

基于 Matlab 的运动控制系统实验平台设计

徐建明, 支文龙, 周家豪

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对运动控制系统课程在传统教学中, 学生在课程理论知识学习和利用 Matlab/Simulink 仿真阶段, 缺少实际控制单元设计与开发实际工程训练的问题, 设计了一个基于 Matlab 的运动控制系统实验平台, 在实验平台使用基于模型设计的方法可实现从仿真测试到实物测试一体化; 通过介绍实验平台中的 PC 端环境配置流程以及实验平台中驱动器的构成给出了实验平台的总体设计方案; 说明了实验平台应用基于模型设计的方法实现代码自动生成的流程, 并对基于模型设计的开发流程进行了详细的阐述; 通过案例永磁同步电机转速、电流双闭环控制系统在实验平台经过模型在环仿真、软件在环仿真、处理器在环仿真, 最后到实验平台进行实物测试的流程与实验结果来达到验证实验平台的优点及其可行性和有效性的目的。

关键词: 实验平台; Matlab/Simulink; 基于模型设计; 代码自动生成; 永磁同步电机

Design of Experiment Platform for Motion Control System Based on Matlab

XU Jianming, ZHI Wenlong, ZHOU Jiahao

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aimed at traditional teaching courses on motion control systems, students lack practical training in actual control unit design and development for engineering applications, particularly during the phases of learning theoretical knowledge and applying Matlab/Simulink simulation. To address this issue, an experimental platform based on Matlab is designed for motion control systems, which enables the integration of simulation testing and physical testing by using a model-based design method. The overall design scheme of the experimental platform is presented, including the configuration of the PC side environment and the composition of the drivers on the platform. It explains that the model-based design method is used to achieve the automatic code generation on the experimental platform, and the development process of the model-based design is elaborated in detail. Through taking a permanent magnet synchronous motor as an example, the speed and current dual closed-loop control system is verified on the platform, the process and experimental results of the model in loop simulation, software in loop simulation, processor in loop simulation, and physical testing on the experimental platform are presented to validate the advantages, feasibility, and effectiveness of the experimental platform.

Keywords: experimental platform; Matlab/Simulink; model-based design; automatic code generation; permanent magnet synchronous motor

0 引言

运动控制系统课程是高校自动化专业一门很重要的专业课程, 该课程是一门综合了多学科的综合课程, 具有很强的实践性和应用性^[1]。因此实验操作对于该课程非常重要, 通过在课程中结合实验对于学生学习直流与交流电机的调速系统理论知识有很大的帮助, 与此同时在实验设计电机驱动控制系统过程中学生实践能力也能够得到提高。

在传统的运动控制系统实验教学中, 一般常见的实验方式有: 一种是在实验室中, 对电机的基本参数进行测量, 通过工程设计的方法设计出电流调节器和转速调节器, 然后在实验台上进行接线, 调参等操作来实现对电机的控制。另一种是在 Matlab/Simulink 中搭建控制模型, 通过仿真的模式来对控制系统进行研究^[2]。两种方式都有一定的局限性, 前者侧重实际应用, 因此在实验前需要经过繁琐的设

计与计算; 后者侧重仿真, 结果会偏于理想化。

针对运动控制系统课程实验平台的不足, 国内外对于运动控制系统课程实验平台设计的研究也有不少。文献 [3] 介绍了一种基于 TMS320F2812 DSK 的低成本电机控制测试台。文献 [4] 介绍了一种用于设计和实现嵌入式控制软件的实验平台。文献 [5] 将 Matlab/Simulink 和 SimPowerSystems 工具箱引入到了运动控制系统课程的实验教学中。文献 [6] 介绍了将 Matlab/Simulink 仿真与实际硬件设备控制相结合的实验平台。文献 [7] 从运动控制系统课程特点和实践环节各类实验的特点分析入手来建设实验平台。文献 [8] 介绍了一种新型的快速控制原型系统, 该系统将控制类课程仿真与动手实践相结合, 学生通过该系统可以专注于控制系统设计、仿真和实验控制验证, 而不是单纯编程。文献 [9] 介绍了一种永磁同步电机控制系统的实验平台, 该平台实现了仿真和硬件平台控制的结合。

收稿日期: 2023-04-08; 修回日期: 2023-05-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374103); 浙江省高等教育“十三五”第二批教学改革项目(JG20190078)。

作者简介: 徐建明(1970-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 徐建明, 支文龙, 周家豪. 基于 Matlab 的运动控制系统实验平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 146-152.

