

Design Guide: TIDA-060045

具有四通道 3D 霍尔效应传感器的低延迟精确线性位置检测参考设计

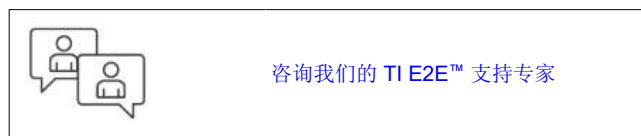


说明

本参考设计使用带有高速 10MHz SPI 的单个或多个等距放置的 3D 霍尔效应传感器 **TMAG5170** 演示了 N45 磁体目标的高精度、低延迟线性位置感应，其中 Z 轴和 X 轴磁场强度以及 CRC 数据在单个 32 位帧中传输，从而实现低延迟和增强的数据完整性。具有 3.3V I/O 的数字接口与 C2000™ MCU LaunchPad 兼容，可以使用 C2000™、Sitara 或其他 MCU 评估我们的 3D 霍尔效应感应技术。

资源

TIDA-060045	设计文件夹
TMAG5170	产品文件夹
TMAG5170-CODE-EXAMPLE	工具文件夹
TI-MAGNETIC-SENSE-SIMULATOR	工具文件夹
LAUNCHXL-F280049C	工具文件夹



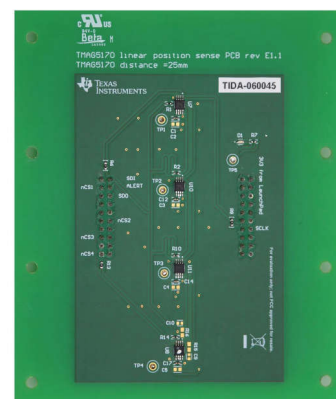
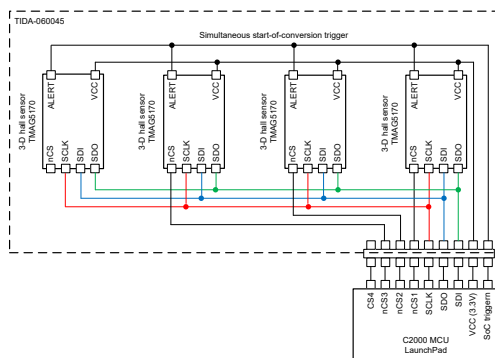
特性

- 具有集成式 ADC 和 SPI 接口的单芯片 3D 霍尔效应传感器可降低 BOM 成本和缩小 PCB 尺寸。
- 线性位置精度通常在 100mm 范围内实现 $\pm 0.15\text{mm}$ ，有助于实现更精确的线性电机传输系统。
- 具有可配置灵敏度 $\pm 25\text{mT}$ 至 $\pm 100\text{mT}$ 和 $\pm 75\text{mT}$ 至 $\pm 300\text{mT}$ 的 3D 霍尔效应传感器有助于优化测量范围和精度。
- 在 $57.5\ \mu\text{s}$ 低延迟下高达 8kHz 的采样率和 10MHz SPI 可实现速度更高的位置控制。
- 专用 ALERT 引脚支持在多个 3D 霍尔效应传感器之间同时启动 X、Y、Z 轴转换。
- 3D 霍尔效应传感器诊断功能可帮助检测和报告系统级和器件级故障。

应用

- 线性电机位置传感器
- 伺服驱动器位置传感器
- 位置传感器
- 接近开关

设计图像



1 系统说明

使用霍尔效应传感器的线性位置感应在许多应用中使用，例如线性伺服驱动器、工厂自动化中的接近开关和线性电机运输系统。根据应用，具有霍尔效应传感器的传感器感测头在具有多个磁极的静态磁条上移动，或者磁性目标在静态霍尔效应传感器或霍尔效应传感器阵列上方移动。

线性电机传输系统使多个磁转子进行一维甚至二维运动，速度高达 10m/s，线性位置精度和可重复性低至 0.01mm。磁传感器上的磁场范围取决于转子的感应磁体以及转子磁体与静态多位置传感器印刷电路板 (PCB) 之间的距离。

图 1-1 展示了使用等间距精密线性 3D 霍尔效应传感器进行线性位置感应的感应原理。每个 3D 霍尔效应传感器之间的距离是系统特定的，取决于转子的磁场强度、磁体直径、空气间隙和所需的位置精度。相邻 3D 霍尔效应传感器之间的典型距离是系统特定的，可以在 10mm 到 50mm 的范围内。

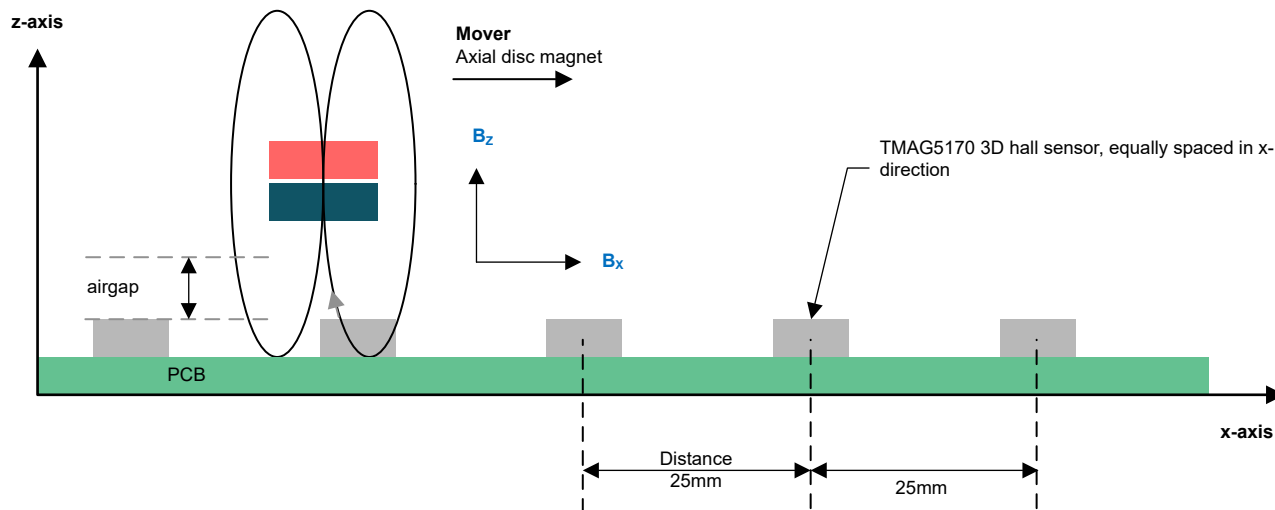


图 1-1. 使用多个 3D 霍尔效应传感器的 PCB 交叉部分

本参考设计展示了采用四个位移为 25mm 的 3D 霍尔效应传感器 TMAG5170 的 N45 磁体目标的高精度低延迟线性位置感应。一个常见的转换启动信号支持同时测量四个 3D 霍尔效应传感器。使用 TMAG5170 测量的 Z 轴、X 轴和 CRC 数据通过 10MHz SPI 以单个 32 位帧的形式传输，从而实现低延迟和增强的数据完整性。可以使用相应 3D 霍尔效应传感器的芯片选择通过 SPI 按顺序读取数据，也可以通过 MCU 并行读取全部四个传感器。具有 3.3V I/O 的数字接口与 C2000™ MCU LaunchPad 兼容，可以使用 C2000™、Sitara 或其他 MCU 评估我们的 3D 霍尔效应感应技术。

1.1 主要系统规格

表 1-1 提供了本参考设计的主要规格。本参考设计可直接连接到 C2000 MCU LaunchPad。

表 1-1. 主要设计规格

参数	值 (典型)	注释
最大感应范围	100mm	
位置精度	$\pm 0.15\text{mm}$ ($\pm 0.15\%$)	在 25°C 时测得
3D 霍尔效应传感器	TMAG5170A1	A1 为 $\pm 100\text{mT}$ (最大值), 快插版本 A2 支持 $\pm 300\text{mT}$ (最大值)
传感器满标量程	$\pm 50\text{mT}$ (Z 轴), $\pm 25\text{mT}$ (X 轴)	可编程 $\pm 25\text{mT}$ 、 $\pm 50\text{mT}$ 、 $\pm 100\text{mT}$
传感器数量	4	可扩展
传感器距离 (x 轴)	25mm	为 25mm 磁体选择
传感器到磁体的距离 (y 轴)	1.52mm	可调节
移动磁体	N45-1350	NdFeB 轴向圆盘磁体: 1350mT, 25mm 直径, 3mm 高
传感器采样率	4kHz	8kHz 成为可能
同步感应	是	所有四个 TMAG5170 同时触发
到主机 MCU 的 SPI	工作频率高达 10MHz 的应用	
延迟	57.5 μs	从有效采样点到 ADC 结果可通过 SPI 读取的时间
到主机 MCU (1) 的接口	3.3V I/O	与 C2000 LaunchPad 接口兼容, 请参阅表 4-1 和 4-2 引脚分配
电源电压	3.3V	

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 显示了本参考设计的方框图。一个专用的转换启动引脚 (ALERT) 支持由主机 MCU 对所有 3D 霍尔传感器进行同步采样，并实现与功率级和段控制算法相关的位置采样时间的低抖动同步。

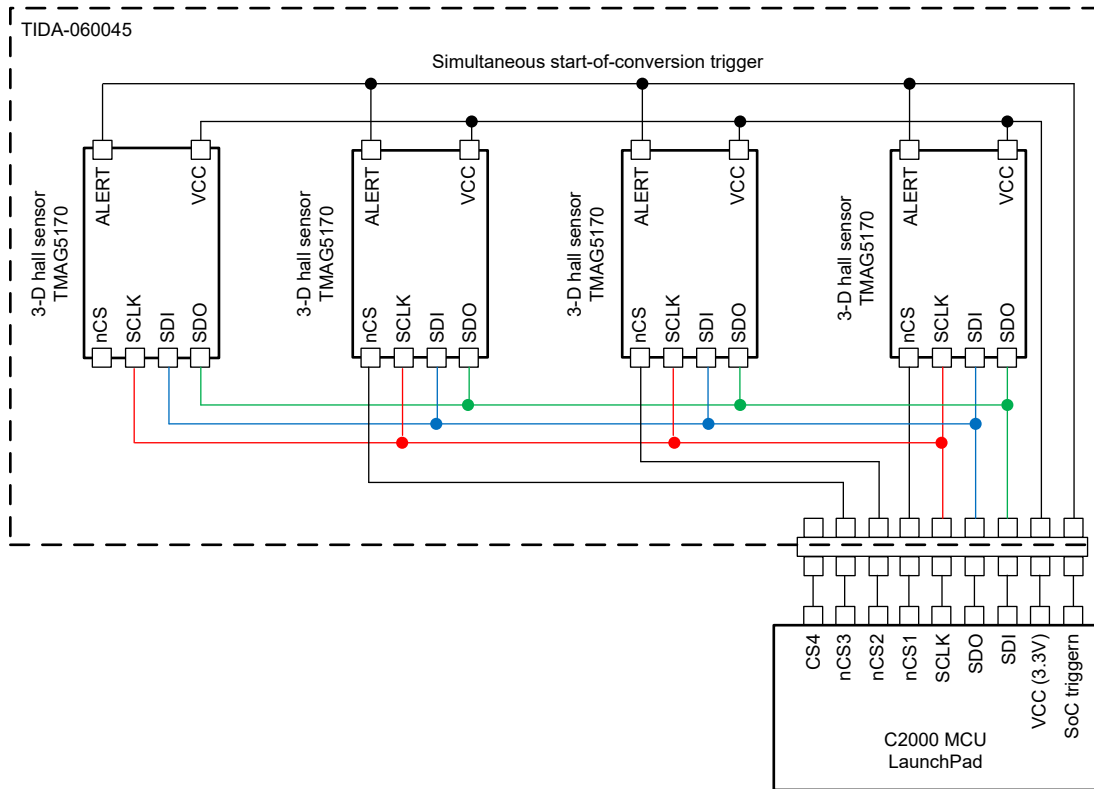


图 2-1. 系统方框图

2.2 设计注意事项

线性电机传输系统使多个磁动子进行一维甚至二维运动，速度高达 10m/s，线性位置精度和可重复性低至 0.01mm。磁传感器上的磁场范围取决于动子的感应磁体以及动子磁体与静态多位置传感器印刷电路板 (PCB) 之间的距离。通常，磁场范围为 50mT 到 300mT。根据空间要求，具有高度集成的 3D 霍尔效应传感器片上系统 (SoC) 的小封装是一个优势。传感器的环境工作温度超过 85°C 时 (例如 125°C)，可实现更高的功率密度，同时在这些极端条件下仍能准确捕获传感器数据。由于需要同时检测某段内多个动子的位置，同时采样和低延迟位置测量至关重要。与模拟输出 SoC 相比，具有低延迟数字接口的 3D 霍尔效应传感器能够更好地抵抗噪声。具有数字接口的 SoC 还具有其他优势，即可以诊断和监测 SoC，例如内核温度、霍尔效应元件或电源电压诊断，从而提高系统可靠性。

