

某型叉车自动变速器控制系统的快速原型和硬件在环试验研究

张炳力¹ 董彦文¹ 胡福建¹ 刘宗其^{1,2}

1. 合肥工业大学,合肥,230009 2. 安徽合力股份有限公司,合肥,230022

摘要:依据叉车工作泵的压力大小分为空载、满载、半载 3 种工况,计算叉车输入特性、输出特性和牵引特性,据此建立了以油门开度、车速和油泵压力为控制参数的三参数换挡规律;设计了基于 dSPACE 的实车快速控制原型试验,验证了换挡控制策略和执行机构策略;设计了自动变速器控制器(TCU)样机和硬件在环仿真试验台,进行了基于 dSPACE 的硬件在环试验,验证了控制策略在 TCU 样机中的控制效果。试验结果表明:基于 dSPACE 开发的 TCU 满足性能要求,并能提高开发效率,可为叉车自动变速器控制器的开发提供参考。

关键词:叉车;TCU;控制策略;快速控制原型;硬件在环仿真

中图分类号:U463.212;TH242

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.022

Experimental Research on Rapid Control Prototyping and HILS for Control System of Forklift Automatic Transmission

Zhang Bingli¹ Dong Yanwen¹ Hu Fujian¹ Liu Zongqi^{1,2}

1. Hefei University of Technology, Hefei, 230009

2. Anhui Heli Co., Ltd., Hefei, 230022

Abstract:Based on the pump pressure, the forklift's working conditions can be divided into no-load, full load and half load. By calculating forklift's input features, output characteristics and traction features, shift schedule of three variable parameters(throttle position, speed and pressure of oil pump) were designed. The rapid control prototyping experiments based on dSPACE system were designed to verify the shift and actuator control strategy. On the basis of TCU and HILS system, the HILS experiments was carried on, which testified the effect of control strategy in real TCU. The test results show that TCU designed by using dSPACE can meet the performance requirements, improve development efficiency, providing a reference for the development of forklift automatic transmission control unit.

Key words: forklift; transmission control unit(TCU); control strategy; rapid control prototyping; hardware in the loop simulation(HILS)

0 引言

工程车辆采用的自动变速技术对减轻驾驶员疲劳程度、提高车辆动力性和减少燃油消耗有重要作用^[1]。传统的工程车辆自动变速器控制器(transmission control unit, TCU)开发过程需要大量的实车试验,存在周期长、效率低的问题,还可能由于控制算法的欠缺和错误造成试验设备损坏甚至发生危险工况。本文采用基于模型的“V型开发模式”^[2]开发了四速叉车自动变速器控制器,建立了基于动态三参数(车速、工作泵压力和油门开度)的换挡控制策略,利用 dSPACE 进行了快速控制原型和硬件在环仿真试验,验证了所建立的叉车自动变速器控制模型的正确性,达到

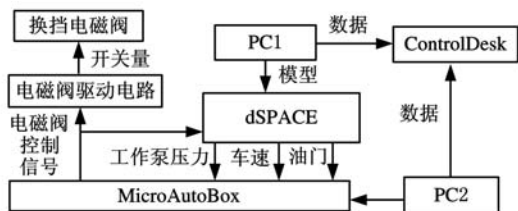
了试验的预期要求。

1 快速控制原型试验

本文在 TCU 的快速控制原型(rapid control prototyping, RCP)试验^[3-4]中,使用 dSPACE 作为模拟的 TCU,将实车变速器作为被控对象进行控制,TCU 开发人员可以快速地对整个控制系统进行试验、调试以不断改进控制系统的性能,TCU 快速控制原型的整体示意图和试验实物图分别见图 1a 和图 1b,包括 MicroAutoBox、实车变速器、PC 机和电磁阀驱动电路等。

