

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202101003



平衡重式叉车满载急转工况下 横向稳定性控制

刘显贵¹, 杨坤全², 张福斌², 许超³

1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 漳州职业技术学院 汽车工程学院, 福建 漳州 363000;
3. 林德(中国)叉车有限公司, 福建 厦门 361009

摘要: 以提高平衡重式叉车满载紧急转向工况下的横向稳定性为目标, 结合叉车动力学特性, 采用 ADAMS 软件建立某型 3T 平衡重式叉车整车横向动力学模型. 设计一种基于模型预测算法的主动后轮转向控制器, 实现叉车的主动后轮转向控制; 然后, 基于 ADAMS 与 MATLAB/Simulink 进行联合仿真计算, 并根据标准 EN 16203:2014 进行实车稳定性试验. 结果表明: 所设计的主动后轮转向控制策略系统反应迅速, 能有效降低叉车急转工况下的横摆角速度和侧倾角, 大大提高叉车的横向稳定性; 叉车满载急转过程安全稳定, 横向稳定性动力学参数横向加速度和横摆角速度的最大值分别降低 16.47% 和 25%.

关键词: 平衡重式叉车; 横向稳定性; 模型预测控制算法; 急转工况; 动力学特性; 主动后轮转向控制

中图分类号: U 463.202; TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)02-0154-06

Lateral Stability Control of Counterbalanced Forklift Under Extreme Steering Condition

LIU Xiangui¹, YANG Kunquan², ZHANG Fubin², XU Chao³

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. School of Automobile Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China;
3. Linde(China)Forklift Truck, Xiamen 361009, China)

Abstract: In order to improve the lateral stability of the forklift under full load emergency steering condition, the model of a 3T counterbalanced forklift truck was established with forklift dynamics characteristics based on ADAMS. An active rear steering controller was designed base on the basic principle of model predictive control algorithm to control the rear steering of the forklift. The active control stability of the forklift truck was simulated with ADAMS and MATLAB, and tested according to the standard EN16203: 2012. The simulation and experimental results show that the active rear steering control strategy can effectively reduce the yaw rate and roll angle and improve the lateral stability of the forklift truck; the full load emergency steering is stable and safe, and the maximum values of the lateral stability dynamics parameters; lateral acceleration and yaw rate are reduced by 16.47% and 25% respectively.

Keywords: counterbalanced forklift; lateral dynamic stability; model predictive control algorithm; sharp turning conditions; dynamic characteristics; active rear wheel steering control

收稿日期: 2021-01-06

通信作者: 刘显贵(1973-),男,教授,博士,主要从事车辆主动安全控制及排放测试技术的研究. E-mail:2010110819@xmut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51641507, 51978592); 福建省自然科学基金资助项目(2019J01861)

近年来,国内外学者通过不同控制策略对车辆动力学系统进行主动控制,大大提升了车辆行驶时的主动安全性能^[1-7].然而,对平衡重式叉车抗侧翻性能,尤其是在其满载急转工况下的横向失稳侧倾这类安全问题的研究鲜有报道,但显然意义重大.在国内,如夏光等^[8-10]提出了一、二级防侧倾控制策略,从叉车底盘系统非线性动力学角度,采用神经网络逆系统方法设计了直接横摆力矩控制和转向系统的协同控制,仿真结果验证了控制策略的有效性;刘显贵等^[11]建立了叉车转向动力学数学模型,基于叉车实际作业状态提出了主动后轮转向的控制策略,并进行了仿真计算和实车试验,极大提升了叉车了转向时的动态稳定性.在国外,Lemerle 等^[12]通过车辆驾驶模拟器设备和实车试验两种方式,研究了平衡重式叉车不同结构参数和行驶速度下转向作业时其表征动态稳定性的动力学参数的变化规律,揭示了平衡重式叉车横向动态失稳机理.以上研究对于叉车横向动态稳定性研究具有一定的参考价值.

