆的动力学模型进行设计的,但是其需要设置的参数较多,在实际应用中难以调试;LQR 控制器是线性负反馈控制器,容易设计。文献[13]设计了智能驾驶车辆 LQR 路径跟踪控制器,以二轮自行车模型为基础,建立路径跟踪问题状态空间方程,设计了相应目标函数,并对其进行 LQR 问题的最优求解,获得最佳状态反馈控制率,实现基于 LQR 控制器的路径跟踪控制。文献[14]基于 LQR 设计了路径跟随控制器,实现侧向的路径跟随控制,并进行实车实验,验证了算法的可行性。

文献[15-17]也对 LQR 控制在路径跟踪控制上的应用进行了一定的研究。综上所述,文中采用 LQR 控制理论为基础,设计智能车路径跟踪器。

在上述的研究中,LQR 控制器都采用随机设置的  $Q$ 、 $R$  矩阵,这样随机选取的加权矩阵限制了路径跟踪控制器的适用性和精度。LQR 控制器的控制效果完全取决于其加权矩阵的选择,然而加权矩阵不能通过数学解析方式得出,只能靠设计者的经验来选择。这样就加大了 LQR 路径跟踪控制器的设计复杂性。并且,有时随机选择的加权矩阵不但不能实现最优控制,还会增加控制的代价。因此利用遗传算法(genetic algorithm,GA)进行全局搜索,以智能车路径跟踪的横向误差和航向误差作为目标函数选择最佳的加权矩阵,减小 LQR 路径跟踪控制器设计的复杂性和提高控制器的精度。此外,传统的 LQR 路径跟踪控制方法未考虑道路的曲率信息,存在稳态误差问题,文中通过在 LQR 路径跟踪控制器的基础上加上一个前馈控制消除系统的稳态误差。

## 1 路径跟踪误差动力学模型

### 1.1 车辆动力学模型

车辆动力学模型反映车辆各个部位的受力情况,对智能车路径跟踪控制具有十分重要的意义。如图 1 所示,为方便对车辆进行控制,根据受力情况建立车辆

的模型。为简化控制只考虑车辆横向和纵向受力情况,并假设前轴和后轴的两个车轮的转角与侧偏刚度相等,汽车后轮不进行转向,并且忽略空气阻力对车辆的影响,将汽车简化为二自由度单车模型。

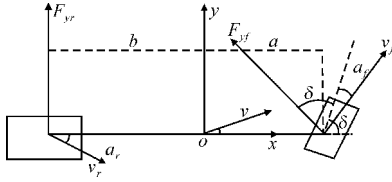


图1 汽车动力学模型

图1中,汽车沿Y轴受力情况和绕Z轴的转动惯量为

$$ma_y = F_{yf} \cos(\delta) + F_{yr} \quad (1)$$

$$I\dot{\varphi} = F_{yf} \cos(\delta) - F_{yr} b \quad (2)$$

假设 $\delta$ 较小,  $\cos(\delta) \approx 1$ , 那么式(1)、(2)可改写为

$$ma_y = C_{\alpha f} \alpha_f + C_{\alpha r} \alpha_r \quad (3)$$

$$I\dot{\varphi} = aC_{\alpha f} \alpha_f + bC_{\alpha r} \alpha_r \quad (4)$$

Y轴的加速度、前后轮的侧滑角可表示为

$$a_y = \ddot{y} + v_x \dot{\varphi} \quad (5)$$

$$\alpha_f = \frac{v_y + \varphi b}{v_x} - \delta \quad (6)$$

$$\alpha_r = \frac{v_y - \varphi b}{v_x} \quad (7)$$

将式(5)~(7)带入式(3)、(4)得到:

$$m(v_y + v_x \dot{\varphi}) = C_{\alpha f} \left( \frac{v_y + \varphi b}{v_x} - \delta \right) + C_{\alpha r} \left( \frac{v_y - \varphi b}{v_x} \right)$$

$$I\dot{\varphi} = aC_{\alpha f} \left( \frac{v_y + \varphi b}{v_x} - \delta \right) + bC_{\alpha r} \left( \frac{v_y - \varphi b}{v_x} \right)$$

最终动力学模型为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (8)$$

其中:

