

文章编号: 2095-2163(2021)09-0184-05

中图分类号: TP23

文献标志码: A

自动驾驶搅拌车横向控制设计及试验研究

武金龙, 谢凡, 尤丽刚, 邹晓楠

(三一汽车制造有限公司, 长沙 410100)

摘要: 车辆控制包含横向和纵向控制两部分,其中横向控制根据决策规划输出的路径、曲率等信息进行跟踪控制,不同的横向控制算法适用于不同的应用场景。本文分析了双前桥转向四轴搅拌车的动力学模型,结合搅拌车运行场景,提出了一种基于车辆动力学模型的横向控制算法(LQR),该算法考虑了路面曲率和道路坡度的前馈补偿。利用 Matlab 对该横向控制算法进行建模,仿真分析其动态响应特性,最后进行实车道路测试。结果表明:LQR 横向控制算法适合搅拌车的工作场景,能够兼顾搅拌车的行驶稳定性和乘坐的舒适性。

关键词: 408 搅拌车; 自动驾驶; 横向控制; LQR; 稳态误差

Research on design and test for lateral control of autopilot mixer

WU Jinlong¹, XIE Fan¹, YOU Ligang¹, ZOU Xiaonan¹

(Sany Automobile Manufacturing Co., Ltd., Changsha Hunan 410100, China)

【Abstract】 Vehicle control includes lateral control and longitudinal control. Lateral control gives the planned path and curvature to track and control and different lateral control algorithms are applied in corresponding situations. In this paper, firstly four-axle mixer with double front axles steering dynamic model is analyzed. Then in view of mixer working condition, a lateral control algorithm LQR based on the vehicle dynamics model is proposed, which utilizes the feed forward compensation of pavement curvature and road slope. Secondly, the lateral control algorithm is modeled with Matlab, and dynamic response is analyzed by simulation. Finally, the road evaluation is tested. The result shows that the LQR is suitable for mixer running condition, which both take into account the driving stability and ride comfort.

【Key words】 408 mixer; autopilot; lateral control; LQR; steady-state error

0 引言

近年来,自动驾驶汽车已成为社会广泛关注的对象,热度经久不衰。但由于汽车动力学复杂,运行工况千差万别,如何实时精确地跟踪轨迹成为学术界研究的重难点^[1]。众所周知,自动驾驶汽车由4大关键技术模块组成:感知、定位、决策规划和控制。控制模块是自动驾驶汽车底层的软件算法模块,其中包括横向控制和纵向控制两部分。横向控制主要用于车辆方向盘的控制,纵向控制则主要负责车辆刹车与油门的控制,两者协同工作才能实现自动驾驶。其中横向控制根据决策规划输出的路径、曲率等信息实时修正进行跟踪控制,以减少横向跟踪误差,保证自动驾驶汽车行驶的稳定性和舒适性^[2]。目前采用的算法主要包括无模型的横向控制算法和基于模型的横向控制算法^[2-4]。

表1列举了几种典型横向控制算法。由此可见,不同的横向控制算法在鲁棒性、路径要求、稳态误差、适用场景等方面存在明显差异^[3-4]。因此,需

综合考虑搅拌车动力学模型及搅拌车的常用工况,选取适合搅拌车运行场景的控制方法。

表1 典型的横向控制算法

Tab. 1 Typical lateral control algorithm

横向控制算法	鲁棒性	路径要求	稳态误差	适用场景
PID	较差	无要求		路径曲率较小及低速的场景
Pure Pursuit	较好	无要求	速度增加时变大	低俗的场景
Stanley	好	曲率连续		路径平滑的中低速场景
Rear wheel feedback	较差	曲率二阶连续		路径平滑的低俗泊车场景
LQR	较差	曲率连续	较小	路径平滑的中高速城市场景

1 动力学模型的横向控制算法

1.1 搅拌车动力学模型

408 搅拌车是双前桥转向四轴工程车辆。要分析搅拌车横向控制系统,必先分析其动力学模型。动力学主要研究对象是作用于物体的力与运动的关系,车辆动力学模型一般用于分析车辆的平顺性和车辆的操纵稳定性,而车辆动力学主要研究轮胎及

作者简介: 武金龙(1988 -),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:工程车辆的智能驾驶算法及测试。

