

基于模型预测和遗传算法的智能车辆轨迹跟踪控制

苑风霞,张 华,陈 丰,司志远

(安徽科技学院 机械工程学院,安徽 凤阳 233100)

摘要:为提高智能车辆轨迹跟踪模型预测控制(MPC)控制器的性能,提出一种基于遗传算法的MPC控制器权重系数整定方法。基于单轨车辆横向动力学模型设计车辆轨迹跟踪MPC控制器,在跟踪直线目标轨迹的工况下,以横向偏差权重系数为例分析其对MPC控制器性能的影响;以智能车辆跟踪目标轨迹的响应时间和跟踪偏差最小为目标,将MPC控制器权重系数的确定问题转化成多目标优化问题,运用遗传算法对其进行求解,得到优化的权重系数;采用MATLAB/Simulink和Carsim软件仿真不同车速下权重系数优化前后车辆跟踪目标轨迹的效果,对其响应时间和跟踪偏差进行分析。结果表明:权重系数对车辆跟踪目标轨迹的响应时间和跟踪偏差有较大影响,优化权重系数能够改善MPC控制器的性能,提高车辆跟踪目标轨迹的响应速度和精度。

关键词:智能车辆;轨迹跟踪;模型预测控制;遗传算法;车辆横向动力学控制

中图分类号:U 461.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2021.04.007

Trajectory Tracking Control of Intelligent Vehicle Based on Model Predictive and Genetic Algorithm

YUAN Fengxia, ZHANG Hua, CHEN Feng, SI Zhiyuan

(School of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: Aiming to improve the performance of the model predictive control (MPC) controller of intelligent vehicle trajectory tracking, a method for setting the weight coefficient of MPC controller based on genetic algorithm-based method was proposed. Based on the lateral dynamics model of monorail vehicle, the MPC controller of intelligent vehicle trajectory tracking was designed. The weighting coefficient of lateral deviation was taken as an example to analyze its influence on the performance of MPC controller under the condition of tracking a straight line. Taking the minimum of the response time and the deviation of intelligent vehicle tracking the target trajectory as the goal, the problem of determining the weighting coefficients of MPC controller was transformed into a multi-objective optimization problem, which was solved by the genetic algorithm to obtain the optimized weighting coefficient. MATLAB/Simulink and Carsim software were used to simulate the effect of vehicle tracking the target trajectory before and after weight coefficient optimization under different vehicle speeds, and the response time and tracking deviation were analyzed. The results show that the weight coefficient has a great influence on the response time and tracking deviation of vehicle tracking target trajectory, and the optimization of weighting coefficient can improve the performance of MPC controller, and improve the response speed and accuracy of vehicle tracking target trajectory.

收稿日期:2021-03-30

基金项目:安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-022);安徽省“六卓越、一拔尖”卓越人才培养创新项目(2019zyrc088);安徽科技学院产学研合作项目(880110)

作者简介:苑风霞(1985—),女,山东德州人,讲师,主要研究方向为汽车电子与智能车辆。

引文格式:苑风霞,张华,陈丰,等.基于模型预测和遗传算法的智能车辆轨迹跟踪控制[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2021,38(4):393-400.

Key words: intelligent vehicle; trajectory tracking; model predictive control; genetic algorithm; vehicle lateral dynamics control

轨迹跟踪是智能车辆的核心功能之一,如何通过对车辆横向运动的有效控制减小车辆行驶过程中横向运动的偏差,实现对目标轨迹的精确跟踪一直是智能车辆研究领域的热点。针对智能车辆轨迹跟踪问题,国内外学者进行了大量研究,开发了多种轨迹跟踪控制器^[1-2]。Netto等^[3]、赵熙俊等^[4]、余红英等^[5]构建PID控制器用于处理智能车辆的轨迹跟踪问题,但由于PID参数的获取问题,构建的PID控制器难以实现对车辆轨迹跟踪的最优控制。马莹等^[6]、郭景华等^[7]基于预瞄方法构建车辆横向控制器,实现了车辆轨迹跟踪的最优控制,但该控制器受制于系统数学模型的精确度,系统参数的时变性和外界干扰影响控制器的鲁棒性和稳定性。针对车辆轨迹跟踪的鲁棒性需求,Ganzelmeier等^[8]、Eom等^[9]、Tan等^[10]在考虑模型参数不确定性的基础上构建了 H_∞ 鲁棒控制器。智能车辆在行驶过程中不仅受到自身结构参数不确定性的影响,还受到外界环境如道路曲率和侧向风等因素的影响。综合考虑这些因素,Choi^[11]提出智能车辆横向自适应控制器,进一步提高了智能车辆轨迹跟踪过程的鲁棒性;Guo等^[12]将自适应控制方法和滑模控制方法相结合设计横向自适应模糊滑模控制器,提高了智能车辆轨迹跟踪精度和响应特性。模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种动态规划方法,由于其具备对系统模型要求低、鲁棒性和抗干扰性好的特点,被广泛应用于智能车辆轨迹跟踪控制^[13-16]。