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\varphi} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{mv_x} & \frac{aC_{\alpha f} + bC_{\alpha r}}{mv_x} - v_x \\ \frac{aC_{\alpha f} + bC_{\alpha r}}{Iv_x} & \frac{a^2C_{\alpha f} + b^2C_{\alpha r}}{Iv_x} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -\frac{C_{\alpha f}}{m} \\ -\frac{aC_{\alpha f}}{I} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{u} = (\delta)$$

公式中的符号含义如表1所示。

表1 公式符号的含义

序号	参数名称	符号
1	前轮侧偏刚度	$C_{\alpha f}, C_{\alpha r}$
2	整车质量	$m$
3	前后悬长度	$a, b$
4	Z轴转动惯量	$I$
5	Y轴加速度	$a_y$
6	前后轮侧滑角	$\alpha_f, \alpha_r$
7	前轮转角	$\delta$
8	车轴、X轴夹角	$\varphi$
9	速度、X轴夹角	$\beta$

## 1.2 车辆路径跟踪动力学模型

建立了动力学模型还不能直观地看出方向盘转角和车辆横向位移的关系,因此再进一步将车辆投影到自然坐标系下,建立以相对于期望路径的横向误差和航向误差为状态变量的误差动力学模型。

如图2所示,将车体坐标系投射到自然坐标系下,这样可以将车辆的控制解耦成横向控制和纵向控制,降低控制的复杂度。

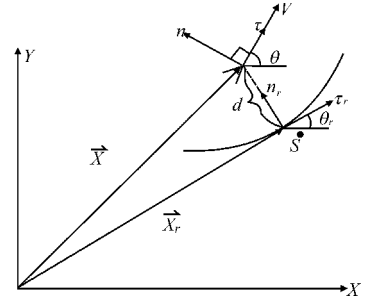


图2 车辆坐标转换

设横向误差为 $d$ ,航向误差为 $\theta - \theta_r$ ,投影点速度大小为 $S$ ,根据向量的关系可得

$$d = (\vec{X} - \vec{X}_r) \cdot \vec{n}_r \quad (9)$$

对式(9)两边同时求导可得

$$\dot{d} = (\vec{X} - \vec{X}_r) \cdot \vec{n}_r + (\vec{X} - \vec{X}_r) \cdot \dot{\vec{n}}_r \quad (10)$$

式中 $\vec{X}$ 为车辆的真实位矢, $\vec{X}_r$ 为投影位矢。

$$\vec{X} = |\vec{v}| \vec{\tau} \quad (11)$$

$$\vec{X}_r = \dot{S} \vec{\tau}_r \quad (12)$$

将式(11)、(12)带入式(10)中并且 $\theta = \beta + \varphi$ 得

$$\dot{d} = v_y \cos(\varphi - \theta_r) + v_x \sin(\varphi - \theta_r) \quad (13)$$

同时 $\varphi - \theta_r$ 为小量,那么式(13)改写为

$$\dot{d} = v_y + v_x \sin(\varphi - \theta_r) \quad (14)$$

令横向误差  $e_d = d$ , 航向误差  $e_\varphi = \varphi - \theta_r$  那么

$$\dot{v}_y = \dot{e}_d - v_x \dot{e}_\varphi \quad (15)$$

$$v_y = \dot{e}_d - v_x \dot{e}_\varphi \quad (16)$$

$$\dot{v}_y = \dot{e}_d - v_x \dot{e}_\varphi \quad (17)$$

$$\dot{e}_\varphi = \varphi - \dot{\theta}_r \quad (18)$$

$$\ddot{e}_\varphi = \ddot{\varphi} - \ddot{\theta}_r \approx \ddot{\varphi} \quad (19)$$

将式(17)、(19)和式(8)动力学模型联立得到误差动力学模型为

$$\dot{\mathbf{e}}_{rr} = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}_{rr} + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \mathbf{C}\dot{\theta}_r \quad (20)$$

其中:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{mv_x} & \frac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{m} & \frac{aC_{\alpha f} - bC_{\alpha r}}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{aC_{\alpha f} - bC_{\alpha r}}{Iv_x} & \frac{aC_{\alpha f} - bC_{\alpha r}}{I} & \frac{a^2C_{\alpha f} - b^2C_{\alpha r}}{Iv_x} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{e}_{rr} = \begin{pmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ -\frac{aC_{\alpha f}}{I} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{aC_{\alpha f} - bC_{\alpha r}}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ \frac{a^2C_{\alpha f} + b^2C_{\alpha r}}{Iv_x} \end{pmatrix}$$

