



引用格式:陆晨,黄立新,朱建柳. 基于 Simulink/Carsim 的轮式移动机器人的联合仿真及其横向稳定性研究[J]. 轻工学报,2019,34(5):88-95.

中图分类号:TP224 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2019.05.012

文章编号:2096-1553(2019)05-0088-08

基于 Simulink/Carsim 的轮式移动机器人的联合仿真及其横向稳定性研究

Co-simulation and lateral stability study of wheeled mobile robot based on Simulink/Carsim

陆晨¹,黄立新¹,朱建柳²

LU Chen¹,HUANG Lixin¹,ZHU Jianliu²

1. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201620;

2. 上海交通职业技术学院,上海 200431

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Communications Polytechnic College, Shanghai 200431, China

关键词:

Simulink/Carsim 联合仿真;PID 闭环控制系统;双移线试验;稳定性

Key words:

Simulink/Carsim co-simulation;PID closed-loop control system;double shift line test;stability

摘要:针对轮式移动机器人横向稳定性能较差的问题,搭建 Simulink 电机模型与车轮转向模型,利用自带的 PID 闭环控制系统实现实际车速和车轮转角自由调节,根据 Carsim 和 Simulink 的接口参数设置实现轮式移动机器人传动系统模型与电机模型和转向模型的信号传递,进而实现轮式移动机器人 Simulink/Carsim 联合仿真. 双移线试验结果表明,联合仿真下的轮式移动机器人横向稳定性高于传统移动机器人.

收稿日期:2019-03-28

作者简介:陆晨(1995—),男,江苏省无锡市人,上海工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为机器人技术.

通信作者:黄立新(1963—),女,上海市人,上海工程技术大学教授,博士,主要研究方向为机器人技术.

Abstract: Aiming at the problem of poor lateral stability of wheeled mobile robots, the Simulink engine model and wheel steering model were built, and the actual speed and wheel angle were freely adjusted by the built-in PID closed-loop control system. According to the interface parameters of Carsim and Simulink, the signal transmission of the wheeled mobile robot transmission system model, the engine model and the steering model was implemented. The Simulink/Carsim joint simulation of the wheeled mobile robot was realized. The double shift line test results showed that the lateral stability of the wheeled mobile robot under joint simulation was higher than that of the traditional mobile robot.

0 引言

1962 年第一台工业机器人 Unimate 的诞生拉开了机器人时代的帷幕^[1-2]. 移动机器人是机器人技术的重要进展,能通过各种传感器感知其内、外部状态,代替人类完成特定任务^[3]. 移动机器人具有移动灵活、结构简单、控制稳定等优点^[4],在物流、救灾、探测、建筑、采矿等领域应用广泛,是现代制造企业的重要设备,为工业的柔性化和高效化提供了重要支撑^[5];而现代工业日新月异的发展也对移动机器人提出了更高的性能要求. 如何获得更稳定的控制系统和更好的稳定性能,成为业界对未来机器人关注的热点.

为提高移动机器人的稳定性能,学者们对其进行了大量研究^[6-10]. S. Y. Xia 等^[6]利用链式法则建立轮式仿人机器人动力学模型,通过 Matlab 对其在 3 种不同情况下的移动稳定性能进行仿真研究,并对其仿真结果的参数进行优化. 马玲等^[7]提出一种移动机器人位置 PID 反馈控制系统,搭建两轮移动机器人动力学模型,优化传统 PID 控制算法,修正左右两轮的反馈增量,运用 Matlab 软件对移动机器人进行轨迹跟踪误差仿真,提高了移动机器人的移动稳定性能. 楼巍等^[8]提出一种模糊控制系统,并引入基于模糊系统的轨迹控制算法,通过 Matlab 进行仿真验证,提高了移动机器人的移动稳定性能. 以上研究主要是针对移动稳定性能,而横向稳定性能的研究相对较少. 轮式移动机器人在执行任务时,由于路况复杂、干扰因素太多,会

导致其运动轨迹、速度变化较大^[9],此时若其横向稳定性能较差,很容易出现侧翻危险. 相对于链式法则、模糊控制系统等建模复杂、算法难度较大的技术方法,直接利用 Carsim 内部自带轮式移动机器人模型和 Simulink 自带模块化的 PID 控制系统,可免去建立移动机器人模型和 PID 控制系统的繁琐过程. 因此,本文拟基于 Simulink/Carsim 建立轮式移动机器人联合仿真动力学模型,引入 PID 闭环控制系统,以期优化轮式移动机器人的横向稳定性能.