模型预测控制算法是一种对模型精度要求不高,但同样能实现高质量控制的算法.它通过输出的测量值与模型的预估值进行比较,实现反复在线优化,得出模型的预测误差,再利用模型预测误差来对模型的预测值进行修正.该算法尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制^[13].本文针对某型 3T 平衡重式叉车,基于 ADAMS 软件建立了叉车整车动力学模型;针对平衡重式叉车在满载急转工况下容易发生侧倾事故问题,设计一种基于模型预测控制算法的叉车主动后轮转向控制策略;最后,基于 ADAMS 软件与 MATLAB/Simulink 进行了联合仿真计算.

1 叉车动力学模型建立

以平衡重式叉车的结构参数为基础,在 ADAMS/View 环境中创建整车动力学模型.叉车建模时各主要参数,如表 1 所示.

表 1 平衡重式叉车整车及转向系统参数表

Tab. 1 Parameter table of counterbalanced forklift truck and steering system

参数	数值	参数	数值	参数	数值
整备质量/kg	4 529	空载前轴荷/kg	2 002	转向节臂长/mm	129
后轮轮距/mm	897	空载后轴荷/kg	2 527	前后轴距/mm	1 686
前轮轮距/mm	1 046	满载后轴荷/kg	1 003	转向主销距/mm	689
转向节初始角/(°)	59.7	满载前轴荷/kg	6 526	转向连杆长/mm	131
质心中心距/mm	496	转向油缸偏距/mm	79.2		

为了研究叉车整车满载急转工况下横向稳定性,需要针对叉车整车模型进行适当简化.叉车整车质量由相同质心位置及质心前后轴质量来代替,车身主要部件由 UG 转化格式后导入到 ADAMS 软件中进行修改.整车模型的转向系统简化为包含转向柱、液压油缸、转向桥、连杆、转向节臂等六连杆转向机构,从中选择 6 个连接点用于创建转向系统模型.

各连接点的坐标,如表 2 所示.叉车 ADAMS 横向动力学模型,如图 1 所示.

表 2 转向机构连接点坐标

Tab. 2 Steering system connecting point coordinates

连接点	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
1	1 686.000	-383.119	0
2	1 685.093	-351.068	0
3	1 733.236	-242.893	0
4	1 733.236	242.893	0
5	1 385.093	351.068	0
6	1 686.000	383.119	0



图 1 叉车 ADAMS 横向动力学模型

Fig. 1 ADAMS steering dynamics model of forklift truck

2 急转工况下的转向控制器设计

采用模型预测算法^[13,15],设计了叉车满载急转工况下的主动后轮转向控制器.以叉车急转过程中横摆角速度和侧倾角作为输出变量,以叉车实际运行路径与控制的安全路径的偏差作为控制量,并反复

在线优化,对叉车进行主动后轮转向控制,以提高叉车横向稳定性和控制的精确性.

1) 建立目标函数,有

$$P(\Delta U(t), \xi(t), u(t-1)) = \sum_{i=1}^{N_1} \|\eta_1(t+i/t) - \eta_2(t+i/t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_2-1} \|\Delta(t+i/t)\|_R^2 + \rho \epsilon^2. \quad (1)$$

式(1)中: ΔU 为叉车偏移控制增量; u 为叉车偏移控制量; ζ 为叉车质心偏移航向角; ρ 为松弛系数; ϵ 为偏差.

基于非线性约束二次规划方法构建二次规划矩阵,然后在 Matlab 求解器中求解.模型预测算法能够进行反复在线优化,故将控制单位时间内叉车实际运行路径与控制的安全路径的偏差定义为

$$\begin{cases} E(t) = \varphi_i \xi(i/t) - Y(t), \\ Y(t) = [\eta_2(t+1/t), \eta_2(t+2/t), \dots, \eta_2(t+p/t)]. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $E(t)$ 为横向偏差; $Y(t)$ 为纵向偏差; φ_i 为叉车某时刻横摆角.

