

Application Note

在 AM13x 上对 Simulink 模型进行基准测试



Nilabh Anand, Arun Munuswamy, Val Singh

摘要

基于模型的设计工作流程要求越来越高，不仅要在仿真条件下进行算法验证，而且要在实际处理器执行条件下直接在目标嵌入式硬件上进行算法验证。在目标硬件上对 Simulink 算法模型进行基准测试可提供定量执行时间和资源利用率数据，仅靠仿真无法提供对于平台选择、调度决策以及多速率系统设计至关重要的信息。本应用手册介绍了一种结构化方法，用于采用处理器在环 (PIL) 仿真对德州仪器 (TI) AM13x 微控制器上的 Simulink 算法模型进行基准测试。

内容

1 简介.....	2
2 处理器在环 (PIL).....	2
3 先决条件.....	2
4 在 AM13x 上对电流控制算法进行基准测试.....	3
4.1 引用 C28x 示例仿真模型.....	3
4.2 为 F28379D 配置的仿真模型.....	3
4.3 仿真结果.....	4
5 隔离算法：将子系统转换为模型引用.....	5
5.1 转换过程.....	5
5.2 为“处理器在环”配置的转换后模型引用块.....	6
6 为 AM13x PIL 配置模型引用.....	7
6.1 目标硬件选择.....	7
6.2 SysConfig 配置.....	7
7 SIL/PIL Manager.....	8
7.1 启动 SIL/PIL Manager 并运行 PIL.....	8
8 优化并重新进行性能分析.....	10
8.1 PIL 结果：采用单精度数据类型和正弦/余弦 TMU.....	10
8.2 显示 TMU 函数的代码生成报告.....	11
8.3 通过“比较运行”选项启用代码视图.....	11
8.4 PIL 结果：使用单一数据类型和正弦/余弦 TMU 执行性能分析.....	12
9 总结.....	12
10 参考资料.....	12

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在 Simulink 中开发的嵌入式控制算法通常会首先在仿真中进行验证，或在初始目标平台上进行原型设计，然后再最终确定生产硬件决策。在电机控制、电源转换和信号处理应用中，磁场定向控制 (FOC) 等算法通常已有在 Simulink 中经过数值验证的完备仿真历史，并可能已在先前的嵌入式目标（如 TI C28x 实时微控制器或 TI AM261x）上部署并进行了性能分析，或者完全来自非 TI 平台，表示不包含任何目标特定依赖项的自包含 Simulink 子系统。

2 处理器在环 (PIL)

将 AM13x 作为候选平台引入时，一个根本性的工程问题随之而来：*该算法在这款处理器上的性能如何？*仿真无法回答这个问题。执行时间、指令高速缓存行为、流水线利用率以及硬件加速数学运算（对于 AM13x，加速器为三角数学单元 — TMU）的影响都是物理处理器的属性，只有通过目标硬件上执行才能观察到。

[处理器在环 \(PIL\)](#) 正是提供了此功能。PIL 直接在连接的 AM13x 硬件上执行 Simulink 算法模型，同时保留仿真环境作为测试框架，提供测试向量、收集输出结果，并根据引用仿真验证数值正确性。执行性能分析数据会在每次 PIL 运行结束时自动返回，报告算法在物理器件上消耗的实测处理器周期数和执行时间。

3 先决条件

- [AM13x 支持包](#)
- [C2000 Microcontroller Blockset](#)
- [Motor Control Blockset](#)

4 在 AM13x 上对电流控制算法进行基准测试

4.1 引用 C28x 示例仿真模型

此工作流程的起点是 MathWorks 随附的示例 [Code Verification and Profiling Using PIL Testing](#)。此示例随附一个完整的 FOC 电机控制模型，用于在 TI C28x 平台上演示 PIL。同一模型还用于重新定向到 AM13x，从而使用完全相同的模型对电流控制算法进行基准测试。