收稿日期: 2021-06-24

其相关部件的受力情况。正常情况下,408 搅拌车的作用力沿着 X、Y、Z 轴分布,如图 1 所示。



图 1 搅拌车作用力示意图

Fig. 1 Mixer force diagram

X 轴:包括三四轴驱动力和制动力,绕 X 轴作滚摆运动;

Y 轴:包括双前桥转向力、离心力和侧风力,绕 Y 轴作俯仰运动;

Z 轴:包括搅拌车四轴上下振荡施加的力,绕 Z 轴作横摆运动。

为了更好地分析 408 搅拌车,现对其动力学模型作如下简化:

(1)忽略轮胎力的纵横耦合关系,只考虑纯侧偏轮胎特性;

(2)不考虑重量转移,用单车模型来描述车辆的运动^[5-6]。

简化后的 408 搅拌车为二自由度模型,如图 2 所示。控制系统轨迹跟踪如图 3 所示,二自由度模型用车辆侧向位置 y 和航向角表示。

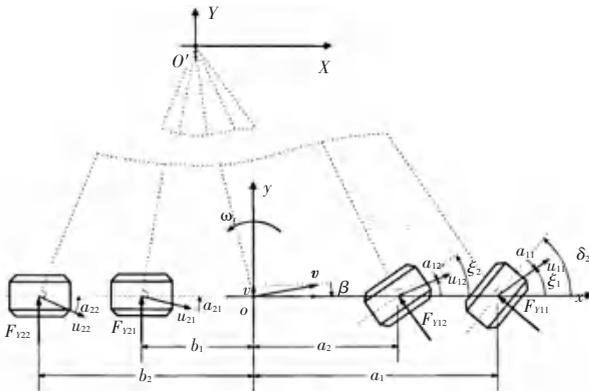


图 2 搅拌车简化后的二自由度模型

Fig. 2 Two degrees of freedom model

图 2 中, F_{Y11} 、 F_{Y12} 、 F_{Y21} 、 F_{Y22} 分别为第一、二、三、四轴轮胎侧向力; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 分别为质心到第一、二、三、四轴距离; u_{11} 、 u_{12} 、 u_{21} 、 u_{22} 分别为第一、二、三、四轴轮胎车速方向; α_{11} 、 α_{12} 、 α_{21} 、 α_{22} 分别为

第一、二、三、四轴轮胎侧偏角; δ_1 、 δ_2 分别为第一、二轴转角; v 为质心速度。

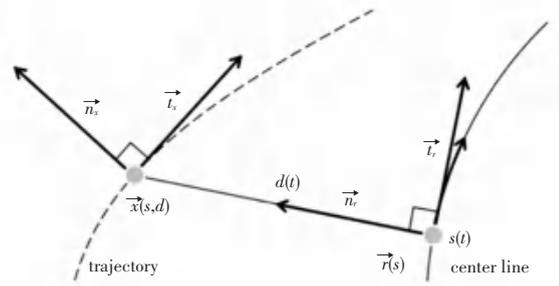


图 3 控制系统轨迹跟踪图

Fig. 3 Control system trajectory diagram

1.2 二自由度动力学模型

分别沿 Y 轴应用牛顿第二运动定律($\sum F_Y = ma_y$)、Z 轴的旋转平衡应用横摆动力方程($\sum M_{Iz} = I_z \ddot{\psi}$),并根据侧偏角、侧偏力、轮速方向角之间关系($F_{Y11} = 2 C_{11}(\delta_1 - \frac{\dot{y} + a_1 \dot{\psi}}{V_x})$)分析,可推出搅拌车二自由度车辆动力学方程如下:

$$2 C_{11} \frac{\partial^2 \delta_1}{\partial t^2} - \frac{\dot{y} + a_1 \dot{\psi}}{V_x} \frac{\partial}{\partial t} + 2 C_{12} \frac{\partial^2 \delta_2}{\partial t^2} - \frac{\dot{y} + a_2 \dot{\psi}}{V_x} \frac{\partial}{\partial t} + 2 C_{21} \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\dot{y} \ddot{\psi}}{V_x} + 2 C_{22} \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t} = m(\ddot{y} + V_x \dot{\psi}) \quad (1)$$

