

叉车自动变速器控制系统的设计

张炳力, 胡福建, 董彦文

(合肥工业大学机械与汽车学院, 合肥 230009)

摘要:通过对叉车发动机与液力变矩器的参数进行匹配计算, 建立基于车速和油门开度的基本动力性换挡规律; 并利用油泵压力作为修正参数建立不同载荷的换挡规律; 对于坡道工况, 采用模糊修正策略, 对换挡规律输出的理论挡位进行修正, 并在实车试验中验证了控制方法的正确性。试验结果表明, 基于油泵建立的修正策略, 在载荷增加时能够使换挡点车速延迟 2~5 km/h, 使车辆获得最佳的动力性; 并且在坡道上始终以 1 挡运行, 防止叉车溜坡。该研究丰富了叉车控制理论, 并给出了一种实际可用的控制方法。

关键词: 变速器, 控制系统, 设计, 换挡规律, 油泵压力, 坡道控制, 快速原型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.012

中图分类号: U463.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0066-07

张炳力, 胡福建, 董彦文. 叉车自动变速器控制系统的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 66-72.

Zhang Bingli, Hu Fujian, Dong Yanwen. Design of automatic transmission control system used in forklift truck[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 66-72. (in Chinese with English abstract)

0 引言

叉车采用自动变速技术对减轻驾驶员的劳动程度、提高车辆动力性和减小油耗有重大作用。国内外叉车传动技术是在传动系统中使用多挡位变速器, 同时结合先进的控制技术减轻驾驶员劳动强度。

目前使用的自动变速叉车多装配国外研发的自动变速器, 如合力 25 t 重载叉车自动变速器的控制器 APC70, 利用发动机转速进行控制, 坡道利用按钮给强制降挡信号。而针对叉车自动变速技术的研究文献很少, 很多研究的是装载机和工程车辆。关于工程车辆自动变速器的研究主要有: 淮阴工学院的基于实时工况的装载机智能换挡规律^[1], 介绍了基于油门开度、车速和油泵压力的三参数换挡规律; 吉林大学的工程车辆模糊自动换挡策略研究^[2], 介绍了根据工程车辆不同工况下对动力性和经济性的要求, 利用模糊控制建立智能模糊控制策略; 长安大学的基于模糊控制的工程车辆自动变速系统研究^[3], 介绍了基于实时参数的模糊控制策略, 从而减小油耗, 提高装载机效率。

虽然都从控制角度研究换挡过程, 利用模糊控制方法改善换挡控制策略, 但没有对叉车的坡道工况进行智能控制, 也没在实车上做试验验证。

1 动力性换挡规律

1.1 最佳动力性换挡规律

针对叉车自动控制技术的问题, 本文以某 10 t 叉车为

对象, 为获得良好的动力性, 以油泵压力修正基本换挡规律, 使换挡点随载荷变化而变化; 坡道工况, 采用模糊修正策略修正理论挡位, 使挡位保持 1 挡; 最终利用 dSPACE 模拟控制器完成叉车自动变速器控制系统快速原型试验。

表 1 动力性换挡点(车速)
Table 1 Power shift points(velocity)

油门/%	km·h ⁻¹					
	1 升 2	2 升 3	3 升 4	2 降 1	3 降 2	4 降 3
30	4.49	8.55	15.96	3.59	6.84	12.76
40	5.08	9.68	18.08	4.07	7.74	14.46
50	5.62	10.70	19.98	4.49	8.56	15.99
60	6.26	11.93	22.27	5.01	9.54	17.81
70	6.84	13.03	24.32	5.47	10.43	19.45
80	7.36	14.02	26.17	5.89	11.22	20.94
90	7.65	14.57	27.20	6.12	11.65	21.76
100	7.94	15.12	28.22	6.35	12.10	22.58

最佳动力性换挡规律是根据发动机与液力变矩器联合工作输出特性^[3], 计算各挡对应的驱动力^[4-6]。通过图解法^[4,7], 当相邻两挡驱动力相等时, 所对应的车速即为该挡位的最佳动力性换挡点, 如表 1 所示。根据动力性换挡点建立基本动力性换挡曲线^[8-9], 如图 1 a 所示。