4.2 为 F28379D 配置的仿真模型

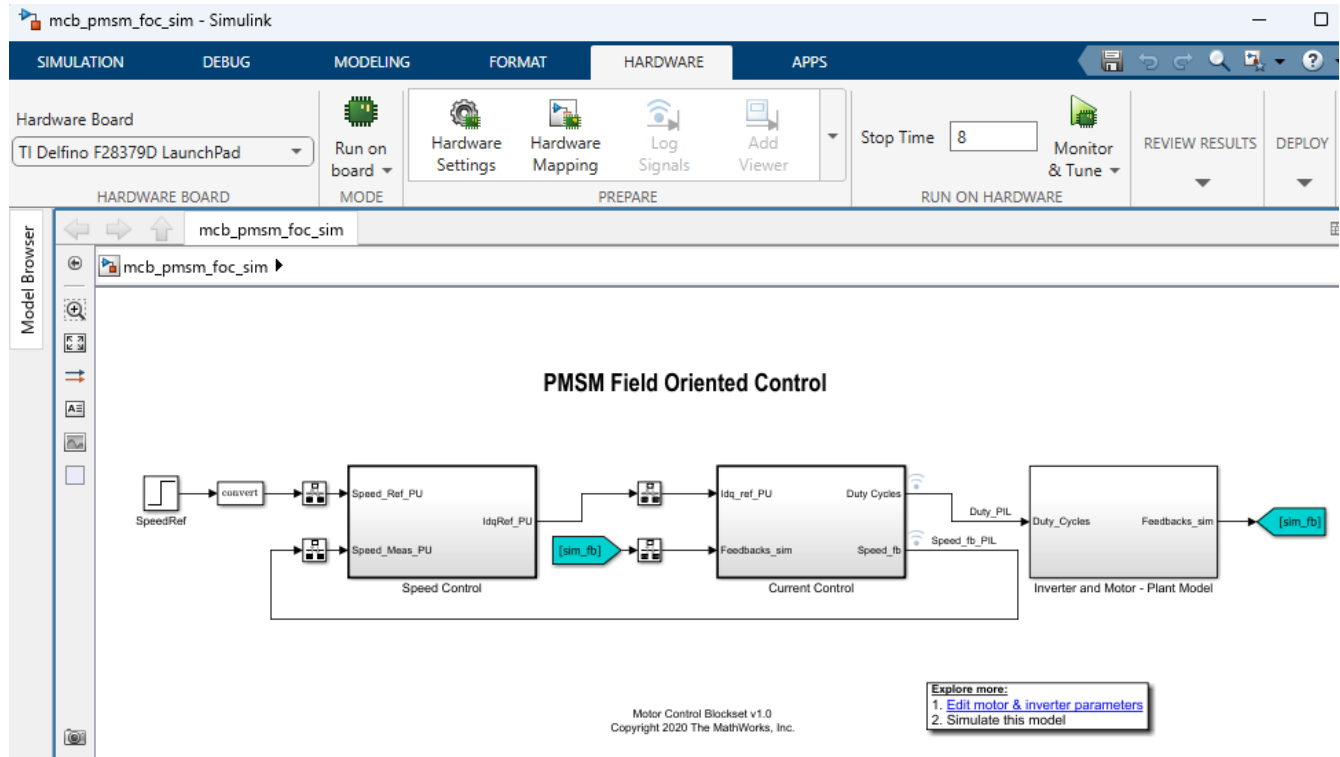


图 4-1. PMSM Blockset

在继续执行 PIL 之前，请验证基线仿真的正确性

- 打开示例模型，然后运行仿真直至完成
- 在 **Simulation Data Inspector** 中观察速度参考和速度反馈信号，反馈轨迹必须正确跟踪参考，从而确认在进行任何目标部署之前，算法在数值上都是可靠的
- 该仿真结果用作比较 PIL 输出的数字参考

4.3 仿真结果



图 4-2.

5 隔离算法：将子系统转换为模型引用

在模型块级别，PIL 要求将待测算法封装为“模型引用”块。这会围绕电流控制算法建立清晰的输入/输出边界，并允许周围的系统模型继续在 Simulink 主机上执行，同时仅将引用的模型部署到 AM13x 目标。