## 2 LQR 控制器设计及其参数优化

### 2.1 LQR 控制器的设计

LQR 的控制对象是一个以线性状态空间表达的

线性系统,而能量函数为控制对象的状态向量和控制量的二次型函数。LQR 的作用在于当系统状态偏离或者还未达到目标状态时,能消耗不多的能量使系统状态向量的各个分量去接近目标状态。利用 LQR 控制理论设计路径跟踪控制器,需要先设计一个包含控制对象的状态向量和控制量的二次型函数。一般选取如下能量函数:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{x}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k) \quad (21)$$

其中,  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  是 LQR 控制器的加权矩阵,  $\mathbf{Q} = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4]$ ,  $\mathbf{R} = [r]$ ,  $\mathbf{x}_k$  为状态量,  $\mathbf{u}_k$  为系统输入量。  $\mathbf{Q}$  中的元素分别代表对系统状态中横向偏差、横向偏差变化率、航向偏差和航向偏差变化率的重视程度,其值越大,其对应的目标便越快速的靠近目标状态;  $\mathbf{R}$  中的元素代表对控制量输出的限制,其值越大,代表对控制量输出的限制越大。

由于处理器不能处理连续信号,所以要将误差动力学模型进行离散化处理:

$$\int_t^{t+dt} \dot{\mathbf{e}}_{rr} dt = \int_t^{t+dt} (\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}_{rr} + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}) dt \quad (22)$$

$$\mathbf{e}_{rr}(t+dt) - \mathbf{e}_{rr}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}_{rr}(\xi) dt + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}(\xi) dt \quad (23)$$

对式(24)的  $\mathbf{e}_{rr}(\xi)$  和  $\mathbf{u}(\xi)$  分别使用中点欧拉法和前向欧拉法进行处理,得到最终的离散化模型为

$$\mathbf{e}_{rr}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{e}_{rr}(k) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u}(k) \quad (24)$$

其中,

$$\bar{\mathbf{A}} = \left( \mathbf{I} - \frac{\tilde{\mathbf{A}} dt}{2} \right)^{-1} \left( \mathbf{I} + \frac{\tilde{\mathbf{A}} dt}{2} \right)$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{B}} dt$$

其中,  $\mathbf{e}_{rr}(k+1)$  为  $k+1$  时刻的状态量,  $\mathbf{e}_{rr}(k)$  为  $k$  时刻的状态量。

LQR 求解问题就变为使用拉格朗日数乘法求解在式(21)中的  $J$  在约束式(24)下取得极小值的  $\mathbf{u}(k)$ 。而  $\mathbf{u}(k)$  不能直接求解,需要迭代求解一个 Riccati 方程得到  $P$ :

$$\bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} + \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{Q} - \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} = 0 \quad (25)$$

求解出  $P$  后即可得到反馈增益矩阵  $\mathbf{K}$

$$\mathbf{K} = -(\mathbf{R} + \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}})^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{A}} \quad (26)$$

最终 LQR 控制器的控制量为

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K} \mathbf{e}_{rr}(k) \quad (27)$$

### 2.2 前馈控制器的设计

在设计 LQR 控制器时,求解系统的最优解时并未考虑道路的曲率信息,也就是误差动力学模型式(20)

中的  $C\dot{\theta}_r$ ,那么 LQR 控制器求解出的控制量作用智能车时无论如何都不能使智能车的系统状态达到目标状态。因此在 LQR 控制器的基础上根据误差动力学模型中的道路曲率信息设计一个前馈控制 $\delta_f$ 消除系统的稳态误差。加入前馈控制后系统的输入量为

$$\boldsymbol{u}(k)=-\boldsymbol{K}\boldsymbol{e}_{rr}(k)+\delta_f$$

(28)

将此输入量带入误差动力学模型式(20)中,系统稳定后得

$$\boldsymbol{e}_{rr}=-\left(\widetilde{\boldsymbol{A}}-\widetilde{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}\right)^{-1}\left(\widetilde{\boldsymbol{B}}\delta_f+\boldsymbol{C}\dot{\theta}_r\right)$$

(29)