由于 Z 轴和 X 轴的最大场强可能不相同，因此允许对每个磁场轴进行单独范围编程和优化的 3D 霍尔效应传感器将有助于支持更高的位置分辨率和精度。表 2-1 显示了线性电机传输系统的示例系统要求以及对 3D 霍尔效应传感器规格的影响。

表 2-1. 线性电机传输系统的磁传感器的示例要求

参数	示例值	对位置传感器 SoC 的影响
动子速度	高达 10m/s	会影响传感器采样率，闭环位置控制频率可以是 4kHz 或更高。
动子位置准确度/可重复性	低至 0.01mm	会影响传感器分辨率、精度和相邻传感器之间的最小位移。
传感器技术	3D/2D 霍尔效应传感器	3D 霍尔效应传感器可实现二维位置感应。

表 2-1. 线性电机传输系统的磁传感器的示例要求 (续)

参数	示例值	对位置传感器 SoC 的影响
传感器磁场范围	50mT ... 300mT	满量程磁场强度线性输入范围
传感器分辨率	典型 12 位分辨率	具有可编程磁场范围调整的 SoC 允许调整每个轴的输入范围，并有助于提高分辨率和准确度。
传感器接口	模拟或串行数字	用于连接 MCU 的接口
传感器延迟	低至 100 μs	高速 SPI，例如...10MHz SPI 有助于减少系统延迟。
多个动子位置的同步采样	具有低抖动转换启动能力的传感器。	传感器具有硬件引脚或基于 SPI 命令的转换启动信号输入。
传感器解决方案 PCB 面积	尽可能小。	具有数字接口的集成式 3D 霍尔效应 SoC 可实现更小的系统占用空间。
工作温度范围	小尺寸和高功率密度会导致段内的温度提高。	3D 霍尔效应 SoC 具有大于 85°C 的环境温度工作范围。
EMC 抗扰度	具有 CRC 的 SPI 接口	带有 CRC 的数字接口可提高针对脉冲噪声的稳健性。
系统可靠性、预测性维护和故障检测	3D 霍尔效应传感器、电源电压、芯片温度监测	例如，通过具有 SPI 接口和集成式诊断功能的传感器实现。

2.3 主要产品

TMAG5170 是高精度线性 3D 霍尔效应传感器，适用于各种工业和个人电子产品应用。高集成度可在各种位置感测系统中提供灵活性和准确性。此器件在 X、Y 和 Z 轴具有 3 个独立的霍尔效应传感器。精密信号链和集成式 12 位 ADC 可实现高精度和低漂移磁场测量，同时支持高达 20ksps 的采样率。片上温度传感器数据可用于系统级漂移补偿。**TMAG5170** 的众多特性包括：

- 独立可选 X、Y 和 Z 磁性范围：
 - TMAG5170A1 : $\pm 25, \pm 50, \pm 100\text{mT}$
 - TMAG5170A2 : $\pm 75, \pm 150, \pm 300\text{mT}$
- 专用 ALERT 引脚支持在多个 3D 霍尔效应传感器之间同时启动 X、Y、Z 轴转换。
- 伪同步采样模式
- 10MHz 串行外设接口 (SPI)，该接口具有循环冗余校验 (CRC)
- 2.3V 至 5.5V 的电源电压范围
- 工作温度范围： -40°C 至 $+150^{\circ}\text{C}$
- 过采样可通过取 2、4、8、16 或 32 次转换的平均值来降低输出噪声

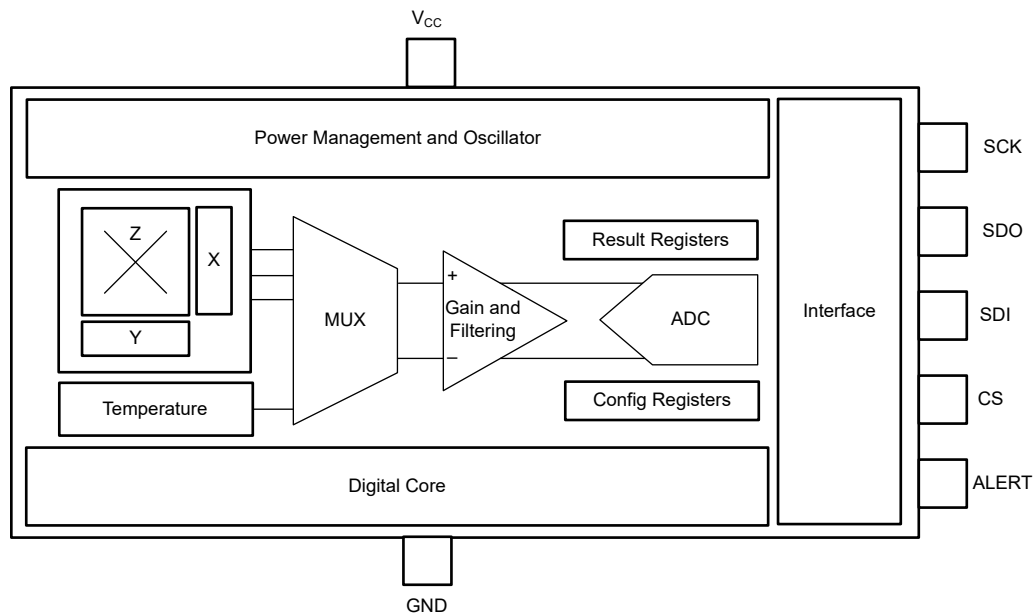


图 2-2. TMAG5170 功能方框图

3 系统设计原理

3.1 硬件设计

由于与 TMAG5170 3D 霍尔效应传感器高度集成，因此原理图相当简单。图 3-1 显示了原理图。

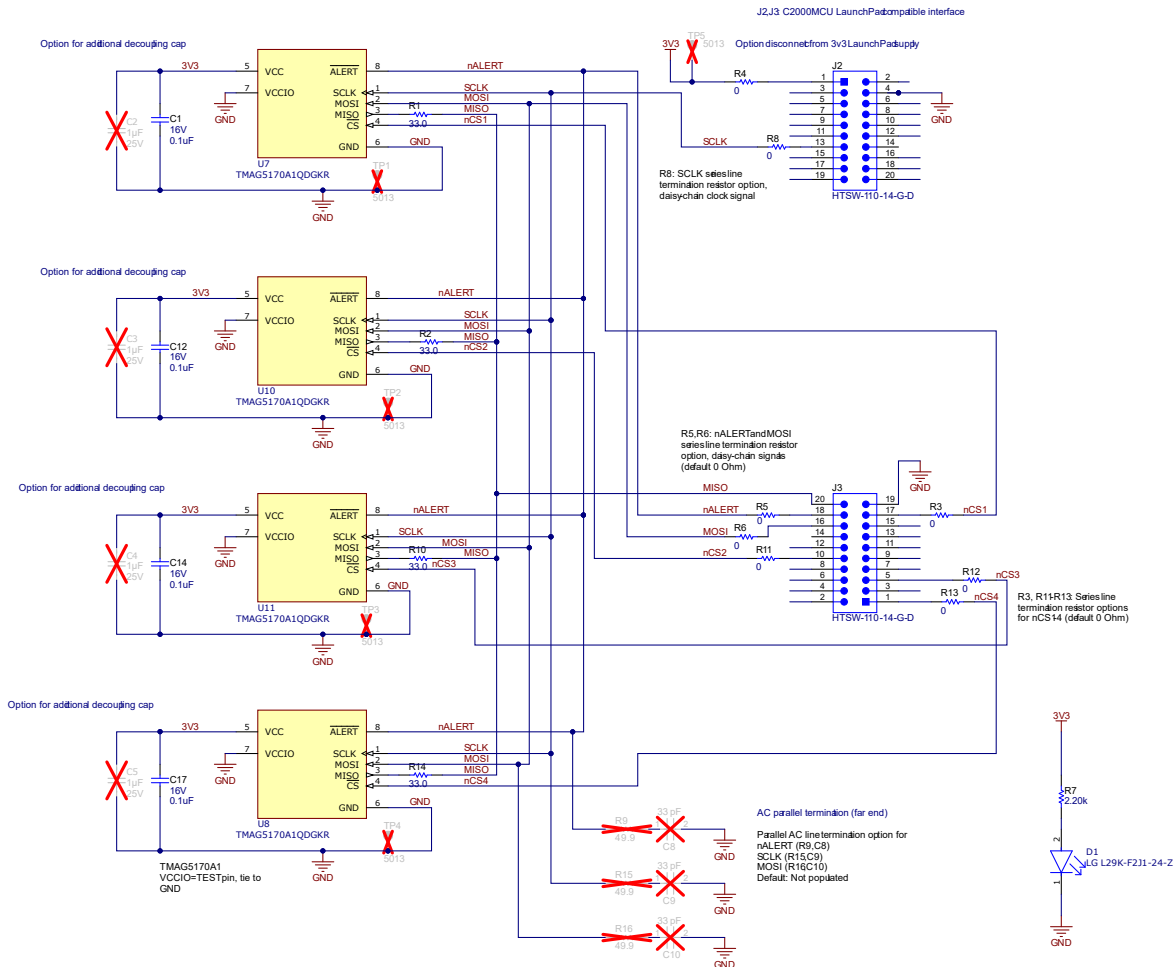


图 3-1. 四通道 TMAG5170 原理图

以下说明以 U7 TMAG5170 为例，并且如果未另作说明，则适用于其余的三个 TMAG5170。

在靠近 VCC 和 GND 引脚的位置添加了一个 100nF 去耦电容器 C1。可额外添加一个可选的 1 μF 电容器 C2 以防 3.3V 电源噪声更大，但未包含在本设计中。

TMAG5170 TEST 引脚 (在 Altium 原理图符号中名为 VCCIO) 需要连接到 GND。TMAG5170 nALERT 引脚是输入，用于同时触发全部四个 TMAG5170 模数转换器的启动。nALERT 引脚以菊花链形式从接头 J3-18 接出，从第一个 TMAG5170 (U7) 开始，通过 U10 和 U11 连接到最后一个 TMAG5170 (U8)，从而实现更好的信号完整性。在接头 J3-18 处添加了串联线路端接电阻器选项 R5，并在 U8 处添加了带有 R9 和 C8 (默认未组装) 的远端并联交流端接选项，以进行测试和验证。SPI 信号 SCLK 和 SDO (MOSI) 也使用菊花链形式进行布线，使用串联线路端接电阻器和远端并联交流端接。对于 SPI 信号 SDI (MISO)，四个 TMAG5170 的每个 SDO (MISO) 输出都有一个 33 Ω 端接电阻器，例如 U7 的 R1。这些信号以星型拓扑进行路由，并且从每个 TMAG5170 的长度匹配到一个结点，在结点处，这些信号会进行组合并路由到接头 J3-1。从相应的接头 J3 路由的每个 TMAG5170 的 SPI 芯片选择信号 nC1、nC2、nC3 和 nC4，每个信号都有一个串联线路端接电阻器选项，例如 U7 的 R3。对于 SPI 信号完整性测试，添加了 GND 测试点 TP1 到 TP4。