因此,优化后的目标函数为

$$P(\Delta U(t), \xi(t), u(t-1)) = [\Delta U(t)^T, \epsilon]^T \mathbf{H}_i [\Delta U(t)^T, \epsilon]^T + \mathbf{M}_i [\Delta U(t)^T, \epsilon]^T + \mathbf{L}_i. \quad (3)$$

式(3)中: \mathbf{H}_i 为正定矩阵, $\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} \theta_i^T Q_c \theta_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \rho \end{bmatrix}$,其中 Q_c 为对角矩阵,其主对角线上元素均为 Q ,其他元素均为 0;其中 $\mathbf{M}_i = [2\mathbf{E}_i^T Q_c \theta_i \quad \mathbf{0}]$, $\mathbf{L}_i = \mathbf{E}_i^T Q_c \mathbf{E}_i$.

通过以上分析,基于模型预测算法的叉车在满载急转工况下,主动后轮转向控制器在如下控制量的作用下,单位控制时间内要满足:

$$\min_{(\Delta U, \epsilon)} \sum_{i=1}^{N_1} \|\eta_1(t+i/t) - \eta_2(t+i/t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_2-1} \|\Delta(t+i/t)\|_R^2 + \rho \epsilon^2, \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max}, \\ U_{\min} \leq A\Delta U + U \leq U_{\max}, \\ y_{1,\min} \leq y_1 \leq y_{1,\max}, \\ y_{2,\min} - \epsilon \leq y_2 \leq y_{2,\max} - \epsilon, \\ \epsilon > 0. \end{cases} \quad (5)$$

在上式中, A 表示元素为 1,维度为预测时域步长的单位矩阵与维度为控制时域步长的方阵的 Kronecker 积.

这样系统会在下一个单位时间内重复满足上述求解的过程,如此循环,最终实现对叉车急转转向工况下跟踪控制.

2) 叉车在急转工况下,主动后轮转向控制系统动力学有如下 3 个约束条件.

- 叉车附着条件, $\sqrt{a_1^2 + a_2^2} \leq \varphi g$;
- 轮胎小侧偏角线性条件, $-2.5^\circ \leq \alpha_r \leq 2.5^\circ$;
- 叉车失稳质心侧偏角临界条件, $\beta = [-12^\circ, 12^\circ]$.

3 仿真计算及结果分析

为了验证模型预测控制策略在叉车满载急转工况下的有效性,基于车辆系统动力学仿真软件 ADAMS 与控制软件 MATLAB/Simulink 建了叉车联合仿真模型并进行联合仿真计算,如图 2 所示.

由于叉车低速行驶时,急转工况下动力学状态变化影响较小,故文中只以叉车高速行驶为仿真条件.本款叉车最大行驶速度为 $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,为了更好地分析叉车基于满载急转向工况下横向稳定性控制的效果,分析控制前后的叉车横向稳定性动力学参数变化,选取行驶速度 $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 为仿真速度.整车横摆角速度和侧倾角变化仿真结果,如图 3 所示.控制前后均方根值比较,如表 3 所示.图 3,表 3 中: ω 为横摆角速度; a 横向加速度; t 为时间; γ 下降变化率.