将式(29)右边展开得

$$\boldsymbol{e}_{rr}=\begin{pmatrix} \frac{1}{k_1}\left(\delta_f-\frac{\dot{\theta}_r}{v_x}\left(a+b-bk_3-\frac{mv_x^2}{a+b}\left(\frac{b}{C_{\alpha f}}+\frac{a}{C_{\alpha r}}k_3-\frac{a}{C_{\alpha r}}\right)\right)\right) \\ 0 \\ -\frac{\dot{\theta}_r}{v_x}\left(b+\frac{a}{a+b}\frac{mv_x^2}{C_{\alpha r}}\right) \\ 0 \end{pmatrix}$$

从式中可以看出  $\boldsymbol{e}_{rr}$  中  $\boldsymbol{e}_d$  的稳态误差可以通过前馈控制量  $\delta_f$  消除,而  $\boldsymbol{e}_{\varphi}$  的稳态误差无法消除。因此,前馈控制器的控制量为

$$\delta_f=\frac{\dot{\theta}_r}{v_x}\left(a+b-bk_3-\frac{mv_x^2}{a+b}\left(\frac{b}{C_{\alpha f}}+\frac{a}{C_{\alpha r}}k_3-\frac{a}{C_{\alpha r}}\right)\right)$$

2.3 基于遗传算法的 LQR 控制器参数优化

由式(21)可知,LQR 控制器的效果与其加权矩阵息息相关,这两个加权矩阵的选取直接影响智能车在无人驾驶过程中的路径跟踪效果。但是加权矩阵中的元素并不是越大越好,而要考虑之间的平衡。由于系统状态中横向偏差、横向偏差变化率、航向偏差和航向偏差变化率是影响智能车路径跟踪的主要因素,而 LQR 路径跟踪控制器中的控制量只有一个前轮转角,所以将加权矩阵  $\boldsymbol{R}$  中的元素设置为固定值,考虑用遗传算法优化选择出合适的加权矩阵  $\boldsymbol{Q}$  中的元素。

遗传算法是一种模仿自然界物种进化的算法。它将问题参数编码为染色体,再利用迭代的方式进行选择、交叉以及变异等运算交换种群中染色体的信息,最终生成符合优化目标的染色体。

根据系统的横向偏差  $e_d$ 、航向偏差  $e_{\varphi}$ 、横向偏差变化率  $\dot{e}_d$  和航向偏差变化率  $\dot{e}_{\varphi}$  设计遗传算法优化的适应度函数,但是  $e_d$ 、 $e_{\varphi}$ 、 $\dot{e}_d$  和  $\dot{e}_{\varphi}$  的单位不一样,因此除以车辆路径跟踪的性能指标值统一单位,得到遗传算法优化的适应度函数,该适应度函数如下:

$$J=\left(\frac{\sum_{n=0}^{n=l}e_{\varphi}(n)^2}{e_{\varphi s}}\right)+\left(\frac{\sum_{n=0}^{n=l}e_d(n)^2}{e_{ds}}\right)+\left(\frac{\sum_{n=0}^{n=l}\dot{e}_{\varphi}(n)^2}{\dot{e}_{\varphi s}}\right)+\left(\frac{\sum_{n=0}^{n=l}\dot{e}_d(n)^2}{\dot{e}_{ds}}\right)$$

其中, $e_{\varphi s}$ 为智能车航向偏差性能指标, $e_{ds}$ 为车辆横向偏差性能指标, $\dot{e}_{\varphi s}$ 为车辆航向偏差变化率性能指标, $\dot{e}_{ds}$ 为车辆横向偏差变化率性能指标。

优化算法流程图如图 3 所示。

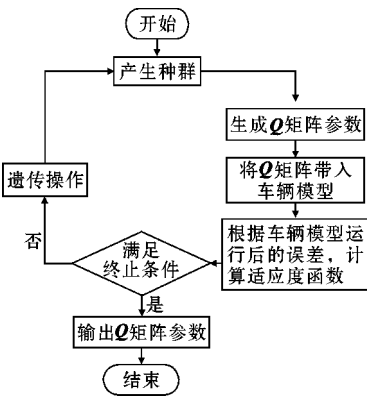


图 3 LQR 控制器参数优化流程图

首先,随机生成一个种群,种群中的个体即为加权矩阵  $\boldsymbol{Q}$ ;其次,将加权矩阵  $\boldsymbol{Q}$  带入车辆模型中计算偏差;再次,利用偏差计算适应度函数;然后判断是否符合终止计算的条件,若符合条件,退出算法的计算,若不符合,进行遗传操作重复前面的步骤;最后输出符合终止条件的加权矩阵  $\boldsymbol{Q}$ 。

