

拖拉机 AMT 代码自动生成应用技术研究

张静云 徐立友 闫祥海

(河南科技大学 车辆与交通工程学院 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对拖拉机 AMT(电控机械式自动变速箱)电控系统软件手工编程难度大、效率低、错误多等问题,基于 Simulink/Embedded Coder 提出了一种实现拖拉机 AMT 电控系统软件开发的方法。分析了拖拉机 AMT 自动换挡控制原理,利用 Simulink 工具箱建立了自动换挡控制算法模型,利用 Embedded Coder 工具箱搭建了以 TMS320F28335 浮点 DSP(数字信号处理器)为处理器的拖拉机 AMT 控制系统模型,借助灵思创奇开发的仿真管理软件 RT-SIM 进行了快速控制原型半实物仿真,将自动生成的代码移植到目标板进行硬件在环半实物仿真。仿真结果表明,基于 Simulink/Embedded Coder 与 RT-SIM 开发的拖拉机 AMT 电控系统软件能够稳定运行,满足 AMT 系统的控制要求。

关键词: 拖拉机; 代码自动生成; 电控机械式自动变速器; Simulink; 数字信号处理器

中图分类号: S232.3

文献标志码: B

文章编号: 1006-0006(2018)04-0029-05

Study on Applied Technology of Automatic Code Generation for Tractor AMT

ZHANG Jingyun XU Liyou YAN Xianghai

(Vehicle and Transportation Engineering School, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: There are many problems in developing the traditional software such as massive work, low efficiency and many errors. To solve these problems, this article uses Simulink/Embedded Coder to develop tractor AMT control system software. The control theory of tractor AMT is introduced by the support of Simulink, the control algorithm model for tractor automatic shift is built. On the basis of Embedded Coder in Simulink, the DSP model for tractor AMT control system with TMS320F28335 is designed. The rapid control prototype semi-physical simulation is accomplished by simulation management software RT-SIM developed by LINKS. The code for AMT control system is generated and loaded in the target board. As the hardware in the loop semi-physical simulation is accomplished, the simulation results verify the practicability of tractor AMT control system software development with Simulink/Embedded Coder and RT-SIM. The code developed by such method satisfies the control system requirements.

Key words: Tractor; Automatic code generation; Automatic mechanical transmission(AMT); Simulink; Digital signal processor(DSP)

传统控制系统的开发包含功能需求分析、系统完整设计与目标具体实现 3 个阶段。这 3 个阶段的工作往往需要由不同的工作人员完成,每个工作人员所负责的内容各不相同却联系密切^[1-5]。由于参与人员多、开发平台不同,后期整合工作复杂烦琐,尤其是目标具体实现阶段的手工编程工作对技术人员要求较高,不仅编程难度大,而且效率低、错误多^[6-7]。随着拖拉机各项性能的提升,其电控系统的代码量快速增长,对软件的开发提出了更高的要求。基于模型的开发模式可使拖拉机电控系统各个阶段的开发都面向相同平台。控制原型开发阶段建

立的控制系统模型能够作为一个动态的可执行规范,有效提升软件开发质量。自动代码生成工具搭建了从“系统完整设计”到“目标具体实现”的桥梁,利用该工具可缩短开发周期^[8]。目前,国外已经形成了以软件为平台基于模型的开发模式。该开发模式也越来越多地应用于车辆电控系统的研发^[9-11]。

运用“基于模型”的设计思想和代码自动生成工具,开发拖拉机 AMT(Automatic Mechanical Transmission)电控系统软件。利用 Simulink 建立拖拉机自动换挡控制算法模型,使用 Embedded Coder 工具箱建立控制系统原型,借助仿真管理软件 RT-SIM

收稿日期: 2018-06-27

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目(2016YFD0701002, 2017YFD070020402); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(18HASTIT026); 河南省产学研合作项目(182107000010)

