

基于模型的设计简化嵌入式电机控制系统开发

作者: Dara O'Sullivan, Jens Sorensen, Aengus Murray, ADI公司

本文描述了围绕基于ARM®的嵌入式电机控制处理器构建的基于模型设计(MBD)平台的详细情况。随后, 本文提供最初部署的基本永磁同步电机(PMSM)控制算法示例, 并介绍了方便的功能扩展, 以包含自动化系统的多轴位置控制。

长期以来, 系统和电路建模一直是电机控制系统设计的重要方面。采用MBD方法后, 电气、机械和系统级模型用于在构建和测试物理硬件前评估设计概念。MathWorks最新的仿真工具可以对完整的嵌入式控制系统进行建模, 包括电气电路和机械系统领域。同时, 嵌入式编码工具从控制系统模型生成C语言代码, 将控制算法部署在嵌入式控制平台上。

这些工具实现了基于模型的设计过程, 人们可以在最终硬件测试前先在仿真平台上进行设计并完全测试。成功构建MBD平台的关键是分隔系统模型和嵌入式软件代码。一旦MBD平台使用已知算法和系统进行测试后, 便可开发新算法, 并在仿真平台上以系统工作极限安全地测试。

完整的设计流程

MBD经过数十年的探讨, 直到最近几年才发展为从模型创建到完整实现的完整设计流程。MBD是解决设计复杂嵌入式控制系统相关问题的数学和可视化方法。设计师无需使用复杂的结构和大量软件代码, 通过连续时间和离散时间构建模块, 就可以使用MBD

定义具有高级功能特性的各种模型。这些与仿真工具一同使用的模型能够缩短原型设计、软件测试和硬件在环(HIL)仿真的时间。

通过仿真, 我们能够立即发现各种规范差异和模型误差, 不会等到设计周期的后续环节才发现。为了优化整体代码生成过程, 可以加入自动代码生成来减少任何手动部署步骤, 并进一步有助于缩短整体产品上市时间。总而言之, MBD方法使设计师能够从更多经典设计方案开始扩展, 以可控方式直接从模型创建转到仿真、代码生成和HIL测试, 无需重新设计整个系统就可对系统进行作出递增改变。

本文中的实验性设置基于交流馈入闭环电机控制系统, 如图1所示。该系统表示一个功能完整的PMSM市电输入电机驱动, 具有功率因数校正、完全控制、通信信号隔离和光学编码器反馈功能。该系统的核心是一个ARM Cortex®-M4混合信号控制处理器, 即ADI的ADSP-CM408。它通过搭配IAR和MathWorks公司的工具, 实现完整的MBD平台部署。

交流电机驱动系统建模

目标驱动系统是带有编码器位置反馈的PMSM, 连接三相交流电源逆变器, 带有隔离式相位电流反馈。驱动控制算法部署在混合信号专用信号处理器(ASSP), 包含外设, 可捕获电机反馈信号并控制电源逆变器。