利用 matlab/simulink 仿真,求解出最优的  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  和  $q_4$  参数,遗传算法参数设置如表 2 所示。

表 2 遗传算法参数设置

序号	主要参数	量值
1	种群大小	100
2	个体数量	10
3	个体数值范围	5 ~ 50
4	最大迭代次数	100
5	交叉概率	0.6
6	变异概率	0.001

通过遗传算法优化后,得到的  $\boldsymbol{Q}$  矩阵参数为

$$\boldsymbol{Q}=\text{diag}[28.94,19.75,31.98,24.20]$$

3 仿真实验结果及分析

为验证所设计的 GA-FFC-LQR 路径跟踪控制器,在 carsim/simulink 中进行仿真。在 carsim 中采用的车



辆模型参数如表 3 所示。仿真测试中的道路选择常用的双移线道路和余弦曲线道路,车速设置为固定值 10 m/s,由 carsim 中的控制器进行控制,车辆转角控制由 simulink 中的 LQR 控制器解算出来传递至 carsim 中进行控制。

表 3 智能车参数表

序号	主要参数	量值
1	前轮侧偏刚度	-110000 N/rad
2	后轮侧偏刚度	-110000 N/rad
3	整车质量	1412 kg
4	前悬长度	1.015 m
5	后悬长度	1.895 m
6	绕 z 轴转动惯量	1536.7 kg · m <sup>2</sup>

3.1 双移线路径跟踪实验

为方便分析本文设计的路径跟踪控制器的性能,同时一起测试了带有前馈控制的 LQR 控制器(FFC-LQR)和 LQR 控制器的性能。

图 4 和图 5 表示了 3 种控制器在双移线道路仿真中的航向偏差和横向偏差。从仿真的结果中可以看出本文设计的 GA-FFC-LQR 路径跟踪控制器的横向误差控制在 0.1m 以内,航向偏差控制在 0.05rad 以内;FFC-LQR 控制在各方面的性能均不如本文设计的路径跟踪控制器;只有单独的 LQR 控制器在 3 个控制器中性能最差。

在图 6 的跟踪效果图中,可以明确地看到 3 种控制器的路径跟踪性能。从图中可以看出本文设计的路径跟踪控制器较为精准的贴合规定路线行驶,FFC-LQR 控制器也基本能贴合规定路线行驶,但不如本文设计的路径跟踪控制器效果好,单独的 LQR 控制器在直线时效果与前两种比没有太大的差别,但是在转弯时跟踪精度很差。

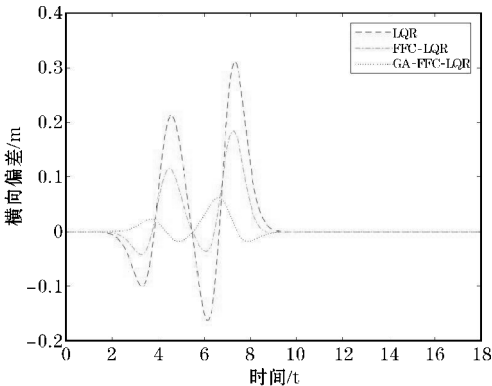


图 5 横向偏差(双移线)

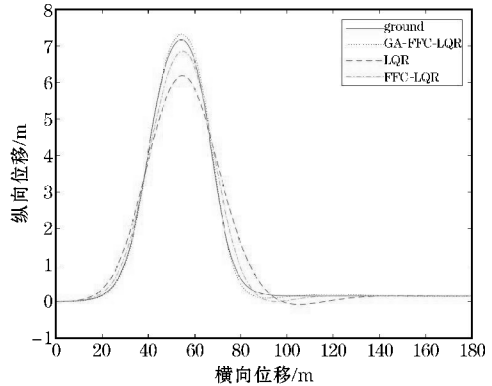


图 6 路径跟踪结果(双移线)