5.1 转换过程

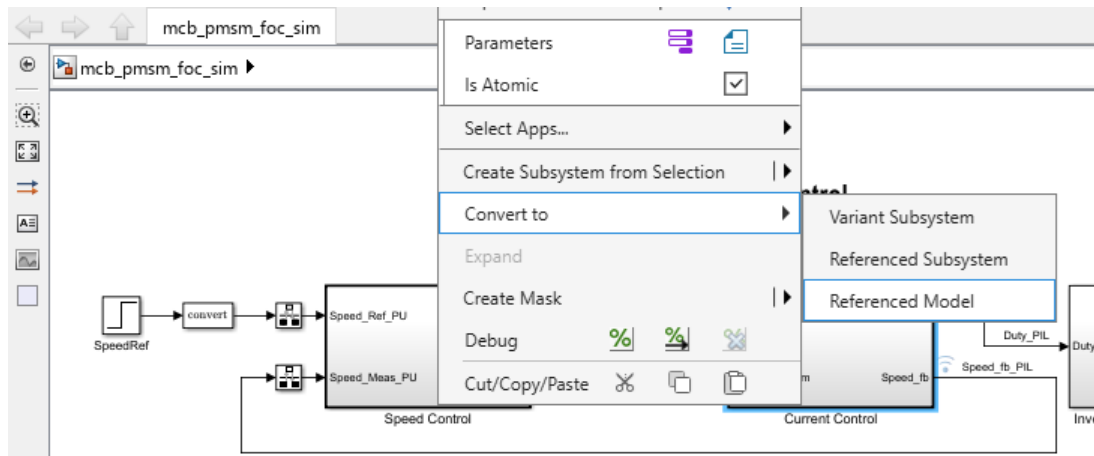


图 5-1. 引用模型

1. 在顶层模型中，右键单击电流控制子系统块
2. 选择 **Subsystem** → **Convert to** → **Referenced Model**
 - a. 单击转换该模型，Model Advisor 将显示转换成功消息

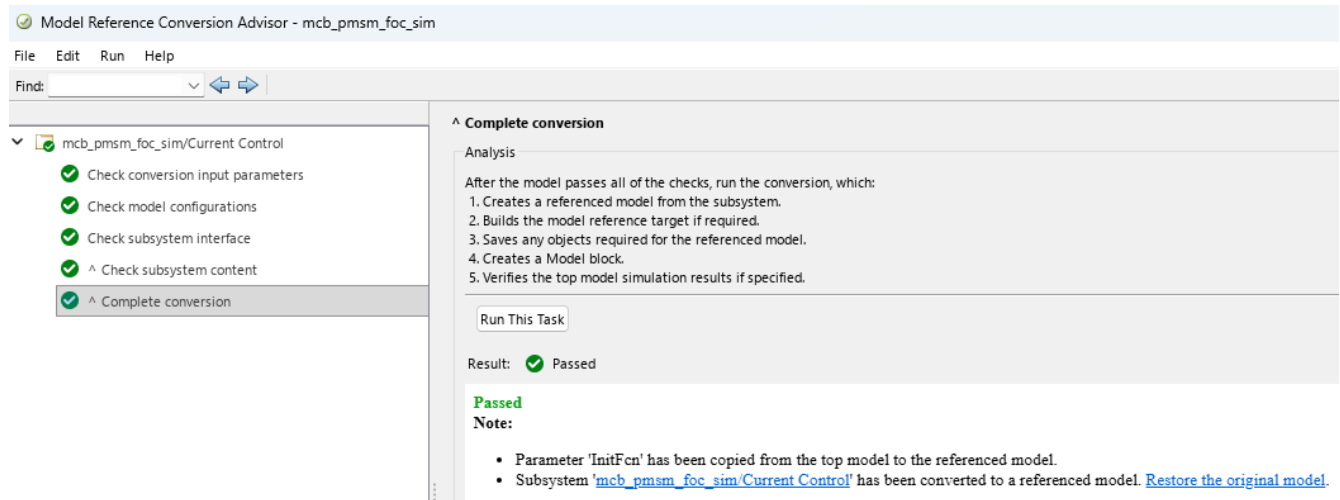


图 5-2. 转换步骤

3. Simulink 会创建一个单独的新模型文件，其中仅包含电流控制算法内容
4. 顶层模型中的原始子系统会自动替换为指向新建模型的模型引用块。重命名顶层模型，以避免与引用示例模型冲突。
5. 验证顶层模型在转换后是否正确仿真，数值结果必须与转换前基线完全相同

