

一种支持 Cortex-M3 的 Simulink 自定义目标系统设计

常广晖, 陈 诚, 吴 越, 王宇欣, 刘树勇

(海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033)

摘要: 在基于模型的嵌入式控制系统设计开发中, 利用 Simulink Coder 和 Embedded Coder 等工具为控制算法、系统模型等自动生成嵌入式代码被证实是一种高效、可靠、便捷的方法; Mathworks 为自带的 Simulink 模块和 MTALAB 函数的目标代码生成提供了支持, 缺乏的是对于嵌入式开发中目标外围功能的直接支持, 比如数字、模拟输入/输出, 网络通信以及其它微控制器自身功能, 而这对于嵌入式系统开发往往是不可缺少的重要部分; 针对工业级嵌入式产品领域应用广泛的 Cortex-M3 内核微控制器这一目标, 设计开发了支持常用外围功能的 STM32F1XTarget 目标系统以及配套的嵌入式控制板, 详细阐述了 STM32F1XTarget 的工作流程和自定义设备驱动模块设计原理; 设计的目标系统支持由系统模型到应用程序下载的一键式操作, 这将算法设计和产品开发无缝连接到一起, 大大加速了嵌入式控制系统的开发流程, 降低了成本, 最后在倒立摆嵌入式控制系统开发中进行了实验验证, 检验了该目标的有效性和可靠性。

关键词: 自定义目标; 基于模型设计; 嵌入式控制; Cortex-M3 微控制器; 硬件驱动

A Design of Simulink Custom Target System Supporting Cortex-M3

CHANG Guanghui, CHEN Cheng, WU Yue, WANG Yuxin, LIU Shuyong

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In the design and development of model-based Embedded control system, it has been proved to be an efficient, reliable and convenient method to automatically generate Embedded codes for control algorithms and system models by using Simulink Coder and Embedded Coder tools. Mathworks for built-in Simulink module and target code generation of MTALAB function provides support, lack of is a target for embedded development in direct support of peripheral functions, such as digital and analog input/output, network communications and other function of micro-controller itself, and that for embedded system development is often an important and indispensable part. In order to achieve the goal of Cortex-M3 kernel micro-controller which is widely used in the field of industrial embedded products, the STM32F1XTarget target system supporting common peripheral functions and the matching embedded control board are designed and developed, and the work flow of STM32F1XTarget and the design principle of custom device driver module are described in detail. Design target system supported by the system model to the application download one-click operation, the algorithm design and product development of seamless connection together, greatly accelerated the development process of embedded control system, reduce the cost and the last in the inverted pendulum embedded control system development experimental verification, test the validity and reliability of the target.

Keywords: custom target; model-based design; embedded control; Cortex-M3 micro-controller; hardware driver

0 引言

Matlab/Simulink 被广泛应用于工程教育, 特别是控制类课程。控制理论的系统建模、特性分析及控制器设计都可以在 Matlab/Simulink 环境下实现^[1-3]。而另外一方面, 控制理论在实际物理系统中的生根落地, 离不开微控制器(MCU, microcontroller unit)编程以及将其与物理系统的集成过程。实现控制算法的主要工具是 C 和 C++ 编译器, 设计实际的控制系统, 必须具备扎实的控制理论知识。而

基于 Simulink 的控制算法的设计与最终 C 或 C++ 控制算法实现之间的鸿沟, 往往使的控制系统的设计变得复杂, 尤其是各种智能控制算法逐步走向实用的今天, 这个问题显得格外突出。

Simulink 环境下的 Embedded Coder 工具箱, 提供了将 Simulink 模型或 Matlab 程序直接转换为 C 和 C++ 代码的功能^[4-8]。更近一步为实现与物理系统的交互集成, 还需要 Simulink 模型对数字和模拟输入/输出等外设以及其他

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-12-28。

基金项目: 国家自然科学基金(51579242)。

作者简介: 常广晖(1979-), 男, 河北衡水人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事计算机仿真、机舱自动化方向的研究。

通讯作者: 陈 诚(1991-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事计算机仿真方向的研究。

引用格式: 常广晖, 陈 诚, 吴 越, 等. 一种支持 Cortex-M3 的 Simulink 自定义目标系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 190-195.