1.1 TCU 快速控制原型建模

TCU 快速控制原型整体模型包括信号输入模型、换挡控制策略模型、执行机构和信号输出模型等部分,如图 2 所示。



(a) 整体示意图



(b) 试验实物图

图 1 TCU 快速控制原型图

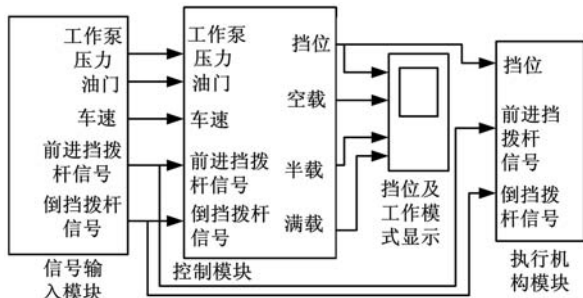


图 2 快速控制原型整体模型

1.1.1 信号输入模块

在快速控制原型试验阶段,输入信号包括工作泵压力、油门开度、车速、拨杆信号,使用 dSPACE 的 RTI(real-time interface)中的信号采集模块进行信号采集,其中工作泵压力信号、油门信号是模拟量信号,车速信号是脉冲信号,拨杆信号是开关量信号,它们都需要通过相应的信号预处理和标定后才能成为控制系统能够识别的信号。

1.1.2 换挡控制模块

为了动态地反映叉车的换挡过程,提高其动力性并降低燃油消耗和减小换挡冲击,在叉车工作循环中,依据叉车工作泵工作压力的不同,把叉车分为空载工况、满载工况、半载工况 3 种情况^[5],具体来说就是通过实时检测工作泵的工作压力来动态地选择换挡规律。设工作泵满载工作压力为 p_1 ,空载时工作泵工作压力为 p_0 ,则工作泵半载工作压力 $p_2 = 0.5(p_1 + p_0)$,若检测到工作泵工作压力为 p ,则换挡原则如下:

(1) 当 $p < p_2 - 0.5p_2$ 时,执行工作泵空载换挡规律;

(2) 当 $p_2 - 0.5p_2 \leq p \leq p_2 + 0.5p_2$ 时,执行

工作泵半载换挡规律;

(3) 当 $p > p_2 + 0.5p_2$ 时,执行工作泵满载换挡规律。

为得到 3 种不同工况下的换挡规律曲线^[6],首先绘制出不同工况下的叉车发动机和液力变矩器联合输入特性和联合输出特性曲线;接着完成不同工况下叉车的牵引特性的计算,绘制出相应工况下的牵引力特性曲线;最后求出不同油门开度下各挡位牵引力曲线的交点,该交点就是最佳动力性升挡点,将求得的升挡点在 $\alpha-v$ (油门开度—车速)的坐标系中画出,即为这两挡之间的最佳动力性升挡曲线;然后用同样的方法得到其他挡位最佳动力性升挡曲线,再按照两参数换挡规律类型进行组合,加上一定的换挡延迟,就可以得到最佳动力性换挡规律的降挡曲线,从而得出图 3 所示的以油门开度、车速和油泵压力为控制参数的 3 种工况下的三参数换挡规律曲线,图 3 中,1-2、2-3、3-4 分别表示 1 挡升 2 挡、2 挡升 3 挡、3 挡升 4 挡;2-1、3-2、4-3 分别表示 2 挡降 1 挡、3 挡降 2 挡、4 挡降 3 挡。

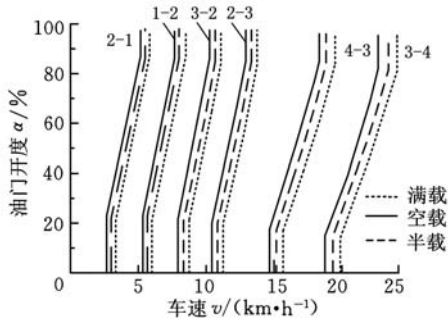


图 3 不同工作泵载荷下降换挡规律曲线

根据上述求出的不同工作泵载荷下降换挡规律曲线和制定的工作泵载荷划分区,建立了基于 MATLAB/Simulink/Stateflow 的动态三参数换挡控制模型,如图 4 所示。