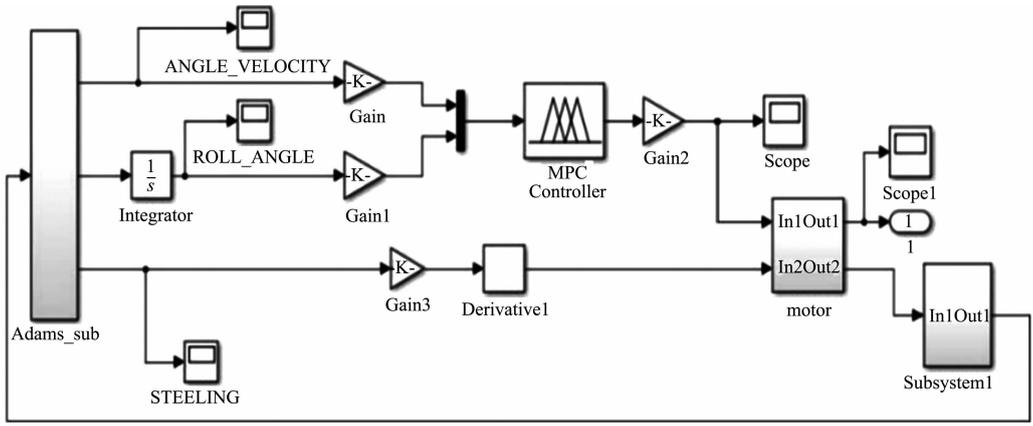


图 2 叉车 ADAMS/MATLAB 联合仿真模型

Fig. 2 ADAMS/MATLAB simulation model of forklift truck

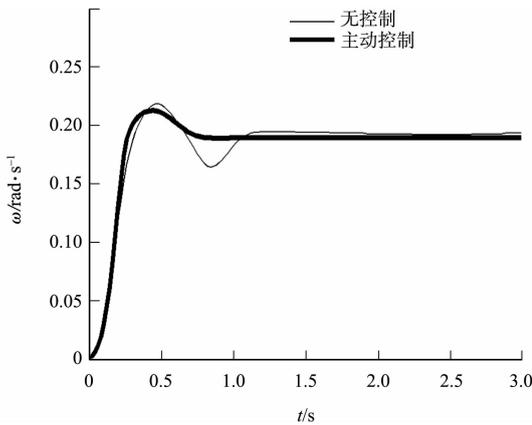


图 3 叉车横摆角速度变化仿真结果

Fig. 3 Simulation results of forklift yaw rate changes

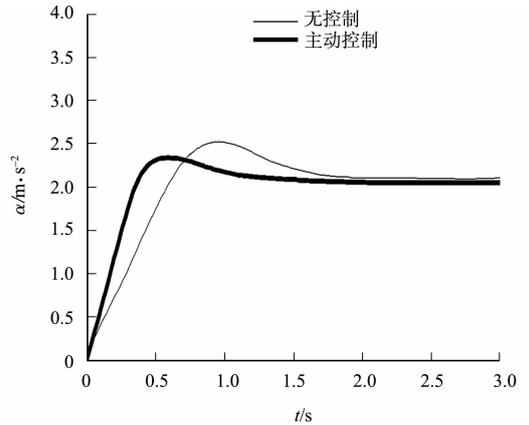


图 4 叉车横向加速度变化仿真结果

Fig. 4 Simulation results of forklift lateral acceleration changes

表 3 控制前后均方根值比较

Tab. 3 Comparison of root mean square values before and after control

动力学参数	无控制	模型预测控制	$\gamma/\%$
$\omega/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	0.024 1	0.019 0	21.16
$a_m \cdot \text{s}^{-2}$	0.337 6	0.228 1	32.55

由图 3,4 及表 3 可知:在满载紧急转向工况下,设计的主动控制策略能够使得叉车较快到达稳定状态,整车动力学响应时间大大缩短,有效地提高了叉车在满载急转工况下的横向稳定性.此外,在不同运行速度下叉车横摆角速度最大值相差不大,在 $0.65 \sim 7.10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,横摆角速度和侧倾角幅值都有大幅降低.

4 实车试验分析

对试验平衡重式叉车进行后轮转向改装,并设计制造试验辅助稳定性工装;然后,基于标准 EN16203:2014 进行动态稳定性试验^[14].试验设备有速度传感器、陀螺仪、数据采集仪.实验时,叉车满载为 3 t,行驶速度为 $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,方向盘为 90° 阶跃输入.试验工装连接和安装好的试验叉车,分别如图 5,6 所示.

按照叉车稳定性法规的测试工况运行,将试验采集到的叉车横摆角速度和侧向加速度数据进行均方根值处理,如表 3 所示.叉车控制前后的部分横摆角速度和侧向加速度试验曲线,如图 7,8 所示.图 7,8 中: ω 为横摆角速度; a 为侧向加速度; t 为时间.