权重系数对MPC控制器的性能具有重要影响,如何整定权重系数是设计MPC控制器的一个关键问题^[17]。在智能车辆轨迹跟踪控制MPC控制器设计中,基本采用仿真或经验性数值传统方法确定权重系数,但得到的权重系数很难最优。鉴于此,提出一种基于遗传算法的智能车辆轨迹跟踪MPC控制器权重系数的整定方法,以智能车辆跟踪目标轨迹的响应时间和车辆轨迹跟踪横向偏差最小为目标,将MPC控制器权重系数的确定问题转化为多目标优化问题,并运用遗传算法对该优化问题进行求解,得到优化的权重系数,以期进一步改善车辆轨迹跟踪MPC控制器的性能。

1 车辆横向动力学模型的建立

忽略悬架作用并假定车辆跟踪目标轨迹过程中车速恒定,建立包含侧向运动和横摆运动的单轨车辆横向动力学模型,如图1。图中: XOY 为与地面相连的固定坐标系; xoy 为车辆坐标系; a 为质心到前轴的距离; b 为质心到后轴的距离; α_1, α_2 分别为前后轮的侧偏角; F_{y1}, F_{y2} 分别为前后轮的侧偏力; δ 为前轮转向角; φ, φ_{des} 分别为车辆航向角及参考航向角。

根据牛顿第二定律建立单轨车辆横向动力学模型:

$$ma_y = F_{y1} + F_{y2} \quad (1a)$$

$$I_z \ddot{\varphi} = F_{y1}a - F_{y2}b \quad (1b)$$

$$a_y = \ddot{y} + \dot{\varphi}v_x \quad (1c)$$

$$F_{y1} = 2k_1(\delta - \alpha_1), F_{y2} = -2k_2\alpha_2 \quad (1d)$$

$$\alpha_1 = \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{v_x}, \alpha_2 = \frac{\dot{y} - b\dot{\varphi}}{v_x} \quad (1e)$$

式中: m 为车辆质量; I_z 为车辆绕 z 轴(车辆坐标系)的转动惯量; k_1, k_2 分别为前后轮的侧偏刚度; v_x 为车辆速度; $\dot{\varphi}$ 为车辆航向角速度; a_y 为车辆侧向加速度。

将式(1)写成状态方程的形式

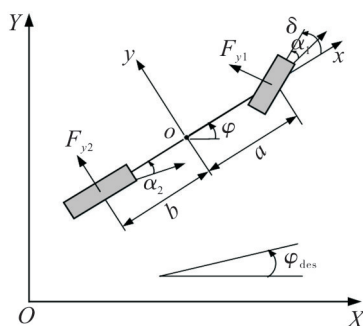


图1 单轨车辆横向动力学模型

Fig. 1 Lateral dynamics model of monorail vehicle

$$\begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2k_1 + 2k_2}{mv_x} & 0 & -v_x - \frac{2ak_1 - 2bk_2}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2ak_1 - 2bk_2}{I_z v_x} & 0 & -\frac{2a^2k_1 + 2b^2k_2}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_1}{m} \\ 0 \\ \frac{2ak_1}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (2)$$

定义两个新的状态变量 e_1 和 e_2 , e_1 为车辆质心距离车道中心的距离, e_2 为车辆的航向角误差:

$$\ddot{e}_1 = \ddot{y} + v_x(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_{\text{des}}) \quad (3a)$$

$$e_2 = \varphi - \varphi_{\text{des}} \quad (3b)$$

则式(2)表示的状态方程变为:

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{A}\mathbf{E} + \mathbf{B}_1 u + \mathbf{B}_2 w \quad (4a)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}\mathbf{E} \quad (4b)$$

式中: \mathbf{V} 为系统的输出; \mathbf{C} 为系统的输出控制矩阵; u 为系统的输入, $u = \delta$; w 为系统的干扰, $w = \dot{\varphi}_{\text{des}}$;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2k_1 + 2k_2}{mv_x} & \frac{2k_1 + 2k_2}{m} & -\frac{2ak_1 - 2bk_2}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2ak_1 - 2bk_2}{I_z v_x} & \frac{2ak_1 - 2bk_2}{I_z} & -\frac{2a^2k_1 + 2b^2k_2}{I_z v_x} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_1}{m} \\ 0 \\ \frac{2ak_1}{I_z} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2ak_1 - 2bk_2}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ -\frac{2a^2k_1 + 2b^2k_2}{I_z v_x} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix}.$$

