



## 采用“快速试错，快速迭代”的方法，打造基于模型设计的实时嵌入式机电系统

Emiel Nuijten, 系统架构师, [Emiel.Nuijten@sioux.eu](mailto:Emiel.Nuijten@sioux.eu)

Patrick van Bree, 首席机电系统设计师, [Patrick.van.Bree@sioux.eu](mailto:Patrick.van.Bree@sioux.eu)

---

### 摘要：

在有实时目标限制的复杂机电系统开发中，基于模型的设计是糅合多学科知识、复杂项目最行之有效的的方式，此方法可进行快速的开发迭代，且几乎不需要任何知识迁移，因此可以避免因为对嵌入式软件中机电一体化设计的实现方式理解不同而导致的错误，且可根据最新的项目发现改进、调整算法，大大降低了开发风险。当然，在多次设计迭代和探索性开发的“低成本、高性能”项目中，也有助于设计师充分发挥，探索最佳实现方法。

**关键词：** 基于模型设计、机电一体化系统、实时目标、代码生成、嵌入式软件、Simulink、Python、上市、迭代策略、低成本高性能

---

### 引言

苏科思致力于开发具有挑战性的、价格更优、性能更佳，且具有限定开发周期的高科技产品，我们的专长在于开发高度复杂、多学科集成、小批量生产的系统及产品。在开发中，因为组件成本优化而导致无法选择完美的硬件，这给整体设计带来了挑战，为了应对这些挑战，我们投入掌握了快速的设计增量方法：可使用的模块化软件开发嵌入式平台，作为产品模块化开发工程系统的一部分。

### 实时机电系统

我们开发最先进的机电产品，在非常复杂或仅有原型应用的情况下，依靠由高性能实时目标控制的高端组件和驱动器，通过例如 Simulink Real-time 提供非常有效的基础架构，弥补台式机模拟和将控制器应用于实际硬件闭环部署之间的差距，在模拟目标和实际目标下均可进行自动化测试、调整参数和跟踪信号。工程师也可测试自己的算法，最棒的是，只用很少的预算就可立即完成这一目标模拟测试。

### 高科技、低成本的挑战

在我们面临高性能和严苛成本相结合的项目时，通常高端零部件和项目时间都无法实现最终产品的要求，用低成本的替代品取代昂贵的伺服电机和编码器会有什么后果？在零件性能未知的情况下，我们还能按时交付吗？

谈到低价，在一次性机器制造业中广泛使用的带光学解码器的工业伺服电机就是个很好的例子，随着产



品的尺寸越来越小，需求越来越多，位控电机的成本却要求越来越低，那么问题来了，是否可以替代使用价格只有几欧的步进电机呢？如果不使用价格昂贵的解码器，我们则可以实现伺服电机的价格目标，但是否还能达到我们需要的精准度目标呢？如果在开发后期出现了更好的替代方案，我们是否还有勇气尝试？如何在没有造成不可接受高风险的情况下处理这些问题呢？