进行快速控制原型仿真,使用 CCS(Code Composer Studio) 将生成的代码编译成可执行文件后下载到 TMS320F28335 浮点数字信号处理器(Digital Signal Processor ,DSP) 中运行,最后与控制器硬件、发动机仿真模型、拖拉机整车仿真模型相配合进行硬件在环半实物仿真。

1 DSP 代码自动生成开发流程

DSP 代码生成技术主要基于 MATLAB 平台,利用 MATLAB 自带的嵌入式实时代码生成工具可将 Simulink 模型转化为实时标准的 C 代码,进而为快速原型系统、硬件在回路系统或产品提供设计输入。在 Simulink 模型的基础上,使用 Embedded Coder 工具箱完成相应的嵌入式目标设置,就可生成对应于不同平台的可执行代码,因此使用 MATLAB 开发拖拉机 AMT 电控系统软件是可行的。

MATLAB 环境下 DSP 软件代码自动生成的开发流程如图 1 所示。基于模型的设计方法将 DSP 软件代码自动生成分为 3 个阶段^[12-14]: 控制原型开发阶段、算法实现阶段和算法验证阶段。在控制原型开发阶段所建立的 Simulink 模型需满足系统需求,并反映系统控制算法与控制策略,通过快速控制原型仿真技术工作者在控制系统研发早期发现并修改 Simulink 系统模型直至其仿真结果正确无误。控制原型开发阶段的 Simulink 模型是后期研发工作的动态可执行规范。算法实现阶段研发人员的工作环境是 Simulink 与 CCS,在 Simulink/Embedded Coder 与 RT-SIM 环境中基于控制原型开发阶段建立的 Simulink 功能模型构建代码模型并使用代码自动生成

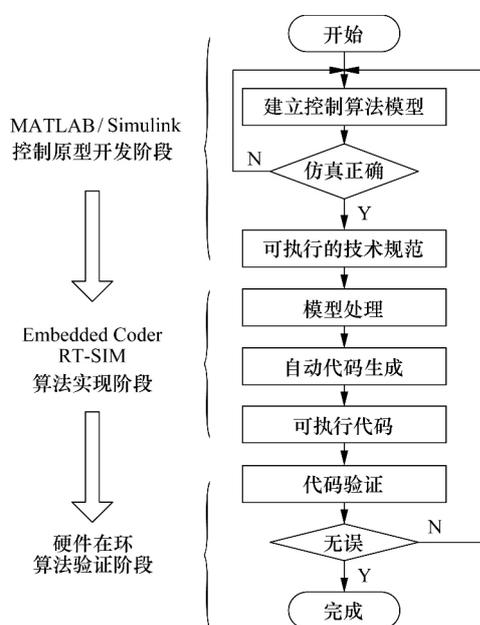


图 1 DSP 软件代码自动生成的开发流程
Fig.1 Development Process of Software Code for DSP

工具自动生成 C 代码,自动生成的 C 代码能够直接或在优化后移植至目标硬件,该阶段实现了模型的代码化,完成了软件开发的主要工作。代码验证是基于模型开发软件的最后步骤。代码验证阶段出现的问题通过修改 Simulink 控制模型加以解决,在实现预定功能的同时,可以保证可执行代码与控制模型完全同步。

2 拖拉机 AMT 控制系统建模

2.1 AMT 控制原理

拖拉机 AMT 系统以其控制单元(Transmission Control Unit ,TCU) 为核心,根据拖拉机作业工况,通过控制液压执行机构完成离合器动作和变速器换挡,通过步进电机完成对油门拉杆的控制。液压执行机构包含 1 个离合器液压缸和 3 个换挡液压缸。离合器分离接合动作通过 2 个高速开关电磁阀控制离合器液压缸的移动速度和位移来实现。3 个换挡液压缸通过 6 个高速开关电磁阀两两控制,实现拖拉机 I~V 挡、R 挡及空挡的挡位切换。拖拉机行驶过程中,TCU 通过安装在副变速液压缸和换挡液压缸上的 4 个位移传感器监测当前换挡拨叉的位置信息,通过安装在离合器上的位移传感器监测离合器行程信息,同时结合液压回路外的其他信息(如发动机转速等),按照系统控制策略输出高速开关电磁阀控制信号,完成变速器自动换挡动作。