2 车辆轨迹跟踪 MPC 控制器的设计

式(4a)表示车辆横向动力学模型为非线性,需对其进行线性化和离散化处理才能进行MPC控制器设计。采用针对参考系统进行泰勒展开的线性化方法,保留一阶项,忽略高阶项,并进行离散化,得

$$\dot{\tilde{\mathbf{E}}} = \mathbf{A}_k \tilde{\mathbf{E}} + \mathbf{B}_{1k} \tilde{u} + \mathbf{B}_{2k} \tilde{w} \quad (5)$$

式中: $\tilde{\mathbf{E}} = \mathbf{E} - \mathbf{E}_{\text{ref}}$; $\tilde{u} = u - u_{\text{ref}}$; $\tilde{w} = w - w_{\text{ref}}$; $\mathbf{A}_k = \mathbf{I} + \mathbf{T}\mathbf{A}$; $\mathbf{B}_{1k} = \mathbf{T}\mathbf{B}_1$; $\mathbf{B}_{2k} = \mathbf{T}\mathbf{B}_2$; T 为采样周期; \mathbf{E}_{ref} 为参考状态量; u_{ref} 为系统的参考输入; w_{ref} 为系统的参考干扰量。

车辆在跟踪目标轨迹过程中,MPC控制器以增量模式实现对车辆行驶轨迹的控制,设定 $\boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = [\tilde{\mathbf{E}}, \tilde{u}(k-1)]^T$,得到增量模式下的车辆横向控制状态方程^[18-19]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \tilde{\mathbf{A}}_k \boldsymbol{\varepsilon}(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{1k} \Delta u(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{2k} w(k) \\ \boldsymbol{\eta}(k) = \tilde{\mathbf{C}}_k \boldsymbol{\varepsilon}(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\tilde{\mathbf{A}}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k & \mathbf{B}_{1k} \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}$; $\tilde{\mathbf{B}}_{1k} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{1k} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$; $\tilde{\mathbf{B}}_{2k} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{2k} \\ 0 \end{bmatrix}$; $\tilde{\mathbf{C}}_k = [\mathbf{C}_k \quad 0]$ 。

假设系统的模型预测控制器的预测时域为 N_p ,控制时域为 N_c ,当前时刻为 k ,则预测时域内的状态量表示为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{W} + \mathbf{\Psi} \Delta \mathbf{U} + \Delta \mathbf{W} \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}(k+1) \\ \boldsymbol{\varepsilon}(k+2) \\ \boldsymbol{\varepsilon}(k+3) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}(k+N_p) \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \Delta u(k+2) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1) \end{bmatrix}, \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_k \\ \tilde{\mathbf{A}}_k^2 \\ \tilde{\mathbf{A}}_k^3 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{A}}_k^{N_p} \end{bmatrix}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{1k} \\ \tilde{A}_k \tilde{B}_{1k} & \tilde{B}_{1k} \\ \tilde{A}_k^2 \tilde{B}_{1k} & \tilde{A}_k \tilde{B}_{1k} & \tilde{B}_{1k} \\ \tilde{A}_k^{N_p-1} \tilde{B}_{1k} & \tilde{A}_k^{N_p-2} \tilde{B}_{1k} & \tilde{A}_k^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_{1k} & \cdots & \tilde{B}_{1k} \end{bmatrix}$$
$$\Delta = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{2k} \\ \tilde{A}_k \tilde{B}_{2k} & \tilde{B}_{2k} \\ \tilde{A}_k^2 \tilde{B}_{2k} & \tilde{A}_k \tilde{B}_{2k} & \tilde{B}_{2k} \\ \tilde{A}_k^{N_p-1} \tilde{B}_{2k} & \tilde{A}_k^{N_p-2} \tilde{B}_{2k} & \tilde{A}_k^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_{2k} & \cdots & \tilde{B}_{2k} \end{bmatrix}$$

系统的输出为

$$H = \tilde{C}_k Z \tag{8}$$

式中： $H = \begin{bmatrix} \eta(k+1) \\ \eta(k+2) \\ \eta(k+3) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p) \end{bmatrix}$ 。由于系统模型的时变性,定义目标函数为

$$J(\varepsilon(k),u(k-1),\Delta u(k)) = \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \eta(k+i) - \eta_{\text{ref}}(k+i) \right\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \left\| \Delta u(k+i) \right\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \tag{9}$$