有关 SPI 信号布局指南，请参阅第 5 章。

在最后的 PCB 上未组装测试点 TP1 至 TP5，以免干扰 TMAG5170 磁场测量。添加了一个绿色的 LED D1 来指示存在 3.3V 电源。

接头 J2-1 处的 3.3V 输入电源 (容差为 +/10%) 连接至全部四个 TMAG5170。为了实现附加的测试和验证选项，添加了 0Ω 电阻器 R4。如有需要，可以使用铁氧体磁珠取代 R4 以改善射频噪声抑制，或者移除 R4 以从 C2000 MCU LaunchPad 断开 3.3V 电源，并通过测试点 TP5 使用与工作台电源分离的独立 3.3V 电源。在本参考设计中，使用的是 C2000 MCU LaunchPad 提供的 3.3V 电源。

3.2 软件设计

为了验证本参考设计，我们使用 TMS320F280049C LaunchPad 以及 TMAG5170 头文件、TMAG5170-CODE-EXAMPLE 和适用于 C2000 MCU 的 C2000WARE 软件开发套件开发了一款 TI 内部测试软件。

3.2.1 TMAG5170 SPI 帧

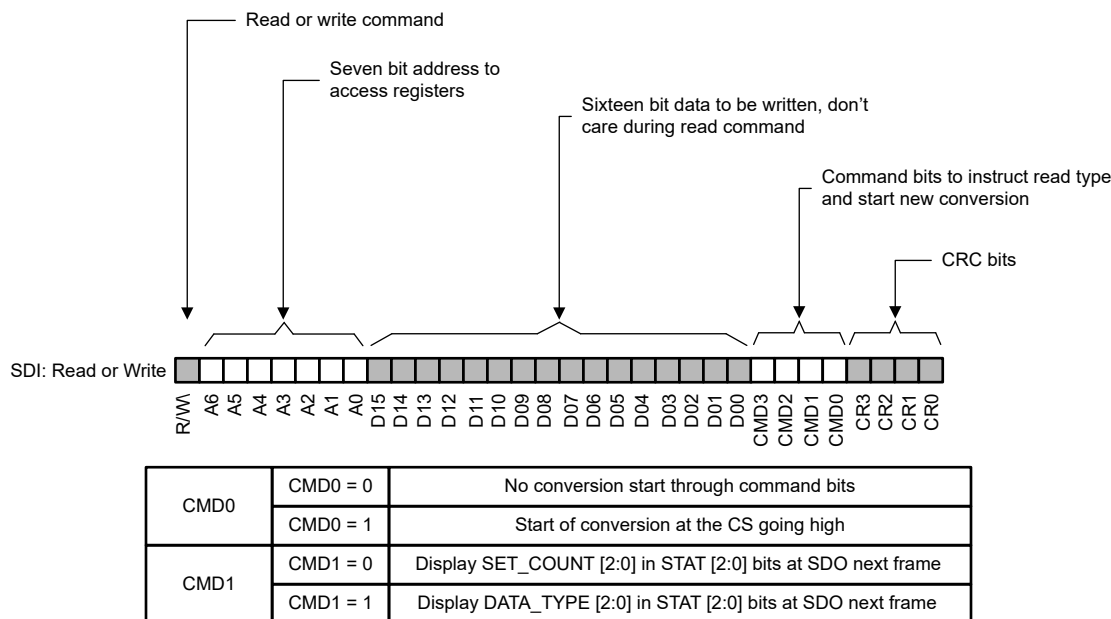
TMAG5170 支持 4 线 SPI。器件与外部微控制器之间的主要通信是通过 SPI 总线实现的，该总线提供全双工通信。外部微控制器用作 SPI 控制器，它在 SDI 引脚上发送命令请求并在 SDO 引脚上接收器件响应。TMAG5170 器件充当 SPI 外设器件，该器件接收命令请求并通过 SDO 线路向外部微控制器发送响应 (例如状态和测量值)。TMAG5170 支持固定的 32 位帧大小，以便与控制器器件通信。32 位帧可以通过 DATA_TYPE 寄存器位进行配置，以支持常规的单寄存器读取或写入数据包或同时读取双通道数据的特殊数据包。

串行时钟 SCLK 表示主机控制器时钟信号。该时钟决定数据传输的速度，所有接收和发送都与该时钟同步。SDO 引脚上的输出数据在 SCK 的下降沿转换，而 SDI 引脚上的输入数据在 SCLK 的上升沿锁存。

nCS 激活 SPI。只要 nCS 信号处于高电平，TMAG5170 就不会接受 SCLK 信号或串行数据输入 (SDI)，并且串行数据输出 (SDO) 处于高阻抗状态。在通信帧的持续时间内需要将 nCS 保持为低电平而不进行切换，以维持正确通信。每次 nCS 从低电平变为高电平时都会禁用 SPI。

3.2.1.1 32 位帧中的串行数据

主机控制器使用串行数据输入 (SDI) 线路来配置 TMAG5170 寄存器、启动新的转换或发送读取命令。当 nCS 引脚为低电平时，SDI 位会在每个 SCLK 上升沿发送。图 3-2 说明了 SDI 帧。SDI 线路中有 4 个命令位，用于选择下一帧的状态位或开始新的转换。



* CMD2 & CMD3 are reserved bits
 ** SET_COUNT register bits indicate the rolling count of the conversion data set. The counter is reset after 111b.
 *** DATA_TYPE register bits indicate the type of data being read through the SDO line

图 3-2. TMAG5170 32 位 SDI 帧

3.2.1.2 串行数据输出 32 位帧

控制器使用串行数据输出 (SDO) 线路来从 **TMAG5170** 中读取数据。当 **CS** 引脚为低电平时，**TMAG5170** 在每个 **SCK** 上升沿以串行方式移出命令响应和 **ADC** 转换数据。当 **CS** 为高电平时，此引脚呈现高阻抗状态。根据 **DATA_TYPE** 位设置，**TMAG5170** 支持两个不同的 **SDO** 帧：

- 常规 32 位 **SDO** 读取帧
- 特殊 32 位 **SDO** 读取

在本参考设计中，常规 32 位 **SDO** 读取帧用于 **TMAG5170** 配置。本设计使用特殊 32 位 **SDO** 读取帧，在单个帧中读取 **Z** 轴和 **X** 轴磁场强度以实现最低延迟。

当 **DATA_TYPE = 000b** 时，**TMAG5170** 在 32 位 **SDO** 帧期间支持常规 16 位寄存器读取，如图 3-3 中所述。在此读取模式下，会显示 12 位状态位。除 **ERROR_STAT** 位之外的所有状态位都直接从状态寄存器中读取。**ERROR_STAT** 位指示器件中是否设置了任何错误位。

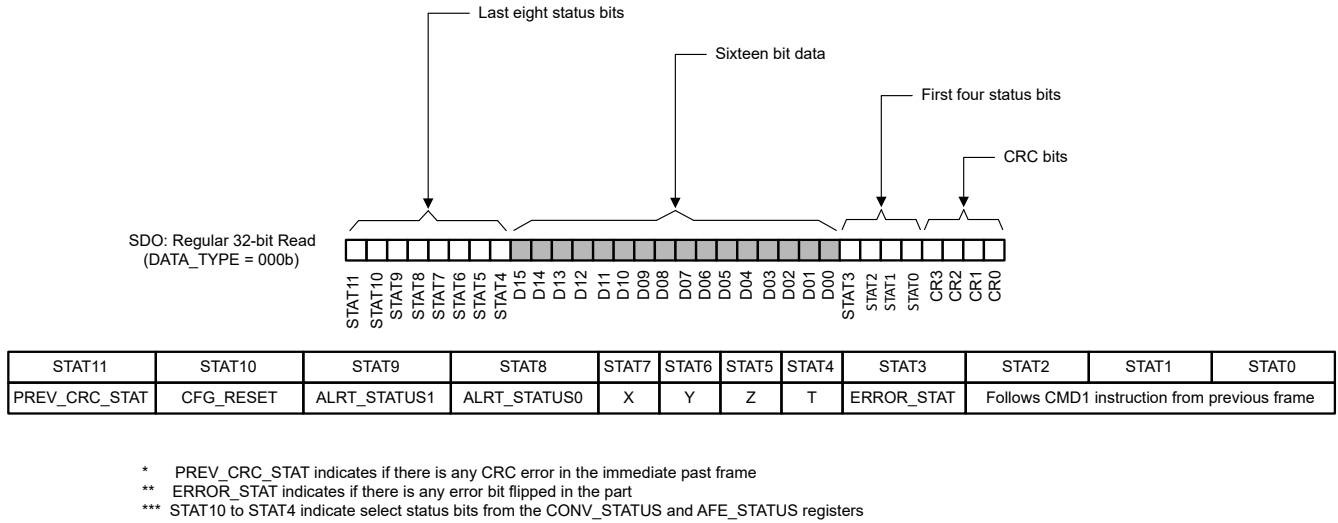
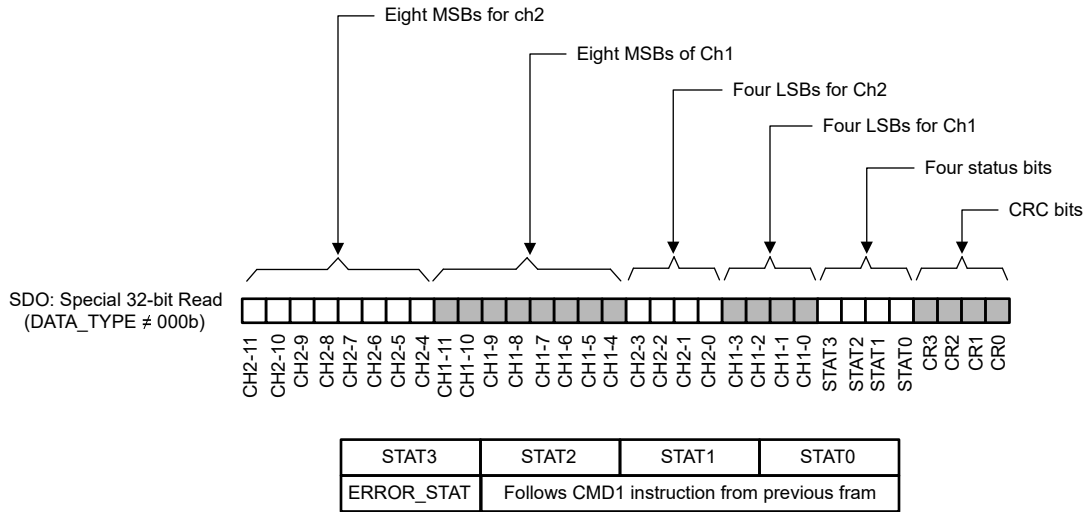


图 3-3. **TMAG5170** 常规 32 位 **SDO** 帧

当 **DATA_TYPE > 000b** 时，**TMAG5170** 支持特殊 32 位 **SDO** 帧来实现双通道同步数据读取。每个通道数据限制为 12 位。此功能对于在执行多轴测量时需要更快数据吞吐量的系统非常有用。图 3-4 说明了特殊 32 位 **SDO** 帧的详细结构。当器件设置为特殊 32 位读取时，器件将在连续读取或写入周期内继续通过 **SDO** 线路提供双通道数据集。必须复位 **DATA_TYPE** 位才能返回到常规读取周期。此模式下仅会发送四个状态位。除 **ERROR_STAT** 位之外的所有状态位都直接从状态寄存器中读取。**ERROR_STAT** 位指示器件中是否设置了任何错误位。**STAT[2:0]** 状态位可以根据前一帧中的 **CMD1** 值进行更改。



* ERROR_STAT indicates if there is any error bit set in the device

图 3-4. TMAG5170 特殊 32 位 SDO 帧

有关 TMAG5170 SPI (如 CRC) 的更多信息, 请参阅 TMAG5170 数据表。

3.2.2 TMAG5170 寄存器配置

TMS320F280049C MCU 上的 SPI 设置为主机, 具有 10MHz SPI 时钟和两次连续的 16 位 SPI 数据传输以支持 32 位帧。在 SPI 传输前后, 串行时钟配置为低电平。SPI 接收数据 (MISO) 在 SPI 上升时钟沿 (SCLK) 锁存, 发送数据 (MOSI) 在下降时钟沿发送。