### 设计 & 实施 首次模拟测试

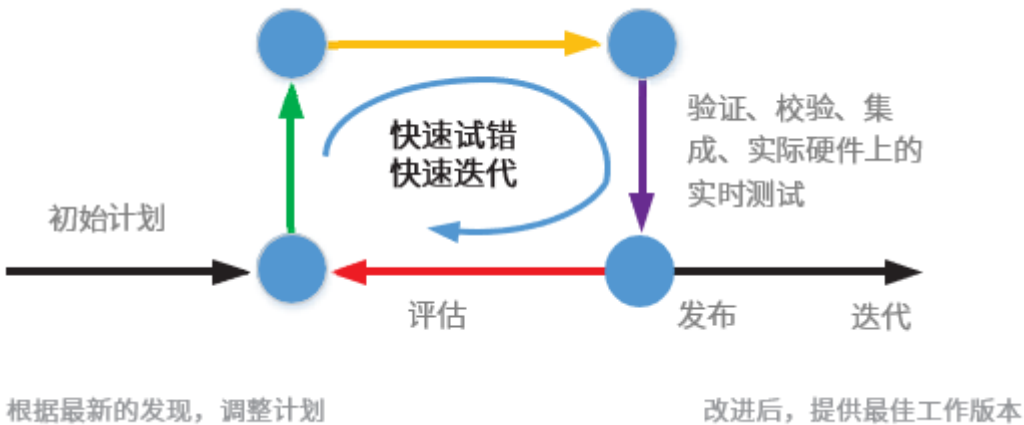


图1：采用快速试错、快速迭代开发模式的产品迭代开发周期图

### 通过“快速试错，快速迭代”，降低风险

在产品的开发阶段如果必须改变设计理念和控制架构会有很大的挑战性，从内心也不太愿意接受，因此在可行的、紧凑的时间计划内，高效且可降低风险的开发方法至关重要，这种“快速试错，快速迭代”的开发方法，可实现快速的试错，打造快速的迭代，是基于模型开发的系统工程和软件设计的理想方案。

### 一切都与沟通有关.....

在传统的嵌入式系统开发中，机电一体化设计人员根据对功能和控制环路的计算和模拟来确定软件要求，而在后面的开发中，实际功能的实现则由软件工程师提供。知识的传递和需求的解释非常耗时，其中还普遍存在一些误解，但这些问题经常是在代码完成并经过验证后才能发现。用 C++ 实现的函数和逻辑规则可以轻松检查，但是如果缺少合适的（模拟）环境，则很难验证反馈控制环路中算法的性能。在后一种情况下，机电一体化设计人员必须熟悉软件平台，并在实际环境测试，与设计环境相比，模拟、跟踪和调试受到更多限制，可实现性更差且更耗时。

基于模型的设计大大降低了沟通成本，机电一体化设计师在自己最擅长的领域工作，更重要的是，使用基于模型的工具消除了非常容易出错的沟通步骤，不需要使用与早期概念模拟中不同的方式手动实现数值算法和相关的功能。



## 各尽所能

工作中很重要的一点是发挥各自的长处，嵌入式软件工程师对特定于平台的部署例如硬件抽象、任务调度、对通信协议的支持以及如何处理内存存储和基础架构以实现软件更新了如指掌。

机电一体化设计师专注于系统模块的功能行为、动态行为和控制系统设计，需考虑传感器和执行器缺陷的自动校准、调整或学习算法及控制器结构。这些问题远非事先制定就可以的，它们的设计可能需要许多次迭代。

让软件工程师和机电一体化设计师各尽其能，平行工作，实现团队平衡。一个组可从软件的角度完全专注于提供可用的平台，另一个组可以专注于实现功能和动态目标，实施部署所需的沟通信息变少，更有图形化的模型可用于文档记录。借助模型化设计方法，我们的机电一体化工程师反馈说他们感觉重构概念、测试新的算法或更新算法、发现错误和缺陷的时间变短了。