$$a_1 2 C_{11} (\delta_1 - \frac{\dot{y} + a_1 \dot{\psi}}{V_x}) + a_2 2 C_{12} (\delta_2 - \frac{\dot{y} + a_2 \dot{\psi}}{V_x}) - b_1 2 C_{21} (\frac{b_1 \dot{\psi} - \dot{y}}{V_x}) - b_2 2 C_{22} (\frac{b_2 \dot{\psi} - \dot{y}}{V_x}) = I_z \ddot{\psi} \quad (2)$$

$$\ddot{y} = \frac{2 C_{11} \delta_1 + 2 C_{12} \delta_2 - 2(C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22})}{m} \dot{y} + \frac{-2 C_{11} a_1 - C_{12} a_2 + C_{21} b_1 + C_{22} b_2}{m V_x} - V_x \quad (3)$$

$$a_1 2 C_{11} \frac{\partial^2 \delta_1}{\partial t^2} - \frac{\dot{y} + a_1 \dot{\psi}}{V_x} \frac{\partial}{\partial t} + a_2 2 C_{12} \frac{\partial^2 \delta_2}{\partial t^2} - \frac{\dot{y} + a_2 \dot{\psi}}{V_x} \frac{\partial}{\partial t} - b_1 2 C_{21} \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\dot{y} \ddot{\psi}}{V_x} - b_2 2 C_{22} \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t} = I_z \ddot{\psi} \quad (4)$$

式中: C_{11} 、 C_{12} 、 C_{21} 、 C_{22} 分别为第一、二、三、四轴轮胎侧偏刚度; δ_1 、 δ_2 分别为第一、二轴转角; \dot{y} 为沿车身 Y 轴横向运动产生的加速度; $V_x \dot{\psi}$ 为车身横摆运动产生的向心加速度。

1.3 融合路面坡度的动力学模型

本文研究的横向控制,使用相对路面位置及航向误差这类状态变量来表示误差。假设车辆在半径 R 的路面、路面斜坡为上,以 V_x 匀速行驶,横摆动力

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{2(C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22})}{mV_x} & \frac{2(C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22})}{m} & -\frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) + 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{mV_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) + 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{I_z V_x} & \frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) - 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{I_z} & -\frac{2(C_{11}a_1^2 + C_{12}a_2^2) + 2(C_{21}b_1^2 + C_{22}b_2^2)}{I_z V_x} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{11}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{11}a_1}{I_z} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{12}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{12}a_2}{I_z} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) + 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{mV_x} \\ 0 \\ -\frac{2(C_{11}a_1^2 + C_{12}a_2^2) + 2(C_{21}b_1^2 + C_{22}b_2^2)}{I_z V_x} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

由于 408 搅拌车是双前桥转向,根据转向几何关系可知:

$$\frac{\tan \delta_1}{\tan \delta_2} = \frac{(b_2 + b_1)/2 + a_2}{(b_2 + b_1)/2 + a_1} \approx \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (6)$$

因此:

$$\dot{x} = Ax + (B_1 + \frac{(b_2 + b_1)/2 + a_2}{(b_2 + b_1)/2 + a_1} B_2) \delta_1 + C \dot{\psi}_{des} + D \sin(\Phi) \quad (7)$$

$$\text{令 } B = B_1 + \frac{(b_2 + b_1)/2 + a_2}{(b_2 + b_1)/2 + a_1} B_2$$

最终微分方程为:

$$\dot{x} = Ax + B \delta_1 + C \dot{\psi}_{des} + D \sin(\Phi) \quad (8)$$

1.4 LQR 横向控制算法

由于搅拌车主要应用场景是从搅拌站装混凝土运输至城市周边的建筑工地,运行道路大都为道路曲率连续的城市环线。综合考虑搅拌车的运行场景和搅拌车动力学模型,本文选取适合搅拌车的控制算法 LQR(Linear Quadratic Regulator)调节器。LQR 调节器求解的核心是设计一个代价函数,最优的控制轨迹应使该能量函数最小^[7]。能量函数的一般形式为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (9)$$

式中, Q 是半正定矩阵,代表状态 x 的权重; R 为正定矩阵,代表控制量 u 的权重; $x^T Q x$ 表示跟踪的误差; $u^T R u$ 表示控制量(即所消耗能量)。其核心思想是尽可能消耗最小能量使得跟踪误差最小,通过求解代价函数最小值得到最优解。