基于模型设计 (MBD, model based design) 是一种系统工程方法, 其基本思想是通过系统建模、仿真和验证, 实现对系统的整个周期设计、开发和测试的自动化管理^[10]。MBD 在工程实践中应用广泛, 包括航空、汽车、医疗器械等领域^[11-12]。MBD 的重点是建模语言和工具的研究, 在建模工具方面, Simulink 是应用最广泛的基于模型设计的工具之一, dSPACE、NI LabVIEW、Rhapsody 等软件也是 MBD 工程实践中使用最多的工具^[13-14]。此外, 研究者还致力于探索新的建模语言和工具, 以提高 MBD 的建模效率和可靠性^[15]。

除了上述的应用领域之外, MBD 还可以用于嵌入式系统的开发^[16-17]。嵌入式系统的开发和测试比一般的软件开发更加复杂和困难, MBD 可以提高嵌入式系统的开发效率和质量, 缩短开发周期, 降低开发成本^[18-19]。相对于传统的嵌入式设计开发模式, 基于模型设计的开发模式以模型作为中心, 从模型搭建到代码自动生成一体化实现了高度自动化的开发流程^[20]。这种开发模式的优点在于用户只需在模型上根据需求设置寄存器的工作方式就可以自动生成用于工程应用的 C 代码。这不仅加快了开发过程, 还免去了手写代码可能带来的程序漏洞。同时, 这种模式提供了接口来连接算法模型, 让嵌入式工程师更专注于算法设计, 真正实现了高效开发^[21]。

本文使用 Matlab 软件中的可视化仿真工具 Simulink, 用基于模型设计的方法来设计一个运动控制系统的实验平台, 实验平台主要由 PC 端、驱动器和控制对象三部分构成。用户通过 Matlab/Simulink 对控制对象搭建仿真模型, 并在 Matlab/Simulink 环境中对仿真模型进行仿真且对仿真结果进行分析, 当得到理想的效果时再对其进行软件在环仿真与处理器在环仿真验证。最后在 PC 端环境中将模型控制算法自动生成 C 代码工程形式, 使用 Keil5 编译环境对 C 代码工程编译并载入以 STM32 为主控的驱动器中进行实物验证。用户通过操作实验平台可实现从建模仿真到实物验证实验一体化。

1 平台功能与总体方案介绍

1.1 平台功能

实验平台主要由 PC 端、驱动器和控制对象三部分构成, 如图 1 所示。用户在 PC 端使用 Matlab/Simulink 软件平台可进行对被控对象的建模仿真操作。当仿真结果达到理想效果时, 在 PC 端使用 Matlab/Simulink 软件和 STM32CubeMX 软件将模型生成 C 代码工程, 最后使用 Keil5 编译环境对生成的 C 代码工程编译并载入到驱动器中执行实物测试的功能。

1.2 PC 端环境配置

实验平台的 PC 端主要为用户提供构建控制对象模型、STM32 微处理器配置以及代码自动生成的环境。在设计实验平台时需要 PC 端的环境进行配置, 主要是安装 Matlab、STM32CubeMX 和 Keil5 这 3 个软件。其中 Matlab/Simulink 是实验平台 PC 端运行环境的核心, 实验平台的模

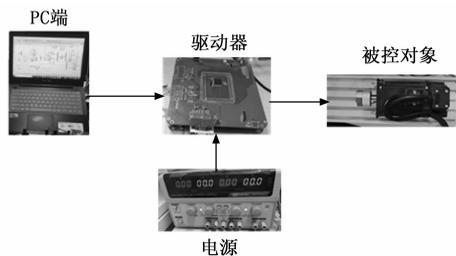


图 1 实验平台

型搭建与代码自动生成都在 Matlab/Simulink 中运行。

实验平台中驱动器使用的微处理器是 ST 公司的 STM32G474VET6, 由于 Simulink 的模型库管理器中没有 STM32 相关的模型功能块, 因此需要在 Matlab/Simulink 中安装 ST 公司开发的 STM32-MAT/TARGET embedded target 工具箱。STM32-MAT/TARGET 是 Simulink 中包含 STM32 功能模块的硬件库, 在安装该硬件库后 Simulink 的模型库管理器中会添加 STM32 对应功能模块的模型, 如 ADC library、GPIO library、MCU CONFIG library、TIMERS library 等等。其中 MCU CONFIG 模块是 STM32 微处理器模块, 该模块是 Matlab/Simulink 与 STM32CubeMX 之间的“桥梁”, 在 Simulink 中设置更新 STM32CubeMX 的路径后通过 MCU CONFIG 模块可以启动 STM32CubeMX 软件。

2 平台硬件设计

图 2 为系统平台驱动器的硬件设计总体框图, 总体分为两个部分: 以 STM32 微处理器为主控的控制电路部分和驱动电路部分。其中, 控制电路的微处理器为 STM32, 其主要对整个驱动控制系统进行任务分配和控制。控制模块主要负责处理传感器模块采集回来的数据并对其进行计算处理, 如编码器电路采集的电机转子位置信息和转速信息以及电流采集电路采集的电流信息。驱动模块主要通过接收控制模块传输的信号来改变驱动电路的状态实现对电机的控制, 并将电机的运行数据反馈给控制模块。电源模块主要将输入电源电压通过升压或降压转换为电路中各个模块所需的电压, 对电路中各个模块进行供电。