顶层 FOC 系统会继续完全在 Simulink 主机上运行。在 PIL 执行期间，仅将电流控制模型引用块部署到 AM13x。

5.2 为“处理器在环”配置的转换后模型引用块

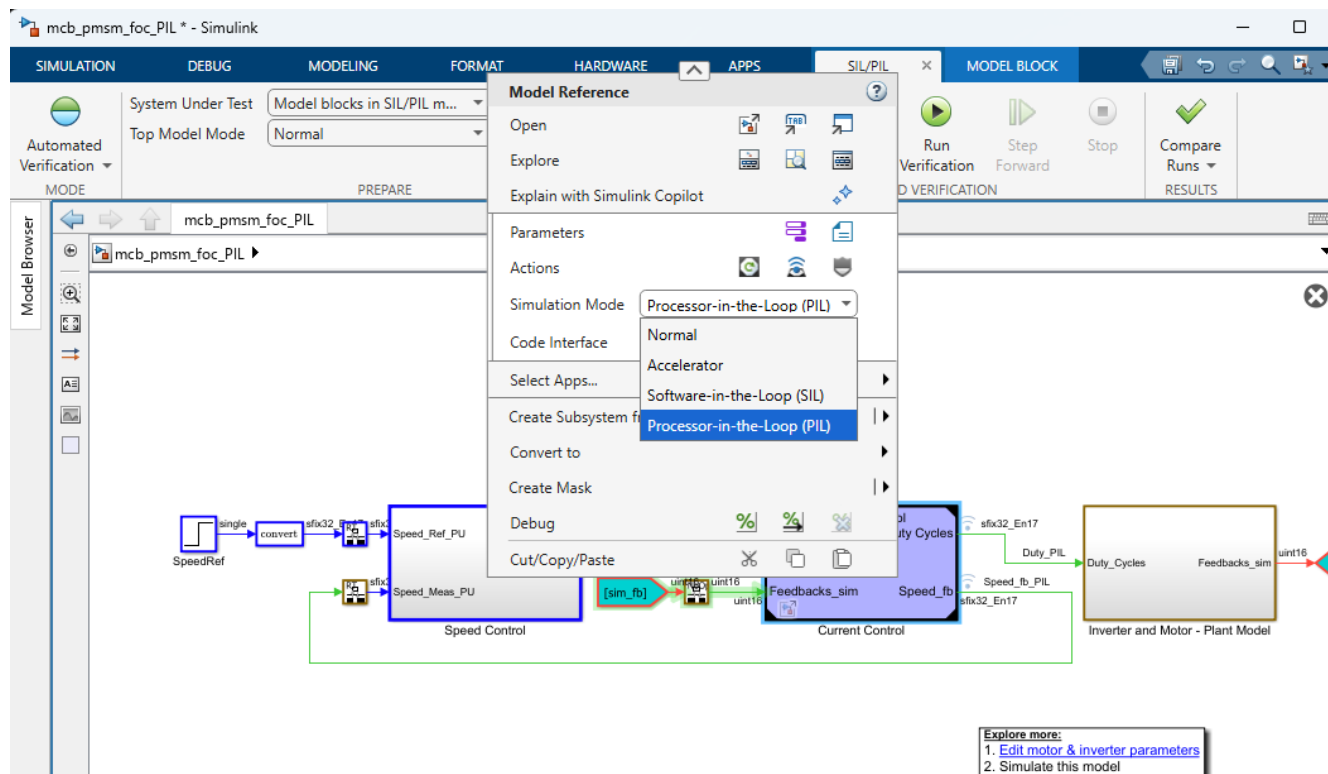


图 5-3. PIL

6 为 AM13x PIL 配置模型引用

建立模型引用后，以下配置步骤会准备在 AM13x Launchpad 上执行 PIL 的电流控制模型。

6.1 目标硬件选择

1. 打开当前控制的引用模型（而不是顶层模型）。
2. 导航至 *Model Configuration Parameters* → *Hardware Implementation*。
3. 将 *hardware board* 设置为 AM13E230x。
4. 选择后，*TMU (Trigonometric Math Unit) Code Replacement Library* 将自动激活，无需手动干预。

6.2 SysConfig 配置

1. 导航到 *Target Hardware Resources* → *SysConfig*
2. 对于 PIL，选择 AM13x PIL 示例随附的 *SysConfig* 文件，此文件已预先配置主机和目标之间 PIL 数据交换所需的通信外设设置
3. 指定 *SysConfig* 文件位置时请使用 *相对路径*