1 轮式移动机器人联合仿真模型的建立

本文基于 Simulink 搭建轮式移动机器人电机模型与车轮转向模型,引入 PID 闭环控制系统,无需人为操纵,移动机器人根据前方摄像头探测得出的目标节气门开度和目标车轮转角来控制其自身的节气门开度、车速和车轮转角. 采用 Carsim 建立轮式移动机器人模型,而后利用接口将其与 Simulink 的电机模型和车轮转向模型连接,建立轮式移动机器人联合仿真模型.

1.1 Simulink 电机模型

由基尔霍夫电压定律可得,单个电机定子各项绕组的电压平衡方程^[11-12]为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_A & L_{AH} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_n \\ u_n \\ u_n \end{bmatrix}$$

其中, u_A, u_B, u_C 为三相定子电压; R_A, R_B, R_C 为三相定子相电阻; i_A, i_B, i_C 为三相定子相电流; L_A, L_B, L_C 为三相定子自感; $L_{AB}, L_{AC}, L_{BA}, L_{BC}, L_{CA}, L_{CB}$ 为三相定子互感; e_A, e_B, e_C 为三相定子电动势.

该电机三相定子绕组采用星形连接, 无中线, 因此有

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

$$u_n = \frac{u_A + u_B + u_C}{3} - \frac{e_A + e_B + e_C}{3}$$

$$L_A = L_B = L_C = L$$

$$L_{AB} = L_{AC} = L_{BA} = L_{BC} = L_{CA} = L_{CB} = M$$

单个电机电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega}$$

动力学方程为

$$T_e = T_L + B\Omega + J \frac{d\Omega}{dt}$$

其中, T_e 为电磁转矩, ω 为转子的电角速度, T_L 为负载转矩, B 为阻尼系数, Ω 为转子的机械角速度, J 为转子的转动惯量.

将 PID 控制系统^[13] 引入 Simulink 电机模型, PID 闭环电机控制原理如图 1 所示. 其主要工作原理是: 将依据前方摄像头探测的实际情况(例如, 遇到障碍物需减少节气门开度; 或前方路况良好, 适当增加目标节气门开度等) 计算出的目标节气门开度与实际节气门开度的差值输入 PID 控制系统, 加上原实际节气门开度, PID 控制系统输出最终节气门开度, 即当前实际节气门开度, 将其与目标节气门开度的差值再输入 PID 控制器, 如此循环, 形成闭环控制系统. 将最终输出的节气门开度加至轮式移动机器人车轮, 从而实现自由调节实际车速^[14]. 根据 PID 闭环电机控制的工作原理所搭建的 PID 电机闭环控制系统模型如图 2 所示, Simulink 电机模型如图 3 所示. 将电机模型最终输出的节气门开度加至 Carsim 模型.

1.2 Simulink 车轮转向模型

将 PID 转向控制系统加入 Simulink 车轮转向模型, PID 闭环转向控制原理如图 4 所示. 其主要工作原理是: 将前面摄像头探测的实际情

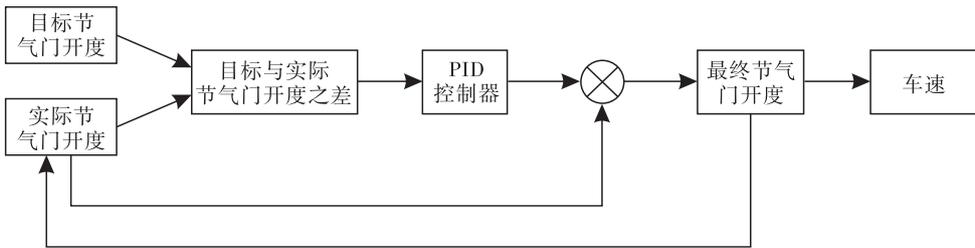


图 1 PID 闭环电机控制原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PID closed-loop motor control principle