式中： Q 和 R 为权重系数； ϵ 为松弛因子； ρ 为松弛因子的加权系数。将式(9)转化成二次规划问题：

$$J(\varepsilon(k),u(k-1),\Delta u(k)) = [\Delta U^T, \epsilon]^T \begin{bmatrix} (\tilde{C}_k \Psi)^T Q \tilde{C}_k \Psi + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} [\Delta U^T, \epsilon] + 2[(\tilde{C}_k \Gamma W + \tilde{C}_k \Delta W - H_{\text{ref}})^T Q \tilde{C}_k \Psi \ 0] [\Delta U^T, \epsilon] \tag{10}$$

前轮转角控制增量约束：

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max}, k = 1, 2, 3, \cdots, N_c \tag{11}$$

式中 $\Delta U_{\min}, \Delta U_{\max}$ 分别为控制时域内前轮转角控制增量的最小值与最大值集合。前轮转角控制量约束：

$$U_{\min} - U(k) \leq D \Delta U(k) \leq U_{\max} - U(k), k = 1, 2, 3, \cdots, N_c \tag{12}$$

式中： $D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes I_m$ ； I_m 是维度为 m 的单位矩阵； \otimes 为克罗内克积； U_{\min}, U_{\max} 分别为控制时

域内前轮转角控制量最小值与最大值集合。输出约束：

$$H_{\min} - \epsilon \leq H \leq H_{\max} + \epsilon \quad (\epsilon > 0) \tag{13}$$

式中 H_{\min}, H_{\max} 分别为系统输出的最小值与最大值集合。

3 车辆轨迹跟踪仿真

3.1 仿真模型的建立

为验证设计的MPC控制器对车辆轨迹跟踪控制的效果,在Simulink中搭建系统的仿真模型。采用Carsim软件建立车辆模型并导入Simulink,仿真模型参数 $m=1\ 370\text{ kg}$, $I_z=4\ 192\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $a=1\ 110\text{ mm}$, $b=1\ 666.22\text{ mm}$, $k_1=-48\ 405\text{ N/rad}$, $k_2=-48\ 768\text{ N/rad}$, $N_p=40$, $N_c=20$, $\rho=10$, $\delta \in [-10^\circ, 10^\circ]$, $\Delta\delta \in [-0.85^\circ, 0.85^\circ]$ 。

MPC控制器的目标是使车辆能够尽快平稳地跟踪目标轨迹,以横向偏差权重系数 Q_{11} 为例分析权重系数对MPC控制器性能的影响。图2为 $Q_{11}=1, 5, 26, 80$ 下车辆MPC控制器的性能曲线。由图2(a)可看出:对应 $Q_{11}=1, 5, 26, 80$,车辆到达期望轨迹($Y=3$)的时间分别为4.612, 3.506, 3.112, 3.024 s; Q_{11} 增大,车辆到达目标轨迹的时间减小,但随 Q_{11} 增大,车辆到达目标轨迹时间减小的幅度越来越小。由图2(b)可看出:车辆跟踪上

目标轨迹后, $Q_{11}=1, 5, 26$ 下车辆转向角随时间的变化情况基本相似; 但 $Q_{11}=80$ 的车辆转向角存在波动, 说明过大的横向偏差权重系数会引起车辆行驶状况不稳定。由图 2(c) 可看出: 车辆跟踪上目标轨迹后, $Q_{11}=1, 5, 26$ 下车辆行驶轨迹横向偏差相对纵向位置的变化情况基本相似且偏差非常小; 相比其他 3 种权重系数的横向偏差, $Q_{11}=80$ 的车辆行驶轨迹横向偏差较大且存在明显波动性。综上所述, 横向偏差权重系数对 MPC 控制器的性能影响较大, 因此如何确定权重系数 Q 和 R 是 MPC 控制器设计的重要问题之一。