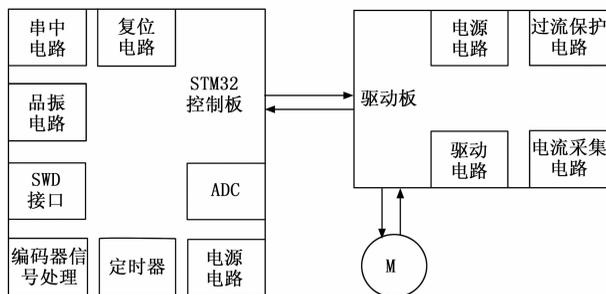


图 2 系统平台驱动器硬件框架图

3 基于模型设计的开发流程

实验平台利用 Matlab 软件平台的 Simulink 结合 ST 公司开发的针对 STM32 微处理器的 Simulink 库 STM32-MAT

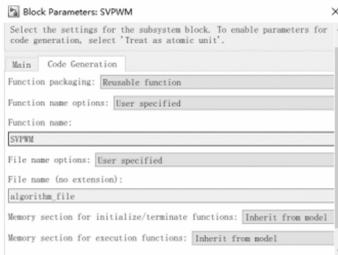
target 工具箱实现从建立运动控制系统的仿真模型到自动生成可读写和可移植的 C 代码工程文件,并在 STM32 微处理器上实际运行。整个设计的流程大致分为 5 个步骤:

1) 建立仿真模型进行模型在环仿真 (MIL, model in the loop), 建模仿真是一种模拟、分析和预测实际系统运行的一种方法,其与实验有一定的区别。对于一些复杂的控制系统,相对成本较高,通过建立仿真模型可以预测系统可能出现的问题和风险,提前采取措施以减少事故和损失。因此建模仿真可以提高系统的效率、减少风险和成本,优化方案选择,从而为系统的研究和决策提供有力支持。

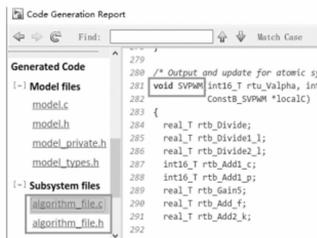
2) 软件在环仿真 (SIL, software in the loop), 软件在环仿真是一种系统级仿真技术,它通过在计算机上运行虚拟系统来评估和验证嵌入式软件的性能和功能。

3) 处理器在环仿真 (PIL, processor in the loop), 处理器在环仿真是一种广泛应用于嵌入式系统开发中的仿真技术。在 PIL 仿真中,嵌入式处理器和相关外设被实际连接到仿真环境中,并与运行在主机计算机上的软件模拟器进行交互。

4) 模型设置生成代码的优化, Matlab/Simulink 平台在基于模型设计中提供了两方面的优化方式:一种是通过改变模块之间信号线的存储类型从而改变代码生成时的变量类型方式;另一种是在搭建控制算法模型时利用结构化的思想将整个模型分解成一个个子系统,并将代码生成在自定义的文件的自定义函数中,以便于移植和调用^[22]。以 SVPWM 算法为例, SVPWM 算法模型设置生成代码的优化配置与其生成的代码如图 3 (a) 所示,优化后的生成代码以函数形式单独生成在自定义的文件中,函数名为自定义的名称 (如图 3 (b) 所示)。



(a) 代码优化模型参数设置



(b) 优化后的 SVPWM 算法模型生成的代码

图 3 模型生成代码的优化配置

5) 配置微处理器模型的参数结合控制算法的模型利用 MATLAB/Simulink 自动生成代码,将其应用到实验平台

进行测试。

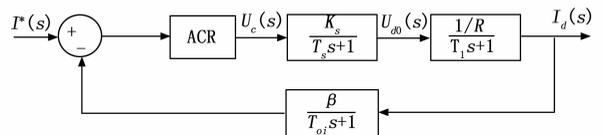
4 基于模型设计的运动控制系统实验的案例

以永磁同步电机的转速、电流双闭环控制系统为例,使用基于模型设计的方法,按照模型在环仿真、软件在环仿真、处理器在环仿真最后到实验平台进行实物测试的顺序来详细介绍实验平台如何实现从仿真到实物测试并通过实验结果来验证实验平台的可行性。

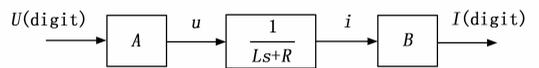
4.1 调节器设计

在工程设计中,转速、电流双闭环控制系统的设计原则是先设计内环再设计外环,一般先设计电流环,将其作为内环,确定电流调节器的设计方案后,把电流环等效成外环的一个环节,再设计外环即转速环^[23]。

对于电流环来说,它是控制系统的内环,主要负责控制电机的电流,因此电流环的好坏直接决定系统的稳定与否。在电流瞬变的过程中,反电动势可以暂时被认为是基本不变的,这是因为电流变化的时间尺度远远快于电机转速的变化时间尺度。因此,在瞬态过程中,可以忽略反电动势的作用,将电机视为一个纯电阻负载进行分析,简化控制系统的建模和控制器的设计。如图 4 (a) 所示为忽略反电动势影响的电流环动态结构图。