1.2 修正换挡曲线

载荷变化可通过工作油泵压力变化反映, 因此本文引入油泵压力对换挡曲线进行修正^[10-12]。空载时油泵压力约为 2 MPa, 满载时约为 20 MPa, 根据油泵压力 p 将叉车分为空载, 半载, 满载 3 种工况。随载荷增加, 应延迟换挡, 延长叉车在高转矩下运动的时间, 从而获得更好的动力性。具体划分为: 1) 当 $0 \leq p \leq 5$ MPa 时, 叉车处于空载状态, 按基本换挡规律换挡; 2) 当 $5 < p \leq 15$ MPa 时, 叉车处于半载状态, 按修订的换挡规律换挡, 如图 1b 所示; 3) 当 $15 < p \leq 20$ MPa 时, 叉车处于满载状态, 按修订的换挡规律换挡, 如图 1b 所示。从修订后的换挡

收稿日期: 2011-06-15 修订日期: 2012-02-15

校企联合项目 项目代号: 2010-0822

作者简介: 张炳力 (1968-), 男, 安徽肥西人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 研究方向为电动汽车技术和汽车动力学及控制。合肥 合肥工业大学机械与汽车学院, 230009。Email: bingli_z@sina.com

规律曲线可以得到：随着载荷的增加，换挡点车速向后延迟 2~5 km/h，这样可使车辆重载时，延长低挡的运行时间，增加车辆在大驱动力的作用时间。

2 自动变速器控制系统模型

自动变速器工作原理是 TCU (transmission control unit,

自动变速器控制单元) 根据当前车辆运行状态信息进行判断，若符合换挡条件，则向执行机构发换挡信号，执行机构进行相应的动作实现自动换挡。

本文利用 Matlab/Simulink^[13-15]建立的自动变速器控制系统模型如图 2a 所示，主要由基本换挡控制模块，模糊修正模块，电磁阀模块 3 部分组成。