MCU 特性的直接支持^[9]。为了实现这个目的, 可以通过开发第三方的 Simulink 目标工具箱来实现。目前主要有 dSpace, xPC Target 前者价格昂贵, 后者仅仅是实时系统的 PC 机解决途径, 而且两者往往只能进行硬件在环的半物理仿真验证, 很难作为最终的控制应用到实际嵌入式控制系统。

Cortex-M3 是 ARM 公司的新一代 32 位低成本、高性能通用微控制器内核, 它引入了大量最新设计, 出色地平衡了强计算能力、低功耗和低成本之间的矛盾, 广泛应用于工业控制领域。很多芯片制造商正在生产 Cortex-M3 内核的 MCU, 其中意法半导体生产的 STM32F1 系列 MCU 就是其中杰出的代表。目前支持 Cortex-M3 MCU 的 Matlab/Simulink 第三方目标主要有用于 ST Discovery 开发板的 Embedded Coder 支持包、用于 ST Nucleo 开发板的 Simlink Coder 支持包、STM23-MAT/TARGET, 前两种目标仅支持 GNU GCC 编译器, 后者还需要 STM32CubeMX 软件包的支持, 开发相对复杂, 主要的共同缺点是: 它们都是封闭的, 无法实现功能的自行扩展。为此, 本文设计开发了一种开放式的 STM32F1XTarget 目标系统, 并给出软、硬件设计方案。硬件电路支持工业嵌入式控制常见的输入输出通道及网络通信功能^[10], 目标软件通过自定义 Simulink 模块封装的形式给出各功能硬件驱动程序。通过目标系统文件控制代码的生成过程将自动生成的代码文件通过 XML 文件读写的方式集成到标准 Keil MDK V5 工程模版上去。通过该实时目标进行嵌入式控制系统开发, 首先建立整个控制系统的 Simulink 模型并进行仿真分析, 仿真通过后对控制器的输入、输出通道驱动进行配置来替换建模仿真当中被控对象模型, 然后利用 Embedded Coder 代码生成机制, 实现控制器和硬件驱动代码的自动生成。代码生成完毕后自动后台调用 Keil uVision5 编译器对代码进行编译链接等操作, 全程不需要人为干预, 实现控制程序的一键式下载。

1 自定义目标嵌入式控制电路板设计

在一般工业嵌入式控制系统开发中, 常用的物理反馈通道包括数字输入、模拟输入、频率输入, 控制输出通道包括数字输出、模拟输出、PWM 输出等, 通信总线则包括以太网、CAN 总线、USART 等。为了提高 STM32F1XTarget 目标系统的适用性, 其配套的嵌入式控制电路板包含以上全部物理通道。电路板采用核心板+底板结构的模块化设计方案。核心板采用 ST 公司的 Cortex-M3 内核 STM32F103ZET6 作为 MCU, 在此基础上集成 DM9000BI 以太网通信电路和 FLASH 存储电路等, 底板主要是各类物理通道电路, 电路板总体组成如图 1 所示。