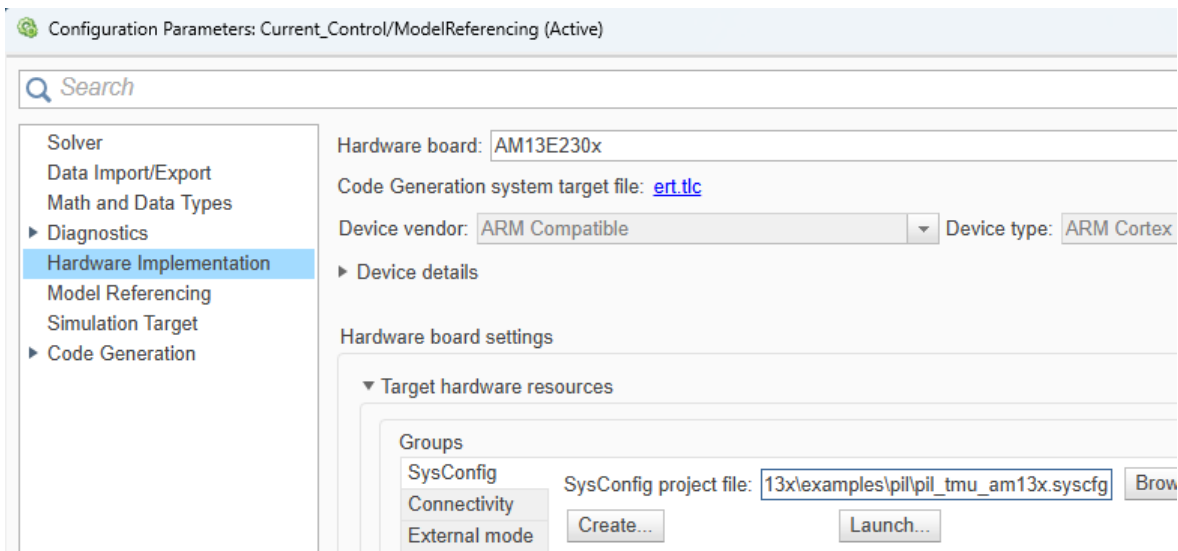


图 6-1. 部署目标选择

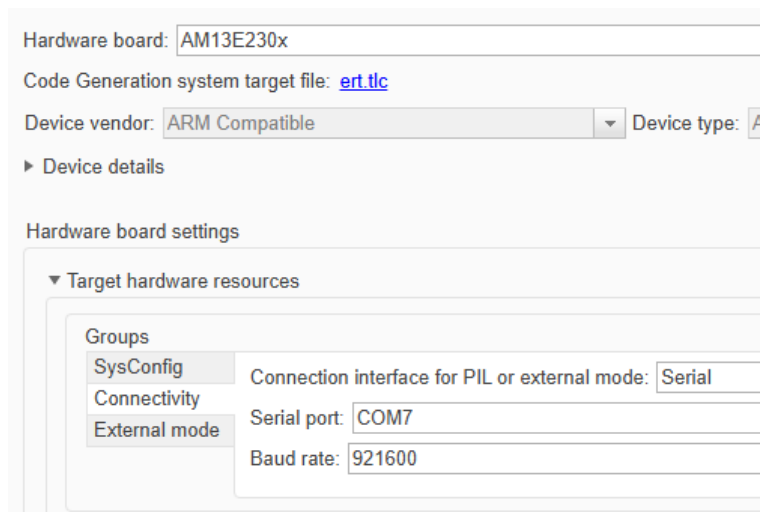


图 6-2. UART 串行连接

7 SIL/PIL Manager

7.1 启动 SIL/PIL Manager 并运行 PIL

1. 打开 *SIL/PIL Manager* 应用程序 (从 Simulink 工具栏选择 *Apps* → *SIL/PIL Manager*)
2. 该应用会自动管理 PIL 执行、性能分析数据采集和数值比较
3. 从 *Settings* 启用 *Task Profiling* 选项，如下图所示