2.2 拖拉机 AMT 自动换挡控制模型

在拖拉机起步、怠速、调速等工况下,AMT TCU 应能够根据系统的输入信号和反馈信号,经判断后发出指令控制输出信号,完成离合器、换挡执行机构、发动机油门执行机构动作,使拖拉机自动换挡以获得最佳工作状态。拖拉机田间作业时,驱动轮滑转率能够反映拖拉机机组行驶路况和牵引负荷的变化情况,当驱动轮滑转率减小时,拖拉机机组作业速度损失减小,此时可以适当增加负荷或者升高挡位行驶;当驱动轮滑转率急剧增大且超过阈值时,拖拉机机组作业速度迅速减小,牵引效率急剧降低,此时应适当减小负荷或降低挡位作业。本文所研究的 AMT 基于东方红 - MG 系列轮式拖拉机的机械变速器,自动换挡控制模型以拖拉机行驶速度 v 、油门开度 α 和驱动轮滑转率 δ 为控制参数,是 AMT 系统代码生成的基础。在 Simulink 中建立的拖拉机 AMT 自动换挡控制模型如图 2 所示,系统的输入量有手柄位置(HP)、制动踏板位置(BPP)、行驶模式(Mode)、油门开度(α)等,动力换挡模式(P)为系统默认的换挡模式,模式开关信号为 1 时系统自动选

择经济换挡模式 (E); 反馈信号有离合器接合位置 (CEP)、3 个换挡液压缸活塞位置 (CPP1、CPP2 和 CPP3)、拖拉机行驶速度 (v)、驱动车轮转速 (n_k)、发动机速度 (n_e)、变速器输入轴转速 (n_{e_in}) 等; 输出为 8 个高速开关电磁阀 ($M_{v1} - M_{v8}$) 控制信号和

步进电机控制信号等。驾驶员选择前进挡 (D 挡) 时, 拖拉机 AMT 按照图 2 中 Autogear_D Controller 模块自动换挡。Autogear Controller 模块为换挡手柄位于其他位置 (N 挡或者 R 挡) 时 AMT 的自动控制模型。