2 自定义目标软件系统设计

STM32F1XTarget 是完全开放并可以扩展的, 所有的代码和配置文件, 如 Matlab 代码、模板、配置等可以作为源

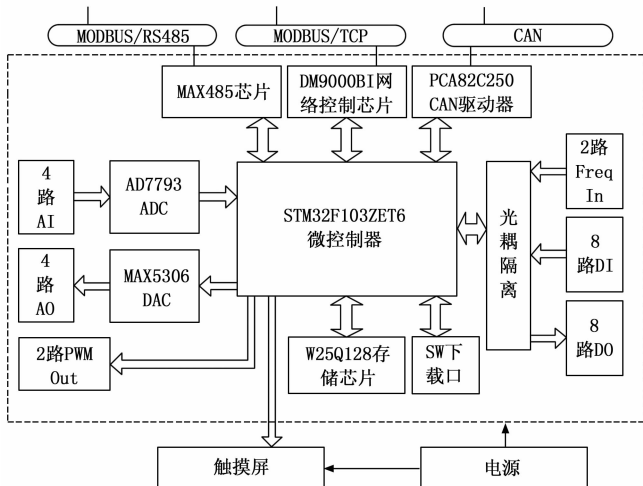


图 1 STM32F1XTarget 目标工具箱的驱动模块

代码使用, 并可以在此基础上扩充。STM32F1XTarget 基于 uCOS-II 实时操作系统, 它使用 Keil MDK V5 来编译生成的源代码。目标编译此后生成完整的支持 Keil MDK IDE 的项目文件, 有了这些项目文件, 在不运行 Simulink 模型或开发自己的模块时, 也可以手动编译和/或调试生成的代码。Simulink 块库包含两组功能块: 一类是 MCU 自带硬件资源驱动模块; 另一类是功能扩展模块。第一类模块包括: DIO, ADC, DAC, PWM 驱动, 编码器输入, TCP/UDP, RS485、CAN 网络通信等。第二类模块包括倒立摆模型、LQR 控制器等主要是控制对象和控制算法模块, 可以自行扩展。STM32F1XTarget 同时支持具有 Simulink 模型代码生成功能的 Simulink Coder 和 Embedded Coder。要生成、编译、链接和下载一个 Simulink 模型的 C 代码, 只需要一个步骤点击 Simulink 工具栏上的 Build 一键即可部署到配套的电路板上。

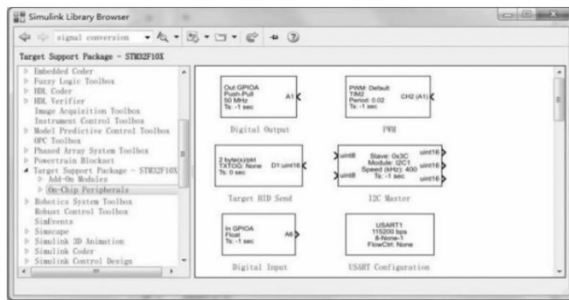


图 2 STM32F1X 目标自带硬件资源模块

2.1 STM32F1X 目标代码生成原理

将 Simulink 模型自动转换为可执行二进制文件的原理工作流程如图 4 所示。

Simulink Coder 或 Embedded Coder 首先从 Simulink 模型生成 rtw 文件^[11]。rtw 文件是一种模型的特定文本表示文件格式。在自定义目标 tlc 文件 (目标语言编译器文件) 的配置下, 目标语言编译器 (TLC) 会生成几个 c/h 文件和一