启动后, 使用常规 32 位 SDO 读取帧对 TMAG5170 寄存器进行配置。表 3-1 显示了本参考设计中使用 N45 磁体的默认配置。

表 3-1. TMAG5170 寄存器配置

寄存器偏移 [十六进制]	值 [十六进制]	注释
0h	0130h	不计算平均值, 感应磁温度系数 0.12%/°C (NdBFe), 有效触发模式
1h	0345h	XZX 通道启用 (伪同步采样), Z 范围 ±50mT, X 范围 ±50mT
2h	0400h	在 nALERT 脉冲 (下降沿) 时转换开始
3h	0000h	默认值
4h	7D83h	默认值
5h	7D83h	默认值
6h	7D83h	默认值
7h	6732h	默认值
8h	0040h	只读
9h	0058h	只读
Ah	0000h	只读
Bh	7FD0h	只读
Ch	4500h	只读
Dh	0000h	只读
Eh	0300h	只读
Fh	0040h	在 SPI 通信中启用 CRC (默认)
10h	0000h	复位 OSC 计数器 (默认)
11h	0000h	默认值
12h	0000h	默认值

表 3-1. TMAG5170 寄存器配置 (续)

寄存器偏移 [十六进制]	值 [十六进制]	注释
13h	0000h	只读
14h	0000h	只读

在 TMAG5170 寄存器配置完成后，向每个 TMAG5170 写入命令以设置特殊 32 位 SDO 帧。在该模式下，Z 和 X 轴以及 CRC 的场强将通过单个 32 位帧传输以减少总延迟。

表 3-2. 特殊 32 位 SDO 帧的 TMAG5170 寄存器设置

寄存器偏移 [十六进制]	值 [十六进制]	注释
2h	0480h	在 nALERT 脉冲 (下降沿) 时转换开始。启用特殊 32 位 SDO 帧 (设置位 8)

对于使用 CORDIC 进行绝对角度测量，需要来自 Z 轴和 X 轴的传感器数据来计算精确角度。在不同时间通过同一信号链借助单个 A/D 转换器收集的磁场数据会在角度计算中引入误差。TMAG5170 提供伪同步采样数据收集模式来消除此误差。图 3-5 显示了 XZX 通道模式 (伪同步采样模式) 收集 XZX 数据并通过双 X 样本计算平均 X 数据的示例。因此，假设 X 轴信号频率明显低于 ADC 采样率，平均 X 和 Z 传感器数据的时间戳相同。

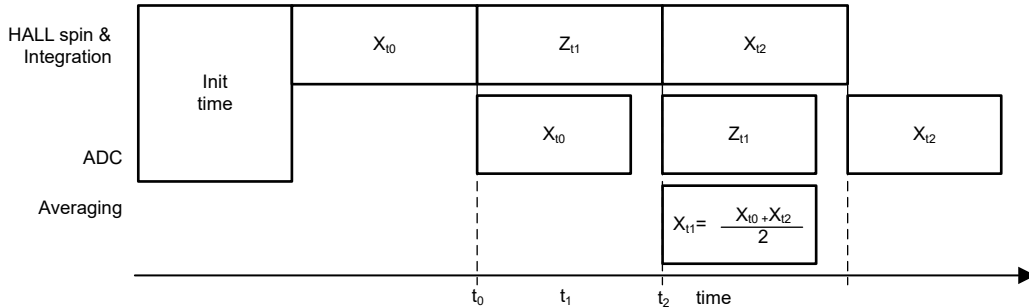


图 3-5. TMAG5170 伪同步采样模式

3.2.3 SPI 和转换启动时序

图 3-6 显示了用于触发 Z 轴和 X 轴同步转换并以 4kHz 采样率读取全部四个 3D 霍尔效应传感器数据的 SPI 和 nALERT 信号时序。

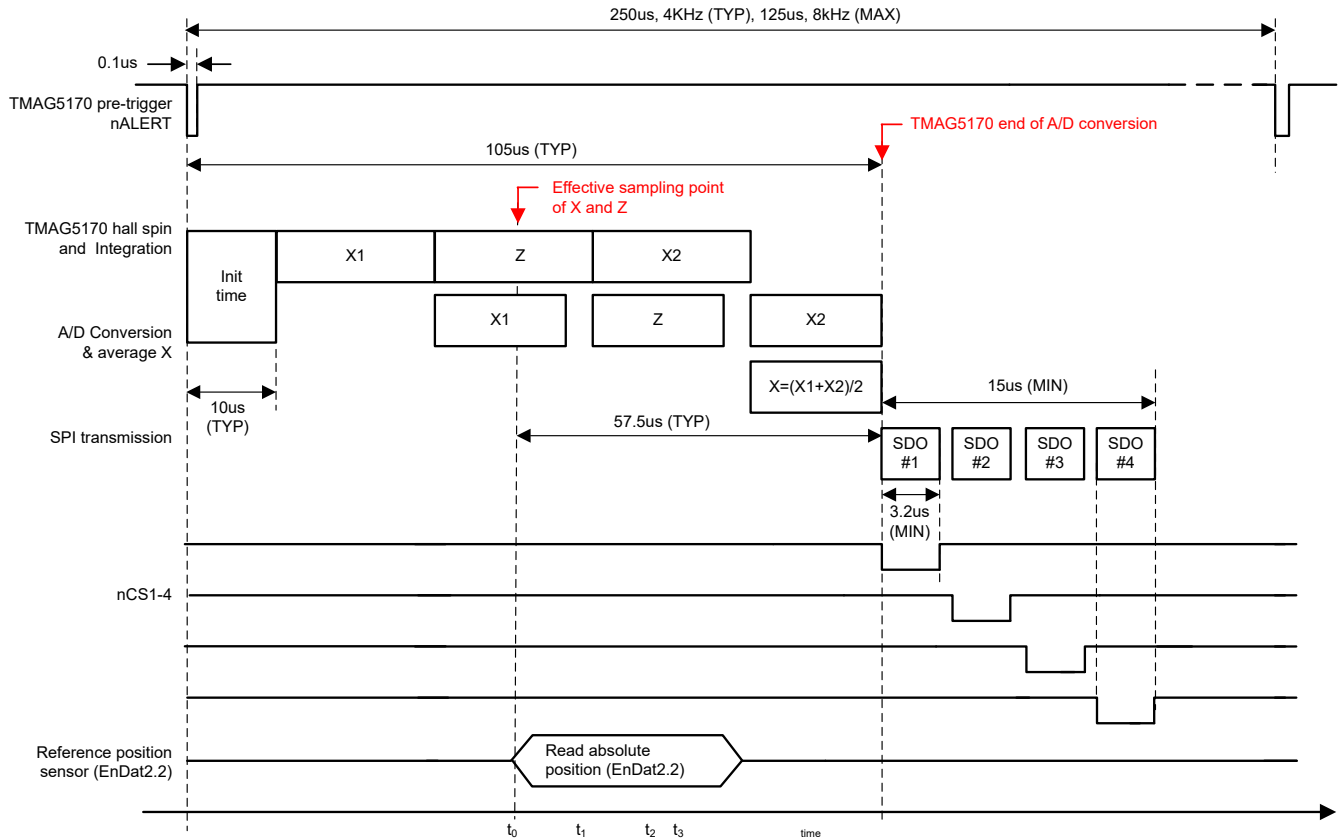


图 3-6. TMAG5170 同步采样和 SPI 时序

C2000 MCU 等主机 MCU 在 4kHz 采样率下生成宽度为 100ns 的低电平有效 nALERT 触发脉冲。四个 TMAG5170 中的每一个都启动霍尔效应传感器旋转和集成。TMAG5170 对序列 XZX 进行采样和转换，然后计算平均 X 值。A/D 转换完成后，C2000 MCU 使用单独的低电平有效芯片选择信号依次读取四个 TMAG5170。在有效低电平 ALERT 触发脉冲之后，平均 X 和 Z 轴数据的有效采样在大约 47.5μs 之后发生。从有效采样点到 SPI 传输开始的延迟约为 57.5μs，4 个通道的顺序 SPI 传输在 15μs 之后完成。因此，包括 SPI 传输在内的总信号延迟约为 72.5μs。

使用分辨率为 10 μm 的 Heidenhain LC415 EnDat2.2 线性位置编码器作为参考。C2000 MCU 在读取 LC415 EnDat2.2 编码器的位置的同时采样四个 TMAG5170 的 Z 和 X 轴。

3.2.4 线性位置计算

在每个中断服务例程中，四个等距间隔 TMAG5170 的线性位置是按照图 3-7 中的流程图以 4kHz 速率采样率计算的。

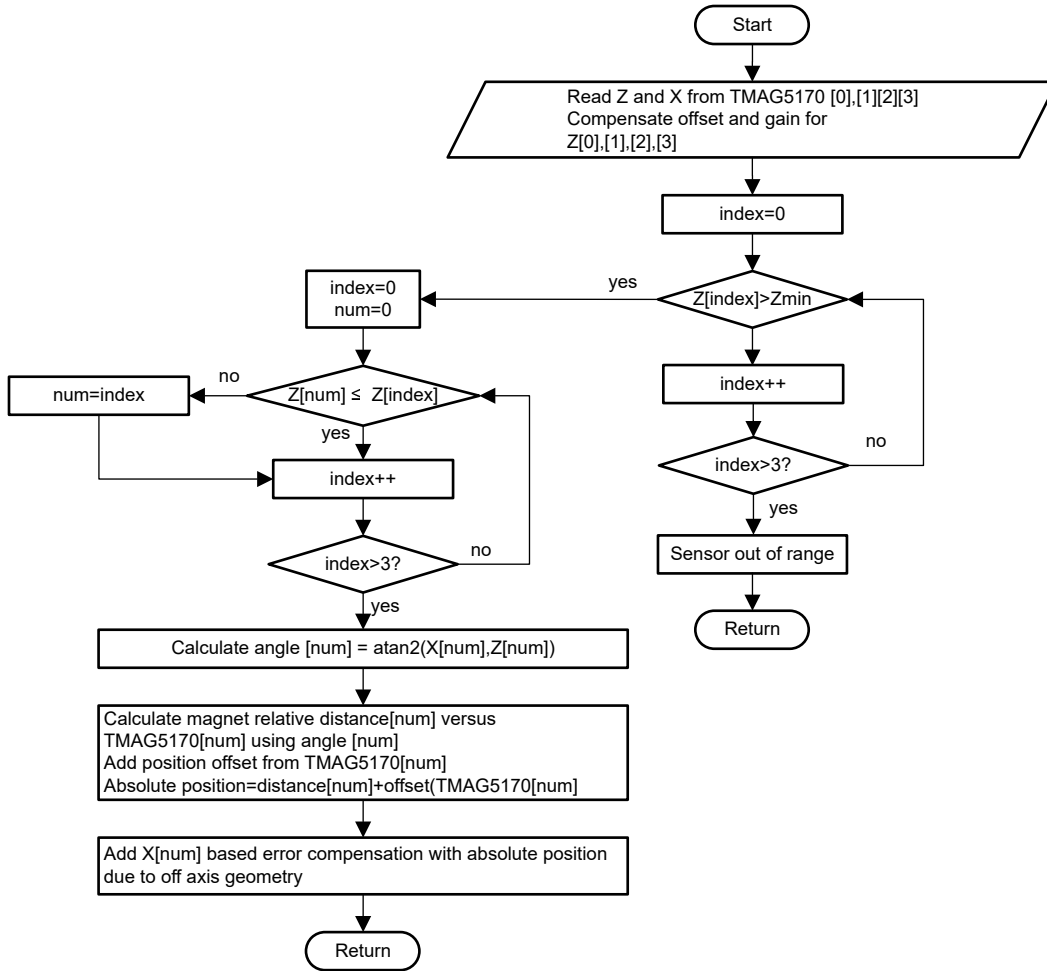


图 3-7. 简化的位置计算流程图

读取四个 **TMAG5170** 的 Z 轴和 X 轴数据。如果这些 Z 轴幅度都不超过最小场强，则表示移动磁体超出范围。否则，会识别 Z 轴上幅度最大的 **TMAG5170**。可以使用一个迟滞来避免在两个相邻的 **TMAG5170** 之间的切换。当感应磁体位置位于两个相邻 **TMAG5170** 之间的中心时，就会发生这种情况，因此两个 **TMAG5170** 测量到相似的 Z 轴磁场强度。