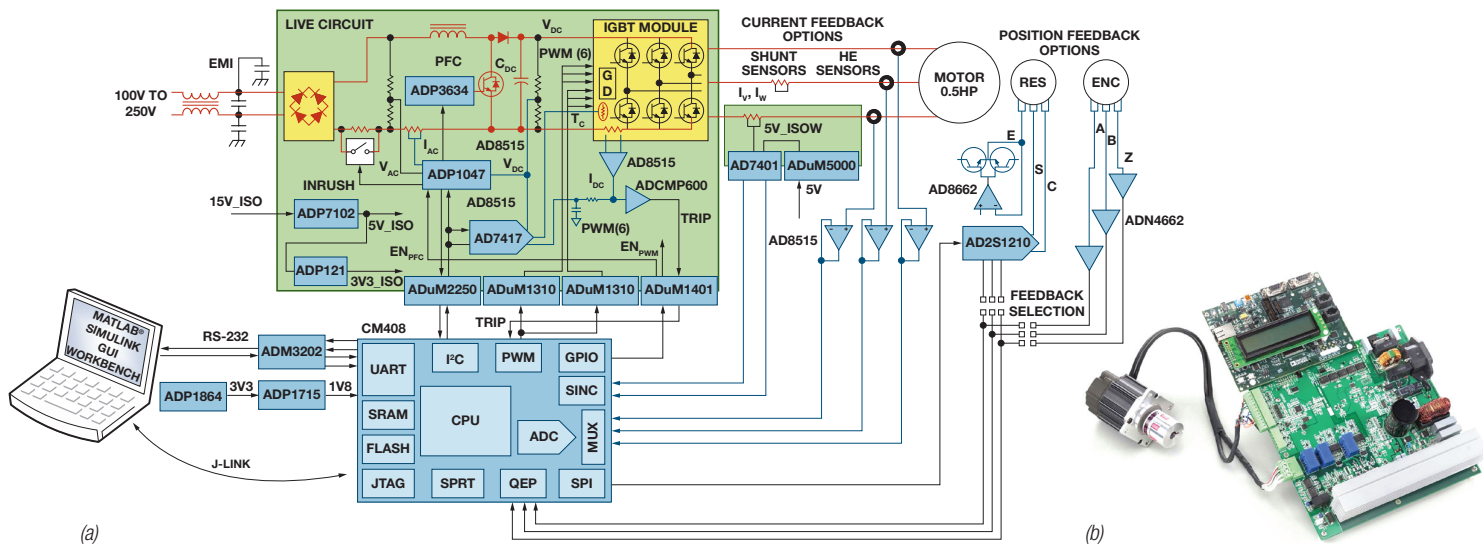


图1. 驱动系统平台(a)交流馈入闭环电机控制系统框图(b)系统原型制作

系统有三个主要组件可用于建模：电源逆变器和电机(对象)、控制反馈电路和数字控制器。对象模型使用Simulink Simscape组件来仿真连续时间域内的电源逆变器电气电路和电机机电元素。反馈电路模型处理控制器和电机驱动模型之间的增益和数据类型。

Simulink嵌入式编码器工具创建的C语言代码可以在仿真平台和嵌入式控制处理器上精确反映算法的执行。基于模型设计的成功执行有赖于精确的系统和电路模型，以及正确分隔系统模型和嵌入式控制软件。由于系统中混合了离散和连续时间函数，因此该仿真求解器采用了固定步长离散求解器。

驱动系统硬件包括电源板、控制板、以及带编码器反馈的PMSM(参见图1b)。电源板包含输入整流器、三相逆变器模块、电流和电压传感器、数字和模拟信号隔离电路，以及编码器信号缓冲器。控制板包含电机控制ASSP(集成240 MHz ARM Cortex-M4F内核)以及专用电机控制外设(包括PWM定时器、正交编码计数器、Sinc滤波器和嵌入式模数转换器(ADC))。硬件包含电机电流反馈选项，采用隔离电流传感器(集成嵌入式ADC)或分流器(集成隔离式ADC Σ - Δ 型转换器)，以及嵌入式Sinc滤波器。

反馈信号采集和控制算法执行通过处理器中断机制与PWM开关频率同步。由于对象中被关注的时间常数远长于PWM开关周期，系统仿真采用相同的时间步长。由于全开关信号仿真无法提供有用的控制信息，电源逆变器使用平均值模型。

PMSM电机模型来源于MathWorks SimPower系统库，受配置菜单(甚至预设模型参数)的支持。用户可以在自定义电机或逆变器模型之间切换，具体取决于设计开发的要求。

电机控制(MC)算法模型是一组离散时间函数，每一个时间步进均在仿真和嵌入式平台上执行。通常，MC算法函数包含在单个子系统模块内，简化代码产生过程。代码生成器创建C语言代码，来执行算法输入、输出和状态变量的控制算法和数据结构。算法本身是常用的磁场定向控制(FOC)，具有外部速度环路、内部d轴和q轴电流环路，如图2所示。