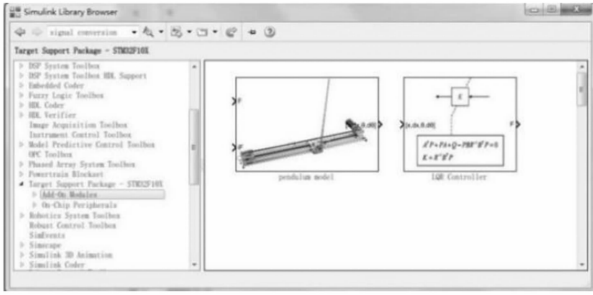


图 3 STM32F10X 目标功能扩展模块

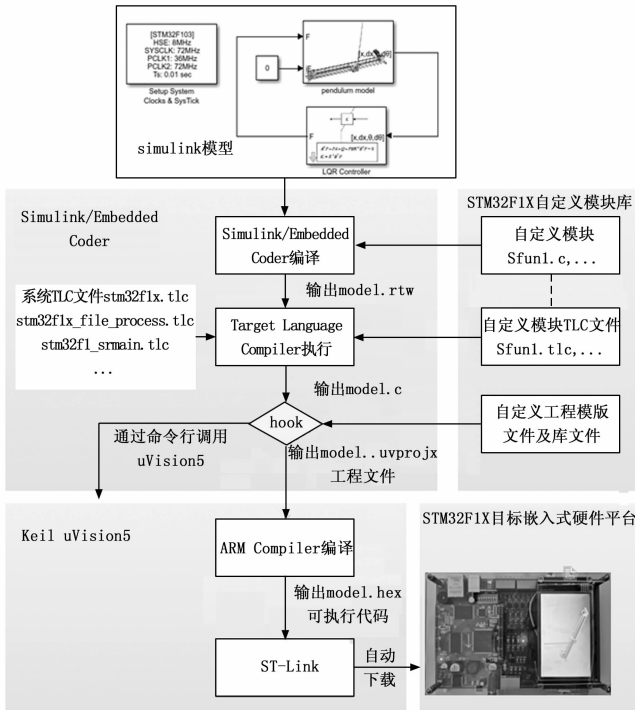


图 4 Simulink 模型转换为可执行代码的工作流程

个 Make 文件，与此同时这个过程会受到 hook 文件调用的控制。

STM32F10X 目标代码自动生成过程由以下几个 tlc 文件控制：stm32f1x.tlc 用于 Embedded Coder 或 stm32f1x_grt.tlc 用于 Simulink Coder 的起点。从 rtw 到 c 文件的转换过程中，TLC 提供了几个钩子来定制代码生成过程。STM32F1XTarget 主要使用两个钩子：after_make 用于代码处理进程和更新编译信息文件，exit 用于创建系统工程文件并将生成的代码添加到工程中。

整个过程可归纳为以下几个步骤：

1) TLC 使用当前 Matlab 工作路径将所有生成的文件存储在一个文件夹中，该文件夹的名称使用 Simulink 模型名和 '_stm32f1x_rtw' 后缀，例如 Invertedpendulum_stm32f1x_rtw。在此过程中，Simulink 提供的 tlc 文件用于每个标准的 Simulink 模块。对于每个非 simulink 模块，STM32F1XTarget 提供自定义的 tlc 文件。除了由 tlc 文

件生成的 c/h 文件之外，还基于 makefiles 模板 stm32f1x.tmf 创建了一个 makefile。这个 makefile 需要一个额外的 make include 文件，该文件在第 2 步中描述的钩子函数中生成。

2) 在步骤 1) 之后，在钩子调用 after_make 期间，创建一个特定目标文件夹。将所有生成的文件复制到该文件夹中，并生成一个特定于 stm32f1x 的 make include 文件。这包括文件非常类似于一个标准的 gcc 使用的 makefile。

3) 在执行 exit 钩子时，会通过项目工程模板生成模型对应的工程文件，并通过命令行自动调用 Keil MDK V5 软件，自动对项目进行编译生成一个 hex 可执行文件。

4) hex 可执行文件通过 ST-link 下载器下载到目标嵌入式电路板的 MCU 中。

2.2 STM32F10X 目标控制文件设计

TLC 通过执行目标系统中的控制文件来控制代码生成过程。设计目标控制文件目的是为了设置代码生成过程中的目标参数、定制用户代码、调用 Keil uVision5 等，STM32F10X 目标控制文件主要包括：stm32f1x.tlc、stm32f1x_file_process.tlc、stm32f1x_callback_handler.m、stm32f1x_make_rtw_hook.m。系统 TLC 文件 stm32f1x.tlc 是通过修改 Simulink 标准的嵌入式实时系统目标文件 (ert.tlc) 来实现，用来实现指定 TLC 配置变量、设定自定义目标选项和指定 tlc 文件入口等功能；自定义文件处理模板 stm32f1x_file_process.tlc 用于组织代码生成的格式，生成的全部代码文件的格式都应模板文件一致；回调函数 stm32f1x_callback_handler 是对一些目标系统常用默认设置项进行设置，比如：针对嵌入式开发需要将步长设置为硬件支持的固定步长并禁止修改，设置求解器、采样时间等。钩子文件 stm32f1x_make_rtw_hook.m 用于对代码生成的各个阶段对自定义操作的处理，为了实现代码生成、编译、下载过程的一键式操作，主要是在 exit 阶段通过编写 m 脚本文件，自动调用并指导 Keil uVision5 来实现。