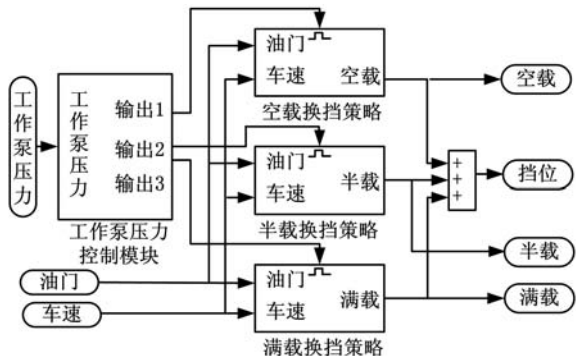


图 4 换挡控制模型

1.1.3 执行机构控制模块

本文所研究的叉车变速器有一个空挡、4 个前进挡和 4 个后退挡,其换挡执行机构的动作是

由相应的电磁阀来控制的,包括一个前进挡电磁阀、一个倒挡电磁阀和一挡、二挡、三挡、四挡电磁阀组成,不同挡位时各电磁阀动作逻辑见表1。

表1 不同挡位时电磁阀的动作逻辑表

挡位	前进电磁阀	后退电磁阀	一档电磁阀	二档电磁阀	三档电磁阀	四档电磁阀
前进一档	●		●			
前进二档	●			●		
前进三档	●				●	
前进四档	●					●
空挡						
后退一档		●	●			
后退二档		●		●		
后退三档		●			●	
后退四档		●				●

注:“●”表示工作,其余表示不工作

根据上述电磁阀工作逻辑,建立不同挡位下的电磁阀工作模型,同时加上 RTI 中的相应信号输出接口模块,构成了执行机构和信号输出模型,如图5所示。

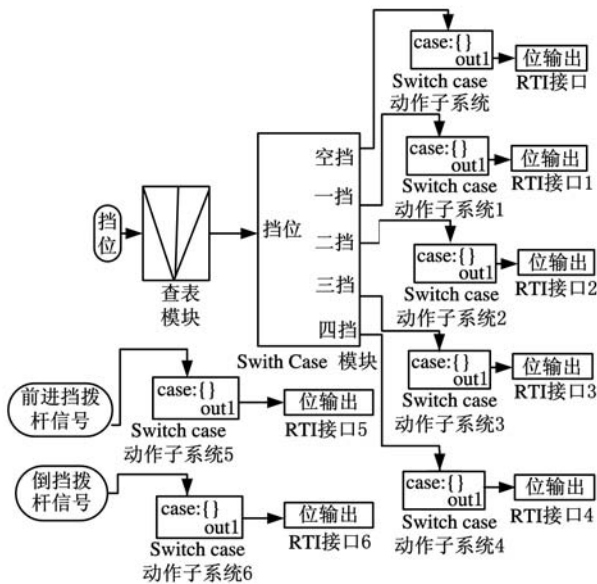


图5 执行机构和信号输出模型

1.2 TCU 快速控制原型仿真试验结果分析

1.2.1 控制策略模型的仿真结果

图6所示为快速控制原型试验中控制策略模型的仿真结果,可以看出,第0~150s为叉车开始出发至货叉铲好负载过程,此时工作泵处于空载状态;150~155s为提升货叉过程,工作泵压力经历了由空载变为满载过程;155~420s为运送货物过程,这一过程中工作泵压力变化不大;420~445s为举升货叉过程,此时工作泵压力达到最大值;445~465s为卸掉一半负载的过程,工作泵压

力经历了由满载变为半载过程;465s以后为工作泵半载工作过程。从图6可以看出,输出结果挡位能够很好地根据输入信号泵压力、油门开度和车速的不同而准确实时地变化,即验证了换挡控制策略的正确性,为后续试验打下了基础。

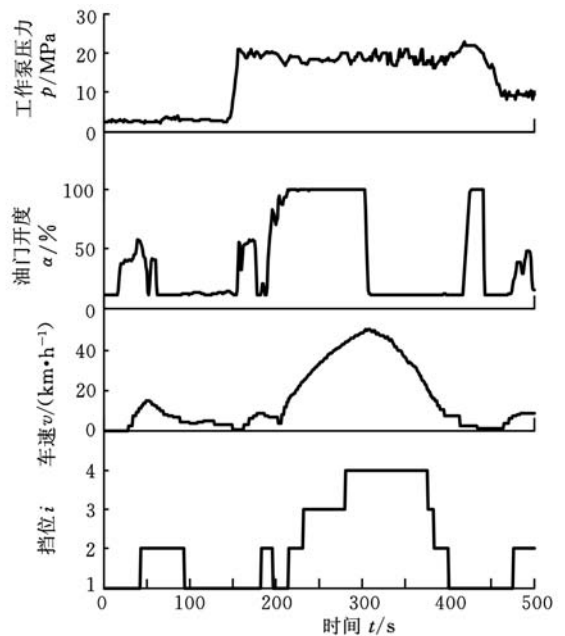


图6 工作泵压力、油门开度、车速、挡位仿真图

1.2.2 执行机构模型的仿真结果

图7所示为挡位和相应挡位时的电磁阀动作曲线对应关系,图中,纵坐标“电磁阀开闭”中,0表示电磁阀开启,1表示电磁阀关闭。由图7可以看出,对应的挡位和各个挡位的执行元件能够按照换挡逻辑的要求正确动作,从而验证了执行机构策略的正确性。