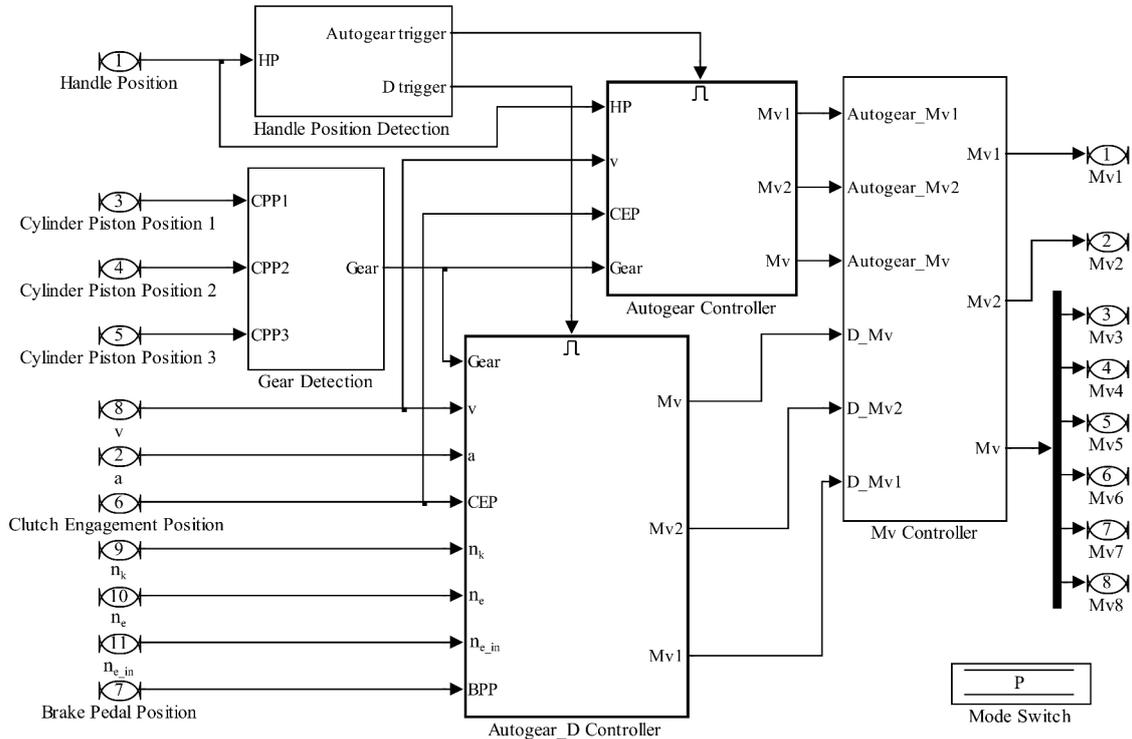


图 2 Simulink 中的拖拉机 AMT 自动换挡控制模型
Fig. 2 Automatic Shift Control Model of Tractor AMT in Simulink

3 拖拉机 AMT 代码自动生成

3.1 AMT 代码自动生成模型

Math Works 公司使用 Simulink 语言将外设单元写在 Simulink/Embedded Coder 工具箱中, 合理使用该工具箱可代替复杂的手工编程。

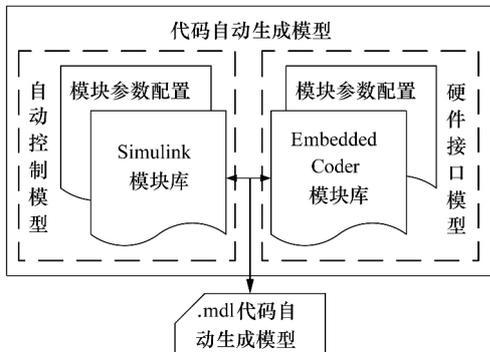


图 3 拖拉机 AMT 系统模型创建结构
Fig. 3 Creation Structure of Tractor AMT System Model

拖拉机 AMT 系统模型创建结构如图 3 所示, 利用 Simulink 模块库搭建拖拉机 AMT 自动控制模型, 利用 Embedded Coder 模块库搭建硬件接口模型, 二者共同构成代码自动生成模型, 进而自动生成系统软件代码。

拖拉机 AMT 代码自动生成模型如图 4 所示, 使用 Embedded Coder 工具箱建立的 AMT 代码自动生成模型包含以下模块。

1) 处理器模块和看门狗模块。Target Preferences 模块提供多种 DSP 硬件平台供使用, 本文选择 TMS320F28335, 设置系统的时钟频率为 150 MHz。为提高系统抗干扰性, 设置看门狗时钟复位间隔为 2 ms。

2) 信号输入模块。信号输入模块由 Capture Unit (CAP) 模块、Digital Input 模块、数模转换 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 模块和 CAN (Controller Area Network) Receive 模块组成。CAP 模块实现脉冲冲量捕捉任务, 捕捉单元捕捉并记录引脚值的变化并保存到先进先出队列 (First Input First Output, FIFO) 缓存中, 用于采集输入轴转速和驱动车轮转速信号。Digital Input 模块将通用输入/输出接口 (General Purpose Input Output, GPIO) 指定为输入状态, 采集手柄位置、模式开关等开关量信号。ADC 模块将输入引脚的模拟信号进行捕捉并数字化处理, 将结果保存到结果寄存器 ADResult 中。ADC 模块工作于级联模式下的顺序采样, 采样频率为 500 Hz。CAN