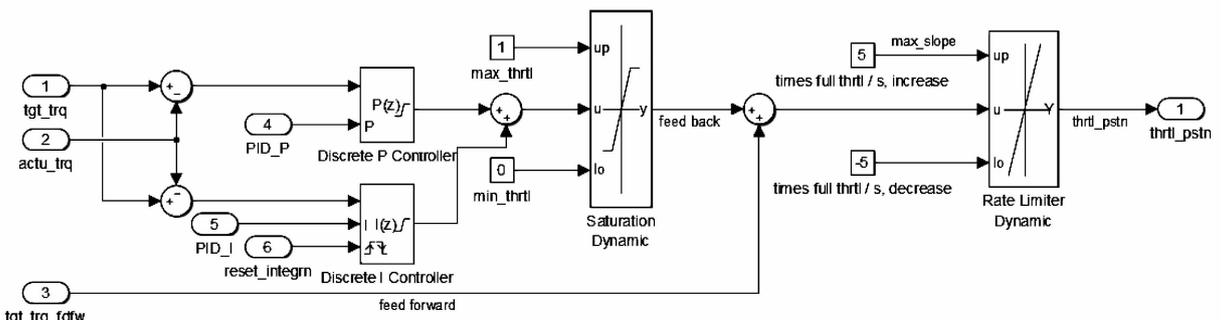


图 2 PID 电机闭环控制系统模型仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of PID motor closed-loop control system model

况(例如直道进入弯道行驶、弯道进入直道行驶或者在曲率不一的弯道间切换)计算得出的纵向预瞄距离对比横向预瞄距离,由前后纵向预瞄距离形成左右横向预瞄距离补偿,输入至 PID 控制系统,加上原目标转角,形成最终车轮转角.由车轮实际转角得出的横向预瞄距离再次与纵向预瞄距离对比,形成预瞄距离补偿输入至 PID 控制器,如此循环,实时调节车轮转角,形成闭环控制系统.最终输出的车轮转角加至轮式移动机器人车轮,从而控制横向稳定性^[15].根据 PID 闭环转向控制的工作原理而搭建的 PID 车轮转向控制模型如图 5 所示,将车轮转向模型最终输出的实际转角加至 Carsim 模型.

1.3 Carsim 传动系统模型

Carsim 的传动系统结构如图 6 所示,在进行传动系统建模时,将 Carsim 中几个部件用 Simulink 电机模型替换,以精简发动机到车轮之

间的大部分部件,构建的轮式移动机器人传动系统结构如图 7 所示.将发动机输出的节气门开度信号和 4 个半轴转速信号直接发至 Simulink 电机模型,最终通过电机模型处理后,把相应的节气门开度、车轮转角输出到 4 个车轮上.

1.4 Simulink 电机、转向模型与 Carsim 模型接口

根据电机性能,以及 Carsim 和 Simulink 接口参数的输入输出设置,实现轮式移动机器人传动系统模型与电机模型的信号传递,最后通过电机模型将转矩输出到 4 个车轮上.

参考某轮式移动机器人的整体参数来搭建轮式移动机器人 Simulink/Carsim 联合仿真平台,主要参数为:外形长 5456 mm,宽 2387 mm,高 1757 mm,轴距 2360 mm,前轮距 1800 mm,后轮距 1805 mm,总质量 800 kg,前悬架为麦弗逊型,后悬架为拖曳臂型,前制动器为通风盘型,后制动器为鼓型,轮胎规格 235/80/R16,前

