

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.020

基于模型的 HEX 自动生成工具的开发与应用

李哲帅,周文华*,聂飞

(浙江大学 能源工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对手动生成 HEX 文件耗时耗力、易出错和数据管理繁琐等问题,对编译链接原理进行了研究。对变量地址更新方法和数据管理方式进行了归纳分析,利用 m 脚本设计开发了 HEX 自动生成工具,完成了控制模型数据管理,实现了 Simulink 控制模型一键运行并自动生成 HEX 文件及 A2L 文件,生成的 HEX 文件可直接下载至单片机运行,最后通过发动机台架试验,充分验证了生成 HEX 文件的正确性和可靠性。试验结果表明:通过该工具链开发的高压共轨控制策略代码准确无误,能够实现发动机各工况下正常运行。HEX 自动生成工具简化了基于模型的 ECU 开发流程,保证算法开发工程师将更多精力专注于控制策略开发与验证,极大地提高了开发效率,大大缩短研发周期,降低开发成本。

关键词:HEX 自动生成; Matlab/Simulink; 基于模型; 高压共轨

中图分类号: TP312; TK427

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)08-0886-06

Development and application of model-based HEX automatic generation tool

LI Zhe-shuai, ZHOU Wen-hua, NIE Fei

(College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the time-consuming and error-prone problem of the manually generated HEX file and the complexity of data management, the principle of compiling and linking was studied, and the method of updating variable address and the way of data management were summarized and analyzed. Designed and developed with m scripts, the HEX automatic generation tool completed data management of the control model and enabled HEX file and A2L file to be generated automatically with one key. The generated HEX file could be downloaded directly to the microcontroller. At last by engine bench test, the correctness and reliability of the generated code was fully verified. The results show that the high-pressure common rail control strategy developed with this tool is accurate, and can realize the engine's normal operation under various working conditions. The HEX automatic generation tool can greatly simplify model-based ECU development, and allow algorithm development engineers to focus more on the design and verification of control strategies. Therefore, the tool improves development efficiency, reduces development cycle, and cuts down costs.

Key words: HEX automatic generation; Matlab/Simulink; model-based; high-pressure common rail

0 引言

目前,世界上主流柴油机电控喷油系统就是高压共轨系统,而控制软件的开发成为至关重要的环

节^[1]。随着控制功能越来越多,基于扭矩的控制算法越来越复杂化^[2],传统手写代码的开发模式已难以胜任,采用基于模型的开发模式^[3-5],便于控制策略后续修改完善。共轨压力控制是一个实时控制系统^[6],为追求良好的响应和控制精度,需要不断摸索最优控制

收稿日期:2017-12-22

作者简介:李哲帅(1993-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事发动机电子控制技术方面的研究。E-mail: zheshuai_li@163.com

通信联系人:周文华,男,副教授,硕士生导师。E-mail: zhouwh999@126.com

算法,采用模型设计方法将会极大减轻设计工作量,缩短开发周期。

通过 Embedded Coder 可将 Simulink 控制模型转换为 C 代码,但从 C 代码到可下载至单片机运行的包含程序和数据的十六进制文件(HEX 文件),仍有许多工作要做,如 C 代码编译链接、数据单元描述文件(ASAM MCD-2MC language, A2L)地址更新等,若人工执行,耗时耗力且容易出错。此外,模型数据管理也是个问题。