逆变器接口和反馈路径分为传感器信号调理和嵌入式接口模块。电流传感器和信号调理模型是简单的增益元素，因为它们的带宽超出了控制反馈所关心的范围。位置传感器模型更为复杂，因为它提供高分辨率增量位置信号和低分辨率绝对位置信号。

嵌入式信号接口模型包括类型转换函数，因为ADC、Sinc滤波器、计数器和定时器外设具有16位或32位定点输出数据寄存器。每个嵌入式接口的增益都是外设系统时钟速率、采样速率和接口外设寄存器设置的函数。模型参数必须匹配嵌入式系统配置，确保仿真结果的精确性。

软件分隔和代码生成

电机驱动系统执行多种功能和电机控制算法。嵌入式软件分为多个功能模块，来实现平台灵活性，并方便开发。关键的代码功能是系统初始化、通信接口、应用任务、电机控制接口和电机控制算法。图3显示的是高电平驱动程序流程图，图4显示的是代码结构。

主程序调用初始化例程来配置ASSP硬件，然后将处理器置于连续等待环路。所有其它函数都由事件驱动型中断服务例程(ISR)调用。ADC中断具有最高优先级，而当新传感器数据样本就绪时，ADC ISR调用电机控制函数。ADC采样与PWM切换同步，为控制环路提供执行时序。ADC ISR每一个PWM周期执行一次，但仅在电机运行标识置位时才调用电机控制例程(PMSMctrl)。在代码构建前选择电机电流反馈路径。

PWM触发中断是异步的；它仅在响应硬件故障时才会调用，而且是延迟故障的唯一函数，因为硬件PWM触发函数会自动关断逆变器PWM信号。通信端口ISR具有较低的优先级，处理用户命令，并发送调试监控器函数捕捉的数据。内核定时器ISR管理背景应用任务，比如电机启动和停止序列、调试监控器接口以及其它管理类任务。