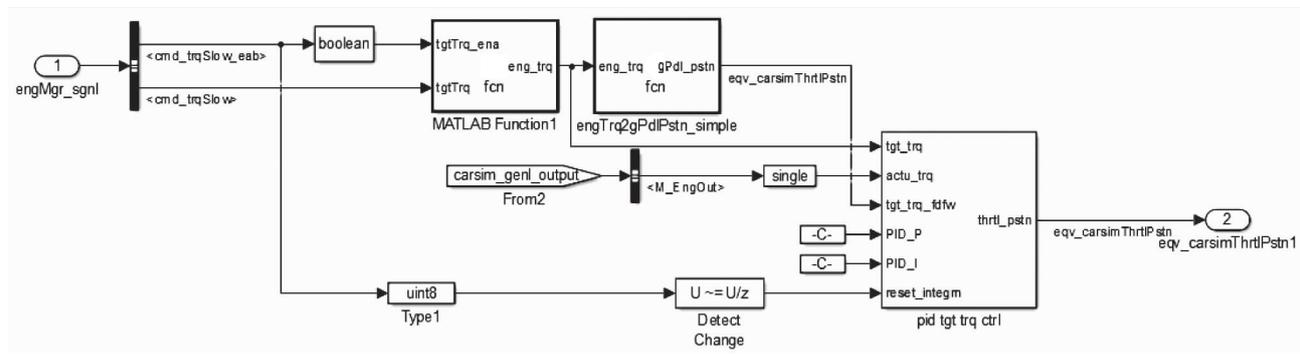


图 3 Simulink 电机模型仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of simulink motor model

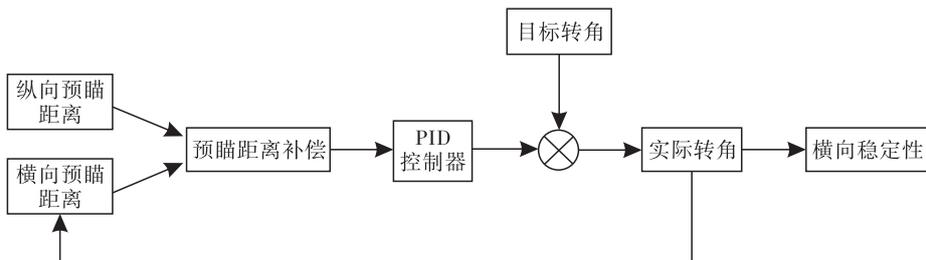


图 4 PID 闭环转向控制原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PID closed-loop steering control principle