(a) 电流环动态结构图



(b) 电压电流数字量与真实值之间关系图

图 4 电流环结构图

在电机控制过程中,通常需要进行数字信号处理和模拟信号转换。如图 4 (b) 所示,图中 A 表示数字量电压转换为模拟量电压的比值系数,通过换算可将数字量电压转换为对应的模拟电压输出给电机。B 表示模拟量电流转换为数字量电流的比值系数,通过换算可将电机采样的模拟电流信号转换成对应的数字量用于控制器内部的计算。根据对应关系通过公式 (1) 可得出 A 和 B 的值。

$$A = \frac{V_{bus}}{2^{16}}$$

$$B = \frac{k_{op} 2^{16}}{3.3} \quad (1)$$

在公式 (1) 中, V_{bus} 为母线电压, k_{op} 为对应电流传感器上的电流与电压的比值。在设计电流环时,将其按照典型一型系统来设计,所以采用 PI 调节器作为电流环的调节器。

在设计速度环时,将电流环作为其整个环节中的一个一阶惯性环节来代替,速度环的动态结构图如图 5 所示。

为了消除转速静差并提高控制系统响应速度和稳定性,

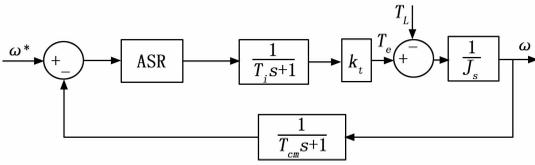


图 5 速度环动态结构图

需要在负载扰动作用点前添加一个积分环节, 并将其纳入转速调节器中。这将使系统能够快速消除静差, 以提高系统响应速度和稳定性。由于转速环开环传递函数中已经包含一个积分环节在扰动作用点后面, 因此需要设计成典型 II 型系统^[23], 因此转速调节器 (ASR) 也采用 PI 调节器。

电流调节器和速度调节器具体设计方法参考文献 [23] 中第四章的电流调节器与转速调节器的设计部分。在设计调节器时需要注意的是: 因为电流环作为内环, 其输出值直接影响电机的电流, 因此速度环的输出值通常作为电流环的参考值。在速度环输出的参考值经过电流环控制后, 得到电机的实际电流值, 为了保证电机的安全运行, 需要对速度调节器的输出值进行限幅。在系统启动时, 由于电机的转速为零, 内环控制器的输出为最大值, 如果没有饱和和限幅的约束, 将会导致输出电压超过电机额定电压, 从而产生过大的电流, 这可能会损坏电机或其他部件。因此, 引入饱和限幅可以避免这种情况的发生, 通过限制输出电压和电流来控制电机的加速度, 减少启动过程中的超调量和启动电流的波动。虽然饱和限幅可能会降低系统的响应速度和启动效率, 但是它可以有效地保护电机和系统组件, 提高系统的可靠性和稳定性。

4.2 模型在环仿真

对控制对象建立模型是实验流程的第一步, 也是很重要的一个步骤。在建立模型时通过对

被控对象参数进行分析, 利用 Simulink 中的物理建模工具箱 (Simscape、Simmechanics、Simdriveline 等) 构建控制对象模型, 根据控制对象选择合适的逆变器建立满足需求的系统控制模型^[24-25]。由于本次实验案例中的控制对象是永磁同步电机, 因此在构建控制算法模型中使用了电压空间矢量脉宽调制算法 (SVPWM, space vector pulse width modulation)。如图 6 所示为永磁同步电机的矢量控制框图, 其中控制对象模型只在仿真的阶段中使用, 在代码

生成时只对控制算法模型进行生成 C 代码的操作。

根据矢量控制框图, 在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型如图 7 所示, 搭建 Clark 坐标变换模块、Park 坐标变换模块及其逆变换模块、ACR 调节器与 ASR 调节器模块以及 SVPWM 控制算法模块等构成控制算法模型 (如图 7 (a) 所示)。在控制算法模型中 SpeedRef 作为设定值为转速调节器提供转速目标参考值; 速度给定值与电机提供的三相电流值、转子速度和位置为控制算法模型的输入; 输出作为 STM32 的 CCR 寄存器的设定值, 通过改变 CCR 寄存器的值可以改变 PWM 输出的脉宽从而控制电机的转速。将控制算法模型封装成新的模块, 命名为 Speed and current double closed-loop control (如图 7 (b) 所示), 在后续的 SIL 仿真和 PIL 仿真中通过直接调用该模块进行实验测试。