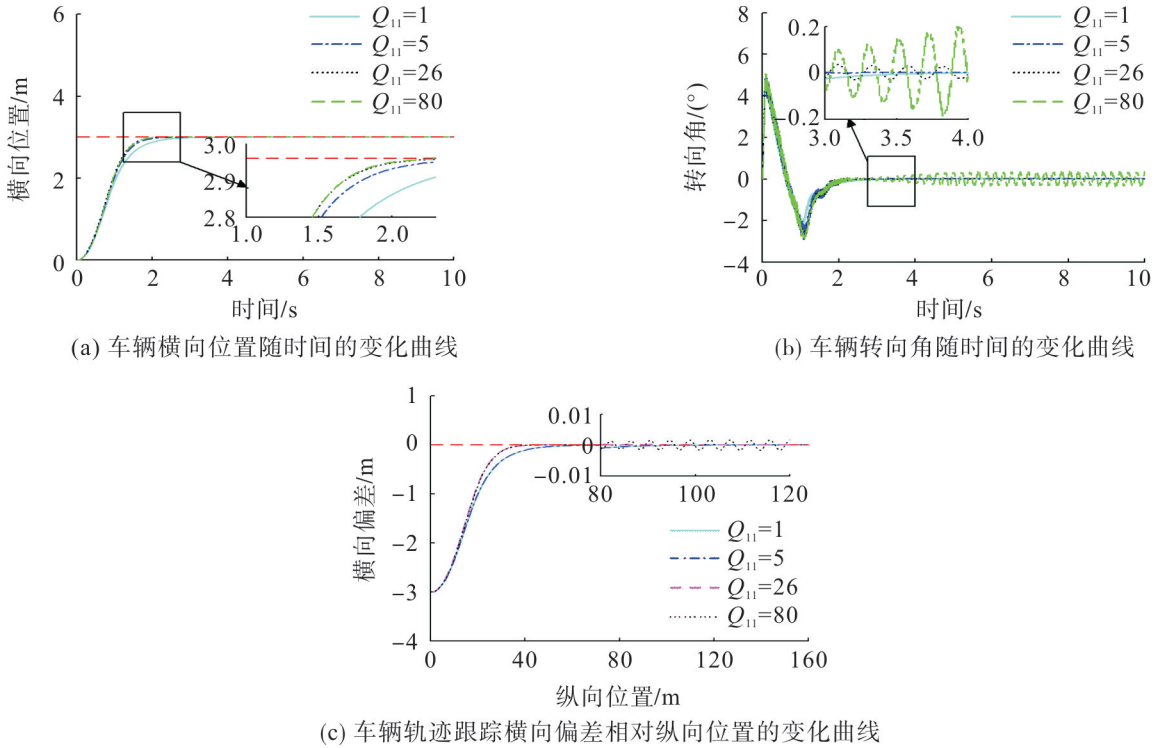


图 2 不同横向偏差权重系数下 MPC 控制器的性能曲线

Fig. 2 Performance curves of MPC controller with different weighting coefficients of lateral deviation

3.2 权重系数的确定

为提高车辆轨迹跟踪 MPC 控制器的性能, 采用优化方法确定权重系数 Q 和 R 。常用的优化方法有最小二乘法、牛顿法、差分演化法、粒子群算法、蚁群算法和遗传算法等。遗传算法^[20]的适应性强, 对问题本身要求低, 因此选择遗传算法确定权重系数 Q 和 R 。优化目标为: 车辆响应时间, 即车辆从初始位置到达目标轨迹的时间; 车辆轨迹跟踪横向偏差, 即车辆到达目标轨迹后, 车辆行驶轨迹相对目标轨迹横向偏差(采用均方值表示)。最终将权重系数 Q 和 R 的确定问题转化成多目标优化问题, 其目标函数可写为

$$p(t, Y) = w_1 \frac{t}{t_0} + w_2 \frac{\sum_{t=t_d}^{t_1} (Y - Y_d)^2}{n} \bigg/ \frac{\sum_{t=t_0}^{t_{10}} (Y_0 - Y_d)^2}{n_0} \quad (14)$$

式中: t_0, t 分别为优化前后车辆响应时间; t_{10}, t_1 分别为优化前后跟踪目标轨迹的总时间; Y_0, Y 分别为优化前后车辆横向位置; Y_d 为根据目标轨迹确定的车辆横向位置; w_1 和 w_2 为加权系数; n_0, n 为采样点数。

选择直线和双移线两种轨迹组成复合轨迹进行优化, 式(15)表示直线轨迹, 用于确定车辆响应时间; 式(16)表示双移线轨迹^[14], 用于确定轨迹跟踪偏差。

$$\begin{cases} X_d = v_x t \\ Y_d = 3 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} Y_d(X) = \frac{d_{y1}}{2} (1 + \tanh(z_1)) - \frac{d_{y2}}{2} (1 + \tanh(z_2)) \\ \varphi_d(X) = \arctan(d_{y1} (\frac{1}{\cosh(z_1)})^2 (\frac{1.2}{d_{x1}}) - d_{y2} (\frac{1}{\cosh(z_2)})^2 (\frac{1.2}{d_{x2}})) \end{cases} \quad (16)$$