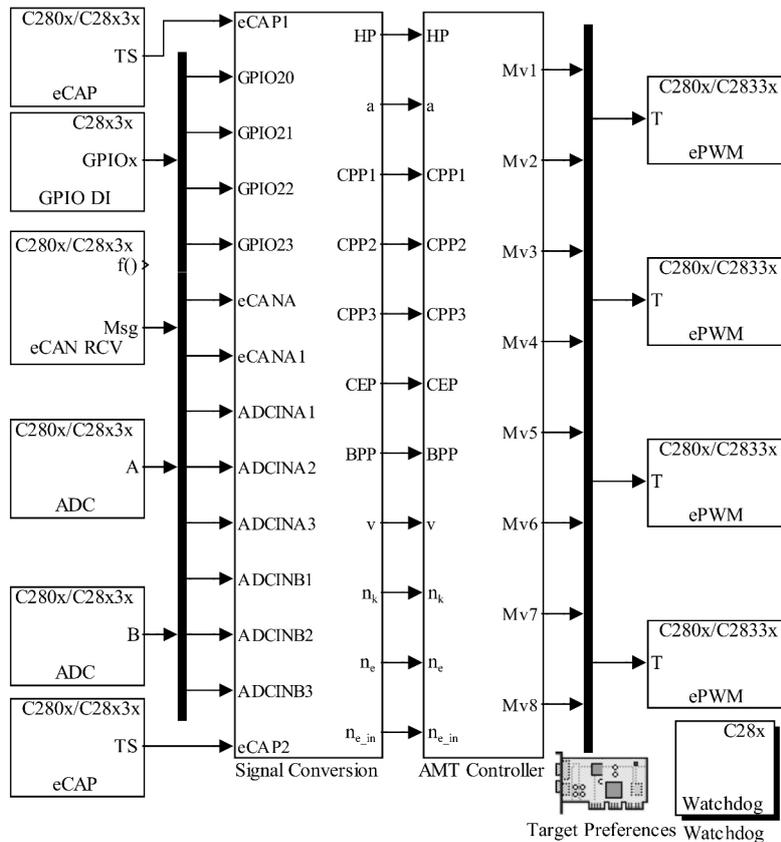


图4 拖拉机AMT代码自动生成模型
Fig. 4 Code Automatic Generation Model for Tractor AMT

Receive 模块具有串行通信能力,使用该模块接收发动机发送的转速和油门开度信息^[15-16]。

3) 信号处理模块和系统控制模块。Signal Conversion 模块完成数字滤波和 GPIO 口的扩展功能,并将 DSP 各结果寄存器的值与 AMT Controller 各输入量进行匹配。所有升挡和降挡操作均由 AMT Controller 模块控制,模型中执行的控制流程根据手柄位置的变化而变化,最终控制对象均为 8 个高速电磁阀,所以在此模块的最终部分使用 switch 模块来完成各控制流程的切换。

4) 信号输出模块。信号输出模块由 8 路 PWM 组成,利用 PWM 占空比大小的变化来控制高速开关电磁阀通断时间。

3.2 AMT 代码自动生成模型定点化

定点模型具有缩小芯片体积、运算速度快、功耗低等优势,所以将模型中的数据进行定点化处理。为了获得足够的计算精度,保证计算过程中没有溢出,每个变量都根据其可能的大小来分配取值范围和数据长度。

3.3 AMT 代码自动生成软件设置

在代码生成阶段,Simulation 选项提供的 Configuration Parameters 能够进行参数设置。Hardware Implementation 选项提供硬件平台选择,Code Generation 提供目标文件格式选择,利用 RT-SIM 进行快速