根据现代控制理论可知,求解的最小值可转化

学不受路面斜坡影响,则对应的搅拌车状态微分方程为:

$$\dot{x} = Ax + B_1 \delta_1 + B_2 \delta_2 + C \dot{\psi}_{des} + D \sin(\Phi) \quad (5)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{2(C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22})}{mV_x} & \frac{2(C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22})}{m} & -\frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) + 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{mV_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) + 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{I_z V_x} & \frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) - 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{I_z} & -\frac{2(C_{11}a_1^2 + C_{12}a_2^2) + 2(C_{21}b_1^2 + C_{22}b_2^2)}{I_z V_x} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{11}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{11}a_1}{I_z} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{12}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{12}a_2}{I_z} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2(C_{11}a_1 + C_{12}a_2) + 2(C_{21}b_1 + C_{22}b_2)}{mV_x} \\ 0 \\ -\frac{2(C_{11}a_1^2 + C_{12}a_2^2) + 2(C_{21}b_1^2 + C_{22}b_2^2)}{I_z V_x} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

为求解黎卡提方程的解 $K, \delta_{sb} = -Kx$, 通过 Matlab 函数 LQR 可求解 K 。

$$K = [k_1, k_2, k_3, k_4] = LQR(A, B, Q, R) \quad (10)$$

式中, $Q = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4]$; $R = [r]$; q_1, q_3, r 为固定值。

$$q_1 = \begin{cases} q_{1\max} & V_x < V_1 \\ q_{1\max} + \frac{q_{1\min} - q_{1\max}}{V_2 - V_1} (V_x - V_1) & V_1 \leq V_x \leq V_2 \\ q_{1\min} & V_x > V_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$q_3 = \begin{cases} q_{3\max} & V_x < V_1 \\ q_{3\max} + \frac{q_{3\min} - q_{3\max}}{V_2 - V_1} (V_x - V_1) & V_1 \leq V_x \leq V_2 \\ q_{3\min} & V_x > V_2 \end{cases} \quad (12)$$

考虑道路曲率前馈补偿量,根据规划提供的轨迹曲率,计算得到道路曲率补偿量 δ_{ff} :

$$\delta_{ff} = \frac{a_1 + a_2 + b_1 + b_2}{2R} + \frac{2mV_x^2}{R(a_1 + a_2 + b_1 + b_2)} \left[\frac{b_1 + b_2}{4(C_{11} + C_{12})} - \frac{a_1 + a_2}{4(C_{21} + C_{22})} (1 - k_3) \right] - k_3 \frac{b_1 + b_2}{2R} \quad (13)$$

考虑路面坡度的前馈补偿量,根据规划提供的斜倾角,计算得到路面坡度的前馈补偿量 δ_{sw} :

$$\delta_{sw} = \frac{A(4,3) - k_3 B(4,1)}{A(2,3) B(4,1) - A(1,4) B(2,1)} g \sin(\theta) \quad (14)$$

在控制算法中加入位置误差积分补偿量 δ_i :

$$\delta_i = \delta_i + k_i e_1 \quad (15)$$

由此可计算前轮转角 δ_1 :