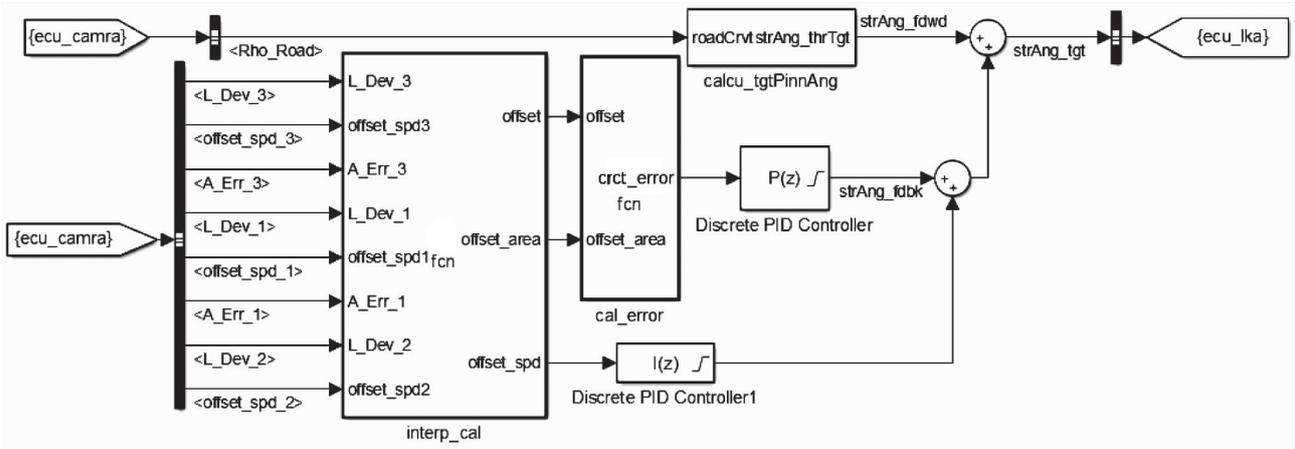


图5 Simulink 车轮转向模型仿真图

Fig.5 Simulation diagram of simulink wheel steering model

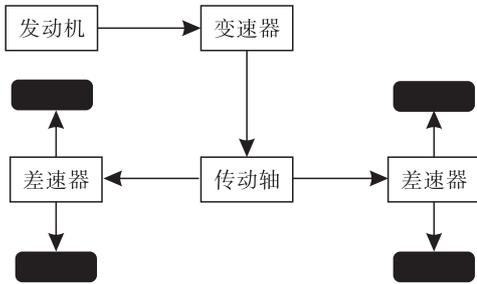


图6 Carsim 的传动系统结构

Fig.6 The drive train structure of Carsim

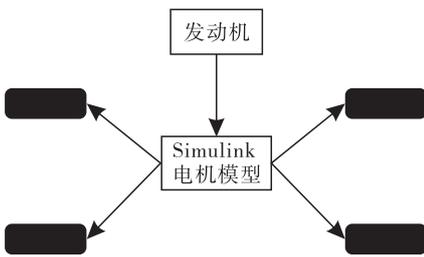


图7 轮式移动机器人传动系统结构

Fig.7 Wheeled mobile robot transmission system structure

设置 Simulink 模型输入输出变量参数^[16],如表 1 所示. 在 Carsim 主界面的 run control with simulink 界面中选择 send to simulink 选项,可以把 Carsim 的参数变量发送至 Simulink 模型. Simulink/Carsim 联合仿真模型示意图如图 8 所示.

表1 Simulink 与 Carsim 联合仿真
输入/输出主要参数变量

Table 1 Simulink/Carsim co-simulation
input/output main parameter variables

输入/输出	变量参数名称	备注
输入	IMP_THROTTLE	节气门开度
	IMP_STEER_ANGLE	车轮转角
输出	L_DRV_1	横向预瞄距离 1
	L_DRV_2	横向预瞄距离 2
	L_DRV_3	横向预瞄距离 3
	lateral acceleration	侧向加速度
	roll	质心侧倾角
	longitudinal speed	纵向速度
	Lateral distance to path	侧向偏移量
	yaw rate	横摆角速度

置前驱驱动,最大功率 35 kW,最大扭矩 165 N·m. 将其中的整体规格参数、悬架参数、轮胎参数和驱动形式输入至 Carsim 中的传动模型即可.

在 Carsim 主界面的 run control with simulink 界面中选择 models: Simulink, 在内部界面

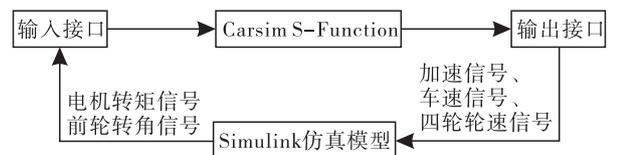


图8 Carsim/Simulink 联合仿真模型示意图
Fig.8 Schematic diagram of Simulink/Carsim co-simulation model