针对基于模型开发中这两个无法回避的问题,本文将利用脚本开发模型一键生成 HEX 工具,将 Simulink 模型直接转换为 HEX 文件。

1 总体框架设计

模型自动生成 HEX 工具 autorun. m 主要包含两部分:数据管理和 HEX 文件生成。具体实现流程如图 1 所示。

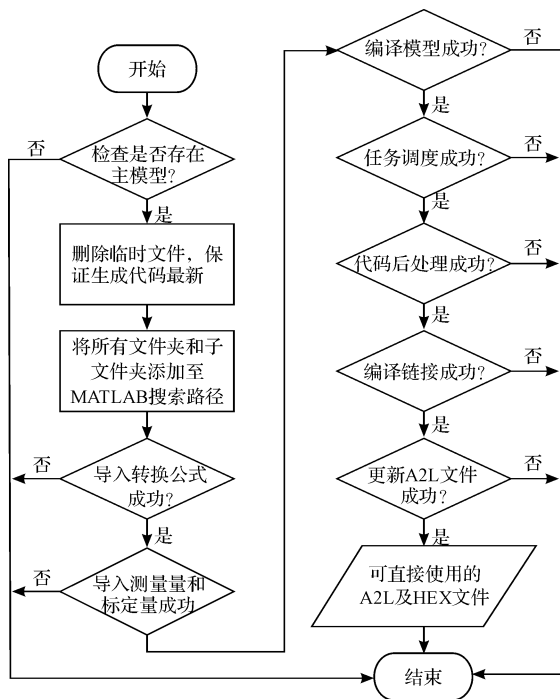


图 1 autorun. m 工具流程图

数据管理主要实现用 Excel 管理转换公式和模型数据。HEX 文件生成包含模型编译、任务调度、代码后处理、编译链接和 A2L 文件更新。autorun. m 脚本编写是建立在通用文件夹基础架构上的,通用文件夹基础架构如图 2 所示。

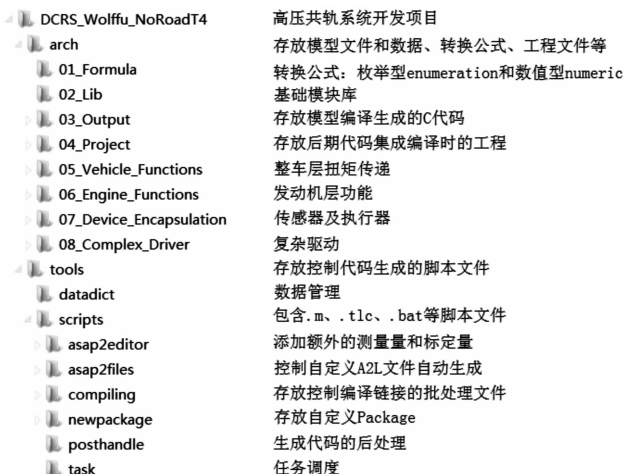


图 2 通用文件夹基础架构

2 数据管理

本研究采用常用的 Excel 实现数据统一管理,用于模型仿真测试、代码生成及 A2L 自动生成,其相较于 m 文件、mat 文件、sldd 格式的数据字典等^[7],更加清晰直观,并可利用 Excel 诸多便捷功能。

2.1 转换公式

转换公式包含枚举型 enumeration 和数值型 numeric 两类,用于物理值和十六进制数之间的转换,合理的转换公式有助于提升运算速度和精度。调用自定义函数 Import_ComputeMethod. m 读取 Excel 转换信息,分别创建 enumeration. m 文件至 Matlab 搜索路径,导入 numeric 至 Matlab 工作空间,实现流程如图 3 所示。

2.2 模型数据

模型数据包含 Simulink 控制模型中的测量量和标定量。调用自定义 Import_Data_Object. m 函数,通过 xlsinfo. m 和 xlsread. m 函数读取 Excel 数据,写入 modeldata. m 文件后运行,则把数据导入到 Matlab 工作空间,实现流程如图 4 所示。

3 HEX 文件生成

目标是自动生成可直接下载至 ECU 中使用的 HEX 文件,以及包含正确 ECU 描述信息的 A2L 文件。代码的编译链接、A2L 文件的地址更新等所有过程都是在后台完成,最终在 Matlab 命令窗口显示工作完成。HEX 文件自动生成流程如图 5 所示。