2.3 STM32F10X 目标系统代码组件设计

代码组件指封装各类设备驱动或各类控制算法的自定义 Simulink 模块，要实现自定义的 Simulink 模块，需要以下元素：一块封装、一个 S 函数文件、一个 tlc 和 C 代码混合而成的 tlc 文件^[12-13]。块封装定义了 Simulink 模型编辑器中显示的模块的外观，定义了块掩码对话框中可用的输入参数。它还定义模块的标题、模块帮助文本和帮助菜单条目。模块参数连接模块块与 S 函数，即一个由 C 语言实现的二进制的 mexw64 文件。和与 S 文件同名的 tlc 文件。在 STM32F1XTarget 中，S 函数主要描述模块的行为：输入和输出端口的数量和类型，检查参数并准备将这些参数传递给 TLC 编译器。

tlc 文件是 tlc 代码、类似脚本的语言和代码片段形式的 C 代码的混合物^[14-15]。脚本代码控制和组织 C 代码片段在

生成的 C 文件中怎样和在哪里放置 .tlc 文件主要包含三个功能: Setup、Start 和 Output。Setup 函数控制包含额外的头文件和源文件, Start 函数执行一次以生成初始化代码, Output 在每个 simulation 循环中调用一次。即使名字是输出, 函数也必须处理通过 Simulink 传送到输入端口的输入值。例如 Digital Output 模块以上 3 种函数代码如下:

```

%function Setup(block, system) void
%assign hFile = LibCreateSourceFile("Header", "Custom",
"%<CompiledModel.Settings.CONF_filename>")
%assign HW_Lib_cFile = LibCreateSourceFile("Source", "
Custom", "%<CompiledModel.Settings.Hardware_Lib_filename
>")
%if (EXISTS(::__STM32F10X_GPIO__) == 0)
%assign : : __STM32F10X_GPIO__ = 1
%openfile tmpBuf
include "stm32f10x_gpio.h"
%closefile tmpBuf
%<LibSetSourceFileSection(hFile,"Defines",tmpBuf)>
%<LibAddToModelSources("stm32f10x_gpio")>
%endif
%endfunction

%function Start(block, system) Output
%assign nPars = SIZE(SFcnParamSettings.Bits,1)
%assign isByte = SFcnParamSettings.IsByte
%assign nextChannel = 0
%assign port = getPort(SFcnParamSettings.DIOPort)
%if ISEQUAL(port,"PORTA")
%assign port = "PORTA"
%assign ddr = "DDRA"
%else
%assign port="PORTB"
%assign ddr = "DDRB"
%endif
%if isByte
%<ddr> = 0x00;
%else
%foreach idx=nPars
%assign bitIdx = CAST("Number",SFcnParamSettings.Bits
[idx])
%assign rhs = setBitVal(ddr, idx, 0)
%<ddr> = %<rhs>;
%assign nextChannel = nextChannel+1
%endforeach
%endif
%endfunction

%function Outputs(block, system) Output
%assign Channel = 0
%foreach idx = nbr_pins
%assign pin = CAST("Number",%<pins[idx]>)

```

```

%assign y = LibBlockOutputSignal(%<Channel>, "", "",
0)
%assign y_type = LibBlockOutputSignalDataTypeName(Chan-
nel, "tRealPart")
%<y> = * %<portname>_%<pin>;
%assign Channel = Channel + 1
%endforeach
%endfunction

```

3 基于自定义目标的嵌入式控制器开发实例

倒立摆是一个典型的不稳定非线性系统, 是控制领域检验各种控制策略有效性的典型控制对象。为了验证 STM32F1XTarget 目标系统的有效性, 利用该目标设计一级直线倒立摆的嵌入式控制器。首先通过 Matlab2018b 中的 SimscapeMultibody 工具箱建立了与实验室倒立摆物理特性一致的多体动力学仿真模型, 为了推导其 LQR 控制器, 在平衡点将模型线性化为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.52 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 65.37 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 3.576 \\ 0 \\ -18.96 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

其中: x 为小车的位移, θ 为摆杆旋转角度, u 为小车的作用力。

根据 Riccati 代数方程, 得到倒立摆 LQR 控制器 $K = [10.0 \ 6.171 \ 22.128 \ 2.625]$, 为了克服实际位移、角度测量中的噪声干扰在 LQR 控制器前端增加卡尔曼滤波状态观测器^[16-20], 将上述倒立摆模型及控制器模型在 Simulink 环境下集成, 得到的系统仿真模型如图 5 所示。