$$\delta_1 = \delta_{sb} + \delta_{ff} + \delta_{sw} + \delta_i \quad (16)$$

最终, LQR 系统的控制结构如图 4 所示。

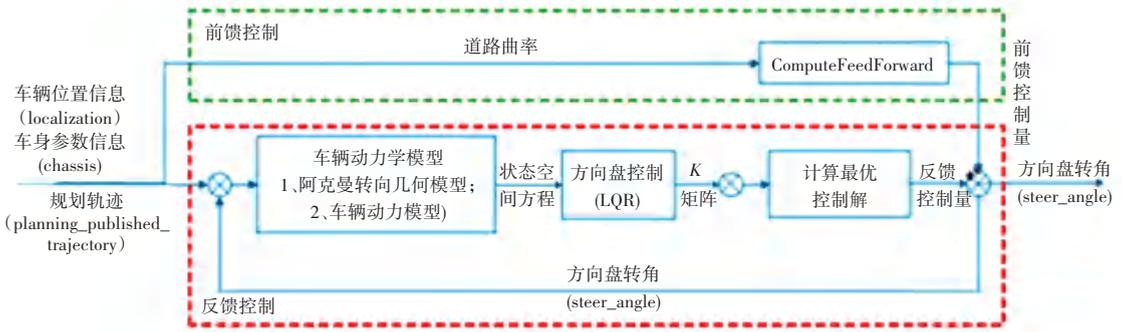


图 4 LQR 控制框图

Fig. 4 LQR control diagram

2 仿真及实车测试结果

2.1 搅拌车整车参数

408 搅拌车的整车参数见表 2。

表 2 408 搅拌车参数表

Tab. 2 408 Mixer parameter

指标名称	参数
长/宽/高/mm	9 645/2 350/3 980
轴距/mm	1 700+3 450+1 350
等效轴距/mm	4 975
整备质量/kg	14 000
整备质量-前/后轴/kg	7 014/6 986
等效 I _f , I _r	2 482.525/ 2 492.525
质心到第一、二、三、四轴距离/mm	3 332, 1 632, 3 167, 1 817
前悬/后悬	1 480/1970
前轮内侧最大转角	45°
悬架类型(前/后)	钢板弹簧/橡胶弹簧
轮胎	12R22.5
转向传动比	20(方向盘到一桥内轮)
1, 2, 3, 4 轴轮胎侧偏刚度(N/rad)	Cf155 494.663

2.2 仿真分析结果

根据前面章节介绍的误差微分方程及 LQR 控

制算法,在 Matlab 中建立搅拌车动力学模型如图 5 所示。进行仿真分析其动态响应特性,仿真过程中,首先设置初始误差,给出不同车速,分析搅拌车模型的横向位置误差及误差变化率、航向角误差及误差变化率等状态的响应曲线。

Matlab 仿真的状态误差响应曲线图、控制增益变化曲线、控制系统响应性能指标如图 6-8 所示。仿真结果表明:10~90 km/h 全速度范围内的误差上升时间<2 s,调节时间<3 s;超调量随车速的增加虽有增加的趋势,但超调量<10%,且振荡次数≤1 次,整体表现良好,满足控制系统的性能要求。

2.3 实车测试结果

进一步将经过仿真分析的算法写入 408 电动搅拌车中(此车辆配备了毫米波雷达、单目摄像头等支持自动驾驶的硬件),按照表 3 的测试工况展开实车测试。试验过程中视频如图 9 所示。实车测试结果:408 搅拌车横向位置误差控制在-0.26~0.3 m,过程中车辆无明显超调,较好地兼顾搅拌车的行驶稳定性和乘坐舒适性。