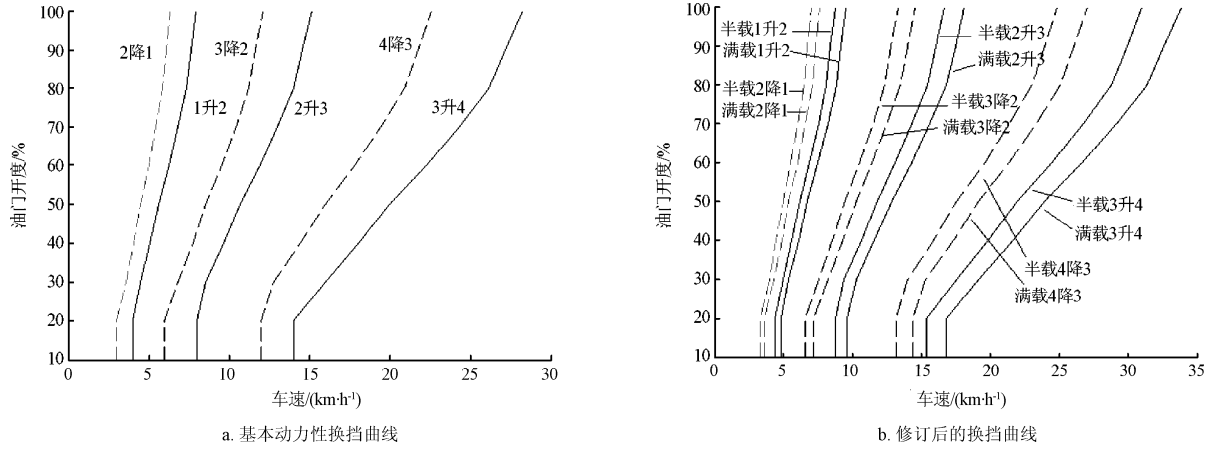


图 1 叉车换挡曲线
Fig.1 Shift curves of forklift truck

2.1 基本换挡控制模块

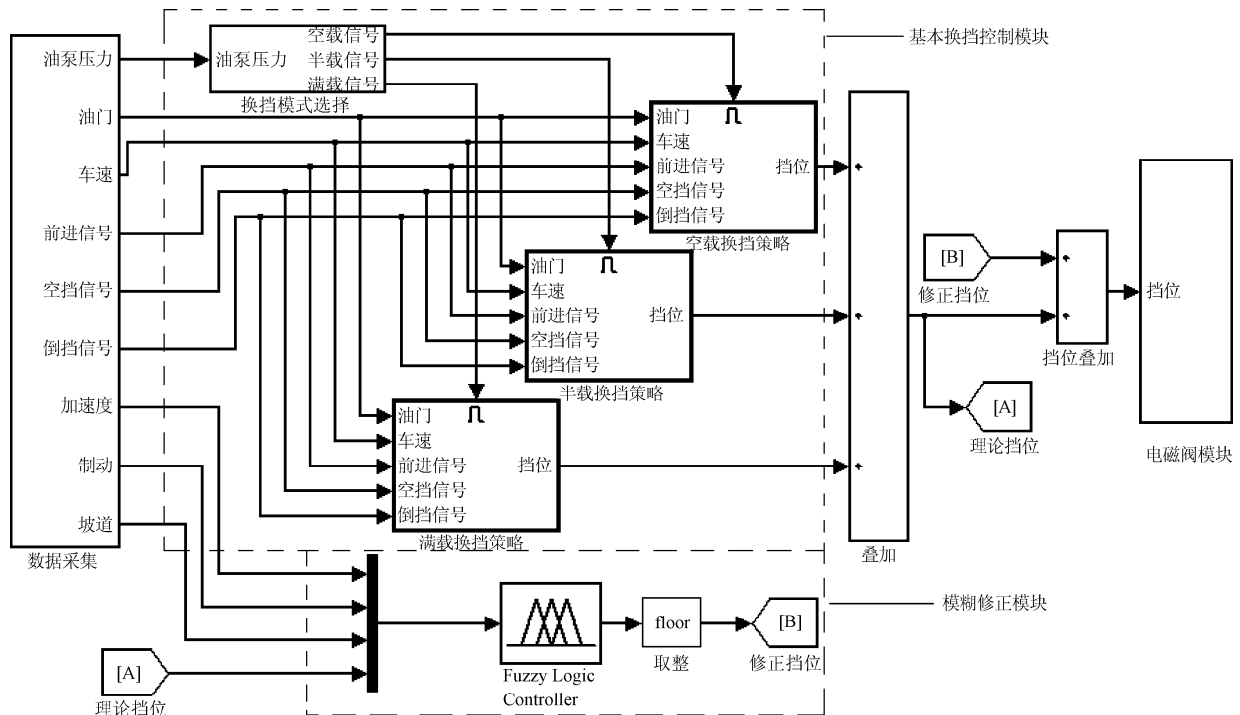
基本换挡控制模块是根据叉车实际动作状态建立的。通过拨杆给 TCU 信号，由 TCU 检测拨杆信号并识别车辆目前的运转状态 (前进挡、空挡、倒挡)，并根据油泵压力来分别触发空载、半载和满载换挡策略，从而输出理论挡位。基本换挡控制策略模型如图 2a 所示。

2.1.1 换挡逻辑输入参数

本文利用 Simulink/Stateflow 建立基于车速和油门开度的两参数换挡模型。前进挡换挡模型如图 2b 所示。

2.1.2 换挡逻辑模块

换挡逻辑模块采用 2 个并行状态图：挡位转移状态图 (shift) 和挡位控制状态图 (shift_control)。shift 状态图中，定义了 upshift 和 downshift 两个状态转移事件作为挡位变换的条件。shift_control 状态图包含有 3 个状态：挡位保持 (steady)，升挡 (upshifting) 和降挡 (downshifting)。当激活 shift_control 后，无条件激活 steady，然后判断状态转移条件是否成立，如果成立则激活 upshifting 或者 downshifting 状态；反之，则维持 steady 状态。从而决定升挡、降挡还是保持当前挡位。