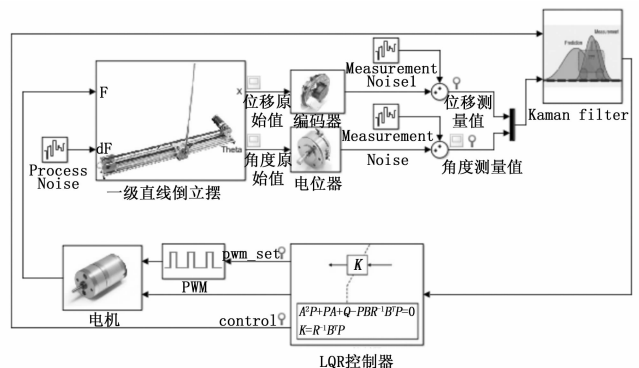


图 5 倒立摆控制仿真模型

经过仿真验证所设计的控制器可以有效的进行稳摆控制, 接下来通过 STM32F1XTarget 目标工具箱的驱动模块快速替换建模仿真当中的倒立摆模型, 所用模块如表 1 所示。

对硬件驱动进行配置后的控制器模型如图 6 所示。

接下来在 Simulink 配置对话框中, 选用 STM32F1XTarget.tlc 系统目标文件, 硬件类型选择 ARM Cortex 类型, 仿真设置为定步长, 步长为 0.005 (即 5 ms), 设置好之后就可

表 1 倒立摆控制嵌入式目标所用模块列表

序号	模块功能	STM32F103ZET6 通道	MCU 引脚	STM32F1XTarget 工具箱模块
1	小车位移 信号	TIM4_CHI	PB6	Encoder_In
2	摆杆角度 信号	ADC1_Channel8	PB0	ADC
3	PWM 电机 驱动信号	TIM1_Channel1	PA8	PWM_Out
4	电机正反转 控制信号	GPIO	PB13	Dout
5	MCU 系统 时钟配置			Setup SystemClocks & SysTick

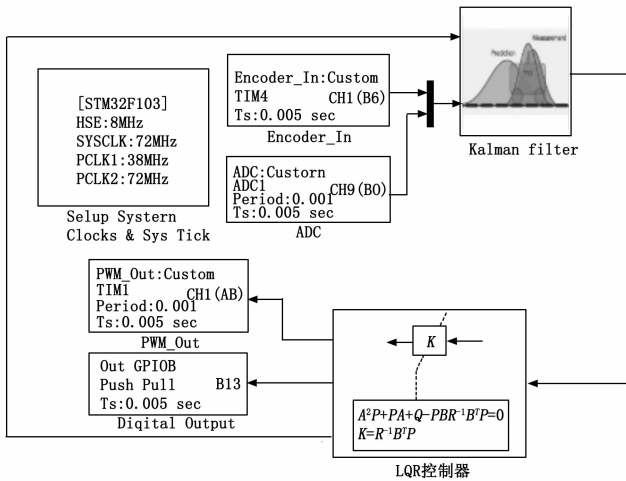


图 6 带硬件驱动配置的控制器模型

以将使用 build 命令利用 Embedded Coder 一键生成嵌入式控制工程如图 7 所示，工程自动编译下载到配套的嵌入式控制板中。整个过程不需要用户编写任何 C 语言代码。

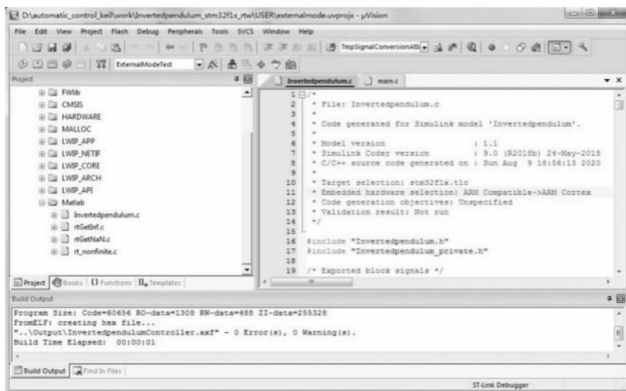


图 7 生成代码图

4 实验结果与分析

在基于自定义目标的实际倒立摆的控制试验中，上位

计算机通过 Simulink 的 TCP/IP Receive 模块接受嵌入式控制电路板实时上传的小车位移和摆杆角度两个数据并显示，同时与运行的仿真体数据比对，实验结果如图 8、9 所示。