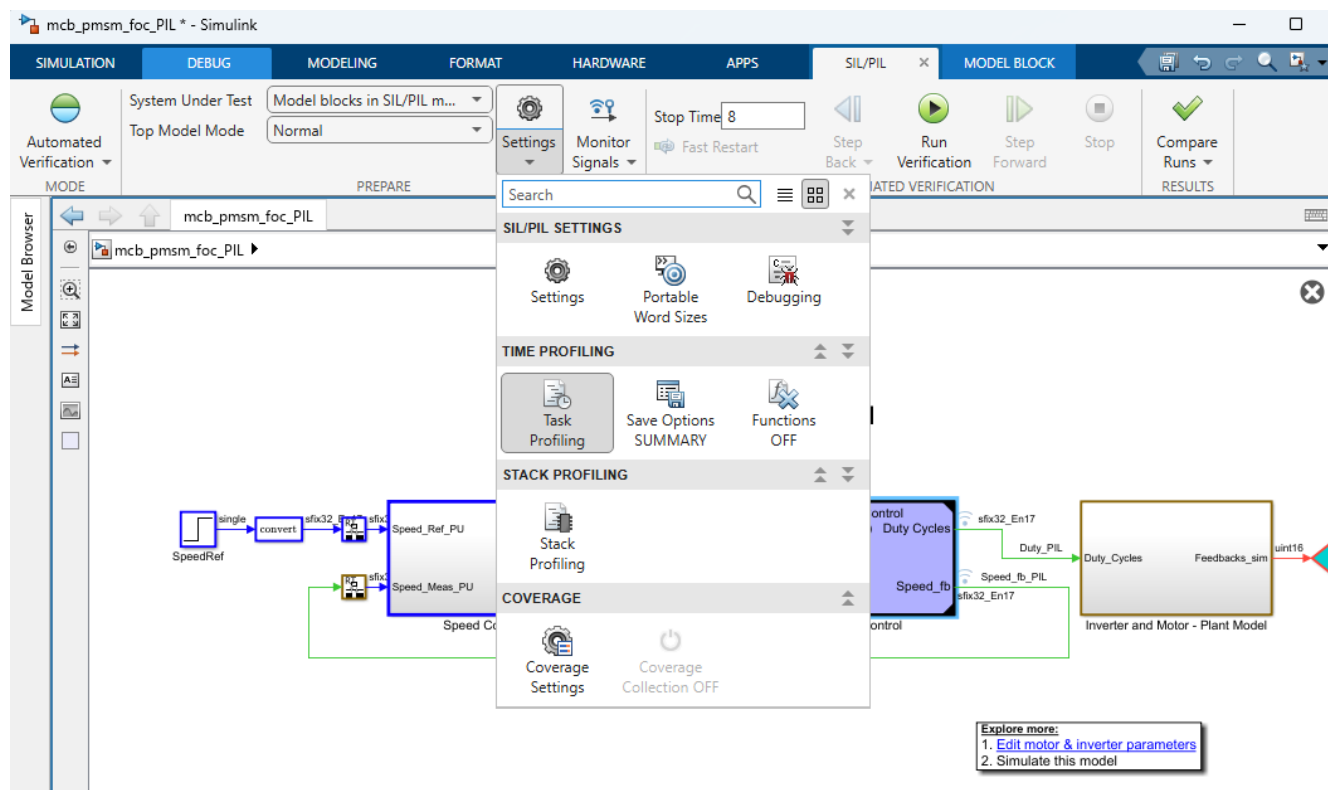


图 7-1. Simulink 任务性能分析

7.1.1 仿真时间注意事项

PIL 仿真并非实时。每个时间步都需要数据通过串行通信链路从 Simulink 主机传输到 AM13x 目标，然后再返回。对于具有快速基本采样时间的电机控制模型，运行完整的仿真持续时间会导致 PIL 会话过长而不切实际。将仿真停止时间设置为 100 毫秒 (0.1)，这足以采集有意义的性能分析数据并观察算法行为，而不会占用过多的运行时间。

1. 在 SIL/PIL Manager 中单击 *Run* 以启动 PIL 执行。
2. Simulink 编译电流控制模型并将其部署到 AM13x，建立通信链路，然后逐步开始交换数据。

7.1.2 PIL 结果：显示数值验证



图 7-2. 结果

7.1.3 PIL 结果：执行性能分析

Code Profile Analyzer

GENERAL TIME PROFILING

Time unit: Microseconds (us) Timer Ticks per Second (MHz): 200

Task Execution Task Validation Function Execution Highlight Source Highlight Code Highlight Profiling Generate Report

Task Execution Task Validation Function Execution Comparison

Task Execution Times

Section Name	Maximum Execution Time	Average Execution Time	Maximum Self Time	Average Self Time	Calls
Current_Control_initialize	4.3300	4.3300	4.3300	4.3300	1
Current_Control_Init	0.4950	0.4950	0.4950	0.4950	1
Current_Control [5e-05 0]	16.4550	16.4298	16.4550	16.4298	2487