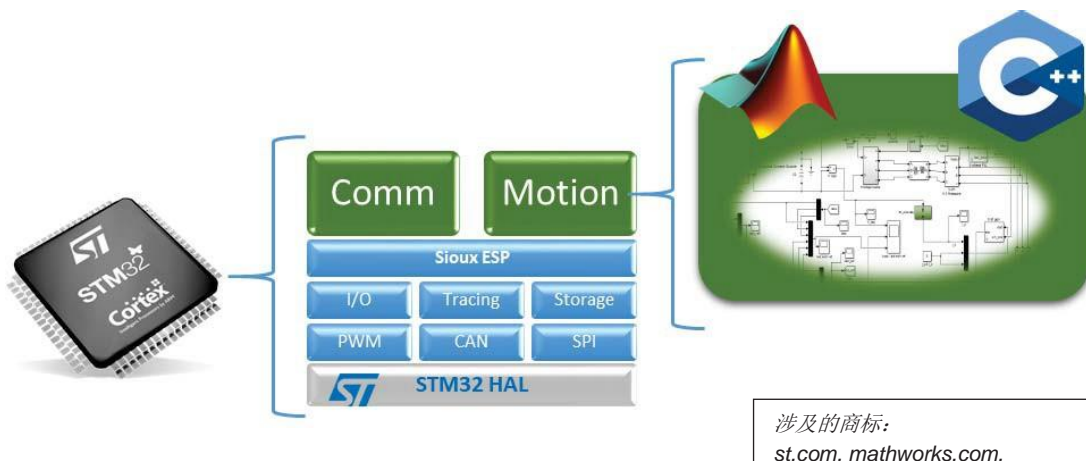


图2:各尽其职。带有代码生成的Matlab-Simulink实现运动控制功能。软件开发人员提供例如硬件抽象和通信的特定功能。

## 恰当的架构和简洁的代码

基于模型的开发看似直观且易于维护，但最终，所有这些都与有序组织的代码、以及明确定义的架构及用户界面有关，这与以任何其他方式编写的软件意义相同。基于模型设计的最大优势在于对跨领域的模型和代码的理解。通过设计、编写规范、建立代码库、测试实例和文档的“模型”，使理解成为现实。在苏科思科技，软件工程师负责定义可正确嵌入从基于模型的设计中生成的代码的架构。当基于模型的控制器设计增加时，除了可读性和可维护性之外，构建块的可测试性、模块化和可复用性也起着重要作用。一般而言，控制工程师都熟悉用于分析、设计和仿真的Matlab-Simulink工具，了解软件设计规则后，他们便可以在其最擅长的环境中交付高质量的软件。

## 一个基于Simulink的电机控制实例

开发一个对定位精度有严格要求的运动系统，该产品需批量生产，这意味着在选择传感器和执行器时，



即便是单个一欧元的价格区别，累计价差已足够明显，除了性能和价格之外，产品生命周期中组件的可用性以及例如应用程序导致的体积限制，进一步缩小了电机和编码器的选择范围。在这一部分，将以一个具体的实例介绍一种典型的工作方法，这种方法是优化设计，以可接受的价格实现“在规格要求范围内足够好”的定位精度。

## 可行性验证

为了在初始阶段就验证需求的可行性，需要设定可控制单个或全部流程的实验装置测试验证。这些初始的验证通常聚焦在子功能上，在这种情况下，高端驱动器、高精度编码器和强大的实时目标用于获得全面的了解，确定性能基准并提高要求，测试结果可以提供如所需的扭矩和干扰力的特性等等数据。有了这些测试信息，可以确定对电机和编码器的要求，可更精准地预估成本价格，需求规格和成本之间的冲突立即一目了然。

## 原型机和早期测试

该原型机基于嵌入式的目标，可实现所有的核心功能，如果可在客户处集成和测试，就可在项目早期最大程度地降低因遗漏和理解错误导致的需求偏差，降低项目走偏的风险，除此之外，功能原型也有助于引入其它领域的开发者如机电设计师和测试工程师，评估他们对项目贡献。

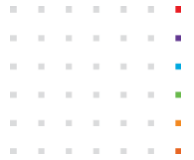
在早期阶段进行功能性测试的要求，通常与为引入低成本硬件导致的缺陷而开发补偿算法所需的时间相冲突，为了解决这一冲突，可以使用不需要大量补偿和校准的高端组件来替代，在稍后的设计阶段，这些昂贵的组件将被便宜一点的组件以及软件补偿算法所取代，系统架构也已经规划可以满足未来需求的设计迭代。原型机的Simulink模型亦可支持命令处理、轨迹生成和反馈控制等的所有功能。

## 替代编码器解决方案

在电机控制示例中，原型包含一个用于测量电机位置的光学编码器。对于最终产品，此解决方案太昂贵了，但是，对于原型，它使我们能够提供可行的解决方案。在项目的下一阶段，需要集成编码器的替代方案。替代方法是：