仅针对 Z 轴磁场强度最高的 **TMAG5170** 继续进行角度计算。

在第一步中，在系统校准期间校正 Z 轴的失调电压和增益。然后，根据 [方程式 1](#)，使用校准后的 Z 轴和 X 轴的 `atan2` 函数计算相对于 **TMAG5170** 的霍尔效应元件 X 位置的角度。

$$Angle_{deg}[num] = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot atan(Z[num], X[num]) \quad (1)$$

在第二步中，根据 [方程式 2](#) 计算线性位置。根据 **TMAG5170** 数量，还会添加相应的线性位置偏移。

$$LinPos_{cm}[num] = \frac{Angle_{deg}[num]}{90^\circ} \cdot 1.25cm + num \cdot 2.5cm + RefOffset_{cm} \quad (2)$$

在第三步中，由于离轴测量而产生的误差将使用 X 轴的绝对幅度进行补偿，并使用在系统校准期间根据 [方程式 3](#) 确定的补偿因数。

$$LinPos_{cm}[num] = LinPos_{cm}[num] + abs(X[num] \cdot CompFactor) \cdot \frac{cm}{mT} \quad (3)$$

下面显示了用于在参考设计中计算线性位置的源代码。

```

//-----
// Angle calculation
//-----
// z_max_num
// 0: Out of range (Z-field too small)
// 3: TMAG5170[0] has highest Z-field
// 5: TMAG5170[1] has highest Z-field
// 7: TMAG5170[2] has highest Z-field
// 9: TMAG5170[3] has highest Z-field
//-----
void calcLinPos(int16_t zmax_num_index)
{
    float      tnom;
    float      tdenom;

    PositionRead.LinPosRef_cm = LC415LinPos_cm;           // Absolute linear position reference
    if (zmax_num_index==0)                               // Magnet is out of range
    {
        PositionRead.LinPos_cm = 0;                     // Measured absolute linear position
        PositionRead.LinPosError_cm = 0;                // Measured position error
    }
    else
    {
        // Gain and offset compensated Z-axis
        tnom = TMAGS_ARRAY[(zmax_num_index-3)/2].Z_mT-
PositionCalc.OffsetZ_mT[(zmax_num_index-3)/2];
        tnom =
tnom*PositionCalc.GainComp[(zmax_num_index-3)/2];

        tdenom = TMAGS_ARRAY[(zmax_num_index-3)/2].X_mT; // X-axis
        PositionRead.Angle_deg = (180/3.1415)*atan2f(tdenom,tnom);
        PositionRead.LinPos_cm = PositionRead.Angle_deg/90*PositionCalc.DistanceTMAG5170_cm/2;
        PositionRead.LinPos_cm += PositionCalc.DistanceTMAG5170_cm * ((zmax_num_index-3)/2);
        PositionRead.LinPos_cm += -PositionCalc.RefOffset_cm;

        // Nonlinear position error compensation using X-field
        PositionRead.LinPos_cm += PositionCalc.PosXfieldComp * abs(TMAGS_ARRAY[(zmax_num_index-3)/
2].X_mT);
        // calculate position error versus reference
        PositionRead.LinPosError_cm = PositionRead.LinPos_cm - PositionRead.LinPosRef_cm;
    }
}

```

有关角度和线性位置计算算法的更多信息，请参阅应用报告 [实现更高系统角度检测精度](#) 和 [线性位置应用的磁体选择 \(修订版 A\)](#)。

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件

4.1.1 PCB 概述

PCB 顶视图和底视图如下所示。

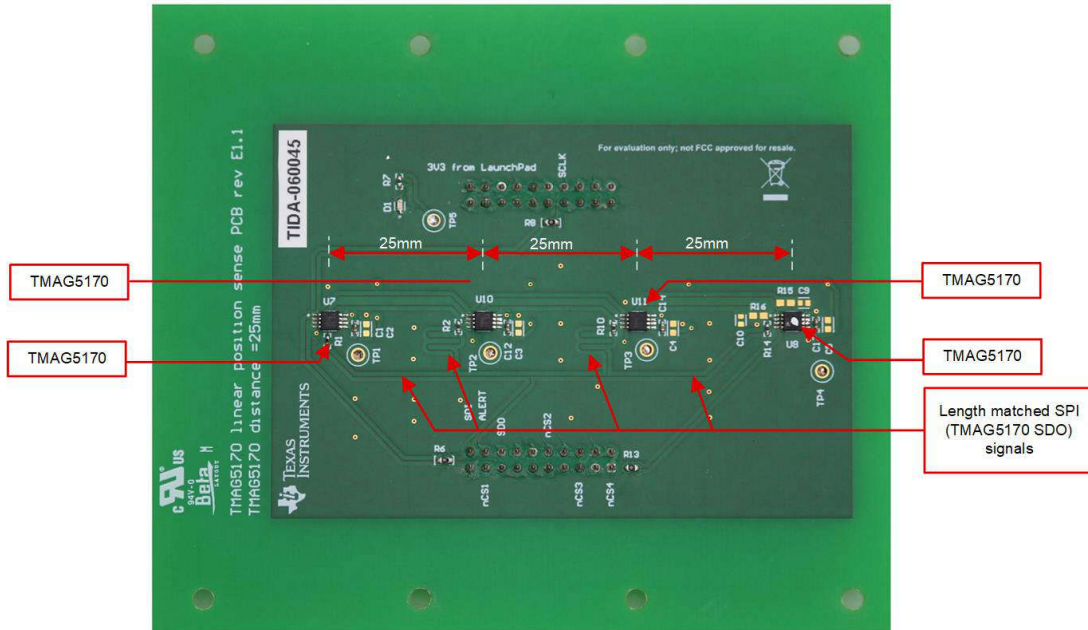


图 4-1. PCB 顶视图

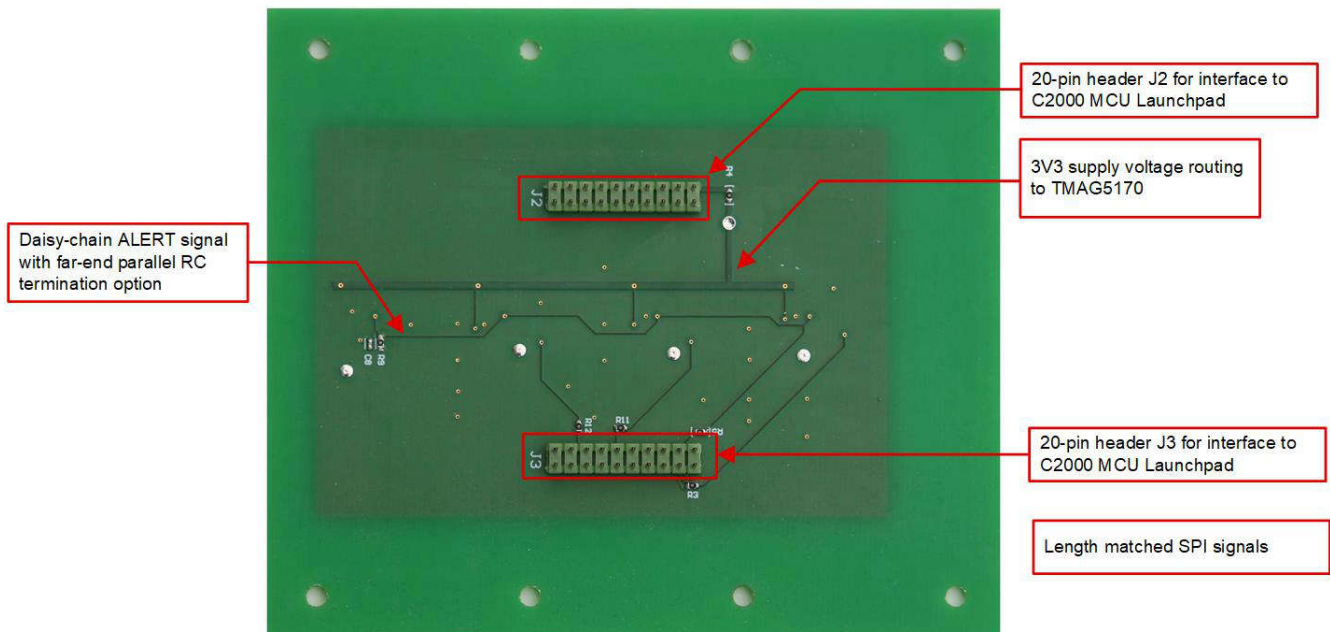


图 4-2. PCB 底视图

4.1.2 MCU 接口连接器

TIDA-060045 接口规范符合 TI BoosterPack 插件模块标准。表 4-1 和表 4-2 显示了引脚分配。

表 4-1. 接头 J2 引脚分配

引脚	信号	I/O	引脚	信号	I/O
J2-1	3.3V 电源	输入	J2-2	NC	
J2-3	NC		J2-4	GND	GND
J2-5	NC		J2-6	NC	
J2-7	NC		J2-8	NC	
J2-9	NC		J2-10	NC	
J2-11	NC		J2-12	NC	
J2-13	SCLK	输入	J2-14	NC	
J2-15	NC		J2-16	NC	
J2-17	NC		J2-18	NC	
J2-19	NC		J2-20	NC	

表 4-2. 接头 J3 引脚分配

引脚	信号	I/O	引脚	信号	I/O
J3-1	nCS4	输入	J3-2	NC	
J3-3	NC		J3-4	NC	
J3-5	nCS3	输入	J3-6	NC	
J3-7	NC		J3-8	NC	
J3-9	NC		J3-10	nCS2	输入
J3-11	NC		J3-12	NC	
J3-13	NC		J3-14	NC	
J3-15	NC		J3-16	SDO (MOSI)	输入
J3-17	nCS1	输入	J3-18	nALERT	输入
J3-19	GND	GND	J3-20	SDI (MISO)	输出

4.2 测试设置

使用了以下硬件设备来评估本参考设计。

表 4-3. 先决条件

设备	注释
TIDA-060045	此参考设计
LAUNCHXL-F280049C	F280049C C2000™ Piccolo™ MCU LaunchPad™ 开发套件
N45-1350	圆柱圆盘磁体，1350mT，25mm 直径，3mm 高
LAUNCHXL-F28379D	F28379D C2000™ Delfino™ MCU LaunchPad™ 开发套件
TIDA-010026	适用于 EnDat2.2 绝对编码器的稳定接口参考设计
Heidenhain LC 415	EnDat2.2 绝对线性位置编码器，精确的 ±5μm 级，0.010μm 分辨率