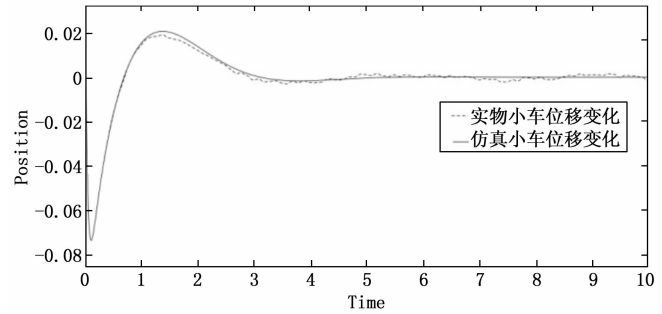


图 8 小车位移的实物与仿真对比

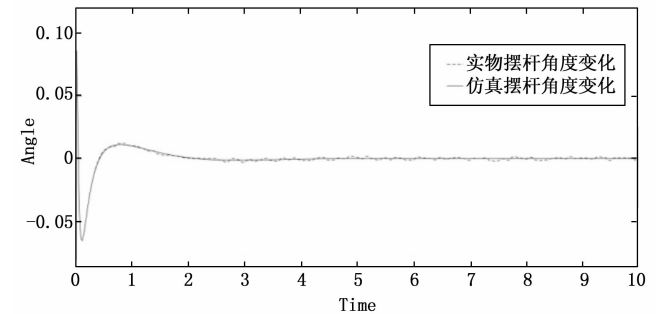


图 9 倒立摆角度的实物与仿真对比

实验结果表明，采用基于模型设计的控制算法通过自动代码生成直接移植到嵌入式控制器，几乎取得了同仿真一致的控制效果，所设计的自定义目标有效可行，使嵌入式控制系统开发简洁高效。

5 结束语

STM32F1XTarget 的开发是为了改善和简化 MCU 在传感器/执行系统等嵌入式控制系统等模块中的使用，工具箱所提供的模块涵盖了配套嵌入式电路板所支持各类硬件驱动。利用 STM32F1XTarget 目标软件嵌入式电路板配套使用，可胜任大部分工业嵌入式控制应用，使开发者仅仅关注算法的开发，不用把大量的精力投入到底层硬件设计和 C 语言的驱动设计。通过倒立摆实际稳摆控制试验，验证了使用 MBD 方法简化了嵌入式控制器的设计过程，减少了设计失败的风险，相比通过手动编写代码设计控制其而言，缩短了设计时间提高了设计效率。该 MDB 方法流程为其它复杂机械系统控制器的设计提高了很好的借鉴。

参考文献：

[1] NAJAFI E, ANSARI M. Model-based design approach for an industry 4.0 case study: a pick and place robot [C] //2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (IC-MT), IEEE, 2019: 1-6.
 [2] ZHU S X, MA W L. A study on automatic control principle