- 作为传动系统齿轮的一部分，一个定制化的低成本磁性旋转编码器，
- 带事件驱动位置校正的齿轮感应，
- 基于感应转子磁场的电机角度预估。

与电机供应商一起，选择用模拟霍尔传感器代替用于换向的数字霍尔传感器，电机换向开关角度现在必须由微控制器内的软件中确定，而不是直接由数字霍尔逻辑确定。Simulink中的位置感知算法支持对原型机使用增量编码器，该体系架构在这个阶段已经为使用绝对电机角度做好了准备。



## 变量的处理

通过对Simulink模型的扩展，可以选择基于逻辑的增量编码器和电机换相，也可以选择基于角度估计的换相和位置控制，结果是相同的软件版本可以在不同的硬件版本上执行，这一步需要在Simulink中发生的操作与在接近硬件层的嵌入式软件中发生的操作之间进行紧密协调，在客户定制的电机到达之前，设计角度估计算法并进行了仿真测试，同时，使用增量编码器的实际设置对位置控制器进行调优，这两个步骤都考虑相同的版本控制模型。

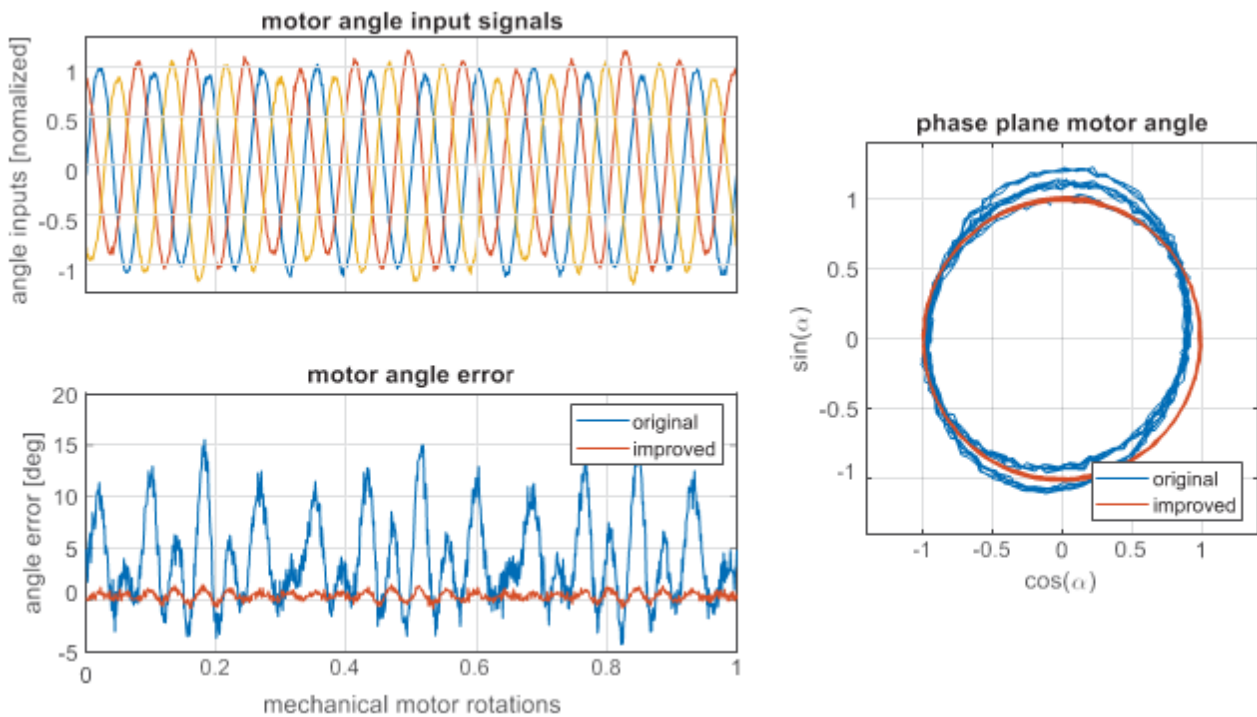
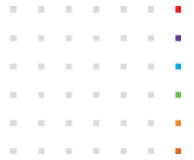