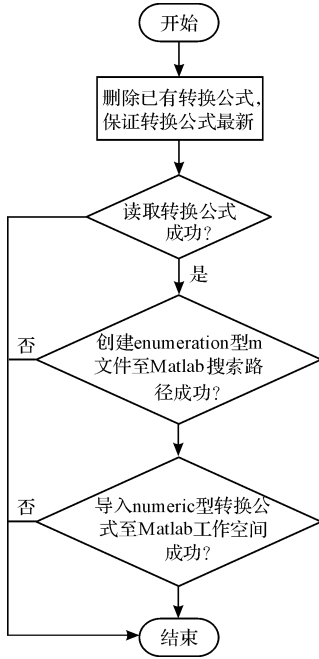


图 3 转换公式流程图

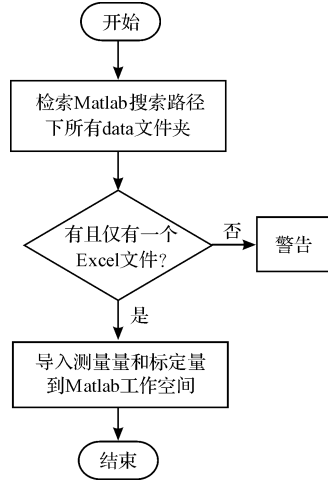


图 4 模型数据流程图

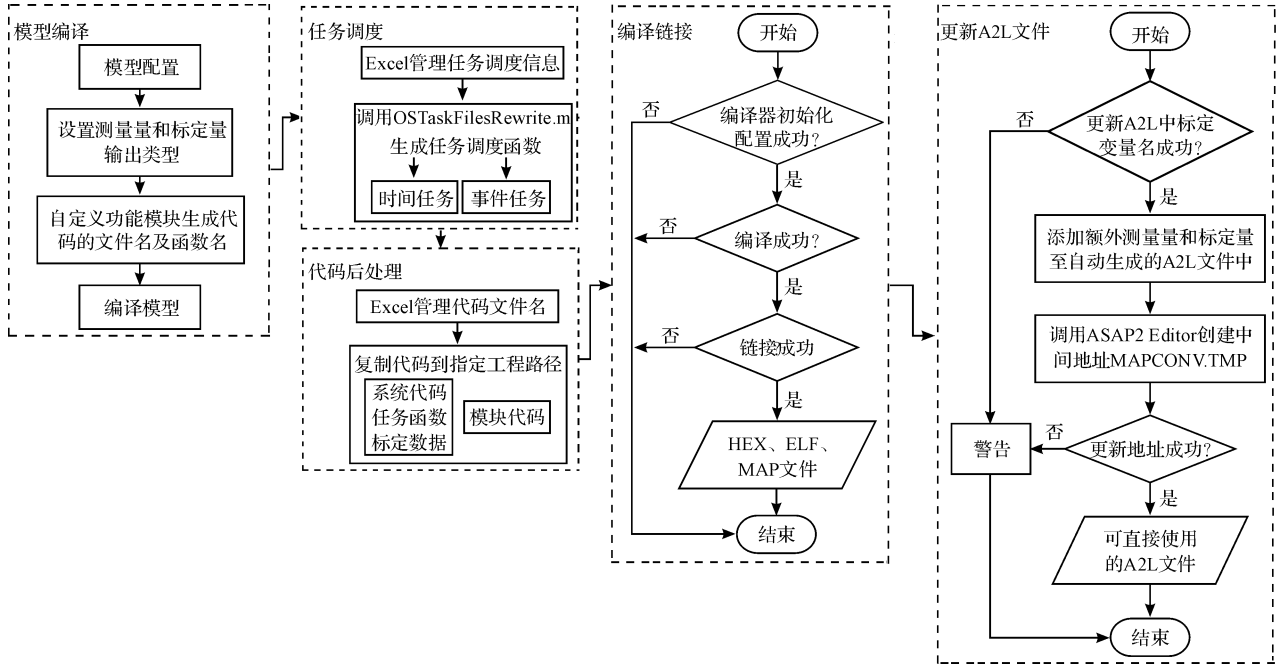


图 5 HEX 文件自动生成流程图

3.1 模型编译

本研究在编译前完成如下配置:主模型选择定步长离散求解器,硬件选择 Infineon-TriCore,系统目标文件选择 ert.tlc;单个功能模块设置为原子单元,以便自定义其生成代码的文件名及函数名;设置标定量输出类型为从常数继承,测量量输出 resolve,保证模型编译成功;最后通过 rtwbuild.m 函数编译模型为 C 代码。

3.2 任务调度

项目采用 RTA-OSEK 操作系统^[8],可实现喷油

量、喷油正时、轨压精确控制。为避免直接面对 C 代码进行操作,本研究采用 Excel 管理任务调度信息^[9],主要配置 2 个初始化任务,9 个时间任务,3 个事件任务,任务调度函数信息表如图 6 所示(以 10 ms 任务为例)。

将各功能模块函数名分别列入相应 Sheet,调用自定义 OSTaskFilesRewrite.m 函数,通过 xlsinfo.m 和 xlsread.m 函数读取不同 Sheet 中的任务函数名,并利用 fopen.m 和 fprintf.m 函数写入任务调度 C 文件如图 7 所示。

10ms Task Scheduling		
Section	Func	Name
1	BSW	ESC_PushSampTime_Proc_10ms()
2		ExeCon_Main_Proc()
3		SyC_Main_Proc_10ms()
4		SyC_PreDrv_Proc_10ms()
5		SyC_PostDrv_Proc_10ms()
6		OS_lstDrv10msTask_Proc()
7		SyC_Deadline_Proc_10ms()
8	MCAL	Epm_EngTooth10ms()
9		Epm_Eng10ms()
10		Epm_Spd_10ms_Proc()