- courseware based on MATLAB [J]. Computer Engineering and Intelligent Systems, 2015, 6 (5): 1-15.
- [3] 蔡云霄, 张敏良. 基于 Matlab 的早高峰电梯群控调度系统仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (9): 97-102.
- [4] TULPUL P, REZAEIAN A, KARUMANCHI A, et al. Model based design (MBD) and hardware in the loop (HIL) validation; curriculum development [C] //2017 American Control Conference (ACC), IEEE, 2017: 5361-5366.
- [5] 徐捷, 丁学明. 基于 Matlab 与 STM32 的电机控制代码自动生成 [J]. 电子科技, 2017, 30 (4): 148-151.
- [6] HALLORAN C O. Automated verification of code automatically generated from Simulink [J]. Automated Software Engineering, 2013, 20 (2): 237-264.
- [7] 王顺锋, 孙培德. 基于 MATLAB 的 DSP 实时控制软件自动生成 [J]. 微型机与应用, 2015, 34 (8): 20-22.
- [8] LIU X F, CUI S M, GAO W F, et al. Software development of on-board power electronics equipment using model-based design methodology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 2963: 1524-1528.
- [9] 刘杰, 翁公羽, 周宇博. 基于模型的设计—MCU 篇 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [10] 汪伟, 莫官旭, 申健, 等. 基于 Simulink 自动代码生成技术的 CAN 底层模块库设计 [J]. 控制与信息技术, 2020 (3): 93-96.
- [11] 刘杰. 基于模型的设计及其嵌入式实现 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
- [12] 王博, 华庆一, 舒新峰. 一种基于模型和模板融合的自动代码生成方法 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (22): 69-74.
- [13] 张磊. 代码自动生成技术在实验教学中的应用 [J]. 电气电子教学学报, 2019, 41 (5): 141-143.
- [14] 李进忠, 李银莘, 文国然. 基于自动代码生成技术的汽车控制系统设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (18): 166-169, 174.
- [15] 万彪. 一种 Simulink 模块封装的自动代码生成技术研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (10): 166-169.
- [16] 祁虔, 李祖枢, 谭智, 等. 基于卡尔曼滤波的倒立摆控制系统噪声抑制 [J]. 控制与决策, 2010, 25 (8): 1145-1149.
- [17] 万胜辉, 丁求启, 蒋知彧. 基于卡尔曼滤波的新型船摇前馈补偿方法 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 214-216.
- [18] SCHIFF S J, SAUER T. Kalman filter control of a model of spatiotemporal cortical dynamics [J]. BMC Neuroscience, 2008, 9 (s1): 206-225.
- [19] SZITA I A, et al. Kalman filter control embedded into the reinforcement learning framework [J]. Neural Computation, 2004, 16 (3): 491-499.
- [20] NGUYEN T T H, Tomonori NAKAYAMA T, ISHIDA M. Power control method using Kalman filter prediction for stable operation of PV/FC/LiB hybrid power system based on experimental dynamic characteristics [J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2015, 94 (6): 532-541.

(上接第 171 页)

析; 最后一组实验是进行了本文的基于 HadoopMapReduce 算法进行网络安全预测, 首先进行数据清理和预处理、降维、特征值训练, 采用了 Hadoop 的 MapReduce 算法进行了结果集的关联规则分析得出结果集, 实验结果显示本文的模型的检测率最高。

5 结束语

本文提出并实现了基于 Hadoop 的分布式数据处理的网络安全预测算法, 该算法通过对现有较为流行的机器学习算法进行有针对性的优化、改进后, 进行网络安全事件的预测和预警。经过试验证实, 采用 Hadoop 分布式大数据处理平台与数据挖掘算法结合的模式, 实现了分布式数据处理的并行化计算提升海量数据处理能力的目的。通过数据降维和特征值训练, 增加误差反馈自学习能力, 解决了以往的网络预测模型的检测率低的问题。

参考文献:

- [1] ENDSLEY M R. Situation awareness global assessment technique (SAGAT) [C] // NAECON 1988. Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference, IEEE, 1988: 789-795.
- [2] BASS T. Intrusion detection and multisensor data fusion: Creating cyberspace situational awareness [J]. Communications of the ACM, 1999, 43 (24): 100-105.
- [3] LAU S. The spinning cube of potential doom [J]. Communications of the ACM, 2004, 47 (6): 25-26.
- [4] NG P C, HENIKOFF S. SIFT: Predicting amino acid changes that affect protein function [J]. Nucleic Acids Research, 2003, 31 (13): 3812-3814.
- [5] 朱丽娜, 张作昌, 冯力. 层次化网络安全威胁态势评估技术研究 [J]. 计算机应用研究, 2018, 28 (11): 78-89.
- [6] 胡华平, 张怡, 陈海涛. 面向大规模网络的入侵检测与预警系统研究 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 25 (1): 21-25.
- [7] 王国华. 基于遗传算法的网络安全态势感知研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (12): 155-161.
- [8] 刘冬兰, 刘新, 张昊, 等. 基于大数据的网络安全态势感知及主动防御技术研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 229-233.
- [9] 赵国生, 王慧强, 王健. 基于灰色 Verhulst 的网络安全态势感知模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 40 (5): 798-801.