图 7-3. 基准

8 优化并重新进行性能分析

PIL 基准测试工作流程本质上是迭代的。确定基线性能分析结果后，工程师可以应用代码生成和算法优化，并重新运行 PIL 来测量每项更改的精确影响。

AM13x 的已知优化手段包括：

- **TMU 代码替换库**：在 AM13x 目标选择后自动启用；将标准三角函数调用替换为 TMU 硬件加速等效函数，从而显著缩短 FOC 算法的执行时间。
- **编译器优化级别**：可在 *Model Configuration Parameters* → *Code Generation* → *Build configuration* 中进行调整
- **数据类型细化**：在算法精确度允许的情况下，将不必要的双精度运算缩减为单精度
- **查找表近似值**：在 TMU 不适用的情况下，将超越函数调用替换为基于表的近似值
- **其他 Simulink 代码生成优化**，请参阅 [Optimization Strategies for Generated Code](#)
- 对于应用的每一次优化，重复 PIL 运行并记录更新的性能分析结果。通过比较基线和优化的性能分析数据，可以获得 AM13x 目标优化效果经过硬件验证的定量指标。

8.1 PIL 结果：采用单精度数据类型和正弦/余弦 TMU

- 将 mcb_pmsm_foc_sim_data.m 中的数据类型从固定点更改为 **single**

```
mcb_pmsm_foc_sim_data.m × +
C:\Users\la1255762\OneDrive - TEXAS INSTRUMENTS\Documents\MATLAB\Examples\R2026a\mcb\CodeVerification
18
19 %% Set data type for controller & code-gen
20 % dataType = fixdt(1,32,17); % Fixed point code-generation
21 dataType = 'single'; % Floating point code-generation
22
23 %% System Parameters // Hardware parameters
```