4.3 软件在环仿真

软件在环仿真具体的实现是通过建立软件在环仿真模型, 在 SIL 仿真中, 硬件系统被替换为虚拟的模拟器或仿真器, 而系统的软件部分运行在这个仿真环境中。这种仿真技术可以在早期阶段验证系统的软件部分的正确性和性能, 从而降低系统集成的风险和成本。如图 8 (a) 所示, 将图 7 中的控制算法部分模型添加到待测模型 Model 中, 在 Simulink 环境下将待测模型设置为 SIL 模式。在仿真运行时, SIL 模型会调用外部实验平台中的编译器环境, 将模型生成 C 代码形式 (如图 8 (b) 所示) 在编译器中运行并将结果输送到 Simulink 仿真环境中。在设计软件在环仿真时, 将 SIL 模型与原模型并联在一起仿真, 在输入相同的给定信号时, 比较两个模型的输出结果来判断模型生成代码的功能与其是否等效。

通过图 9 可以看出 SIL 仿真输出转速曲线基本贴合给定转速曲线, 且输出转速与 MIL 模式的输出转速差值基本稳定在 5 rpm 左右, 最大不超过 16 rpm。SIL 仿真测试结果表明通过 SIL 仿真可以验证生成的控制算法代码在 Simulink 环境中与模型功能基本一致且能够稳定的运行。

4.4 处理器在环仿真

在 PIL 仿真中, 嵌入式处理器和相关外设被实际连接到仿真环境中, 并与运行在主机计算机上的软件模拟器进行交互。这种仿真技术利用 Simulink 使模型与硬件平台协同工作, 控制算法的模型在 Simulink 中以 Normal 仿真模式

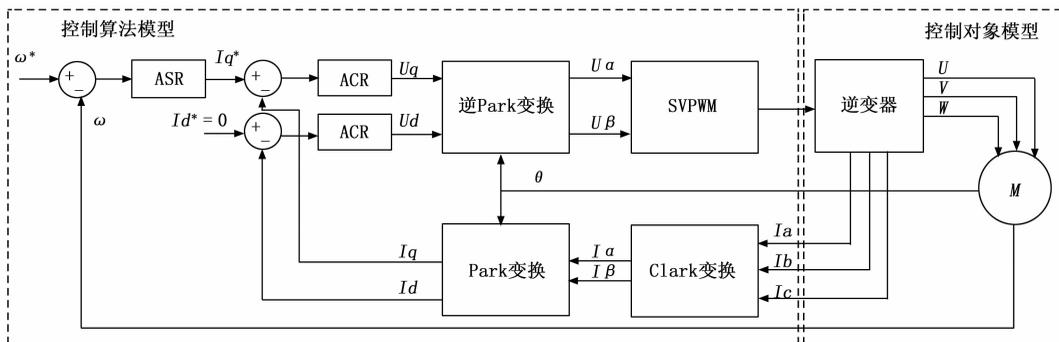
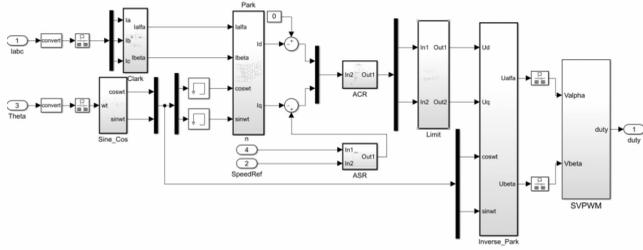
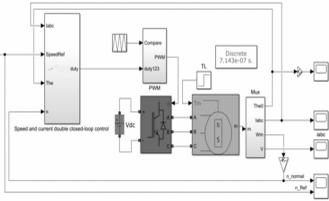