3.2 余弦曲线路径跟踪实验

在余弦曲线道路测试实验中,车速仍然设置为 10 m/s。仿真的测试结果如图 7、图 8 和图 9 所示。仿真测试结果显示,基于 GA-FFC-LQR 的路径跟踪控制器的效果最好,车辆的横向偏差和航向偏差在 3 种控制器中是最小的,能很好地跟踪目标路径;FFC-LQR 控制器的效果比 GA-FFC-LQR 的路径跟踪控制器效果略差,但基本也能跟踪目标路径;单独的 LQR 控制器的效果是 3 种控制器中最差的,尤其在弯道时误差最大。

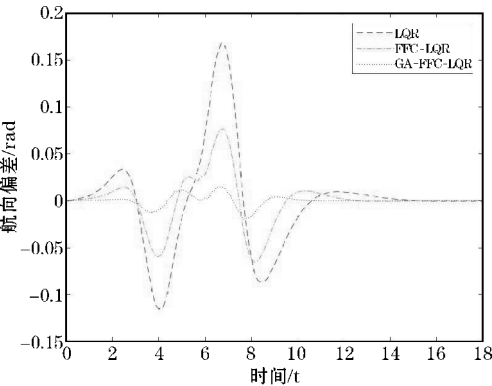


图 4 航向偏差(双移线)

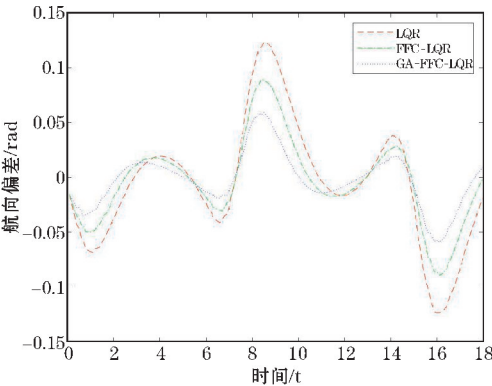


图 7 航向偏差(余弦曲线)

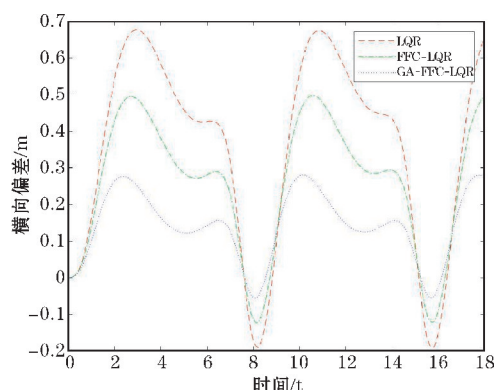


图8 横向偏差(余弦曲线)

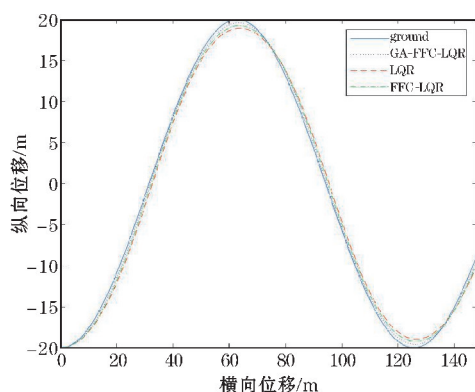


图9 路径跟踪结果(余弦曲线)

## 4 结束语

针对智能车无人驾驶关键技术路径跟踪控制进行研究。根据车辆的横向和纵向受力情况以及合理假设的基础上建立了二自由度车辆动力学模型,并根据此动力学模型建立了相对于期望路径的横向误差和航向误差为状态变量的误差动力学模型,在此基础上设计了基于 LQR 控制理论的自动驾驶路径跟踪控制器,同时根据道路的曲率信息加入了前馈控制器来消除系统的稳态误差。然后,对 LQR 加权矩阵参数进行分析,利用遗传算法的全局搜索能力,以智能车路径跟踪的横向误差和航向误差作为目标函数计算最佳的加权矩阵,减小 LQR 路径跟踪控制器设计的复杂性和提高控制器的精度。最后,通过 carsim/simulink 的联合仿真对本文设计的路径跟踪控制器进行仿真实验和对比分析,证明了本文设计的基于 GA-FFC-LQR 的智能车路径跟踪控制器对目标路径具有较好的跟踪控制效果。