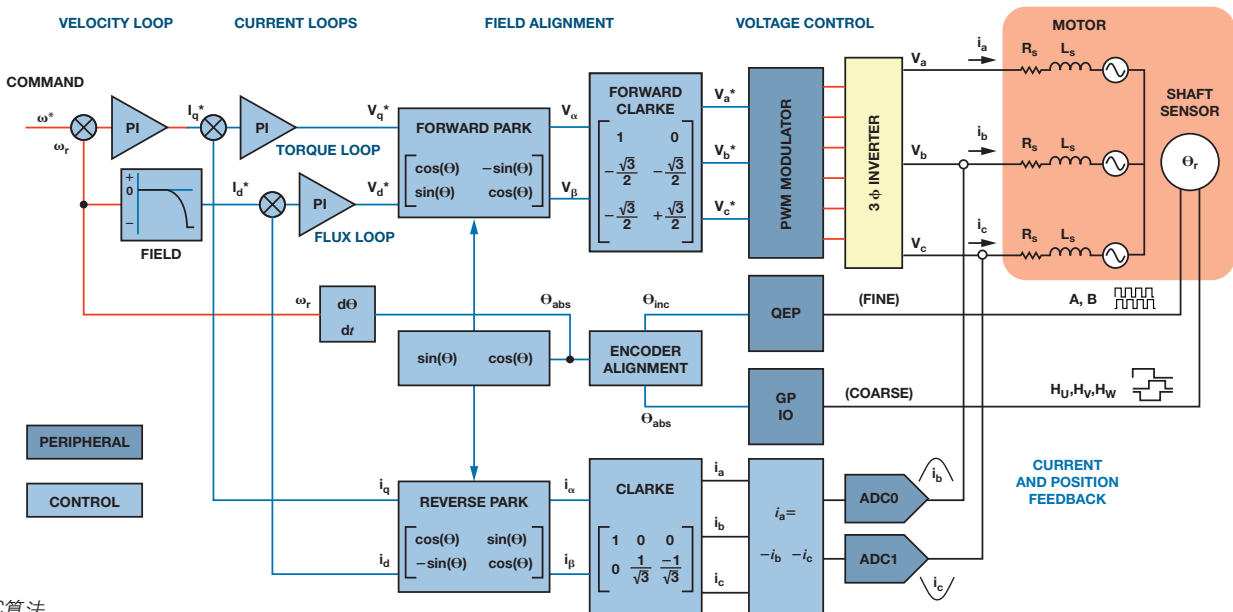


图2. FOC算法

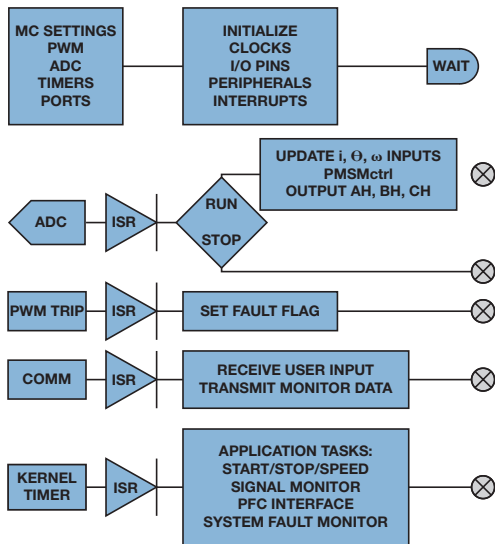


图3. ISR说明

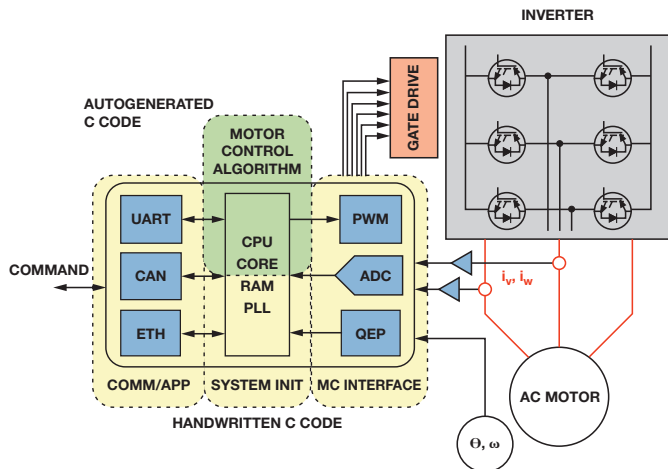


图4. 代码分隔

嵌入式代码按照功能组织而不是按编程顺序组织。系统初始化代码时以标准方式设置处理器时钟、电源和内核定定时器，与应用程序函数几乎无关。通信和应用程序任务代码通过用户接口和系统管理要求定义，与电机控制算法几乎没有关系。

电机控制(MC)接口函数管理电机驱动硬件和控制算法之间的信号数据流。此代码专门用于控制驱动电路以及控制为控制算法提供反馈信号的电机控制相关外设。电机控制算法是独立于平台的代

码，由Simulink生成，包含反馈和输出信号的数据结构。所有其它驱动代码均为手动编码。

实现细节

若要发挥MBD的最大效益，理解电机控制系统不同部分的建模详细要求并尽可能将关键物理系统参数与相应模型参数相匹配很重要。这包括将已建模的系统分隔为不同的详细部分。总体而言，以PWM平均值方式对整个系统建模就足够了。例如，在高频PWM开关周期中以平均值处理所有信号，并且在电压或电流信号中不包含PWM纹波或开关分量。

系统模型分隔至逻辑模块内，如图5所示(图中显示相关信号流)。每一个模块再进一步细分(如图中右侧所示)，且每一个子模块采取适当的建模方法，如表1中所列。表中未列出用户命令模块。用户命令通过C语言代码内部的全局参数结构与内核算法通信；一旦它们在Simulink算法中定义为全局可调参数后，便可正确处理。