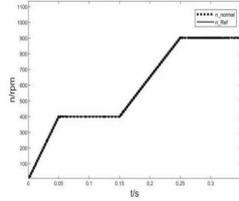
图 6 矢量控制框图



(a)控制算法模型

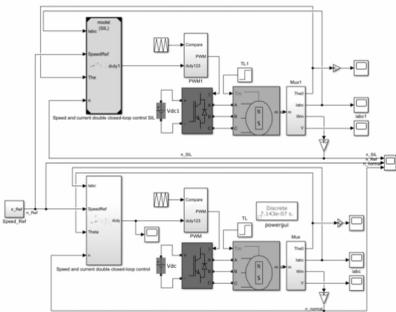


(b)模型在环仿真

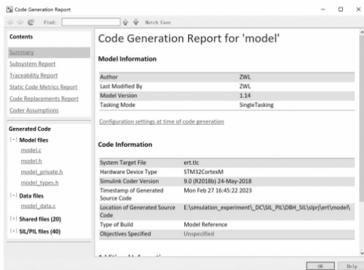


(c)给定转速与反馈转速

图 7 MIL 仿真



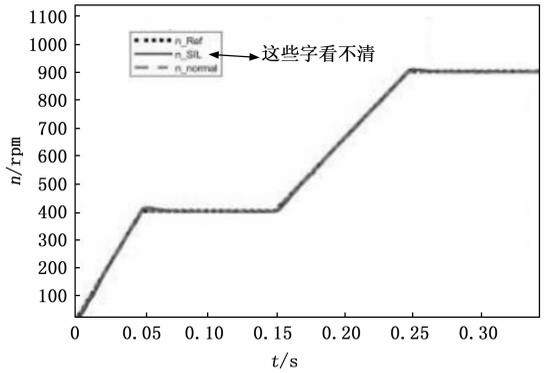
(a)SIL模式与MIL模式对比



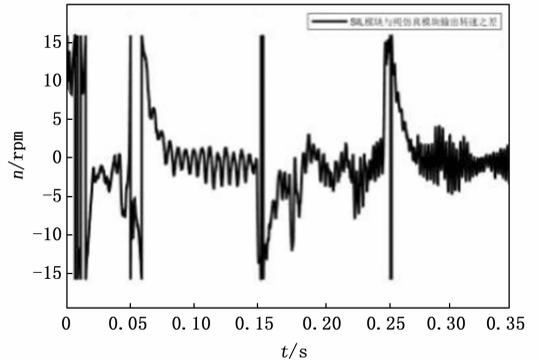
(b)SIL仿真代码生成报告

图 8 SIL 仿真

和 PIL 仿真模式两种不同的模式运行, Normal 仿真模式以模型在环仿真形式在 Simulink 平台中运行, PIL 仿真模式需要将 PIL 模型先生成嵌入式 C 代码的形式, 然后将其编译为目标文件载入到硬件平台中去, 硬件平台与 PC 端通过串口通信方式建立连接, 建立 Simulink 与硬件平台上微处理器之间的通信通路。在仿真运行过程中 Simulink 的信号源模块将当前信号通过串口传递给硬件平台的微处理器, 经过微处理器计算之后再通过串口回传到 Simulink 模型中, 然后 Simulink 的信号源模块再传入下一个采样点信号, 重复上述操作。将 PIL 仿真结果与 MIL 模式仿真的结果进行比较, 通过测试在给定相同的输入参数两种仿真模式下的输出值并做对比看其差值是否在合理范围内来验



(a)输出转速对比



(b)SIL模式与MIL模式下输出转速差

图 9 SIL 仿真输出转速

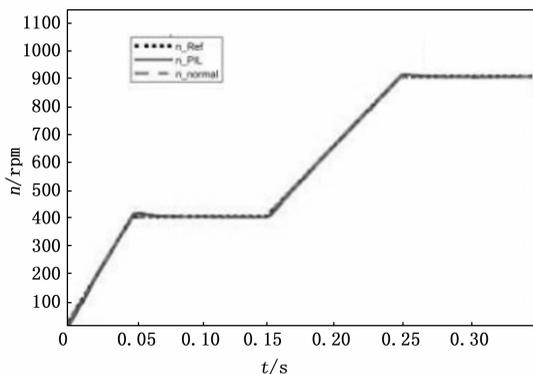
证系统的性能和功能^[25]。

在对图 8 (a) 中模型进行 SIL 仿真验证后, 将其控制算法模块部分改成 PIL 模式, 并在 Simulink 平台中通过 Code generation 下的 STM32 options 中更新 STM32CubeMX 的路径。在仿真运行之前, Simulink 平台会根据路径启动 STM32CubeMX 并配置硬件平台微处理器串口通讯的对应参数。利用 STM32CubeMX 将其生成 C 工程文件并利用 Keil5 编译环境对工程文件编译并载入到微处理器中验证其能否在微处理器中正常运行, 最后确定硬件平台与 PC 端串口通讯正常之后在 Simulink 平台中运行模型仿真, 并通过在 Simulink 中通过调用 Scope 模块获取 PIL 仿真的结果与 MIL 仿真的结果。

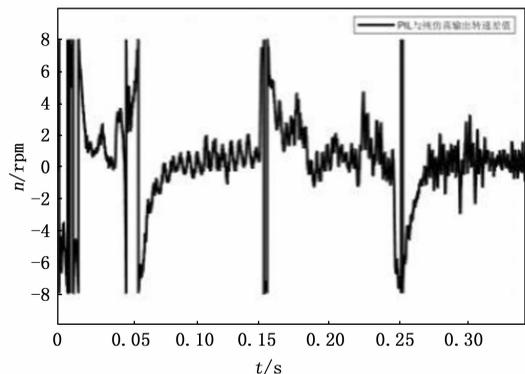
从图 10 可以直观的看出在相同的给定转速下, PIL 仿真输出的转速与 MIL 模式仿真输出的转速轨迹基本吻合, 且两者的误差稳定在 8 rpm 以内。PIL 仿真测试结果表明通过 PIL 仿真可以验证生成的控制算法代码在 Simulink 环境中与模型功能基本一致且能够稳定的运行, 进一步验证了控制算法模型及其生成的 C 代码工程的可行性。

4.5 实验平台实物测试

模型经过 PIL 仿真测试验证后, 利用实验平台的真实环境对控制算法的可行性进行验证, 将实验平台中的驱动器和永磁同步电机替代仿真模型中模拟的控制对象部分。为了达到和仿真类似的效果, 仿真中的电流反馈环节与转速反馈环节将由硬件平台中的传感器以及采样电路代替。