a. 自动变速器控制系统模型

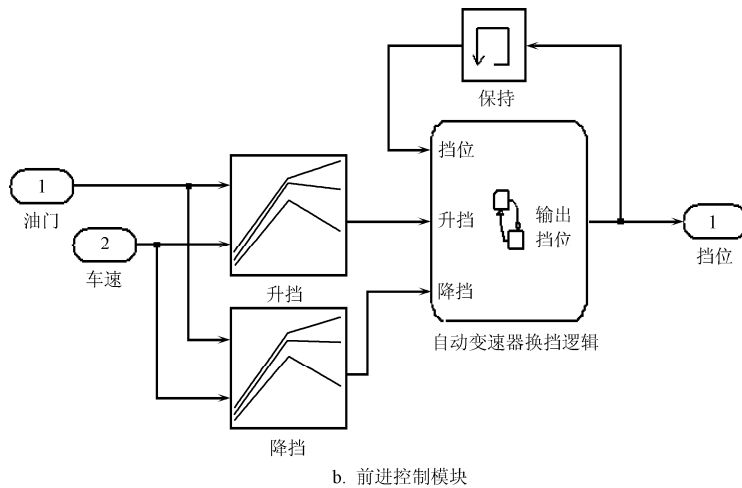


图2 控制模型
Fig.2 Control model

2.2 模糊修正模块

对于叉车自动变速器研发的瓶颈技术—坡道控制，本文利用模糊控制策略^[16-18]对基本换挡控制模型输出挡位进行修正，将挡位修正因子与基本换挡控制模型输出的理论挡位叠加，就可得到实际挡位。

实际驾驶中，驶入坡道前会快速减小油门，并迅速制动，使车辆挡位换为 1 挡。本文制定的挡位模糊修正模块以坡道角度、制动踏板开度、理论挡位和加速度作为输入，以挡位修正因子作为输出，构成一个 4 输入单输出的模糊修正模型。

2.2.1 输入信号模糊化

输入信号论域：坡道论域：[0,30]；制动踏板开度论域：[0,100]；挡位论域：[1,4]；加速度论域：[-3,3]。输入、输出模糊子集分别定义：{负大(NB)、负中(NM)、负

小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中偏小 (PM-)、正中(PM)、正中偏大 (PM+)、正大(PB)}。挡位修正因子：{负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)}。输入信号隶属度函数如图 3a、b、c、d 所示。

2.2.2 输出信号反模糊化

将模糊规则运算结果，经反模糊化后输出，与基本换挡控制模型中输出的理论挡位信号进行叠加，得到实际挡位。反模糊化隶属度函数采用高斯型函数，如图 3e 所示。

2.2.3 模糊规则

输入参数经过模糊规则运算后，就能根据叉车运行状态，输出挡位修正因子，修正挡位。坡道条件：1) 加速度为 NB；2) 加速度任意值，坡道为 PM-、PM+或者 PB。只要满足任意一种，则为坡道工况，并使挡位强制换为 1 挡，其余情况挡位不变。部分模糊规则如下所示：