控制原型仿真。操作 Build 完成 Simulink 模型到 CCS 可执行文件的生成和 CCS 软件的自动运行,再进行硬件在环仿真。该过程在 MATLAB 窗口中显示的运行信息如图 5 所示。

```

### Writing source file AMT.c
### Writing header file AMT_private.h
### Writing header file AMT.h
### Writing header file AMT_types.h
### Writing header file rtwtypes.h
### Writing header file rt_nonfinite.h
### Writing source file rt_nonfinite.c
### Writing header file rtGetIn.h
### Writing source file rtGetIn.c
### Writing header file rtGetNaN.h
### Writing source file rtGetNaN.c
### Writing source file AMT_data.c
### Writing source file AMT_main.c
### TLC code generation complete.
.....### Creating project marker file: rtw_proj.tmw
### Creating project: F:\Program Files\MATLAB\AMTdsp\AMT_ticcs\AMT.pjt
### Project creation done.
    
```

图5 代码自动生成过程 MATLAB 窗口显示信息
Fig. 5 Information of Code Automatic Generation Process

4 拖拉机 AMT 半实物仿真及结果分析

利用北京灵思创奇科技有限公司开发仿真管理软件 RT-SIM 将可执行代码加载至仿真机 LINKS-C3U 进行快速控制原型仿真,验证了控制算法的正确性。利用 CCS 软件将可执行代码加载到目标板,将串口与上位机中的发动机仿真模型、拖拉机机组仿真模型相结合并进行硬件在环半实物仿真。发动机仿真模型根据发动机特性试验数据,采用双线性插值拟合法,使用 MATLAB/Simulink 提供的 Look-

up 模块建立; 拖拉机机组仿真模型的输入量为发动机转速 n_e 、滑转率 δ 、变速器输出转矩 M_{e_out} , 输出量为变速器的挡位 gear、拖拉机行驶速度 v 和变速器输出转速 n_{e_out} 。设置 Simulink 中的参数, 使 Simulink 模型和 DSP 硬件同步运行, 以保证仿真的实时性。依据上述方法构建拖拉机 AMT 半实物仿真平台, 仿真结果如图 6 所示。

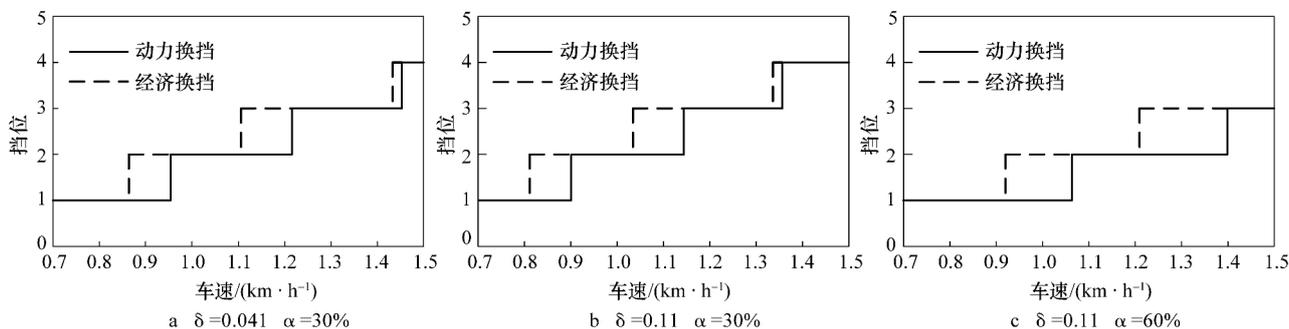


图6 基于半实物平台的仿真结果
Fig. 6 Simulation Result Based on Semi-physical Platform

5 结论

使用 Embedded Coder 自动生成拖拉机 AMT 电控系统代码, 缩短了软件开发时间, 避免了人工编程容易出错等问题; 强交互性平台搭建使开发人员无须费时费力就可掌握 DSP 繁杂的寄存器配置, 可集中精力在控制算法上; 基于 MATLAB/Simulink、RT-SIM 和 DSP 进行拖拉机 AMT 系统快速控制原型与硬件在环半实物仿真, 有效避免了试验测试中被控对象多、被控对象体积大, 试验平台搭建困难、搭建时间长等问题。