(a) 输出转速



(b) 输出转速差

图 10 PIL 仿真

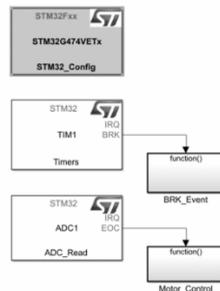
在生成 C 代码工程前, 需要配置 STM32 微处理器的相关参数以及搭建 STM32 微处理器外设程序的相关模型。

通过 Matlab/Simulink 界面在 Model Configuration Parameters 中将 Code Gengration 的系统目标文件 (System target file) 更改为 stm32.tlc。然后设置更新 STM32 Options 中的两个路径 STM32CubeMX installation path 和 Installed Full Path。STM32CubeMX 的路径更新后, 在 Simulink 中添加 MCU config 功能块, 通过 MCU config 功能块中的 Start STM32CubeMX configuration tool 选项便可启动 STM32CubeMX 软件对微处理器参数进行设置修改。确认微处理器参数后, 在 Simulink 界面点击 Build Model 进行 C 代码生成操作, Matlab/Simulink 会结合 STM32CubeMX 软件自动生成 STM32 工程文件。将生成的 STM32 工程文件放在 Keil5 环境中编译并载入驱动器的微处理器中, 最后通过实验平台进行实物测试。

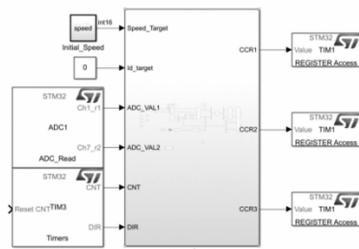
本次实验使用矢量控制 (如图 6 所示) 的方法来搭建永磁同步电机转速、电流双闭环控制系统模型。控制系统模型中的微处理器芯片选择的是意法半导体的 STM32G474VET6, 代码自动生成的模型整体结构如图 11 (a) 所示, 在设计搭建模型时从生成程序代码运行逻辑的角度考虑, 将本次实验的执行程序放在 ADC 的 EOC (End Of Conversion) 事件和 Timers 的 Break 事件两个中断中去执行。其中定时器的 break 中断放在 TIM1 的 BRK 中断中, 为了防止实验平台在进行实物测试实验时电路中出现过流

损坏电路的事件发生; 将控制算法部分模型放在 ADC 的 EOC 中断中, 以确保在执行控制算法程序时 ADC 已采集到反馈的电流并更新结束。

在对定时器的参数进行配置时, 除了配置输出 PWM 控制电机的参数外, 还需要额外配置一个通道 (该通道不需要设置输出) 作为 ADC 的外部触发源用来触发 ADC 的采样。此外将 TIM3 设置为编码器模式 (Encoder Mode + index), 其中 TIM3 的通道 1 和通道 2 作为增量式编码器 A 相与 B 相的采集接口; ADC1 的通道 1 和通道 5 分别作为电机 B 相电流和 C 相电流采集接口; TIM1 的通道 1、通道 2 和通道 3 与其互补通道作为 PWM 输出接口 (如图 11 (b) 所示)。



(a) 模型整体结构



(b) 电机控制部分

图 11 STM32 控制模型图

在 Matlab/Simulink 中模型自动生成代码的过程时, 模型生成的代码通常会使用结构体来表示模型中的各个模块及其信号连接关系。这些结构体在程序运行时会被实例化为具体的变量, 并通过变量名来调用结构体成员。在对模型进行代码优化时, 将部分复杂的仿真模型设置为可重复使用的功能 (Reusable function)。

相对于非可重复使用的功能 (Noreusable function), 对于一些复杂的仿真模型来说 Reusable function 模式的性能会更好。在代码可读性方面, Nonreusable function 模式的程序可能会包含多个单独的函数, 相比之下, Reusable function 模式的程序会更易于理解。对于电机控制来说, 处理器的运行时间是非常关键的, 因此需要尽可能地优化代码, 在对参数类型进行设置时, 根据模型之间的信号关系可考虑将参数类型设为定点数的形式以减少计算时间和提高控制性能。

在模型中根据需求对代码的优化操作设置后进行仿真的最后一步操作: 生成代码。使用 Keil5 编译环境对生成的

C 代码工程文件进行编译并载入 STM32 微处理器。在电机运行时通过串口将电机实时速度传送到 PC 端, 如图 12 (b) 所示, 对比图 7 (c) 仿真中速度曲线可以看出, 在平台实物测试中电机的实时输出转速曲线与仿真基本一致, 验证了实验平台的可行性。