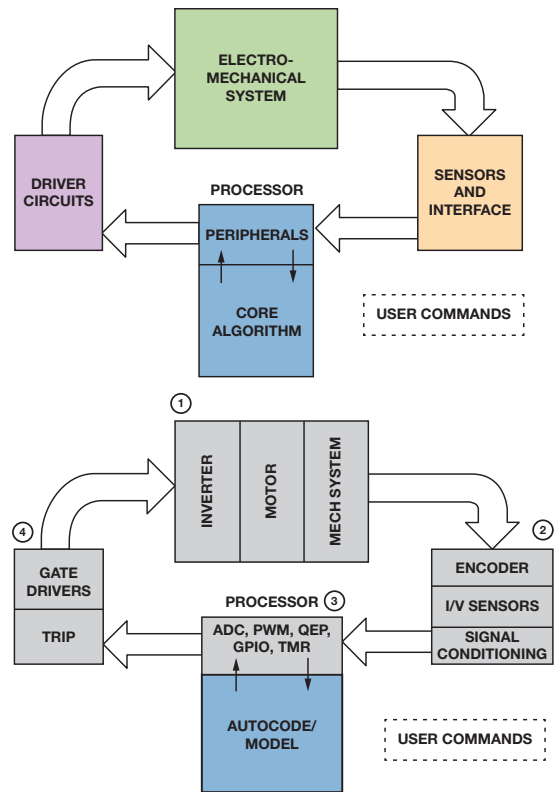


图5. 系统模型分隔

表1. 模型考虑因素

模块	建模/代码生成	关键参数
机电系统(1)*	逆变器: 均值函数模型, 非常简单	无
	电机: 标准机电DQ模型	定子电感、反电势/扭矩常数
	机械系统: 标准刚度-惯性-摩擦模型, 特定应用	负载惯量
传感器和接口(2)	函数模型	增益、失调
处理器(3)	外设: 函数模型	定标系数、量化效应
	内核算法: 从此处生成代码	高效部署、定点/浮点边界
驱动器电路(4)	函数模型	无

*括号中的数字对应图5中的框图。

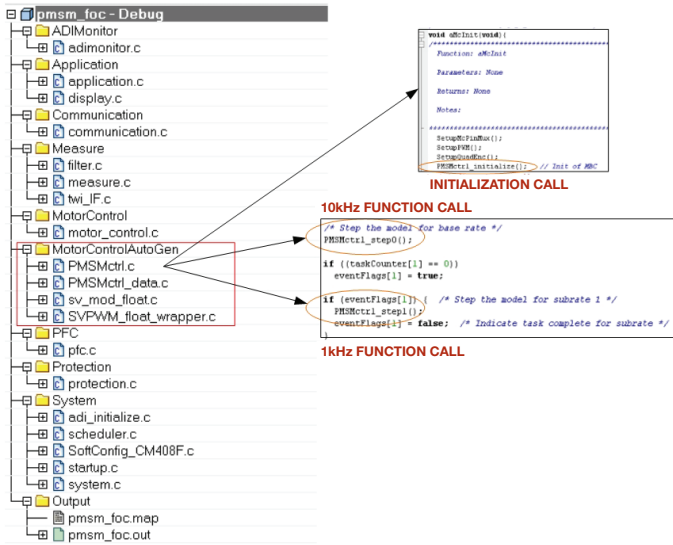


图8. 代码模块组织和算法函数调用

如图所示，代码以模块化方式组织，集成特定应用函数，比如联网和保护，非常直观。高优先级任务(比如电机控制算法)从图3中的ISR处调用。应用程序级任务从基本调度程序内核处作为调度任务调用。MC接口例程包含于电机控制和测量代码模块中，后者包含所有电流反馈信号处理代码。ADI电机代码包含用于系统测试的调试监视器函数，可以在电机运行时捕捉应用和控制算法信号数据。数据通过串行链路传输至PC，以供显示和分析。