图 8-1. 数据类型更改

- 将逼近方法从 Lookup 更改为 none 以生成正弦/余弦函数

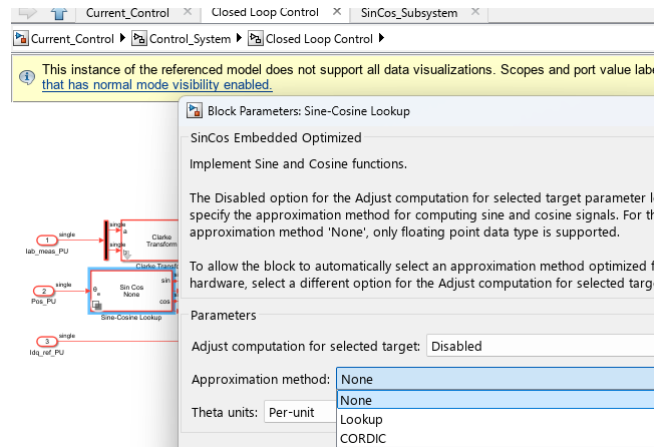


图 8-2. 逼近方法

- 现在，代码生成会将正弦/余弦替换为 TMU 函数 `sinf_tmu/cosf_tmu`

8.2 显示 TMU 函数的代码生成报告

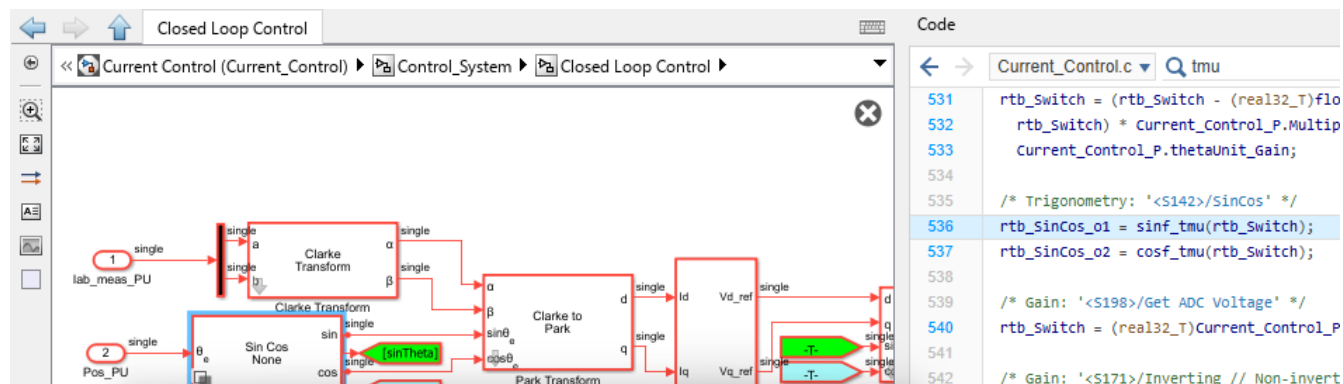


图 8-3. TMU 内联函数替换

8.3 通过“比较运行”选项启用代码视图

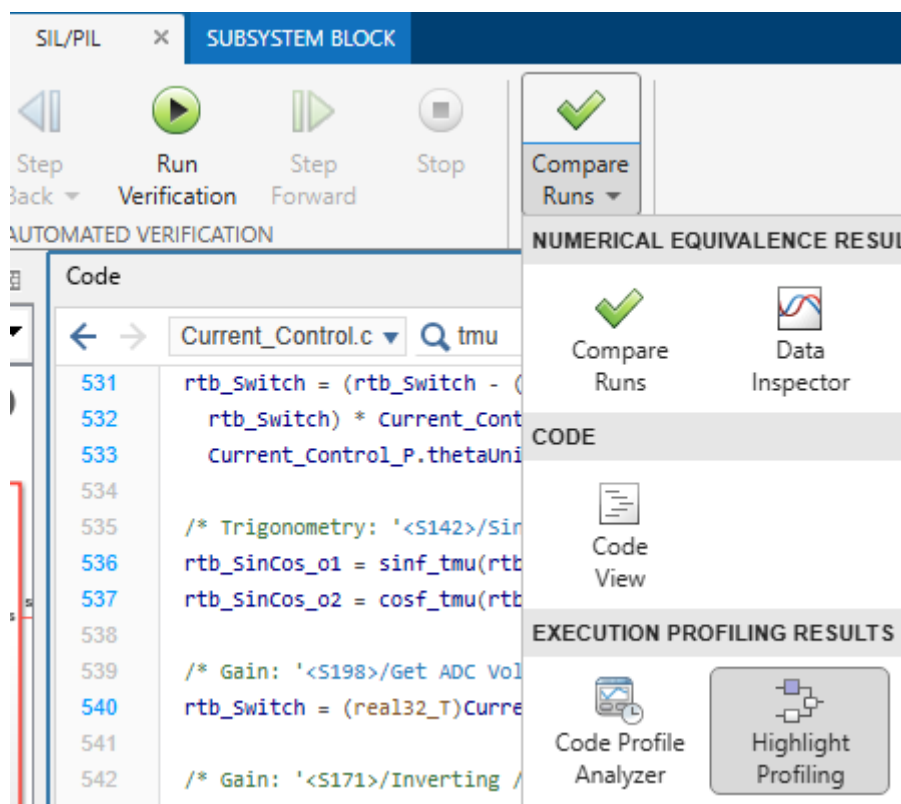


图 8-4. 性能分析

8.4 PIL 结果：使用单一数据类型和正弦/余弦 TMU 执行性能分析

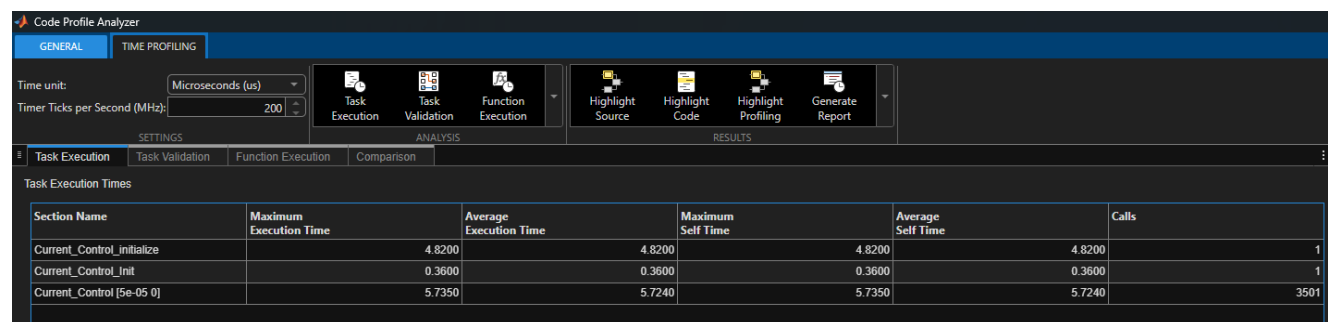


图 8-5. 使用 TMU 的结果

9 总结

本应用手册介绍了一种结构化的基准测试工作流程，该流程可跨算法模型源（C28x、其他 MCU）移植到 AM13x 器件。这将使到 AM13x 的转换更加顺畅、快捷。

10 参考资料

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月