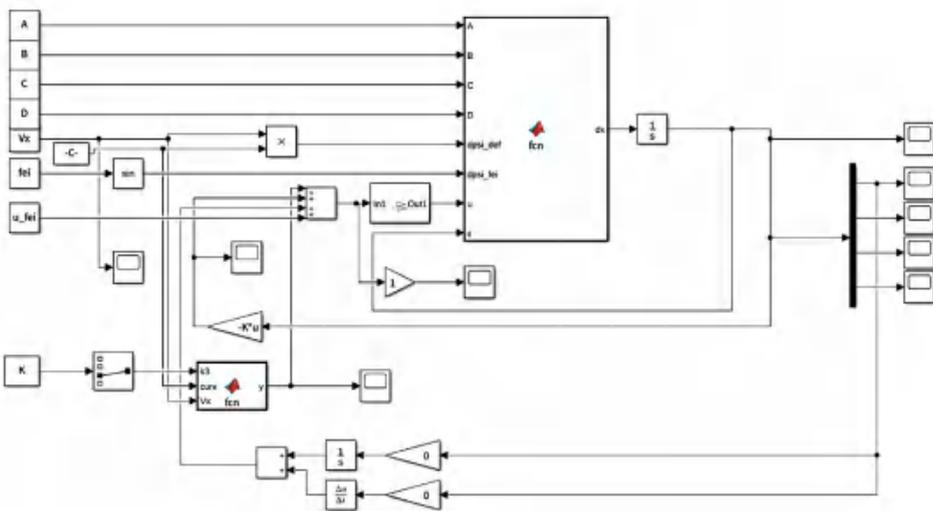


图 5 搅拌车横向控制系统仿真图

Fig. 5 Mixer lateral control simulation diagram

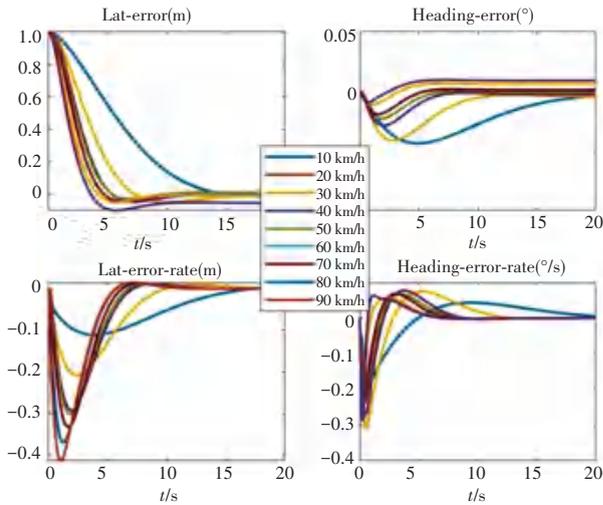


图6 误差及航向角响应图

Fig. 6 Error and course-angle response diagram

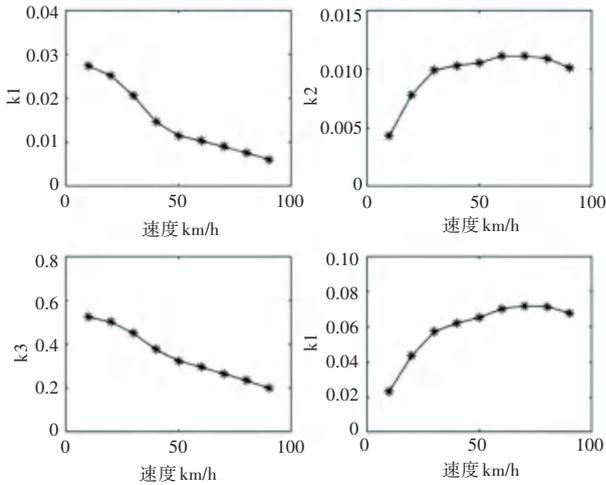


图7 控制增益图

Fig. 7 Control gain diagram

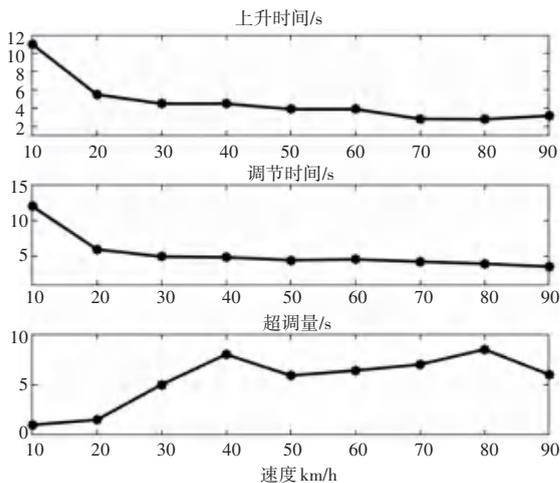


图8 上升时间及超调量统计图

Fig. 8 Rise-time and overshoot statistic chart



图9 搅拌车测试图

Fig. 9 Mixer test diagram

表3 自适应巡航测试工况表

Tab. 3 ACC test conditions table

序号	测试工况	车速 km/h		横向误差
		主车	目标车	
1	目标车辆静止	60	0	
2	目标车辆低速	60	30	
3	目标车辆减速	60	减速度 3 m/s^2	$-0.26 \sim 0.3 \text{ m}$
4	50%横向重叠	60	60	
5	弯道工况	60	30	

3 结束语

以车辆动力学模型的横向控制算法(LQR),综合考虑了路面曲率和道路坡度的前馈补偿,经仿真分析和搅拌车实车验证,其横向误差较小且无明显超调,适应于搅拌车的工作场景,能够较好地兼顾搅拌车的行驶稳定性和乘坐舒适性。但该算法仍存在一些不足,需进一步提高算法的鲁棒性;同时算法需经过进一步的路试来验证算法的兼容性。

参考文献

[1] 蔡英风, 臧勇, 孙晓强, 等. 自动驾驶汽车横向可拓预瞄切换控制系统研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(9): 1032-1039.
 [2] 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.
 [3] 无人情报局. 无人车横向控制概述[DB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/PIPo0swOgCng02QhK5GDrg>, 2020-10-27.
 [4] 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.
 [5] 冀杰. 基于自动驾驶系统的车辆纵横向运动综合控制研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院, 2010.
 [6] 郭景华. 视觉导航式智能车辆横向与纵向控制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
 [7] 贺广宇. 基于LQR的列车精确停车控制算法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009.