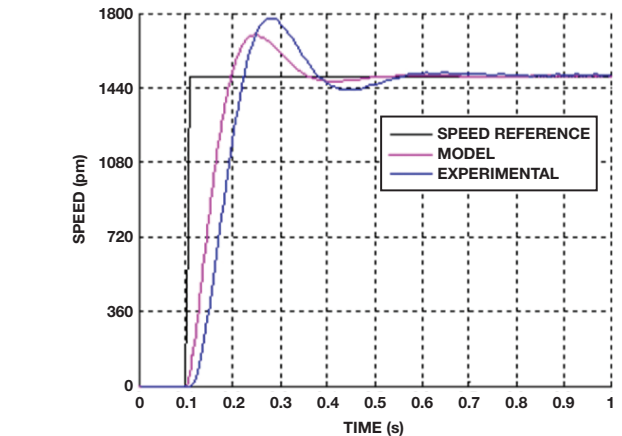
系统测试与调试

通过测量、计算和查阅数据手册确定表1中的关键参数后，速度和电流环路的正确控制器增益便可使用Simulink模型确定。这可以利用标准PID调谐法[2]或MathWorks提供的调谐工具(比如PID调谐器工具)实现。该过程详见参考文献3。

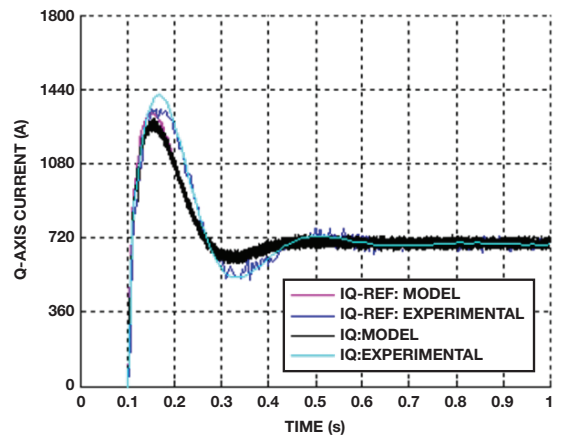
建模和实验操作的电流环路性能如图9和图10所示。该曲线中的实验数据仅每隔5 ms采样一次，因此存在一些混叠，但整体趋势非常明显。

基于模型的自动生成代码的性能可以通过在PWM周期内检查代码执行的时间期限确定。这可以使用I/O引脚和示波器来完成，或更简单地使用IAR Embedded Workbench C-SPY调试器中的ITM事件功能来完成。PWM周期中事件的序列如图11时间期限所示。

PWM同步脉冲发生在每一个新PWM周期开始处，并在硬件中连接ADC定时器，控制每个ADC通道的采样。这种情况下，电机电流将在PWM同步脉冲之后立即采样，并直接存储器存储(DMA)至存储器，然后执行算法，并生成PWM占空比更新值。如图11所示，执行基于模型的自动生成代码消耗的PWM周期不到10%，从而允许有大量的其它背景任务开销。以前对于自动生成代码效率的担忧将不复存在。



(a)



(b)