参考文献:

- [1] 李根, 唐臻宇, 耿海翔, 等. 基于 Matlab/RTW 的控制系统一体化新型设计方法[J]. 中国测试, 2010, 36(1): 75-77, 85.
- [2] 王建锋, 张天宏, 黄向华. 基于 Matlab 的复杂控制系统软件开发[J]. 计算机工程, 2012, 38(10): 54-56, 59.
- [3] 郭晓博, 郭军卫, 周豫鸽, 等. 基于 LabVIEW 与 MATLAB 的回归分析数据处理系统[J]. 拖拉机与农用运输车, 2014, 41(3): 46-49.
- [4] 刘思久, 孙莹, 赵蔚, 等. 基于 MATLAB/RTW 的控制系统一体化设计方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(5): 29-32.
- [5] 高喆, 禹朝帅, 刘钊宾, 等. 基于 Python-Matlab 的 Abaqus 后处理技术在柴油机有限元分析中的应用[J]. 拖拉机与农用运输车, 2017, 44(4): 46-49.
- [6] 曹现超, 樊银斌, 刘朋杰, 等. 基于 Matlab 的拖拉机离合器参数优化设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2018, 45(1): 40-41, 46.

由图 6a、6b 和 6c 可以看出, 拖拉机经济性换挡速度小于动力性换挡速度; 由图 6a 和 6b 可以看出, 当油门开度一定时, 拖拉机换挡速度随滑转率的增大而减小; 由图 6b 和 6c 可以看出, 当滑转率一定时, 拖拉机换挡速度随油门开度的增大而增大。拖拉机 AMT 半实物仿真结果与三参数自动换挡规律要求一致。

- [7] 刘杰, 周宇博. 基于 Matlab/Simulink 模型的设计. MSP430/F28027/F28335 DSP 篇[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] 陈永春. 从 Matlab/Simulink 模型到代码实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] 杭勇. MATLAB/Simulink 在高压共轨柴油机电控系统开发中的应用[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(22): 23-26.
- [10] 祝轲卿, 徐权奎, 王俊席, 等. 自动代码生成工具在电控柴油机燃油系统控制软件开发中的应用[J]. 内燃机, 2006(5): 12-15.
- [11] 宋保林, 王朋真, 赵海发. 如何利用电控发动机传感器故障码快速解决故障[J]. 拖拉机与农用运输车, 2013, 40(5): 70-74.
- [12] 徐铁军, 黄超凡, 徐天蒙, 等. 从模型到自动代码生成的弹载飞行控制器设计[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(6): 44-47.
- [13] 何炎祥, 喻涛, 刘健博, 等. 基于 Esterel 的代码自动生成方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(5): 817-824.
- [14] AHMED M A, HERMADI I. GA-based Multiple Paths Test Data Generator[J]. Computers & Operations Research, 2008, 35(10): 3107-3124.
- [15] 房丽爽, 郭洪艳, 陈虹. 汽车动力学 HiL 仿真实验平台的搭建及应用[J]. 控制工程, 2015, 22(3): 375-381.
- [16] 闫祥海, 周志立, 徐立友, 等. 拖拉机 CAN 通信技术研究及试验[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2016, 37(4): 71-75, 77.

(编辑 刘红云)

作者简介: 张静云(1986-), 河南宜阳人, 助教, 硕士, 主要研究方向为车辆新型传动理论与控制。

通信作者: 徐立友(1974-), 河南息县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为车辆新型传动理论与控制。

欢迎各企事业单位和个人洽谈业务、刊登广告!