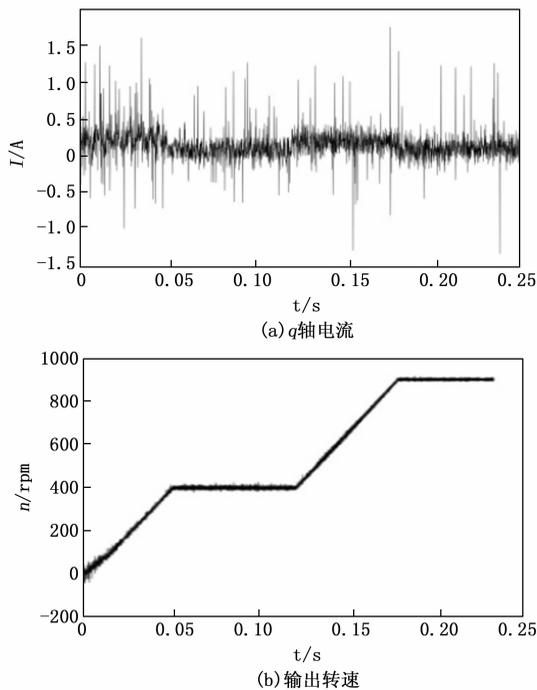


图 12 实验平台实物测试

5 结束语

本文针对传统运动控制系统课程实验平台的不足, 设计了一个基于 Matlab 的运动控制系统的实验平台。首先给出了实验平台的总体设计方案并介绍了实验平台的功能及其硬件结构; 然后介绍了实验平台应用基于模型的设计方法实现代码自动生成, 并对基于模型设计的开发流程进行了详细的阐述; 最后通过案例永磁同步电机转速、电流双闭环控制系统在实验平台经过模型在环仿真、软件在环仿真、处理器在环仿真最后到实验平台进行实物测试的流程来验证实验平台的优点及其可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 张志华, 李琦, 李伯群, 等. “运动控制系统”课程仿真平台在实验教学中应用 [J]. 科技与创新, 2021 (7): 108-109.
- [2] 徐建明, 汪晨浩. 基于 STM32-MAT 的交流永磁同步电机驱动控制系统开发 [J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50 (5): 581-590.
- [3] MONTESINOS D, GALCERAN S, SUDRIA A, et al. A laboratory test bed for PM brushless motor control [C] //2005 European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005. DOI: 10.1109/EPE.2005.219681.
- [4] MOALLEM M. A laboratory testbed for embedded computer control [J]. IEEE Transactions on Education, 2004, 47 (3):

340-347.

- [5] 蒯松岩, 衡风平, 崔鑫, 等. 基于 Matlab 的“运动控制系统”课程教学改革 [J]. 电气电子教学学报, 2016, 38 (1): 29-31.
- [6] 邵雪卷, 张井岗, 陈志梅, 等. “运动控制系统”课程教学改革与实践 [J]. 电气电子教学学报, 2017, 39 (4): 66-68.
- [7] 段锁林, 陈岚萍, 王雪, 等. “运动控制系统”课程实验平台建设与实践 [J]. 电气电子教学学报, 2015, 37 (4): 95-97.
- [8] OHNISHI K, MATSUI N, HORI Y. Estimation, identification, and sensorless control in motion control system [J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82 (8): 1253-1265.
- [9] 方环. 永磁同步电机伺服控制系统开发平台的设计及研究 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [10] 刘杰. 基于模型的设计 [M]. 机械工业出版社, 2012.
- [11] 陈红远. 基于模型设计的电动汽车异步电机控制系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [12] JAN-PETER Alten, SIMON FÜRST. Model-based Design of Embedded Systems with Matlab/Simulink [J]. ATZeletronikworld-wide, 2016, 11 (2): 60-63.
- [13] HOU B, GUO H, JING Y, et al. Development of Inverter Control System Based on MBD [C] //2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). IEEE, 2020: 1-2.
- [14] 宋发君, 康丽, 张彬, 等. 一种适配 Rhapsody 模型生成仿真软件的方法: CN202211175229. X [P]. 2023-01-03.
- [15] SHI S, CHEN Y, FANG H, et al. Research on MBD software development method based on SCADE [C] //International Conference on Computational Modeling, Simulation, and Data Analysis (CMSDA 2021). SPIE, 2022, 12160: 179-185.
- [16] 柏建彩. 永磁同步电机无位置传感器控制技术的研究 [D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2019.
- [17] 刘杰. 基于模型的设计及其嵌入式实现 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [18] GABRIELA NICOLESCU, PIETER J. Mosterman. Model-Based Design for Embedded Systems [M]. CRC Press: 2018-09-03.
- [19] ANWAR M W, RASHID M, AZAM F, et al. Model-based design verification for embedded systems through SVOCL: an OCL extension for SystemVerilog [J]. Design Automation for Embedded Systems, 2017, 21: 1-36.
- [20] 董靖川, 王太勇, 陆钢庆, 等. 基于模型的设计方法在运动控制实验中的研究 [J]. 实验室研究与探索, 2018, 37 (8): 171-175.
- [21] 刘颖辉. 基于模型设计的嵌入式软件测试技术 [J]. 科学技术创新, 2019 (33): 80-81.
- [22] 孙忠潇. Simulink 仿真及代码生成技术入门到精通 [M]. 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [23] 阮毅. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [24] 张才斗. 基于模型设计的无刷直流电机控制系统研究 [D]. 长安: 长安大学, 2018.
- [25] 袁雷. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.