式中: t 为时间; $z_1 = \frac{2.4}{25}(X - 27.19) - 1.2$; $z_2 = \frac{2.4}{21.95}(X - 56.46) - 1.2$; $d_{x1} = 25$; $d_{x2} = 21.95$; $d_{y1} = 4.05$; $d_{y2} = 5.70$; X 为车辆纵向位置。

使用 MATLAB/Simulink, Carsim 和 ISIGHT 软件联合仿真优化确定权重系数 Q 和 R 。MATLAB/Simulink 软件运行系统模型(车辆系统-Carsim 和控制系统-Simulink, 其中 MPC 控制器采用参数为 active-set 的二次规划算法求解^[21]), 使用 ISIGHT 软件运行遗传算法调整权重系数 Q 和 R 并传给 MATLAB/Simulink 软件, 具体过程如图 3。

3.3 优化结果及分析

权重系数 Q 和 R 的优化前后结果分别为:

$$Q_{\text{前}} = \begin{bmatrix} 28.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 18.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 \end{bmatrix}, R_{\text{前}} = 1;$$
$$Q_{\text{后}} = \begin{bmatrix} 3.016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.153 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.842 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.193 \end{bmatrix}, R_{\text{后}} = 0.142。$$

利用优化权重系数 Q 和 R , 分别在 20, 30, 40, 50 km/h 车速下对直线和双移线组成的复合轨迹进行车辆轨迹跟踪仿真, 结果如图 4。

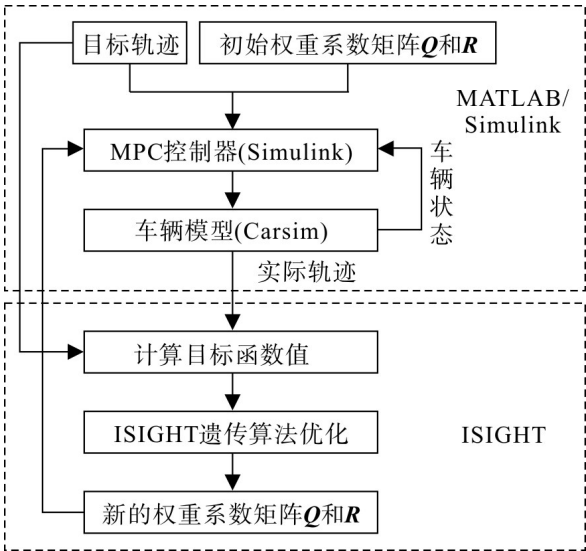


图3 权值系数 Q 和 R 的确定过程
Fig. 3 Identification process of weighting coefficient Q and R