测试设置如图 4-3 和图 4-4 所示。

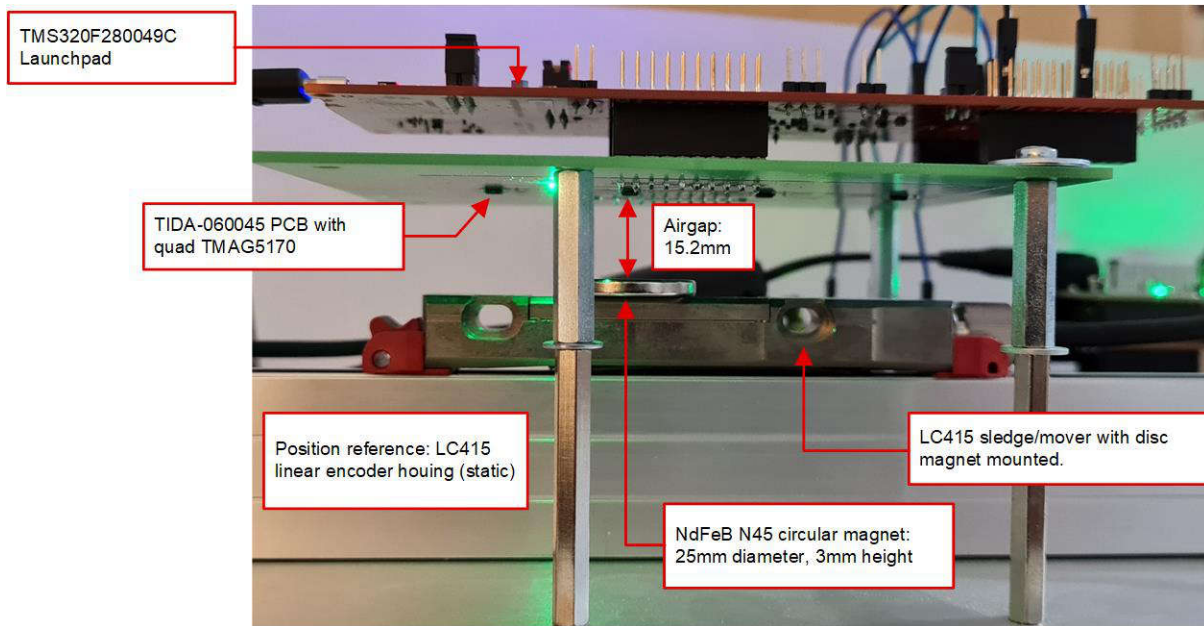


图 4-3. 测试设置侧视图

上面的图 4-3 显示了测试设置的侧视图。使用 EnDat2.2 和 320mm 长度的 Heidenhain 绝对线性编码器作为位置参考并将其安装在固定板上。圆形感应磁体安装在 LC415 线性编码器的移动底座的顶部。底座连接到 EnDat2.2 接口电缆，拉动电缆可移动磁体的位置。TIDA-060045 PCB 安装在 LC415 线性编码器顶部的固定板上，四个 TMAG5170 3D 霍尔效应传感器朝下。TMAG5170 内部每个 3D 霍尔效应传感器的中心 (y 轴) 调整为移动磁体的中心。磁体顶部与 TMAG5170 内部的霍尔效应传感器之间的气隙 (z 轴) 为 15.2mm。TMS320F280049C LaunchPad 通过接头 J1、J3 和 J2、J4 连接到 TIDA-060045 PCB。在此测试设置中，TMS320F280049C LaunchPad 也为 TIDA-060045 提供 3.3V 电源。

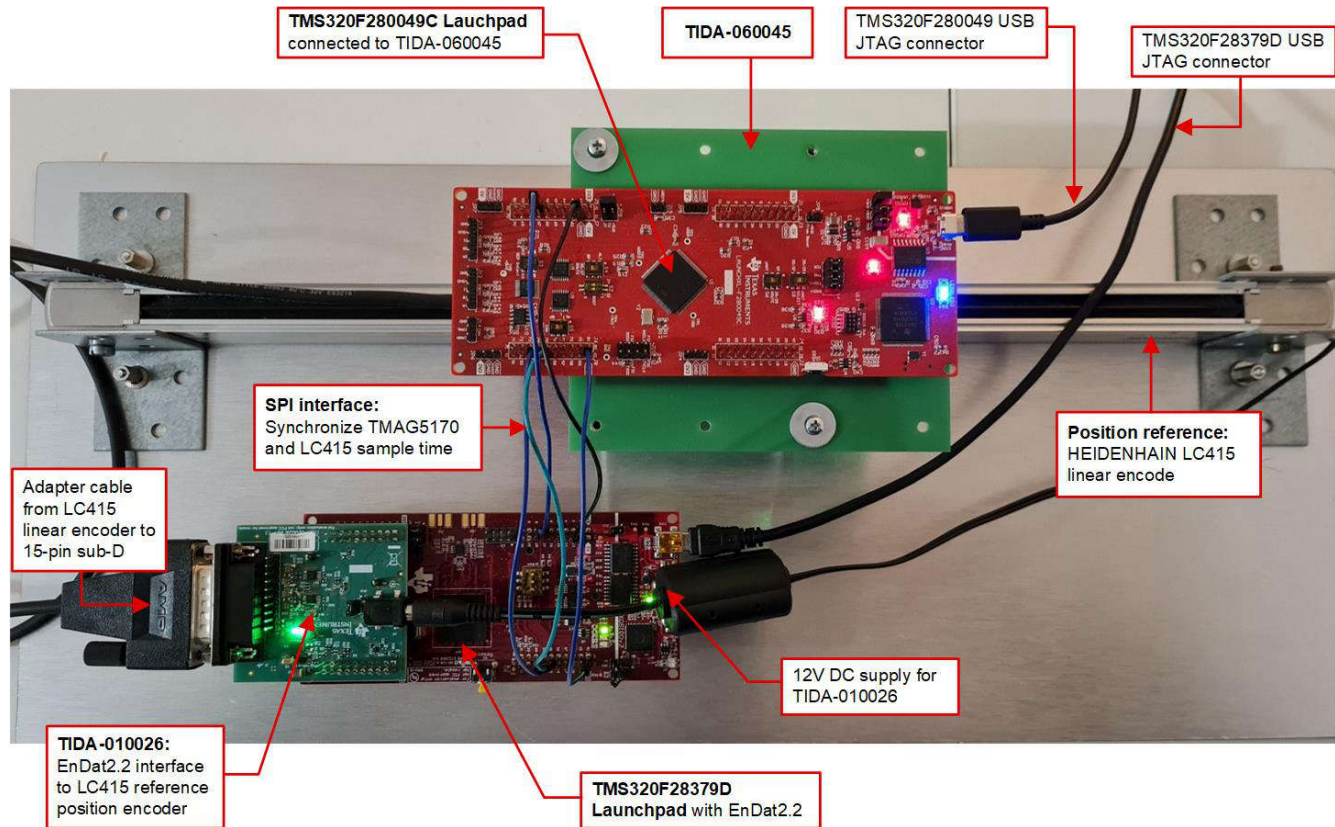


图 4-4. 测试设置顶视图

图 4-4 显示了测试设置的顶视图，TIDA-060045 和 TMS320F280049C LaunchPad 安装在 LC415 线性位置参考编码器的顶部，如前面所述。LC415 线性编码器连接到 TIDA-010026 EnDat2.2 参考设计。TIDA-010026 由 12V 电压供电，并连接到运行 EnDat2.2 软件的 TMS320F28379D LaunchPad。两块 LaunchPad 均通过 SPI 进行连接，用于同步四个 TMAG5170 和 LC415 线性编码器的采样时间，并以高达 4kHz 的采样率将相应的 LC415 参考位置发送到 TMS320F280049C LaunchPad。

为了验证本参考设计，我们使用 TMS320F280049C LaunchPad 以及 TMAG5170 头文件 TMAG5170-CODE-EXAMPLE 和适用于 C2000 MCU 的 C2000WARE 软件开发套件开发了一款 TI 内部测试软件。有关 C2000WARE 的问题，请参阅 C2000 微控制器论坛的 E2E™ 设计支持。有关 TMAG5170-CODE-EXAMPLE 的问题，请参阅传感器论坛。

在 TMS320F280049C 上运行的 TI 内部测试软件有两种操作模式。实时模式以 4kHz 采样率持续测量安装在 LC415 底座上的磁体的绝对线性位置 (x 轴) 并计算相应的位置误差。触发模式在磁体达到从 LC415 参考编码器读取的预定义绝对起始位置后，开始对 200 个系列位置进行采样。有关更多详细信息，请参阅测试结果小节。该绝对起始位置是绝对值 12cm，四通道 TMAG5170 的 10cm 测量范围从绝对参考位置 13.2cm 到 23.2cm 开始。这用于动态精度测量，其中 LC415 往返与传感器磁体相应地移动，所有数据都存储在存储器中。数据通过 Code Composer Studio 读出，并使用 Excel 和 MATLAB® 等工具进行验证。

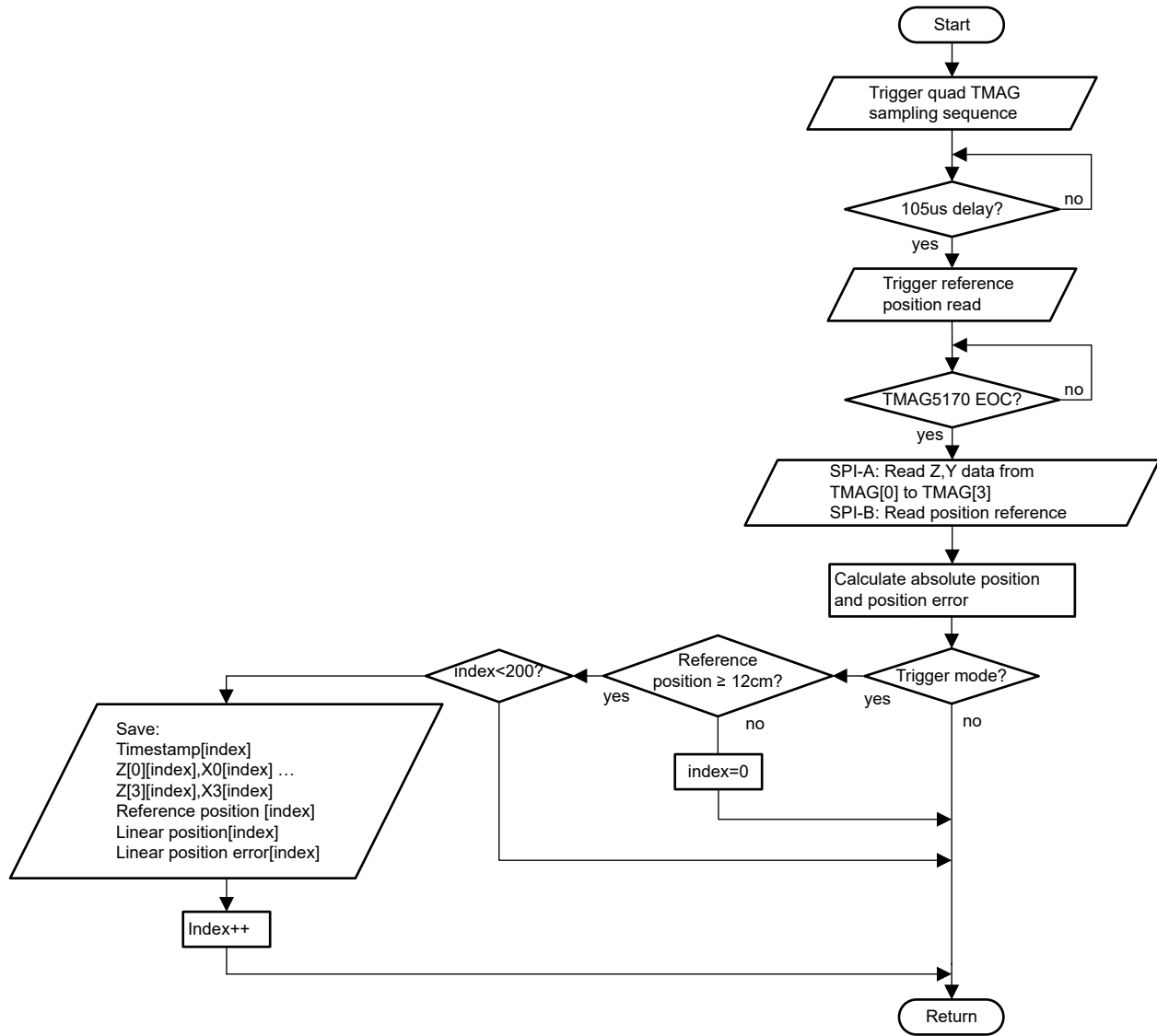


图 4-5. 流程图线性位置测试软件

4.3 测试结果

4.3.1 磁体 Z 和 X 场测量

在启用触发模式以转储 200 个连续样本的情况下，以 4kHz 采样率测量 x 和 z 方向的 2D 磁场强度。图 4-6 显示了在使用参考位置编码器测量的绝对线性位置上测得的 x 轴和 z 轴数据。