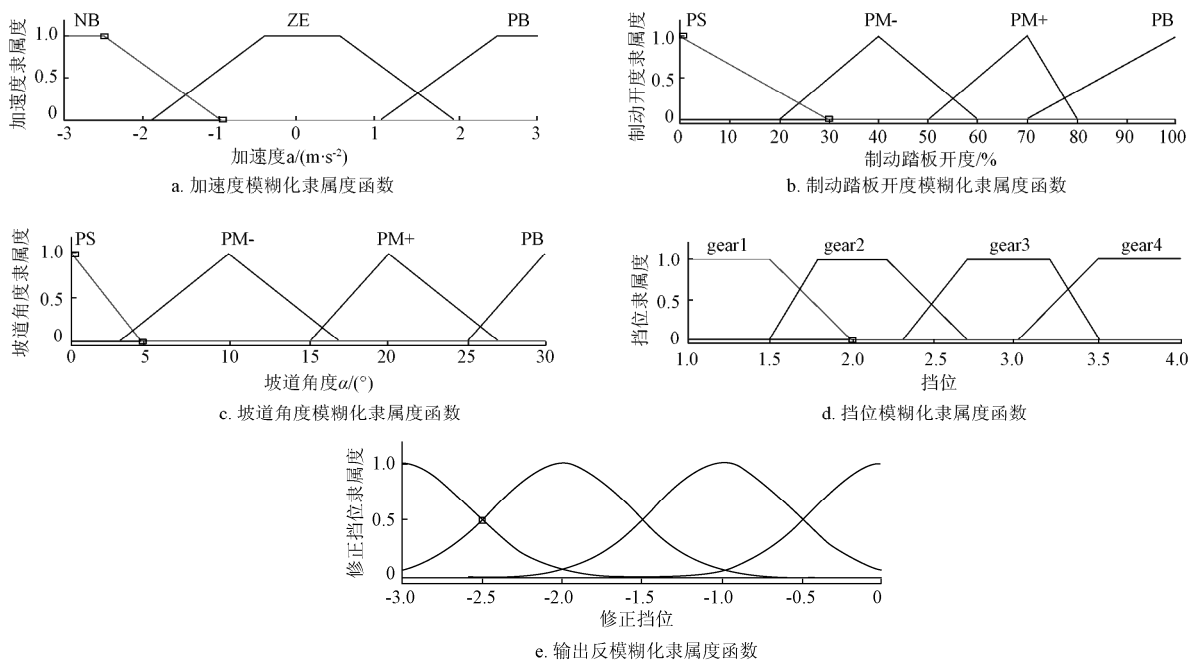


图3 模糊控制
Fig.3 Fuzzy control

1. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PS)and(gear is gear1)then(output is ZE)(1)
2. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PS)and(gear is gear2)then(output is NS)(1)
3. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PS)and(gear is gear3)then(output is NM)(1)
4. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PS)and(gear is gear4)then(output is NB)(1)
5. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PM-)and(gear is gear1)then(output is ZE)(1)
6. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PM-)and(gear is gear2)then(output is NS)(1)
7. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PM-)and(gear is gear3)then(output is NM)(1)
8. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PM-)and(gear is gear4)then(output is ZB)(1)
9. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PM+)and(gear is gear1)then(output is ZE)(1)
10. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PM+)and(gear is gear2)then(output is NS)(1)
11. If(accelerate is NB)and(brake is PS)and(podao is PM+)and(gear is gear3)then(output is NM)(1)

2.3 电磁阀模块

本文建立的电磁阀模块，是根据输出的实际挡位，按照电磁阀动作逻辑给对应的电磁阀供电，改变系统的液压回路及回路油压，促使执行机构动作，实现自动换挡。

3 快速原型试验

自动变速器控制系统快速原型试验^[19-20]是在线验证控制系统模型的正确性，二是在线调整换挡点，获得最佳动力性。试验叉车性能参数如表 2 所示。

3.1 快速原型试验流程

快速原型试验流程如图 4a 所示，用 PC 机将控制模型编译下载到 dSPACE 中，并将电磁阀驱动程序下载到电磁阀驱动电路中；dSPACE 根据实车上采集的信号运行控制系统，并将电磁阀控制信号输入到电磁阀驱动电路中，根据预先存储的电磁阀驱动程序对 dSPACE 传来的控制信号进行控制，向实车上的电磁阀输入电磁阀动作信号，电磁阀接收到控制信号后，使执行机构作出相应的动作，实现自动换挡。这样就完成快速原型试验^[6-8]，实物如图 4b 所示。

表 2 叉车性能参数

Table 2 Parameters of forklift truck

参数	参数值	
整车空载质量/kg	12 510	
整车满载质量/kg	22 510	
桥减速比	23.75 (主减速比和轮边减速比)	
车轮半径/m	0.472 (满载)	
	0.492 (空载)	
变速箱速比 (前进挡与倒挡)	1 挡	4.278
	2 挡	2.368
	3 挡	1.126
	4 挡	0.74

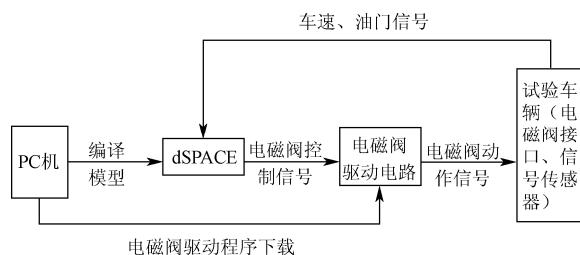
3.2 快速原型试验仿真结果分析

快速原型试验整个过程分为两部分来验证控制策略的可行性，一是叉车在平直路面行驶，二是叉车在坡道行驶。试验中，利用 ControlDesk 测试平台对仿真试验进行数据监控。采集的数据主要有：油门、车速、挡位、油泵压力、制动踏板开度。