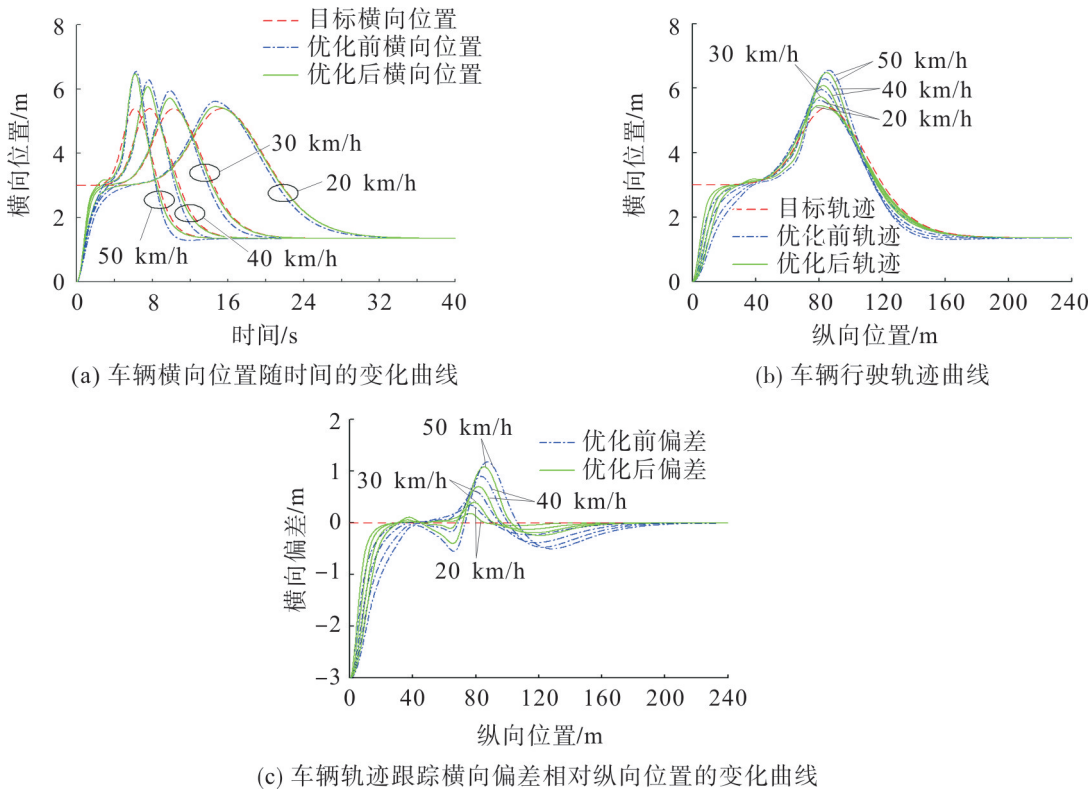


图4 车辆跟踪复合轨迹的仿真结果
Fig. 4 Simulated results of vehicle tracking coupled trajectory

由图4可知:车速为20 km/h时,优化前后车辆均能从初始位置到达目标横向位置,优化后车辆能更快到达目标横向位置;优化前后车辆均能从初始位置跟踪上目标轨迹,优化后车辆行驶轨迹更接近目标轨迹;优化前后车辆轨迹跟踪横向偏差均较小(小于1 m),优化后车辆轨迹跟踪横向偏差更小。总之,车速为20 km/h时,使用优化的权重系数 Q 和 R 的MPC控制器能使车辆更快更准地跟踪目标轨迹。车速30,40,50 km/h与车速20 km/h有类似结论;但车速40,50 km/h时,优化前后车辆轨迹跟踪横向偏差比车速20,30 km/h的大,主要原因是车速的提高改变了地面附着力在车辆纵横向的分布。

为进一步分析权重系数 Q 和 R 优化前后对车辆轨迹跟踪MPC控制器性能的影响,比较优化前后不同车速下车辆响应时间和车辆轨迹跟踪横向偏差均方值(MSE),结果如图5,6。从图5可看出:不同车速下,优化后的权重系数 Q 和 R 减少了车辆响应时间,减少幅度 R_t 随车速的提高逐渐增大;对于20,30,40,50 km/h车速,优化后响应时间分别缩短13.28%,19.21%,21.36%,22.92%。从图6可看出:不同车速下,优化后的权重系数 Q 和 R 减小了车辆轨迹跟踪横向偏差,但减小幅度 R_t 随车速的提高逐渐减小;对于20,30,40,50 km/h车速,优化后轨迹跟踪横向偏差均方值分别减小28.04%,27.79%,27.47%,25.04%。

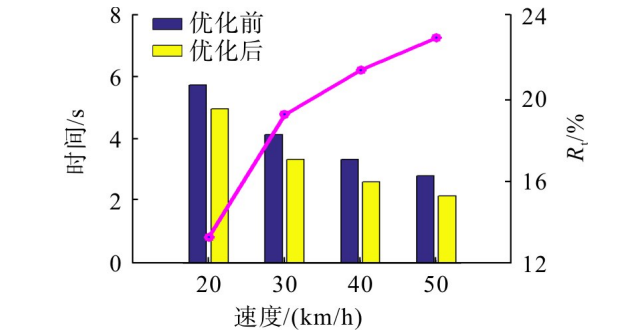


图5 优化前后车辆响应时间

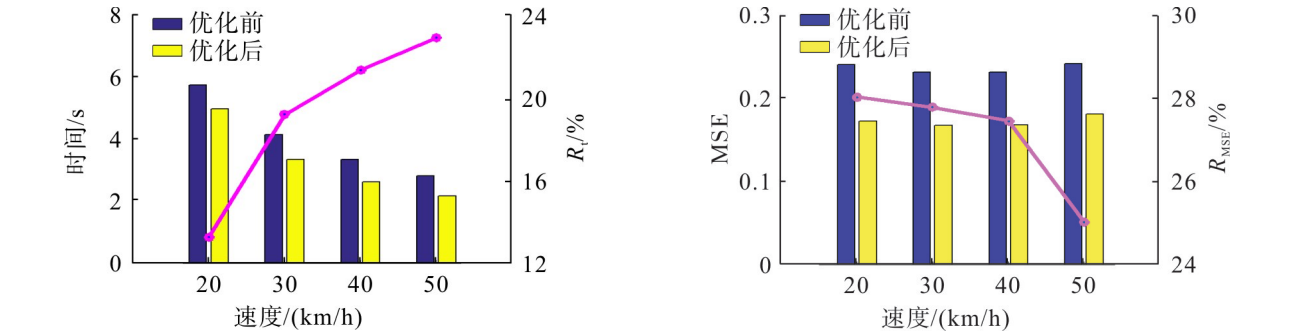


图6 优化前后车辆轨迹跟踪横向偏差

Fig. 5 Vehicle response time before and after optimization Fig. 6 Vehicle trajectory tracking lateral deviation before and after optimization