图9. 比较模型操作和经验操作的(a)速度响应以及(b) q轴电流参考

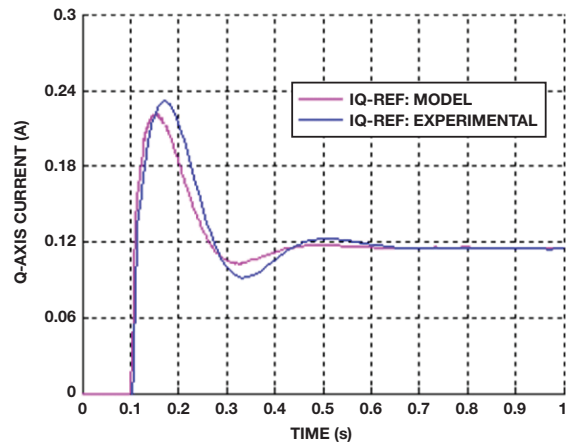


图10. 电流环路性能——模型和经验结果

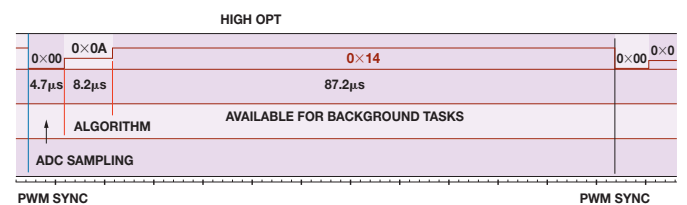


图11. 代码执行时间期限

就代码尺寸而言，算法自动代码的相对尺寸如表2所示；可以看出，自动生成的代码仅占据略大于10 kb的存储器，约为总尺寸的15%。ADSP-CM408的可用SRAM为384 kB，显然可以轻松支持该存储器要求，允许程序以最高速率从SRAM运行，并提供足够多的裕量用于更复杂的算法和其它监控或用户接口功能。

表2. 代码模块尺寸

模块	代码(字节)	数据(字节)	总计
电机控制外设 (PWM、编码器)	1584	94	2.3%
测量外设 (ADC、Sinc、串行监控)	2224	2691	6.7%
PFC控制器配置和监控	3032	2149	7.1%
用户接口外设 (UART、LCD)	1484	5055	9%
系统 (内核、状态机、启动)	1192	1364	3.5%
算法自动代码	5656	5022	14.7%
驱动程序、库	21,596	19,737	56.7%
总计	36,768	36,112	72,880 (100%)

新应用程序开发

本文所讨论的软件假设为含有两个主要组件的系统。第一个是基于模型的组件，部署控制算法。虽然模型以嵌入式目标为原则开发，从自动生成工具获取的代码本质上是通用的。第二个是手写软件组件，将通用算法代码绑定至嵌入式目标，处理调度并分配处理器资源。在重用模型和扩展性方面，这种系统分隔有一定优势。

本文讨论了单个电机(单轴)的控制开发。现在，想象驱动程序规格通过同一个处理器调用两个电机(双轴)控制。无疑，这对系统来说是一个很大的变化，但采用通用模型进行工作的优势也得以凸显。已经完成开发的单轴模型不对处理器外设作出任何假设——它是PM电机的通用控制算法。因而，创建一个可以控制单轴/双轴的模型就变成了创建单轴模型第二个实例的问题。

自然，手写代码需要修改才能支持单轴/双轴，但假设处理器具有一组正确的外设和计算资源来控制双轴，则手写代码的修改也很直观。无论控制的是单轴或是双轴，手写代码的主要任务都是将数值分配至模型的输入、将模型的输出写入处理器外设，以及调度模型的执行时间。因此，从单轴到双轴只不过是外设的分配/配置，并调度增加轴的算法执行时间。该过程是无缝的，并由于模型是通用的这一事实而得以实现。

如果只开发一个单控制系统，那么使用基于模型的设计优势有限。然而，大多数情况下，产品开发意味着多个产品变体，并且对于这些情况而言，重用模型具有很大的吸引力——不仅因为缩短了开发时间，还由于使用受信任模型而导致的质量不断上升。随着时间的推移，算法开发人员将会创建模型库；如果部署正确，这些模型可在不同产品之间重用。由于模型是通用的，它们可以运行在目前和未来的处理器上。

除了满足产品变体的潜在要求或控制多轴之外，开发人员有时候还能提供不同的控制器模式。一个典型的例子便是提供扭矩控制、速度控制和位置控制模式的应用。在电流和速度控制算法的基础构建块上可以部署位置控制算法。

在大多数应用中，位置控制环路作为围绕内层速度和电流环路的外层。基本的位置控制器仅需比例增益项。一般不需要积分项，因为位置环路中的任何稳态误差都会导致非零速度参考。若内层电流和速度环路经过良好调谐，则这些可以视为理想的单位增益模块，以及调谐位置环路变为一个直观的任务。