## 参考文献:

- [1] 李莉. ETCP 摆渡车:连接停车场与目的地的接驳工具[J]. 创业邦,2017(6):30-31.
- [2] 白国星,孟宇,刘立,等. 无人驾驶车辆路径跟踪控制研究现状[J]. 工程科学学报,2021,43(4):475-485.
- [3] 张涌,夏雨,成海飞,等. 智能车辆路径跟踪横向控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2021,35(7):53-61.
- [4] 柴梦娜,刘元盛,任丽军. 无人驾驶车辆路径跟踪控制方法的研究与发展[A]. 中国计算机用户协会网络应用分会. 中国计算机用户协会网络应用分会 2018 年第二十二届网络新技术与应用年会论文集[C]. 中国计算机用户协会网络应用分会;北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室,2018:4.
- [5] 张品,李长勇. 基于改进模糊 PID 的全向搬运机器人路径跟踪控制研究[J]. 食品与机械,2021,37(6):114-119.
- [6] Zhaojian Wang, Wang Zhaojian, Wang Mengen, et al. Driverless simulation of path tracking based on PID control[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2020,892(1).
- [7] 丁根法. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 南方农机,2019,50(2):31.
- [8] Jing Li, Qingbin Wu, Junzheng Wang, et al. Autonomous Tracking Control for Four-Wheel Independent Steering Robot Based on Improved Pure Pursuit[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2020,29(4):466-473.
- [9] 付跃强,夏天添. 基于系统动力学的电动汽车产业发展建模与仿真[J]. 系统仿真学报,2021,33(4):973-981.
- [10] 李斯旭,徐彪,胡满江,等. 基于动力学模型预测控制的铰接车辆多点预瞄路径跟踪方法[J]. 汽车工程,2021,43(8):1187-1194.
- [11] 石贞洪,江洪,于文浩,等. 适用于路径跟踪控制的自适应 MPC 算法研究[J]. 计算机工程与应用,2020,56(21):266-271.
- [12] 梁忠超,张欢,赵晶,等. 基于自适应 MPC 的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020,41(6):835-840.
- [13] 陶冰冰,周海鹰,王思山. 自动驾驶车辆 LQR 轨迹跟踪控制器设计[J]. 湖北汽车工业学院学报,2017,31(4):1-6.
- [14] Krisada Kritayakirana, J. Christian Gerdes. Using the centre of percussion to design a steering controller for an autonomous race car[J]. Vehicle

System Dynamics,2012,50(1).

[15] 孟宇,甘鑫,汪钰,等. LQR-GA Controller for Articulated Dump Truck Path Tracking System[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University ( Science),2019,24(1):78-85.

[16] 高琳琳,唐风敏,郭蓬,等. 自动驾驶横向运动控制的改进 LQR 方法研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(3):435-441.

[17] Wenbin Zhang,Wenhao Bai,Jinyan Wang,et al. Research on path tracking of intelligent vehicle based on optimal deviation control[J]. Integrated Ferroelectrics,2018,191(1).

Design of Intelligent Vehicle Path Tracking Controller

WANG Yuehong, JIANG Tao, LI Ping, ZHOU Nan

( College of Control Engineering,Chengdu University of Information Technology,Chengdu 610225,China)

**Abstract:**In order to solve the problem of difficult parameter selection and steady-state error in the application of LQR control algorithm in intelligent vehicle path tracking, a GA-FFC-LQR path tracking controller based on genetic algorithm, feedforward control and linear quadratic regulator is proposed. Firstly, the vehicle dynamics model is established according to the force of the vehicle. By projecting the vehicle into the natural coordinate system, the error dynamics model with the lateral deviation and heading deviation relative to the desired path as the state variables is established. Based on this error dynamic model, the path tracking controller of intelligent vehicle is designed by using LQR control theory, and the feedforward controller of path tracking is designed combined with the curvature information of the desired path. Then, the  $Q$  matrix of the controller is optimized by genetic algorithm, so as to reduce the complexity of LQR controller design and improve the accuracy of path tracking controller. Finally, the designed GA-FFC-LQR path tracking controller is tested by CarSim/Simulink joint simulation platform. The simulation test results show that the designed path tracking controller can ensure the path tracking performance of intelligent vehicles on underdifferent roads, and has good better tracking accuracy.

**Keywords:**intelligent vehicle;path tracking; LQR; feedforward control;genetic algorithm