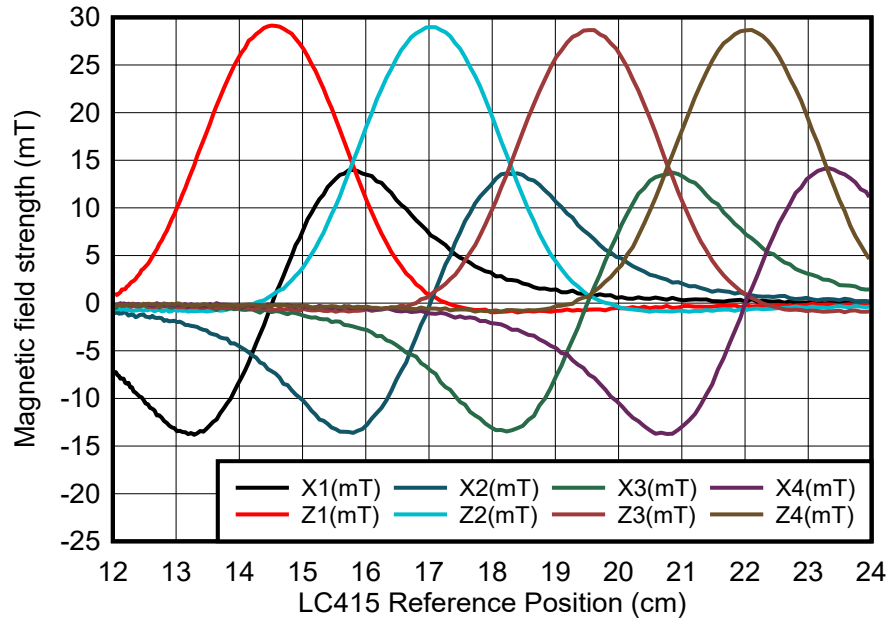


图 4-6. 四个 TMAG5170 的 Z 和 X 磁场与参考位置之间的关系

在分析捕获的数据时，我们看到每个 TMAG5170 传感器观察到的 X 和 Z 分量数据重叠。Z 轴具有单极范围，可以在 ± 90 度的余弦信号范围内近似表示为振幅相等的偏移。X 轴具有双极振幅，可近似为 ± 90 度内的正弦信号。因此，每个 TMAG5170 的满量程磁场范围 Z 轴设为 $\pm 50\text{mT}$ ，X 轴设为 $\pm 25\text{mT}$ 。

从第一个到最后一个 TMAG5170 的下降 Z 场振幅是因为 TIDA-060045 PCB 未精确地平行安装在安装板上，气隙从第一个到最后一个 TMAG7170 略微增加。没有执行此项机械校准。

图 4-7 和图 4-8 显示了使用第一个 TMAG5170 以 4kHz 采样率测量的 1000 个连续 X 场和 Z 场样本的时域图。对于此测试，感应磁体的绝对位置为 14.19cm。

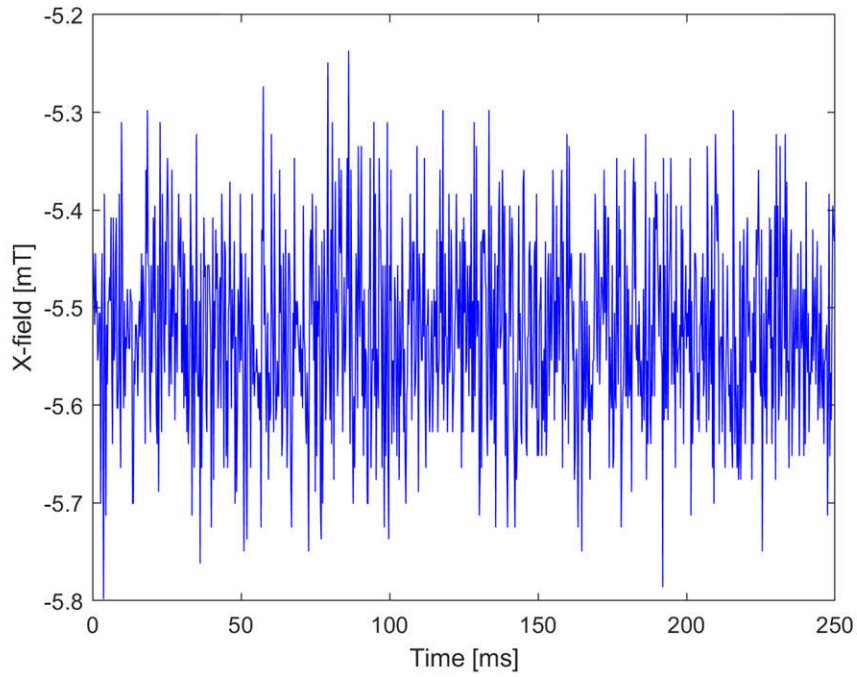


图 4-7. 第一个 TMAG5170 在磁体位置 14.19cm 处的 X 场

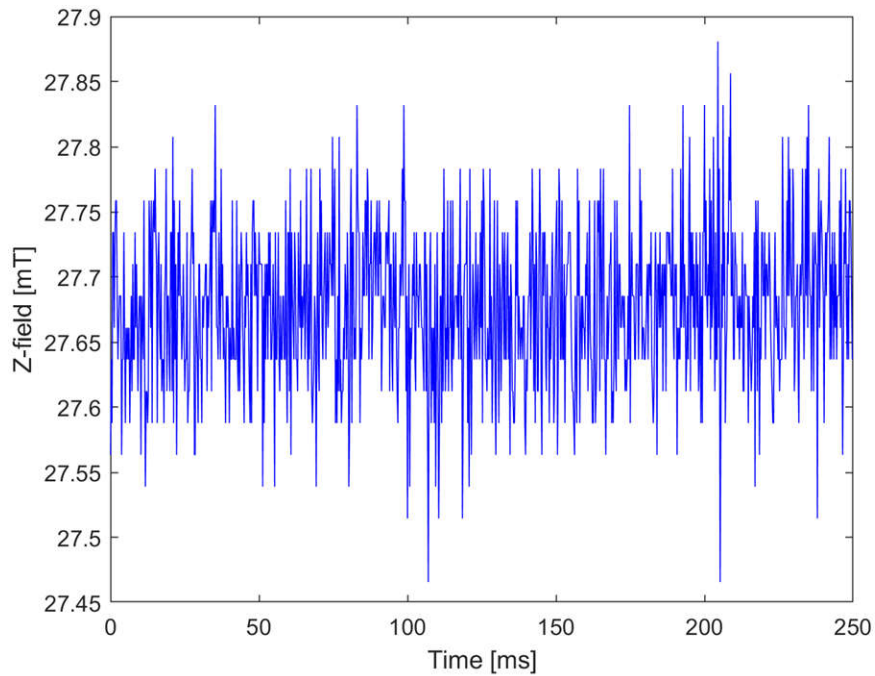


图 4-8. 第一个 TMAG5170 在磁体位置 14.19cm 处的 Z 场

图 4-9 和图 4-10 显示了 X 场和 Z 场数据的相应直方图。

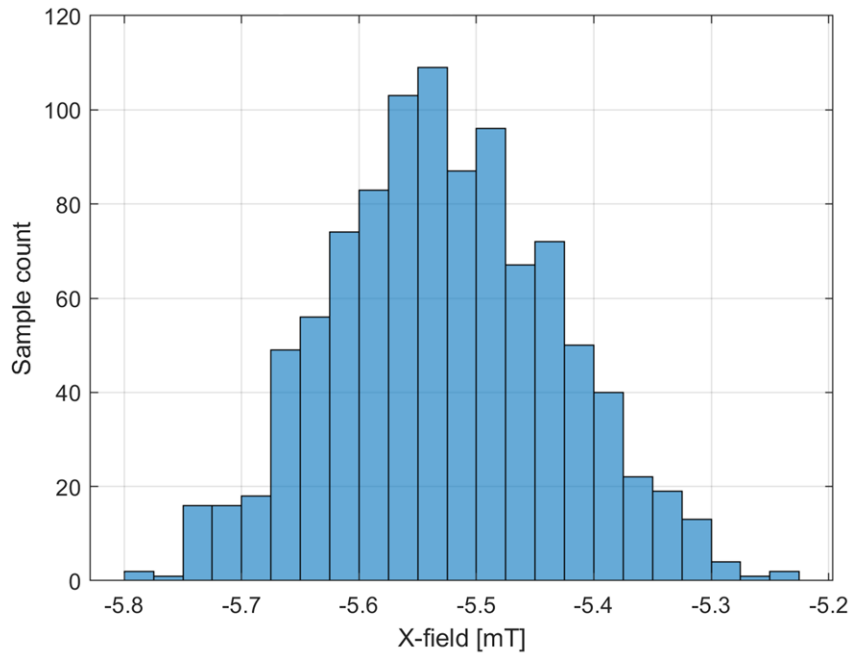


图 4-9. 第一个 TMAG5170 在磁体位置 14.19cm 处的 X 场直方图

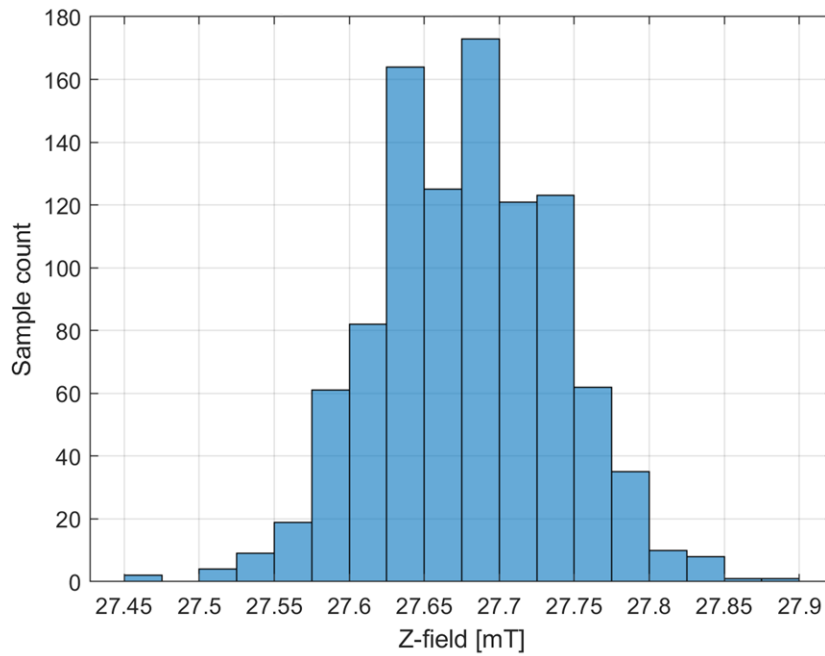


图 4-10. 第一个 TMAG5170 在磁体位置 14.19cm 处的 Z 场直方图

表 4-4 显示了标准差、信噪比 (SNR) 和有效位数 (ENOB) 与满标量程之间的关系。由于 TMAG5170 X 轴的增益设置较高，因此 X 轴上的噪声占主导地位。

表 4-4. 标准差、SNR 和 ENOB 与 TMAG5170 满量程之间的关系

TMAG5170	Z 轴	X 轴	注释
标准差 [mTrms]	0.059	0.094	rms
满量程 ± [mT]	50	25	峰值
SNR [dB]	55.55	45.48	dB
ENOB [位]	8.94	7.26	位

4.3.2 线性位置测量

如节 3.2.4 中所述，移动磁体位置是使用 Z 场和 X 场分量以最高 Z 场幅度通过传感器计算得出的。为了调整离轴测量，测量的 Z 场针对增益和偏移进行了校准。此外，补偿因数乘以 X 磁场的绝对幅度可用于通过位置计算补偿非线性。此外，还校正了 PCB 上每个 TMAG5170 之间的位移。为简单起见，使用相同的值作为每个 TMAG5170 之间的距离。

表 4-5. 校准因数

TMAG5170	1	2	3	4
Z 偏移	14.6mT	14.3mT	14mT	13.8mT
Z 增益	0.94	0.93	0.94	0.94
位移	24.97mm	24.97mm	24.97mm	24.97mm
X 轴补偿因数	0.001538	0.001538	0.001538	0.001538