除了外层比例控制环路，包含一个位置参考也可能很重要，以便负载遵循定义的周期和加速度与减速度速率。这对于最大程度减少很多系统中的机械应力而言十分重要。在本应用示例中，恒定加速度、恒定速度和恒定减速度曲线施加到位置参考变化，如图12所示；图中表示位置参考、曲线位置参考以及相应的理想速度曲线。至于哪个实际速度遵循该曲线则取决于速度控制器的动态响应。

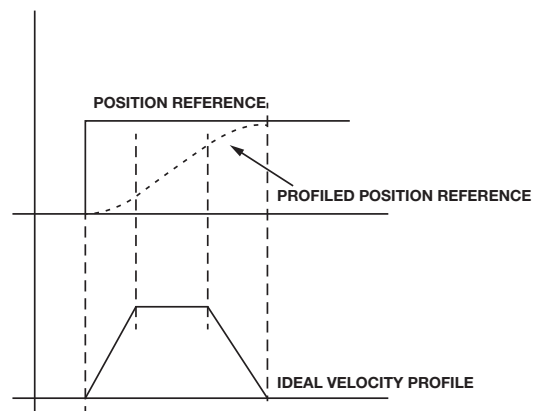


图12. 位置参考曲线

所有这些功能——位置环路增益、位置曲线以及辅助功能(比如回零定位和终端-停止检测)作为额外模块部署在代码中基于模型的部分。唯一需要的手写代码更改是I/O配置，以支持家庭位置和终端-停止信号。

结论

基于模型的设计是强大的工具，可以加速电机驱动制造商的嵌入式开发。如果以通用方式设置和配置，则可以大幅减轻手写代码开发和维护的重担。它还能加快产品上市时间，因为代码开发可在缺少硬件的情况下初始处理——只要提供关键系统组件的合理精确模型。

这些特性已在PMSM驱动器情形中得到证实，该驱动器在扩展至多轴和位置控制的FOC下操作。对软件模块和基于模型的组件进行分割的方法已经详细说明，可以优化基于模型的解决方案提供的数值。实验数据也表明了模型在优化速度控制器参数、代码生成紧凑性和效率方面的优势。

参考文献

www.analog.com/cn/cm4xx

Drury, Bill. 《控制技术传动与控制手册》。《IET电力和能源系列》，第2版，2009年。

O'Sullivan, Dara, Jens Sorensen, Anders Frederiksen. “闭环电机控制中基于模型的设计工具。” PCIM Europe 2014展会；电力电子、智能运动、可再生能源和能源管理国际展览会与研讨会；论文集，2014年5月。

作者简介

Dara O'Sullivan是ADI公司电机与功率控制部门的一名系统应用工程师。其专长领域是交流电机控制应用的功率转换和控制。O'Sullivan拥有爱尔兰科克大学工程学士、工程硕士和博士学位。联系方式：dara.osullivan@analog.com。

Jens Sorensen是ADI公司应用工程师，负责工业应用的电机控制解决方案。他的主要兴趣在于控制算法、电源电子和控制处理器。Sorensen目前专注工业应用，而在早期职业生涯中致力于开发家用电器和汽车应用中的电机控制和电源电子元件。联系方式：jens.sorensen@gmail.com。

Aengus Murray是ADI公司汽车、能源和传感器部门的电机和电源控制应用经理。他负责工业电机和电源控制的整个ADI信号链产品。Murray拥有爱尔兰都柏林大学电气工程学士和博士学位。他在功率电子行业拥有超过30年的丰富经验，曾先后在Rectifier、Kollmorgen Industrial Drives和都柏林城市大学工作。联系方式：aengus.murray@analog.com。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

ezchina.analog.com



全球总部

One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部

上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司

深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心 4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司

北京市海淀区
上地东路 5-2 号
京蒙高科大厦 5 层
邮编: 100085
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司

湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

亚洲技术支持中心

免费热线电话: 4006 100 006
电子邮箱:
china.support@analog.com
技术专栏:
www.analog.com/zh/CIC
样品申请:
www.analog.com/zh/sample
在线购买:
www.analog.com/zh/BOL
在线技术论坛:
ezchina.analog.com