试验结果分析：平直路面行驶试验过程起步、加速、稳定行驶、滑行、制动过程。叉车自动变速器控制系统的快速原型试验结果如图 5 所示。车辆从 1 挡起步，连续换挡最后稳定在 4 挡，在制动过程中，挡位由 4 挡连续降到 1 挡，中间无循环换挡过程。并且根据油泵压力的不同，2 次工况下换挡点有所不同，在油泵压力在 20 MPa 左右时，叉车处于满载状态，相对于空载状态时，车辆换挡点都有所延迟，从而延长叉车在高转矩运行的时间，使车辆获得更好的动力性。

叉车自动变速器控制系统坡道快速原型试验结果如图 6 所示：当叉车状态满足坡道条件时，对换挡模型中输出的理论挡位进行模糊修正，使车辆上坡前强制为 1 挡。例如，24 s 时车辆正处于爬坡状态，经换挡策略输出的理论挡位为 2 挡，但是经模糊修正策略修正之后始终保持挡位为 1 挡。

由以上分析可知，叉车爬坡时，经过模糊修正策略输出的挡位始终保持 1 挡，避免叉车在坡道上换挡，导致溜坡。本文建立的针对叉车爬坡的挡位模糊修正策略正确。



a. 快速原型流程图



b. 快速原型实物图

图 4 快速原型

Fig.4 Rapid control prototyping

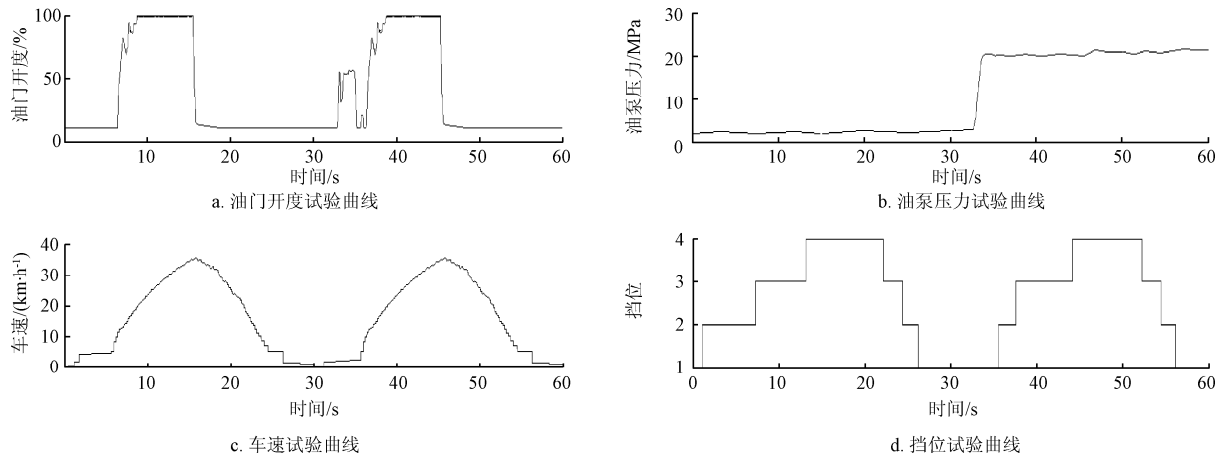


图5 平直路面快速原型试验结果

Fig.5 Offline experimental results on the straight road

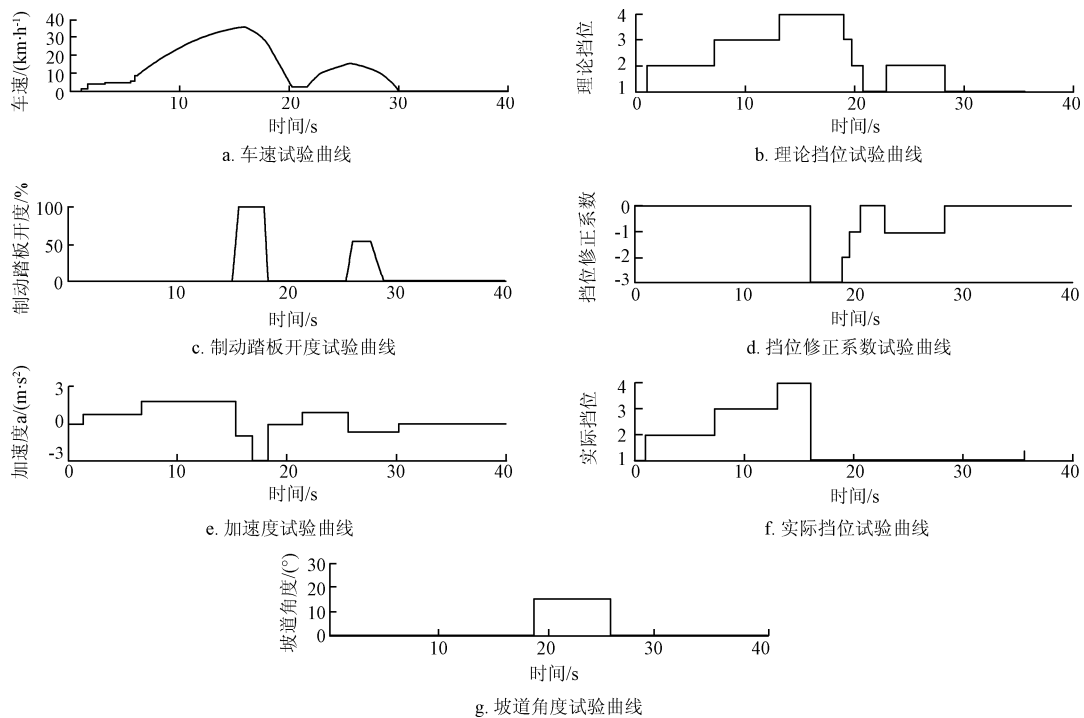


图6 坡道快速原型试验结果

Fig.6 Offline experimental results on the ramp

4 结论

本文对叉车的发动机与液力变矩器的性能进行匹配,建立基于油泵压力的挡位修正策略,并利用模糊控制策略对叉车在坡道工况时挡位进行修正。最终利用dSPACE进行整个控制系统快速原型试验,试验结果表明:所建立的控制系统模型正确,能够实现自动换挡,效果良好。

[参考文献]

- [1] 常绿. 基于实时工况的装载机智能换挡规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 69—73.
Chang Lü. Intelligent shift schedule based on working conditions of loader[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 69—73. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈亚辉. 基于模糊控制的工程车辆自动变速系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2008, 04.
Chen Yahui. Study on Automatic Shift Schedule Application of Engineering Vehicles Based on Fuzzy Control[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008, 04. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张志义, 赵丁选, 陈宁. 工程车辆模糊自动换挡策略研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 26—29.
Zhang Zhiyi, Zhao Dingxuan, Chen Ning. Research on fuzzy automatic transmission strategy of vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 26—29. (in Chinese with English abstract)