由图 7,8 可知:主动转向控制后叉车侧向角速度和横摆加速度都有一定程度的降低.侧向加速度

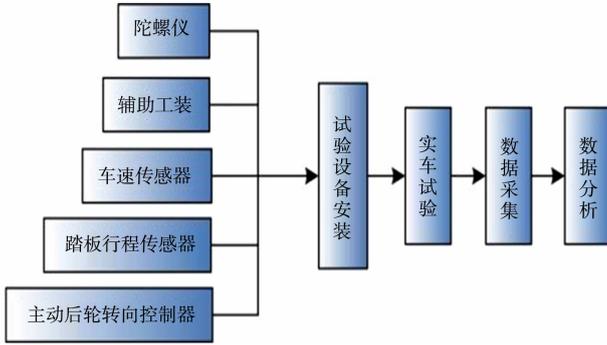


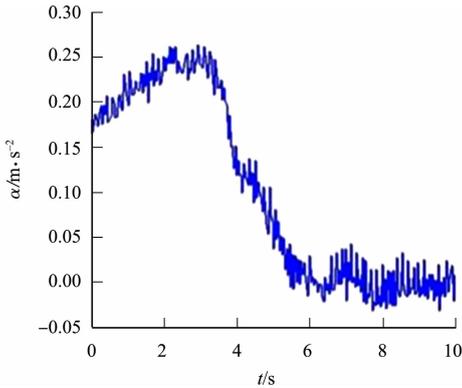
图5 试验工装连接图

Fig. 5 Test tool connection diagram

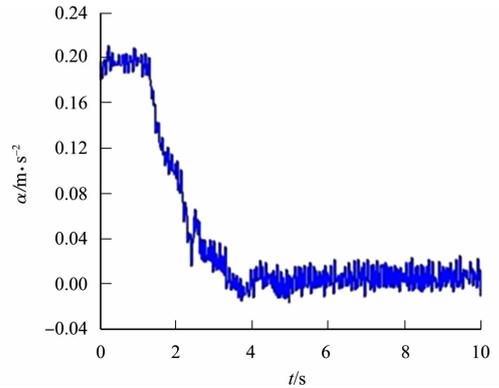


图6 试验叉车

Fig. 6 Test forklift truck



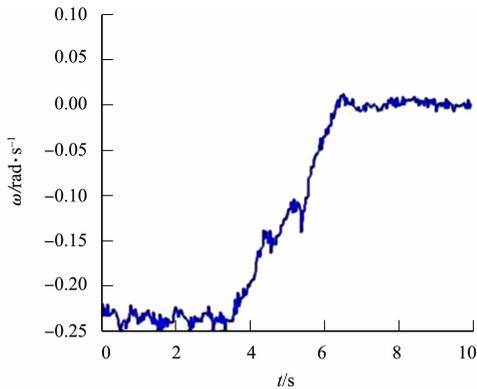
(a) 控制前



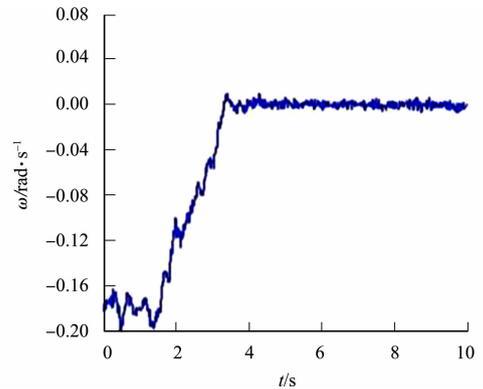
(b) 控制后

图7 叉车控制前后的横向加速度变化

Fig. 7 Change of lateral acceleration before and after forklift control



(a) 控制前



(b) 控制后

图8 叉车控制前后的横摆角速度变化

Fig. 8 Change of yaw rate before and after forklift control

最大值由 $0.255 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 降为 $0.213 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，降低了 16.47%，反应时间减少了 53%；横摆角速度绝对值最大值由 $0.252 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 降为 $0.189 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ，降低了 25%，反应时间减少了 58%。试验结果说明，基于模型预测的主动后轮转向的控制策略能有效地降低叉车横摆角速度和侧向加速度，提高叉车的横向稳定性。