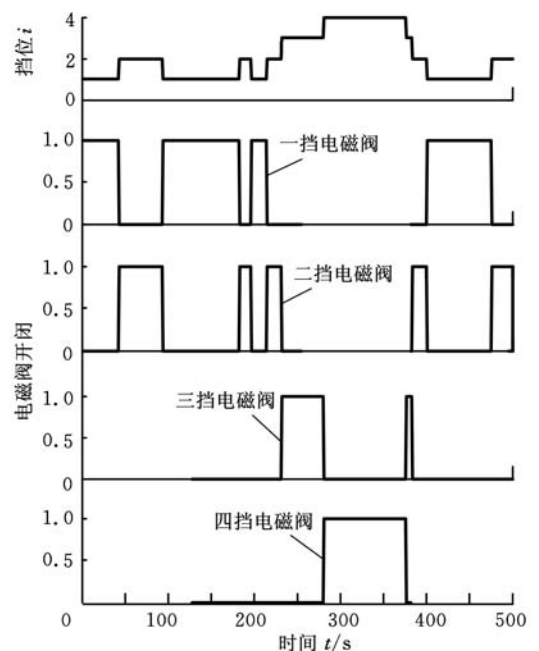


图7 挡位、各执行元件动作图

2 TCU 硬件在环仿真试验

TCU 硬件在环 (hardware-in-the-loop, HIL) 仿真^[7]就是将真实的控制器运行在虚拟或半虚拟的环境中,运行在实时仿真器中的整车模型产生相应的传感器信号发送给 TCU 和相应的外围设备,同时实时仿真器接收 TCU 发出的控制信号并进行 TCU 测试。通过 TCU 硬件在环仿真试验不仅可以加速 TCU 开发,更能够减少实车试验和台架试验,并可进行失效测试和故障模拟等^[8]。

2.1 TCU 系统的开发

整个 TCU 系统的开发包括软件设计和硬件设计两大部分,其中软件设计又包括两部分:一是直接由 targetlink 将控制系统模型转换生成为应用层代码,包括换挡控制策略和执行机构部分代码,这是整个软件的核心部分;二是针对所用的嵌入式系统编写底层驱动代码,底层驱动代码是应用层代码与外部信息交互的基础,具体来说包括操作系统、A/D 转换、脉冲信号采集、CAN 等底层驱动代码。本试验中选用飞思卡尔公司的 MC9S12 系列芯片作为嵌入式系统主控芯片,因此也就是在 codewarrior 环境下,对底层驱动代码和生成的应用层代码进行正确的整合和调试,形成一个完整的 TCU 软件^[9-10]。

硬件部分设计主要是根据所选用的控制器主芯片特点,设计好最小系统、必需的外围接口电路和相应的电磁阀驱动电路。S12 系列单片机内部已经集成了常用的信号处理模块,如 A/D、脉冲采集、SPI 通信等模块,可直接调用这些功能模块。但对于 SCI、CAN 等通信模块,S12 内部只集成了控制器模块,应用这些模块时必须外加相应的驱动芯片和收发器。同时要设计一定的保护电路来保护重要元器件并增强所设计电路的抗干扰能力^[11-12],所设计的 TCU 实物图见图 8。