综上所述可知,优化权重系数 Q 和 R 可改善车辆轨迹跟踪MPC控制器的性能,不仅可减少车辆响应时间,提高车辆响应速度;还可减小车辆轨迹跟踪横向偏差,提高车辆跟踪目标轨迹的精度。

4 结 论

以单轨车辆横向动力学模型为基础,设计基于横向控制的智能车辆轨迹跟踪MPC控制器,提出基于遗传算法优化MPC控制器权重系数 Q 和 R 的方法;针对优化前后的权重系数 Q 和 R ,对MPC控制器的性能进行仿真分析。结果表明:优化后的权重系数 Q 和 R 能够改善MPC控制器的性能,提高车辆跟踪目标轨迹的响应速度和精度;在20,30,40,50 km/h车速下,优化后车辆到达目标轨迹的时间分别缩短13.28%,19.21%,21.36%,22.92%,车辆轨迹跟踪偏差均方值分别减小28.04%,27.79%,27.47%,25.04%。采用遗传算法优化MPC控制器权重系数能够改善MPC控制器的性能,提出的优化MPC控制器权重系数方法具有一定的工程参考价值。

参考文献:

[1] 陈慧岩,陈舒平,龚建伟. 智能汽车横向控制方法研究综述[J]. 兵工学报,2017, 38(6):1203-1214.
[2] 郭景华,李克强,罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述[J]. 汽车安全与节能学报,2016, 7(2):151-159.
[3] NETTO M, BLOSSEVILLE J M, LUSETTI B, et al. A new robust control system with optimized use of the lane detection data for vehicle full lateral control under strong curvatures[C]//2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2006:1382-1387.
[4] 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(5):18-23.
[5] 余红英,杨杰. 基于MC9S12XS128的激光传感器循迹智能车控制系统设计[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2014, 31(2): 177-182.

- [6] 马莹,李克强,高峰,等.改进的有限时间最优预瞄横向控制器设计[J].汽车工程,2006,28(5):434-438.
- [7] 郭景华,胡平,李琳辉,等.基于视觉的无人驾驶车自主导航控制器设计[J].大连理工大学学报,2012,52(3):436-442.
- [8] GANZELMEIER L, HELBIG J, SCHNIEDER E. Robustness and performance issues for advanced control of vehicle dynamics [C]// Intelligent Transportation Systems. Oakland, CA, USA: IEEE, 2001:798-801.
- [9] EOM S I, KIM E J, SHIN T Y, et al. The robust controller design for lateral control of vehicles[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe, Japan: IEEE, 2003:570-573.
- [10] TAN H S, BU F, BOUGLER B. A real-world application of lane-guidance technologies: automated snowblower[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2007, 8(3):538-548.
- [11] CHOI S B. The design of a look-down feedback adaptive controller for the lateral control of front-wheel-steering autonomous highway vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(6):2257-2269.
- [12] GUO J, LI L, LI K, et al. An adaptive fuzzy-sliding lateral control strategy of automated vehicles based on vision navigation[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(10):1502-1517.
- [13] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3):566-580.
- [14] 杨洋,孙涛,李洁.基于模型预测算法的智能车辆横向控制研究[J].农业装备与车辆工程,2019,57(4):47-50.
- [15] 高洪波,李升波,谢国涛,等.智能汽车横向轨迹跟踪的离散时间模型预测控制[J].指挥与控制学报,2018,4(4):297-305.
- [16] 李进.基于DSP的视觉导航智能车辆路径识别[J].安徽科技学院学报,2012,26(1):46-50.
- [17] 梅杨,易高.间接矩阵变换器-异步电机调速系统模型预测控制权重系数自整定方法[J].电工技术学报,2020,35(18):162-172.
- [18] 龚建伟,姜岩,徐威.无人驾驶车辆模型预测控制[M].北京:北京理工大学出版社,2014:45-48.
- [19] JI J, KHAJEPOUR A, MELEK W W, et al. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2):952-964.
- [20] ABBAS W, ABOUELATTA O B, EL-AZAB M, et al. Optimal seat suspension design using genetic algorithms[J]. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 2011, 1(1):44-52.
- [21] FERREAU H J, KIRCHES C, POTSCHKA A, et al. QPOASES: a parametric active-set algorithm for quadratic programming [J]. Mathematical Programming Computation, 2014, 6(4):327-363.

责任编辑:何莉