2 Simulink/Carsim 联合仿真与结果分析

轮式移动机器人横向稳定性能试验包括鱼钩试验、麋鹿试验、双移线试验等。根据实际情况,选择双移线试验分别对本文提出的轮式移动机器人联合仿真模型和传统的 Carsim 自带轮式移动机器人模型进行对比测试,得出的纵向加速度、质心侧倾角、纵向速度、侧向偏移量和横摆角速度的大小能直接反映移动机器人的横向稳定性能。在 Carsim 的 Simulated Test Specifications 界面的 procedure 界面中设置双移线试验典型仿真工况,对搭建的模型进行联合仿真,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,两种轮式移动机器人模型在双移线试验工况下都能按照预定的车速完成仿真试验,二者的变化趋势基本一致,但 Simulink/Carsim 联合仿真模型的峰值一直低于传统 Carsim 自带轮式移动机器人仿真模型。这是由于加入 PID 控制后,移动机器人根据前方摄像头探测的实际情况得出的目标节气门开度与目标车轮转角来控制其自身的节气门开度、车速和车轮转角,尤其是在弯道的时候,联合仿真下的移动机器人的侧向加速度、质心侧倾角、纵向速度、侧向偏移量和横摆角速度都要比传统移动机器人小。因此在双移线试验下,基于联合仿真的轮式移动机器人在横向稳定性上要高于传统移动机器人。

3 结语

本文建立轮式移动机器人 Simulink 电机模型和转向模型,引入 PID 控制系统,无需人为操纵即可实现实际车速和车轮转角的自由调节。根据 Carsim 和 Simulink 的接口参数的输入输出设置来实现轮式移动机器人模型与电机模型和转向模型的信号传递,建立轮式移动机器人

联合仿真动力学模型。双移线试验工况仿真结果表明,该模型输出的侧向加速度、质心侧倾角、纵向速度、侧向偏移量、横摆角速度要比传统移动机器人模型的参数小,说明联合仿真下的轮式移动机器人的横向稳定性能高于传统移动机器人的横向稳定性。基于该仿真分析的移动机器人参数可以为后期优化轮式移动机器人的横向稳定性能提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,2013,36(7):963.
- [2] 谭松敏,卢迎彬,王丽佳,等. 分层特征移动机器人行人跟踪[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(9):1677.
- [3] 王国彪,陈殿生,陈科位,等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报,2015(13):27.
- [4] 张元亨,张森,普杰信,等. 未知负载轮式移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 火力与指挥控制,2018,43(3):30.
- [5] 张长勇,王兴财,步亚,等. 移动机器人搬运物料目标定位优化仿真[J]. 计算机仿真,2018,35(2):257.
- [6] XIA S Y, ZHAN Q, RAHMANI A. ZMP based motion stability analysis of a wheeled humanoid robot with bending torso[J]. Applied Mechanics and Materials,2016,851:497.
- [7] 马玲,牟彬瑞. 移动机器人运动轨迹控制算法研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2018(4):132.
- [8] 楼巍,陈磊,严利民. 基于模糊辨识的移动机器人轨迹控制算法的研究[J]. 仪表技术,2013(1):18.
- [9] 李蕾,刘建鹏. 采用改进神经网络 PID 控制的移动机器人轨迹追踪控制研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版),2019,40(1):68.
- [10] 陈建兵,向青青. 分布式驱动电动汽车 Simulink/Carsim 联合仿真平台的建立[J]. 机械科学与技术,2018,37(10):1496.