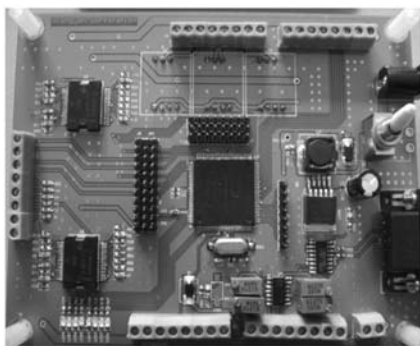


图 8 TCU 实物图

2.2 硬件在环仿真试验

控制器硬件在环仿真试验方案如图 9 所示,

TCU 样机的输入为拨杆信号、工作泵油压信号、油门信号和车速信号,输出信号为电磁阀控制信号(开关量信号),未经处理的开关量信号直接经由 RTI 接口接到 dSPACE 中,经过电磁阀驱动电路后的开关量信号则接到台架上变速器的电磁阀;同时工作泵油压信号、油门信号和制动信号通过 RTI 接口输入到仿真环境中的整车模型,通过模型计算出车辆行驶的速度信号并经 RTI 接口变成脉冲信号后输出给 TCU 样机;进行不同工况下的试验时,分别调用 Simulink 中建立的相应工况下的发动机输出特性 look-up 表,同时根据选用的电机变频器的控制特点,可由 dSPACE 的 RTI 接口输出控制信号至三相交流异步电机变频器,从而达到实时控制电机输出转速和转矩的目的,即模拟不同工况下的发动机输出特性;同样,根据模型实时计算出车辆行驶阻力大小信号和电涡流测功机控制器的控制特性,可以将汽车阻力信号经过 dSPACE 的 RTI 接口转换为控制信号施加到测功机控制器上,通过实时控制定子励磁电流的大小来控制电涡流测功机提供的负载大小,即模拟出当前工况下的负载大小。最后将台架上自动变速器的涡轮转速信号和输出轴转速信号通过 RTI 接口接到 dSPACE 中,通过计算传动比计算出当前实际挡位。

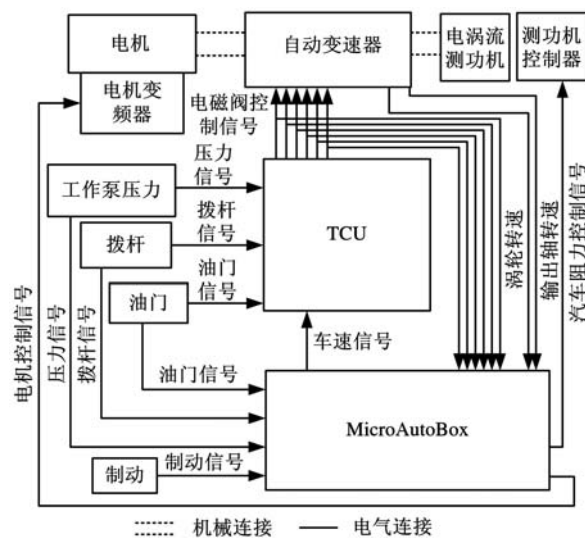


图 9 硬件在环试验台总体方案

图 10 所示为搭建的硬件在环仿真模型,它包括 TCU 电磁阀动作监视模型、实际挡位计算模块、虚拟的整车模型以及与外界通信的 RTI 接口等,是对图 9 总体方案的模型化解释。虚拟的整车模型的输入量是工作泵压力、油门开度、制动信号和拨杆信号,输出信号是车速信号、汽车行驶阻力、发动机转速信号和理论挡位;实际挡位计算模块通过计算变速器涡轮转速和输出轴转速计算出真实的挡位;TCU 电磁阀动作监视模块能够实时