11	APP	EpmCrS_Plaus(Epm_nEngIncl0ms)
12		EpmCaS_ActiveTimer()
13	APP	APP_Co()
14		Tl5_DD_Co()
15		TrqCnv_Co()
16		RailP_Co()
17		MeUn_Co()
18		InjSys_CtlQnt_Co()
19		HLSDem_Co()
20		EISGov_Co()
21		HPUn_Co()
22		Ccp_Daq_Proc_10ms()
23		Diag_Co_Proc()
24	BSW	ESC_PopSampTime_Proc()
25		TerminateTask()

图 6 10 ms 任务调度信息表

```

TASK(Task10ms)
{
    ESC_PushSampTime_Proc_10ms();
    ExeCon_Main_Proc();
    SyC_Main_Proc_10ms();
    SyC_PreDrv_Proc_10ms();
    SyC_PostDrv_Proc_10ms();
    OS_lstDrv10msTask_Proc();
    SyC_Deadline_Proc_10ms();

    Epm_EngTooth10ms();
    Epm_Eng10ms();
    Epm_Spd_10ms_Proc();
    EpmCrS_Plaus(Epm_nEngIncl0ms);
    EpmCaS_ActiveTimer();

    APP_Co();
    Tl5_DD_Co();
    TrqCnv_Co();
    RailP_Co();
    MeUn_Co();
    InjSys_CtlQnt_Co();
    HLSDem_Co();
    EISGov_Co();
    HPUn_Co();

    Ccp_Daq_Proc_10ms();
    Diag_Co_Proc();
    ESC_PopSampTime_Proc();
    TerminateTask();
}
    
```