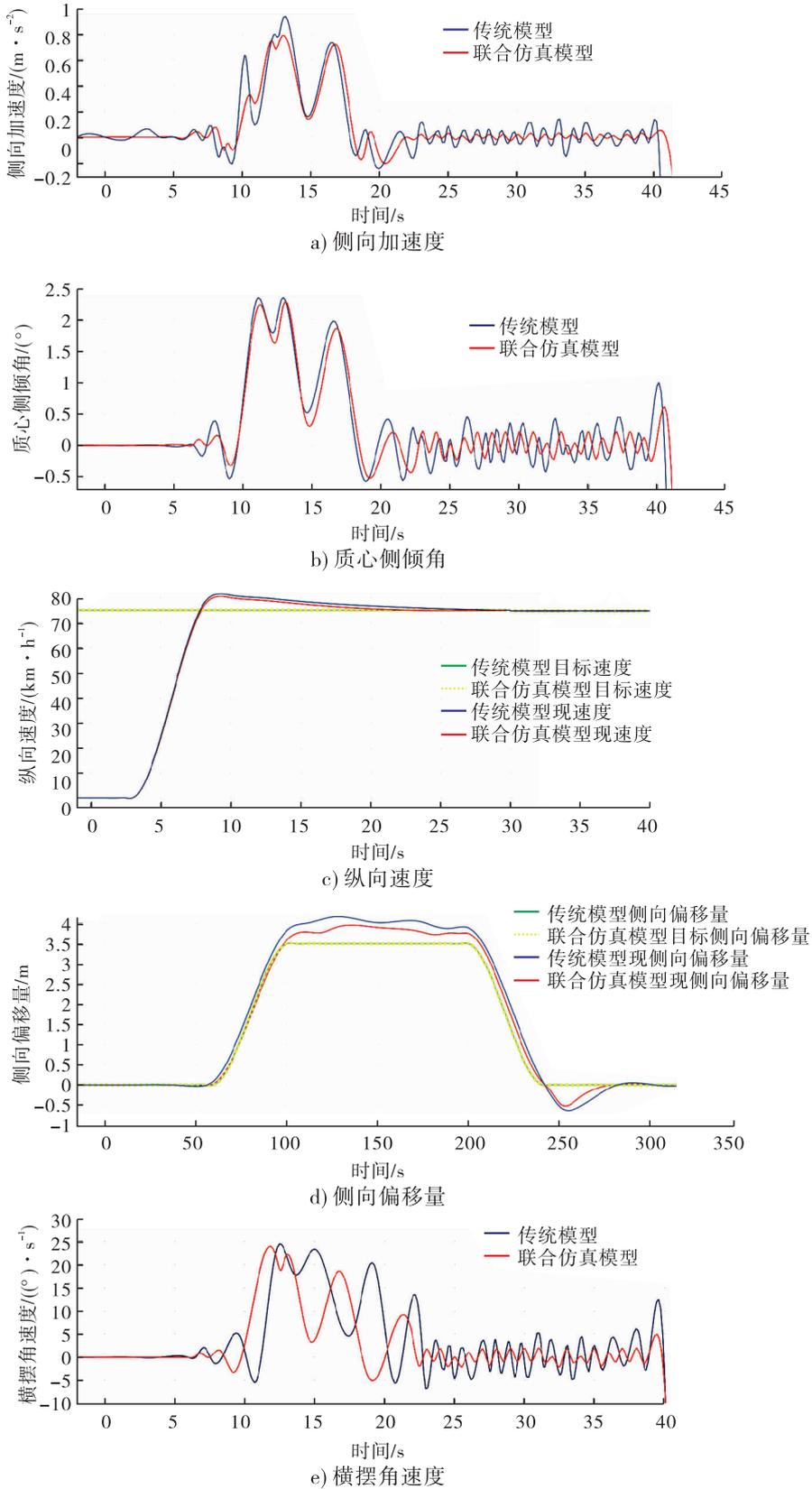


图9 双移线工况仿真结果

Fig.9 Simulation of double shift condition

- [11] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 88 - 90.
- [12] 张奎, 雷勇. 无刷直流电机智能 PID 控制系统建模与仿真[J]. 测控技术, 2015, 34(4): 81.
- [13] 李桢, 赵宏权. PID 调节概念及基本原理[J]. 科技信息(科学教研), 2007(29): 46.
- [14] 刘光星, 贺刚, 张毅. 模糊 PID 控制在电机调速系统中的应用[J]. 电子测试, 2019(2): 21.
- [15] 罗小丽, 范桂林. 无刷直流电机模糊 PI 自适应控制系统仿真研究[J]. 微电机, 2018, 51(12): 67.
- [16] DUMITRIU D N, CHIROIU V, MUNTEANU L. Car vertical dynamics simulations using both an in-house 7 DOF model simulator and Carsim commercial software[J]. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 2015, 77(1): 77.

本刊数字网络传播声明

本刊已许可中国知网, 万方数据资源系统, 维普网, 国家科技学术期刊开放平台, 博视网, 超星, 中国科技论文在线, 中教数据库, EBSCOhost, CA, Ulrichs, FSTA 等在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文. 其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付. 作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明.