Figure 3: 基于不同模拟霍尔自定义编码器选项的电机角度估计。理想情况下，接收到三个等幅、120度相移的正弦波。由于电机的生产公差，模拟霍尔信号远不理想。然而，一个精确的角位置仍然可以通过基于重复性干扰设计的先进算法估算得出。

## 持续迭代实现最佳

取消光学编码器解决了成本问题，电路图的改变、软件和模拟霍尔传感器的取代数字霍尔传感器只有很小的影响，那么需要注意的就是位置的准确性。理想情况下，模拟霍尔传感器可提供具有相同偏置、相同振幅和相差120度相移的三个正弦信号。但是，对于不同的极对，转子磁化强度的差异以及传感器位置的公差将导致角度位置的明显误差。一个简单的Clarke变换是不够的，需要使用算法来获得准确的电机位置和电机速度估算值，首先使控制器设计适合于在受干扰的角度位置提供最小但稳定的性能，接下来再进行许多提高性能的迭代。



## 通过Simulink和Python作为快速迭代的工具

开发框架扩展到了Python环境，可以在其中编写测试场景的脚本，因此，可以从大量的电机中获得实验数据，自动化测试可以与实际硬件以及仿真模型进行交互，可以根据过程变量的轨迹以及控制器的内部信号来评估性能，与Simulink一样，通过使用Python在线调整参数，可以快速比较不同的选项，实验证实干扰会随着电机的机械角度而重复出现，这种发现是提高精度的关键。