图 7 10 ms 任务调度文件

3.3 代码后处理

本研究通过 copyfile.m 函数将 Matlab 自动生成 C 代码和脚本控制生成 C 代码统一拷贝至包含底层驱动和基础软件的工程路径下。

3.4 编译链接

将工程路径下所有应用层及底层源代码,通过后台调用编译器方式转换为机器码。调用 bat 批处理文

件,设定后台编译软件为 cctc.exe,初始化工作空间和路径,定义 CPU 类型为 TC 1782,参照 TASKING 编译器 Compiler 和 Linker 中配置生成的 All options 执行语句,把源代码编译成目标文件,再把目标文件和库文件链接成可执行文件,完成地址和空间分配,后台实现 C 代码编译链接等工作。

3.5 更新 A2L 文件

直接由 Matlab 自动生成的 A2L 并不完整,可通过修改相关 tlc 信息来自定义生成理想 A2L 文件。标定量定义成 Parameter,测量量定义成 Signal,设置 Interface 为 ASAP2。在 asap2setup.tlc 中自定义静态配置,包括文件名、工程名、注释、模块名等。在 asap2userlib.tlc 中自定义 HEADER 项目信息,包括项目编号、项目版本等,设置硬件交互部分内容,如添加 A2ML 和 IF_DATA、在 MOD_PAR 中设置内存范围等。将自定义设置好的 tlc 文件添加到 Matlab 搜索路径,生成自定义 A2L 文件。

Matlab 自动生成的 A2L 文件不包含实际地址,需用编译器分配物理地址进行更新。添加手写代码中测量量和标定量至自动生成的 A2L 文件后,利用 bat 脚本后台调用 asap2editor,结合包含编译器分配地址信息的 ELF 文件,生成中间地址文件 MAPCONV.TMP。用 TMP 中真实地址替换自动生成 A2L 中的假地址,完成变量地址更新。

4 试验验证

该试验用高压共轨控制模型如图 8 所示。

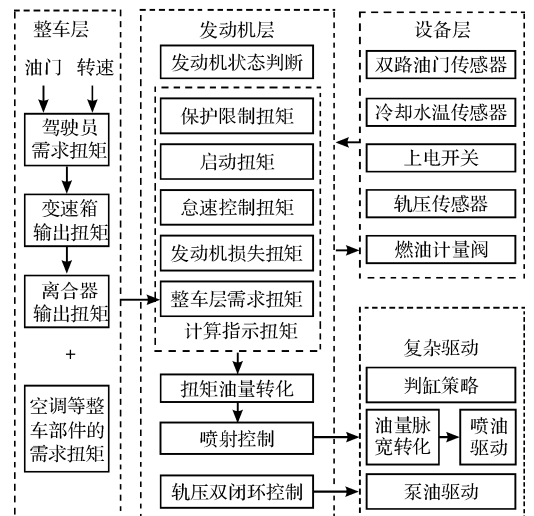


图 8 高压共轨控制模型结构图

试验用发动机是直列、废气涡轮增压中冷、水冷、四冲程柴油机,四缸,排量 1.995 L,额定功率 75 kW,额定转速 3 600 r/min,最大扭矩 223 Nm,怠速转速 800 r/

min。型号为常柴 4F20TCI。在发动机试验台架上,主要通过测试启动工况、轨压控制、怠速工况及部分负荷工况等 4 大核心功能,实现对高压共轨控制程序的充分验证,整个试验过程中发动机均能正常运行,验证了工具自动生成 HEX 文件的可靠性。

4.1 启动工况

实测发动机启动过程如图 9 所示。

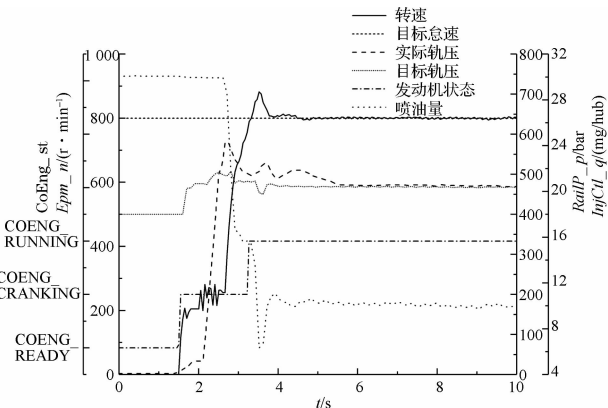


图 9 启动控制过程图

启动过程十分平顺,用时 2 s 左右,启动成功后转速超调 80 r/min 左右,并快速稳定至目标怠速 800 r/min,未出现“跌坑”,启动过程轨压超调量不超过 80 bar,并平稳过渡至目标轨压,整个启动过程正常,满足高压共轨柴油机启动要求。