地记录和监视对应挡位下的电磁阀动作曲线,该曲线反映了真实的电磁阀动作情况。

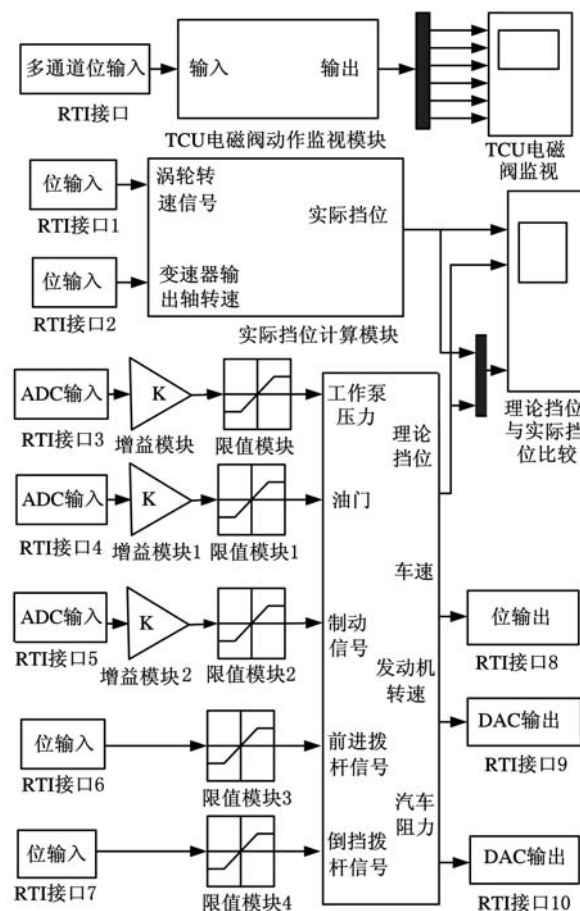


图 10 硬件在环试验模型

通过以上硬件在环仿真模型可以方便地比较 TCU 实际输出挡位和理论挡位的差异,检测出执行机构动作的实时性和正确性,进行相关故障和极限模式下的测试等。通过硬件在环仿真试验可以验证 TCU 样机控制程序的控制效果,可方便地对控制参数进行有针对性的修改,为后续实车标定和上路试验打下基础。

2.3 硬件在环仿真试验结果分析

本文使用 dSPACE 自带的试验软件 ControlDesk 来实现对硬件在环试验过程的综合管理,试验结果的界面图见图 11。图 11a 所示为 ControlDesk 监视的来自 TCU 的电磁阀动作控制信号,通过监视 TCU 样机输出的电磁阀动作控制信号,可以验证当前实际挡位和换挡的实时性以及换挡控制信号和执行机构间相互配合的情况等。图 11b 所示为采集到的实时显示的变速器的涡轮转速和输出轴转速以及经过实际挡位计算模块计算出的实际挡位,它能够准确地反映当前变速器的实际挡位。图 11c 所示为整车模型中运行得到的理论挡位、车速以及外部输入的油门信号

号,通过比较图 11a 和图 11c 能够验证 TCU 样机控制程序与理论上的准确值之间的差异,从而为进一步改进 TCU 样机控制程序做准备。

下面以 15s 时刻的结果为例进行说明,此时图 11b 显示台架上的自动变速器涡轮转速为 680r/min,输出轴转速为 500r/min,两者之比即为当前挡位的传动比。通过实际挡位计算模块计算出真实挡位为 3 挡;由图 11a 可以看出,TCU 样机输出的电磁阀控制信号中只有 3 挡电磁阀控制信号为高电平,其他电磁阀控制信号都为低电平,即 TCU 样机输出为 3 挡;图 11c 显示在当前油门开度、车速状态下,由整车模型计算出的理论挡位为 3 挡;其他时刻都可以进行与上述过程一样的测试和比较。试验结果表明,本文设计开发的 TCU 程序满足实时性和准确性的要求,达到了预期的目的。

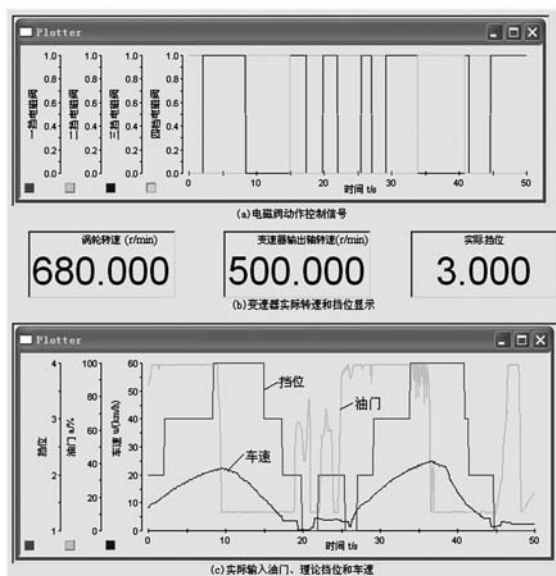


图 11 硬件在环试验结果界面图

3 结语

本文针对叉车自动变速器控制系统进行了快速原型和硬件在环试验,提出了根据工程车辆油门开度、车速和工作泵压力为控制参数的三参数换挡规律,并以此为基础建立了控制系统模型。从仿真试验结果看,所建立的控制系统模型能随着工况的变化进行合适的换挡,符合叉车的实际工作状态。通过快速控制原型试验进一步验证了将控制系统模型应用在实车中的正确性。最后通过硬件在环试验验证了控制程序在真实 TCU 中的控制效果,为下一步的实车标定和上路试验打下良好的基础。基于模型的“V 型开发模式”能够大大缩短了 TCU 的开发周期,节省开发费用。

(下转第 361 页)

cesses and Nanotechnology Conference, New York;IEEE,2002; 188-189.