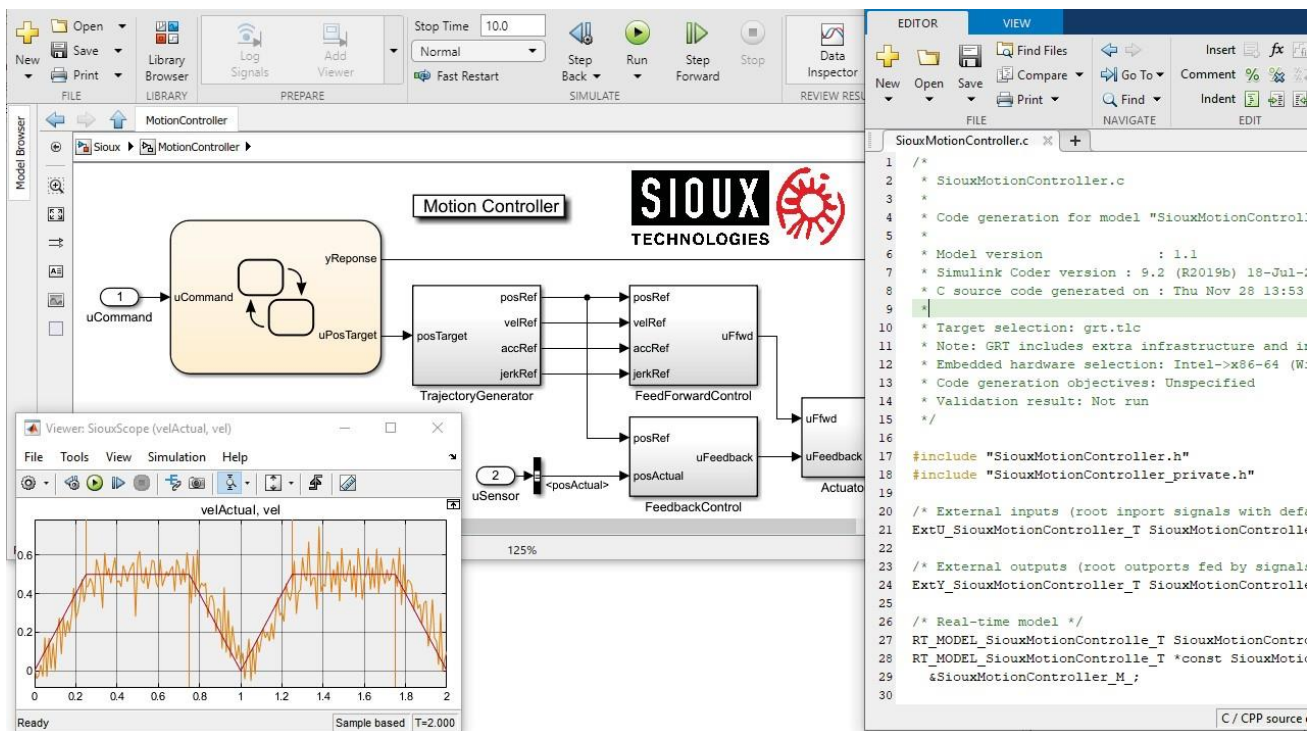


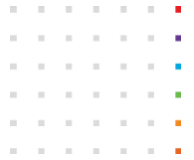
Figure 3 : 在Simulink环境中部署、模拟、编制文档和生成代码。

## 算法开发

该仿真模型可以扩展到覆盖不同干扰特性，使用完全相同的模型，基于仿真和实际测试，评估算法设计更改的适用性。在一种情况下，控制器在与环境工厂模型交互的仿真模式下运行，在另一种情况下，则作为嵌入在应用程序中的生成代码运行，通过结合考虑位置相关干扰的校准过程和基于模型的观测器，可以将整个系统的定位精度控制在规格范围内。

## 正确的人做正确的事

角度估计问题只是算法解决硬件缺陷的一个例子，这些缺陷并没有在规格书中明确说明，也无法事先知道，利用Matlab-Simulink，机电一体化设计人员获得了灵活性，并可以完全控制：设计、实现和测试的功能，而无需深入了解嵌入式软件或容易出错的知识转移过程，这样改进和调整功能以适应新发现或评估替代方案的阻碍就非常小，在最短的时间内，我们就可以知道这个想法是错误的还是成功路上的一大进步。



## 嵌入式系统的适用性

快速迭代和评估多个概念本身就是一个挑战。我们的经验是，使用Matlab-Simulink作为基础模型语言，并使用高级语言(如python)，用于框架测试和自动化。与使用传统规范和编程方法的其他项目相比，可以大大减少所花费的工作。基于模型的开发方法与基于微控制器的开发方法非常兼容。目前市场上价格实惠的微控制器，如STM32系列，具有足够的功能，甚至可以执行实时采样、同步测量的控制回路分析，并可以有效地进行浮点运算。有了正确的工具，机械电子工程师可以用可视化的信号跟踪采样率和执行FRF分析的应用，用高级语言(如Python)编写的测试框架形成了一种灵活的、低成本的数据(后)处理方法。

## I-Mech: 用于智能机电系统的智能运动控制平台

为了有效、高效地开发机电系统，除了本文中提到的方面之外，还需要做更多的工作，本文提出的方法是指实时嵌入式控制器的开发方法，这些类型的子系统非常接近要控制的硬件，并且包含智能传感器、智能执行器和智能放大器。在I-Mech项目定义的体系架构中，此级别映射到“设备层”。在I-Mech内部，由超过30名来自工业界和学术界的参与者组成的联盟在共同努力，以弥合先进机电一体化运动控制系统的最新研究成果与工业最佳实践之间的鸿沟。在更多层级上，利用基于模型的技术来控制复杂性。请参见[www.i-mech.eu](http://www.i-mech.eu)，查看更多先行者和践行者的详细描述。

## 结论

在苏科思内部，使用基于模型的设计技术解决了为复杂机电系统开发嵌入式实时控制器的挑战，它们使我们能够定义适当的体系结构，并以最小的风险和最短的时间生成干净的代码，作为将要开发功能的所有者，机电系统设计人员可以在不依赖于其他学科的情况下设计、部署和评估增量。传感器和执行器的缺陷在软件中得到纠正，是保持低成本高性能系统的开发项目的可管理性、实现嵌入式目标的关键。

基于我们在多个项目中对Matlab-Simulink的应用，我们推荐您访问 <http://tiny.cc/mvr8gz>，阅读此介绍单页，更深入地了解以模型为基础的设计和早期测试、集成对ROI（投资回报比）的影响。