4.2 轨压控制

实测发动机轨压控制效果如图 10 所示。

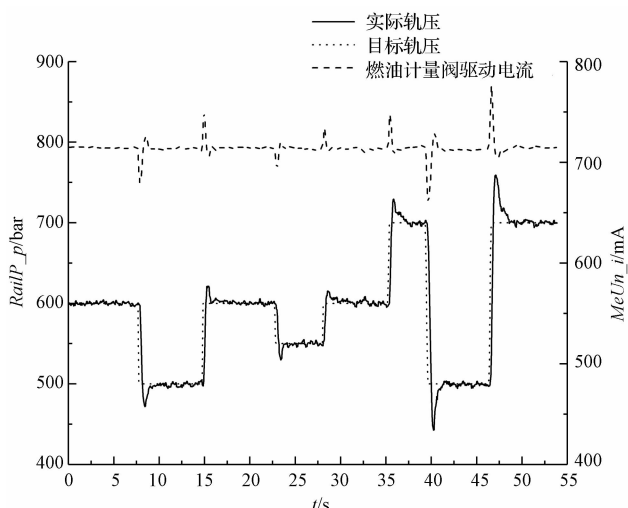


图 10 轨压控制效果图

手动设定目标轨压,通过调节 PID 控制参数,将轨压稳态偏差限制在 ± 5 bar 内。保持转速为 1 400 r/min,当目标轨压阶跃 50 bar 时,轨压超调 20 bar 左右;当目标轨压阶跃 100 bar 时,轨压超调 30 bar 左

右;当目标轨压阶跃 200 bar 时,轨压超调 60 bar 左右。轨压控制采用轨压 - 燃油计量阀驱动电流双闭环控制策略,调节响应迅速,基本没有振荡,直接平稳过渡至目标轨压,轨压稳态偏差控制和动态响应控制效果满足要求。

4.3 怠速工况

实测发动机怠速控制过程如图 11 所示。

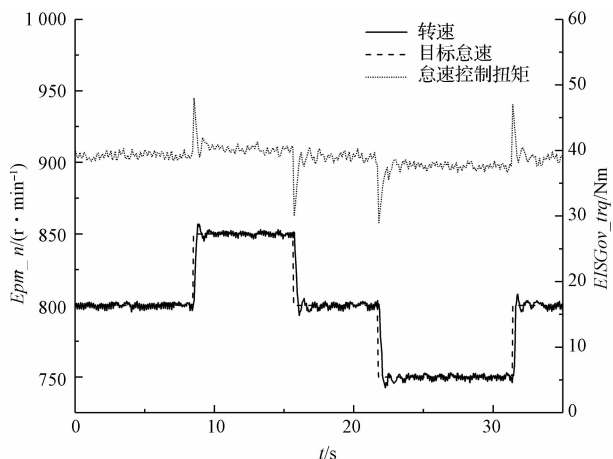


图 11 怠速控制过程图

稳态空载怠速波动在 ± 5 r/min 范围内,手动设定目标怠速阶跃 50 r/min,怠速超调量小于 10 r/min,并迅速稳定至目标怠速,响应时间不超过 1 s,满足怠速稳态和动态控制要求。