[58] 李波,安建欣,徐利梅. 喷涂工艺薄膜厚度模型的构建与应用[J]. 电子科技大学学报,2010, 39(3): 461-465.

[59] Qu Degang, Xiang Dong, He Leiming, et al. A Study of Atomization Characteristic of Ultrasonic Spray Nozzle[C]//2011 International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology. Chongqing,2011; 958-963.

[60] Emmons W D, Winkle M R. Electrophoretic Deposition Process;US, 4592816[P]. 1986-06-13.

[61] Hiro M, Tachiki S, Akahori T, et al. Positive Type Photosensitive Anionic Electrodeposition Coating Resin Composition; US, 5230984 [P]. 1993-06-27.

[62] Vidusek D A. Electrophoretic Photoresist Technology: an Image of the Future—today[J]. Circuit World,1989, 15(2): 6-10.

[63] Kersten P, Bouwstra S, Petersen J W. Photolithography on micromachined 3D Surfaces Using Electrodeposited Photoresists[J]. Sensors and Actuators a Physical,1995, 51(1): 51-54.

[64] 蒋进. 三维电子封装微凸点的电沉积制备及低温固态互连技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.

[65] 朴韩守,權寧鍾. 光刻胶沉积设备以及使用该设备形成光刻胶薄膜的方法:中国,02150649. 3[P]. 2004-06-02.

[66] Tajadod J, Hendriks H, Klocke J, et al. Electrophoretic Photoresist Application for High Topography Wafer Surfaces[EB/OL]. <http://www.cs-mantech.org/Digests/2003/2003PDF/12-4.pdf>.

[67] Yamazaki K, Namatsu H. New Resist—coating Technique Using Fine Mist for Three—dimensional Nanotechnology[M]. New York;IEEE, 2006.

[68] Schneider J. Method and Apparatus for Thin Film/Layer Fabrication and Deposition; US, 20090181162[P]. 2009-07-16.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 向东,男,1972年生。清华大学精密仪器与机械学系副研究员、博士研究生导师。研究方向为绿色设计理论与方法、绿色制造、电子废料再资源化工艺及装备。发表论文 30 余篇。何磊明,男,1977年生。清华大学精密仪器与机械学系硕士研究生。瞿德刚,男,1970年生。清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,后勤工程学院军事供油工程系副教授。牟 鹏,男,1977年生。清华大学精密仪器与机械学系助理研究员。殷广洪,男,1946年生。清华大学精密仪器与机械学系教授。

(上接第 353 页)

参考文献:

[1] 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.

[2] 李长文,张付军,黄英,等. 基于 dSPACE 系统的电控单元硬件在环发动机控制仿真研究[J]. 兵工学报,2004,25(4):403-406.

[3] 张建国,雷雨龙,刘洪波,等. 干式双离合器自动变速器快速控制原型与台架试验[J]. 吉林大学学报,2010,40(4):901-905.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 邓涛,孙冬野,秦大同. 重型车辆 AMT 硬件在环仿真试验研究[J]. 中国机械工程,2010,21(2):245-251.

[8] Kenji H,Satoshi T,Yohei T,et al. The Development and Utilization of Hardware—in—the—loop Simulation for the Development of an Automatic Transmission Control System[J]. SAE Paper,2002-01-1255.

[9] 祝轲卿,王俊席,吴晨楠,等. 基于 Targetlink 的嵌入式系统控制软件开发[J]. 系统仿真学报,2007,19(7):1476-1479.

[10] Yan Quanzhong Kevin, Trush C J. Transmission Control Design Approach Using Simulation,Rapid Prototyping,and Auto Code Generation[J]. SAE Paper,2008-01-0536.

[11] 崔功杰,邓林,赵丁选,等. 工程车辆四参数自动变速器控制系统研究[J]. 工程机械,2007,38(5):18-21.

[12] 王宜怀,刘晓升,等. 嵌入式系统—使用 HCS12 为控制器的设计与应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008:1-320.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 张炳力,男,1968年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院副教授。研究方向为电动汽车技术、汽车动力学及控制、工程机械混合动力驱动。董彦文,男,1986年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。胡福建,男,1987年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。刘亲其,男,1963年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生,安徽合力股份有限公司高级工程师。