5 结论

1) 设计了基于模型预测算法的叉车主动后轮转向控制策略，并建立 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真模型。仿真工况选取了 3 种不同速度下的满载急转工况，结果表明，叉车主动后轮转向控制策略能够有效提高主动控制后叉车的横向稳定性。

- 2) 基于标准 EN16203:2014 的叉车动态稳定性的实车试验,结果表明,基于模型预测算法的叉车主动后轮转向控制策略能够大大改善叉车满载急转工况下的横向稳定性,也验证了仿真结果的正确性;
- 3) 通过主动控制技术是改善叉车的侧翻安全性的一种行之有效的解决方案.

参考文献:

- [1] 刘显贵,郑从兴,林勇明.基于遗传算法的汽车底盘系统协调控制优化[J].机械设计与制造,2015(3):47-50. DOI: 10.19356/CNKI.1001-3997.2015.03.012.
- [2] 解云,徐彬.基于自适应障碍物识别的汽车主动防撞系统[J].机械设计与制造,2018(4):165-171. DOI:10.19356/CNKI.1001-3997.2018.04.048.
- [3] 袁朝春,王桐,何友国,等.传感器感知盲区条件下智能汽车主动制动系统控制研究[J].农业机械学报,2020,51(2):363-373. DOI:10.6041/JISSN.1000-1298.202002.040.
- [4] 王其东,王金波,陈无畏,等.基于汽车行驶安全边界的 EPS 与 ESP 协调控制策略[J].机械工程学报,2016,52(6):99-107. DOI:10.3901/JME.2016.06.099.
- [5] 张宝珍,阿米尔,谢晖.基于主动脉冲后轮转向的侧翻稳定性仿真与试验[J].汽车工程,2016,38(7):857-864.856. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2016.07.011.
- [6] 金智林,严正华.基于二次预测型横向载荷转移率的汽车侧翻预警研究[J].中国机械工程,2019,30(15):1790-1795. DOI. 10.3969/ISSN.1004-132X.2019.15.004.
- [7] 彭文正,敖银辉,邹晨祺,等.主动后轮转向及分布式驱动车辆协同控制研究[J].机械科学与技术,2020,39(2):207-213. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20190101.
- [8] 夏光,杜克,谢海,等.基于侧倾分级的叉车横向稳定性变论域模糊控制[J].机械工程学报,2019,55(12):157-167. DOI:10.3901/JME.2019.12.157.
- [9] 夏光,陈无畏,赵林峰,等.平衡重式叉车底盘小波网络动态逆内模控制[J].机械工程学报.2015(18):126-135. DOI:10.3901/JME.2015.18.126.
- [10] 夏光,张洋,唐希雯,等.平衡重式叉车防侧翻分层控制研究[J].中国机械工程,2019,30(17):2066-2075. DOI:10.3969/ISSN.1004-132X.2019.17.008.
- [11] 刘显贵,姜梦,平许超,等.平衡重叉车横向动态稳定安全性控制[J].安全与环境学报,2018(5):1823-1828. DOI: 10.13637/J. ISSN.1009-6094.2018.05.030.
- [12] LEMERLE P, HOPNER O, REBELLE J. Dynamic stability of forklift trucks in cornering situations: parametrical analysis using a driving simulator [J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49 (10): 1673-1693. DOI: 10.1080/00423114.2010.532557.
- [13] 刘显贵.汽车主动悬架与电动助力转向的集成预测控制仿真[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(增刊2):1826-1830. DOI:10.16511/J. CNKI. QHDXXB.2007.2.005.
- [14] 刘显贵,姜梦平,侯攀,等.转向制动工况下平衡重叉车横向稳定性控制[J].机械科学与技术,2018,37(10):1506-1511. DOI:10.13433/J. CNKI.1003-8728.20180058.
- [15] 陈虹.模型预测控制[M].北京:化学工业出版社,2013.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:崔长彩)