4.4 部分负荷工况

发动机部分负荷工况如图 12 所示。

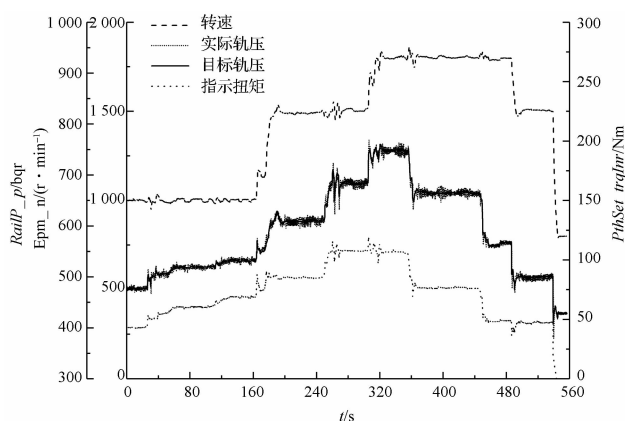


图 12 部分负荷工况控制效果图

试验分别选取 10 个工况点进行验证:(1)1 000 r/min 下测功机设定扭矩分别为 0 Nm、10 Nm、20 Nm、30 Nm;(2)1 500 r/min 下测功机设定扭矩分别为 0、30 Nm、50 Nm;(3)1 800 r/min 下测功机设定扭矩分别为 0 Nm、30 Nm、50 Nm。实测各工况下转速波动在 ± 5 r/min 范围内,轨压波动在 ± 5 bar 范围内,发动机

运行稳定,满足试验要求。

5 结束语

(1)本研究利用 m 语言、tcl 语言和 bat 脚本,完成 Simulink 控制模型到单片机 HEX 文件一键式实现,成功应用于高压共轨 ECU 开发项目,实践证明,HEX 自动生成工具开发的高压共轨 ECU 满足柴油机控制要求,并提升了整个开发过程自动化程度,提高了基于模型开发效率;

(2)HEX 自动生成工具采用调用函数方式实现各功能,便于后续完善,比如可通过 Excel 管理层次化模型信息,实现自动集成,进一步提升自动化程度,减轻工作量,缩短了开发周期;

(3)HEX 自动生成工具具有较强通用性,虽然是基于高压共轨 ECU 开发项目,完成工具开发与发动机台架试验验证,但也适用于其他任何 ECU 开发项目。

参考文献 (References):

[1] 方 焯. 基于模型的高压共轨柴油机控制策略研究与台架优化[D]. 杭州:浙江大学能源工程学院,2017.

- [2] 廖亮宇,徐劲松,申立中. 基于扭矩的高压共轨柴油机急加/减速控制策略的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2014,43(4):1-5.
- [3] JHA A, CHOUDHARY P. Adopting model-based software design and verification for aerospace systems[R]. Washington:SAE Technical Paper, 2017.
- [4] DION B. A cost-effective model-based approach for developing ISO 26262 compliant automotive safety related applications[R]. Washington: SAE, 2016.
- [5] MIRHEIDARI S, FALLAHI A, ZHANG D, et al. AUTO-SAR model-based software component integration of supplier software[R]. Washington: SAE, 2015.
- [6] 郭修其,周文华,郑朝武. 基于代码自动生成的共轨压力控制策略[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(8):1441-1445.
- [7] VITKIN L. The role of the data dictionary in the model-based development process [R]. Washington: SAE, 2009.
- [8] MACHER G, ATAS M, ARMENGAUD E, et al. A model-based configuration approach for automotive real-time operating systems[R]. Washington: SAE,2015.
- [9] 刘少飞,王 魏. 基于 Simulink 的模型调度系统设计与应用[J]. 汽车科技,2016(2):65-69.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

李哲帅,周文华*,聂 飞. 基于模型的 HEX 自动生成工具的开发与应用[J]. 机电工程,2018,35(8):◆-◆,◆.

LI Zhe-shuai, ZHOU Wen-hua, NIE Fei. Development and application of model-based HEX automatic generation tool[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(8):◆-◆,◆.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>