- [4] 常绿, 王国强, 唐新星, 等. 装载机发动机与液力变矩器功率匹配优化[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 28—31. Chang Lü, Wang Guoqiang, Tang Xinxing. Optimization of power matching on torque-converter with diesel engine for wheel loader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [5] 边淑君. 发动机与液力变矩器匹配计算的软件开发[J]. 工程机械, 2007, 38(6): 10—13. Bian Shujun. Computer aided analysis on the matching between engine and torque converter[J]. Construction Machinery and Equipment, 2007, 38(6): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [6] 焦生杰, 余亮. 工程机械液力传动匹配的计算机辅助计算[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(4): 89—91. Jiao Shengjie, Yu Liang. Computer aided calculation on the matching of the hydraulic transmission of engineering machinery[J]. Journal of Xi an Highway University, 2001, 21(4): 89—91. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郑磊, 郭孔辉, 余天明, 等. 自动变速器换挡规律的图解方法[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(3): 5—9. Zheng Lei, Guo Konghui, Yu Tianming, et al. Graphic method on automatic transmission shift schedule[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(3): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陆中华, 程秀生, 冯巍. 湿式双离合器自动变速器的升挡控制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 132—136. Lu Zhonghua, Cheng Xiusheng, Feng Wei. Up-shift control in wet double clutch transmission[J]. Transaction of the CSAE, 2010, 26(5): 132—136. (in Chinese with English abstract)
- [9] 龚捷, 赵丁选. 工程车辆自动变速器换挡规律研究及自动控制仿真[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(9): 930—934. Gong Jie, Zhao Dingxuan. Study on shift schedule and auto-controlling simulation of automatic transmission[J]. Journal of Xi an Jiaotong University, 2001, 35(9): 930—934. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李莺莺, 邵善锋, 李学忠, 等. 基于智能控制的装载机自动换挡策略[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 216—220. Li Yingying, Shao Shanfeng, Li Xuezhong, et al. Automatic gear shifting strategy for loader based on intelligent control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 216—220. (in Chinese with English abstract)
- [11] 国香恩, 李艳. 工程车辆动态换挡规律研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(5): 839—842. Guo Xiang'en, Li Yan. Study on dynamic shift schedule of construction vehicle[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2009, 33(5): 839—842. (in Chinese with English abstract)
- [12] 葛安林, 李焕松, 武文治, 等. 动态三参数最佳换挡规律的研究[J]. 汽车工程, 1992, 14(4): 239—247. Ge Anlin, Li Huansong, Wu Wenzhi. Optimized shift schedule controlled by dynamic 3-parameter[J]. Automotive Engineering, 1992, 14(4): 239—247. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴子岳, 赵婷婷, 王世明. 工程车辆三参数自动换挡系统的研究[J]. 机电工程, 2007, 24(11): 40—42. Wu Ziyue, Zhao Tingting, Wang Shiming. Research of autoshift schedule system with three variable parameters in construction vehicle[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(11): 40—42. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张祥, 杨志刚, 张彦生. 汽车 AMT 系统的 Matlab/Simulink 建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3339—3343. Zhang Xiang, Yang Zhigang, Zhang Yansheng. Modeling and simulation of automobile AMT system application with matlab/simulink[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14): 3339—3343. (in Chinese with English abstract)
- [15] 牛秦玉, 张国胜, 方宗德, 等. 电控机械式自动变速器换挡规律仿真模型的研究[J]. 西安: 机械科学与技术, 2007, 26(3): 351—354. Niu Qinyu, Zhang Guosheng, Fang Zongde, et al. Simulation model of shift law for AMT[J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(3): 351—354. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈然, 孙冬野. 自动变速车辆起步模糊神经网络控制策略仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 912—914. Chen Ran, Sun Dongye. Fuzzy neural network control of automated mechanical transmission during starting[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(4): 912—914. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王骞, 吴光强. 模糊控制在湿式双离合器式自动变速器电控系统中的应用[J]. 测控技术, 2008, 27(8): 59—62. Wang Qian, Wu Guangqiang. Application of fuzzy logic control on wet DCT s TCU[J]. Measurement and Control Technology, 2008, 27(8): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [18] 贾元华, 周立元. 自动变速器模糊换挡及其控制理论研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2005, 4: 33—36. Jia Yuanhua, Zhou Liyuan. A research on fuzzy gear-shift and control theory of automatic mechanical transmission[J]. Shandong Agricultural Machinery, 2005, 4: 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [19] 董其慧, 胡建军, 秦大同. 液力机械自动变速传动系统快速原型控制[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(12): 13—17. Dong Qihui, Hu Jianjun, Qin Datong. Rapid prototype control of hydraulic automatic transmission system based on dSPACE[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(12): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张彦会, 谭彧, 李建平. 基于 Matlab 的自动变速器电控单元快速控制原型设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2008, 35(5): 96—98. Zhang Yanhui, Tan Yu, Li Jianping. Rapid control prototyping of AMT ECU based on matlab[J]. Tractor and Farm Transporter, 2008, 35(5): 96—98. (in Chinese with English abstract)

Design of automatic transmission control system used in forklift truck

Zhang Bingli, Hu Fujian, Dong Yanwen

(School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: By matching the parameters of engine and hydraulic converter, the basic power shift schedule, which took the speed and throttle angle as input, was established. According to the different loading, the pressure of the oil pump was used as the adjusting parameter to adjust the shift schedule. Considering the ramp, the fuzzy adjusting strategy was adopted to adjust the foundational gear. The effective of the proposed method was validated in the test. The result indicated that as the loading increased, the shift points would increased about 2-5 km/h, so that the best power performance could be obtained. The forklift truck always ran with one gear on the lamp to avoid it sliding down. This proposed method can enrich the manipulating theory of forklift truck and could be applied in practice.

Key words: transmissions, control systems, design, shifting schedule, pressure of oil pump, ramp control, rapid control prototyping