该位置是在 22°C 室温下以大约 0.4m/s 的线性速度测得的。在数据采集任一端观察到的峰值是磁体离开四通道传感器 PCB 感应范围的结果。

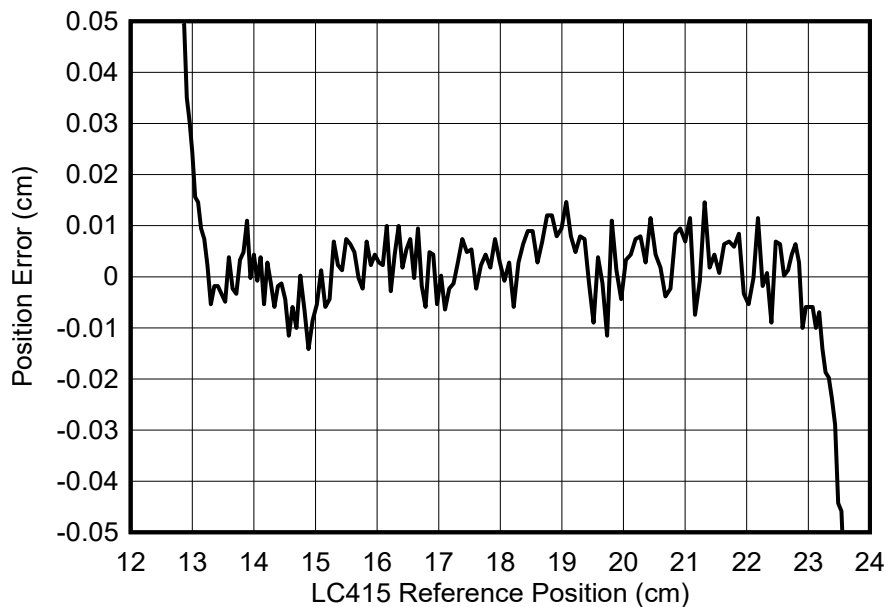


图 4-11. 室温下四通道 TMAG5170 的线性位置误差

为了测量 Z 场和 X 场本底噪声的影响，我们在 4kHz 下测量了超过 1000 个样本在 14.19cm 处的静态位置误差，如图 4-11 所示。图 4-12 展示了相应的直方图。测量在 22°C 室温条件下进行。

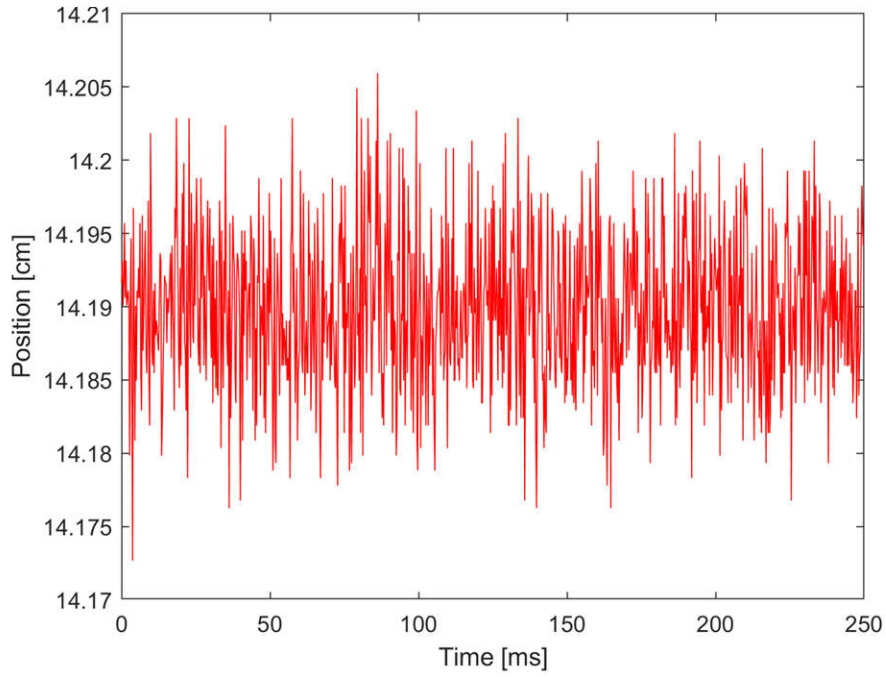


图 4-12. 4kHz 采样率下 1000 个样本的静态位置

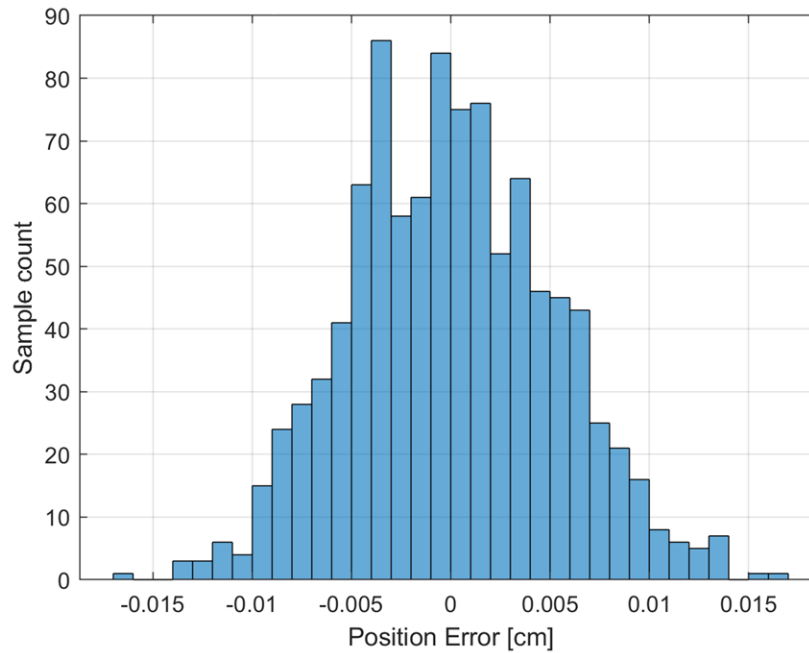


图 4-13. 在磁体位置 14.19cm 处的位置误差直方图

表 4-6 显示了相应的标准差和 ENOB 与满标度位置测量范围的关系。

表 4-6. 四通道 TMAG5170 在静态位置 14.19cm 处的标准差、SNR 和 ENOB

四通道 TMAG5170	位置误差	注释
标准差 [cm]	0.0053	
满标量程 [cm]	10	四通道 3D 传感器
ENOB [位]	10.6	

每个单独的 TMAG5170 都在 2.5cm 测量范围内提供 8.6 位的 ENOB。由于四通道 TMAG5170 阵列的范围为 10cm，因此整体 ENOB 比上表中所示的位数增加了 2 位，达到 10.6 位。

该测试完成后，以大约 0.4m/s 的线性速度重复了 5 次位置测量，概括了 Z 场和 X 场噪声对绝对精度的影响。图 4-14 展示了测试结果。

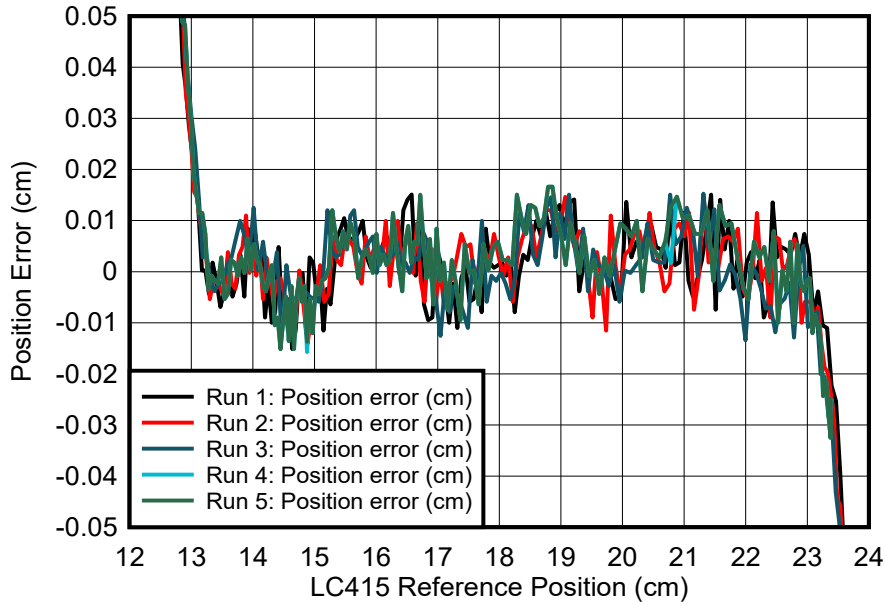


图 4-14. 5 次测试运行的线性位置误差

更先进的补偿算法可以进一步优化。具有较高磁场强度的磁体允许将 Z 轴的磁场强度增加到 100mT，将 X 轴的磁场强度增加到 50mT，这有助于将信噪比分别提高 2 倍。请参阅 [线性位置应用的磁体选择 \(修订版 A\)](#)。

可以在下面这个视频中查看 TIDA-060045 的视频演示：[使用 3D 霍尔效应传感器进行设计：线性位置编码](#)。为了帮助对磁系统进行仿真，TI [磁感应模拟器 \(TIMSS\)](#) 工具可以加快磁性系统的设计和评估。

4.3.3 SPI 信号测量

图 4-14 显示了 32 位 SPI 时序帧，其中 nCS1 在菊花链中的第一个 TMAG5170 (U7) 处测量。红色信号是 SDI 写入帧 (读取命令) 和相应的特殊 32 位 SDO 读取帧，包含两个 12 位 X 和 Z 字段数据、状态位和 CRC。传输用时 3.4 μ s。

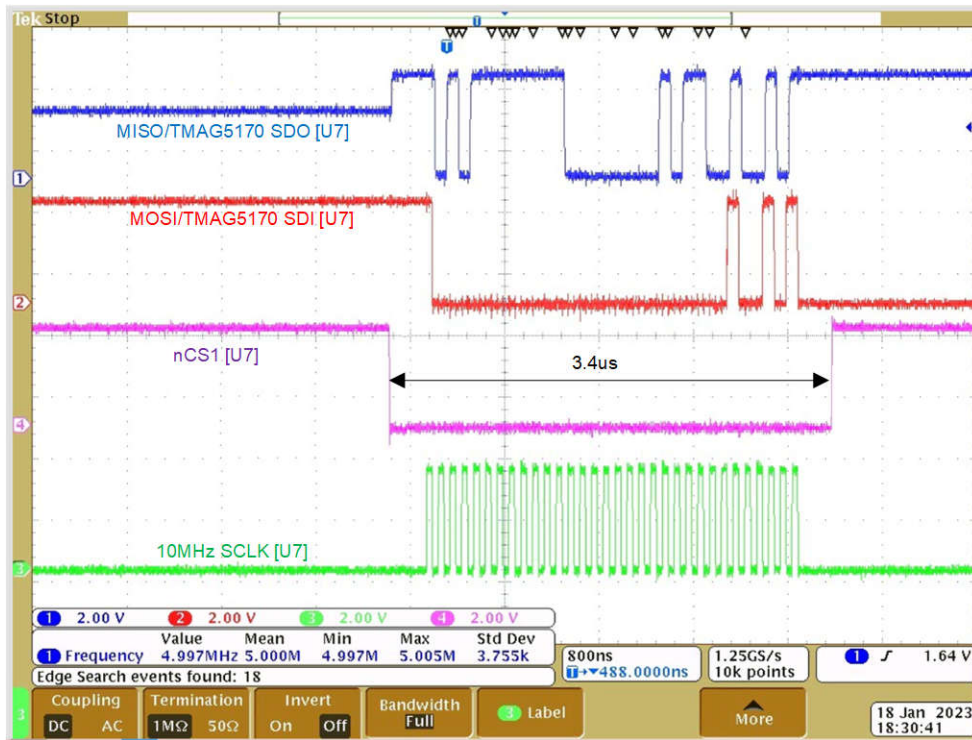


图 4-15. SPI 32 位帧时序

图 4-15 显示了 TMAG5170 (U7) SDO 输出的时序与 SPI 时钟 SCLK 输入的时序之间的关系。SDO 信号与下降时钟沿的延迟时间为 20ns。SDO 上升时间为 7ns，下降时间为 3ns。

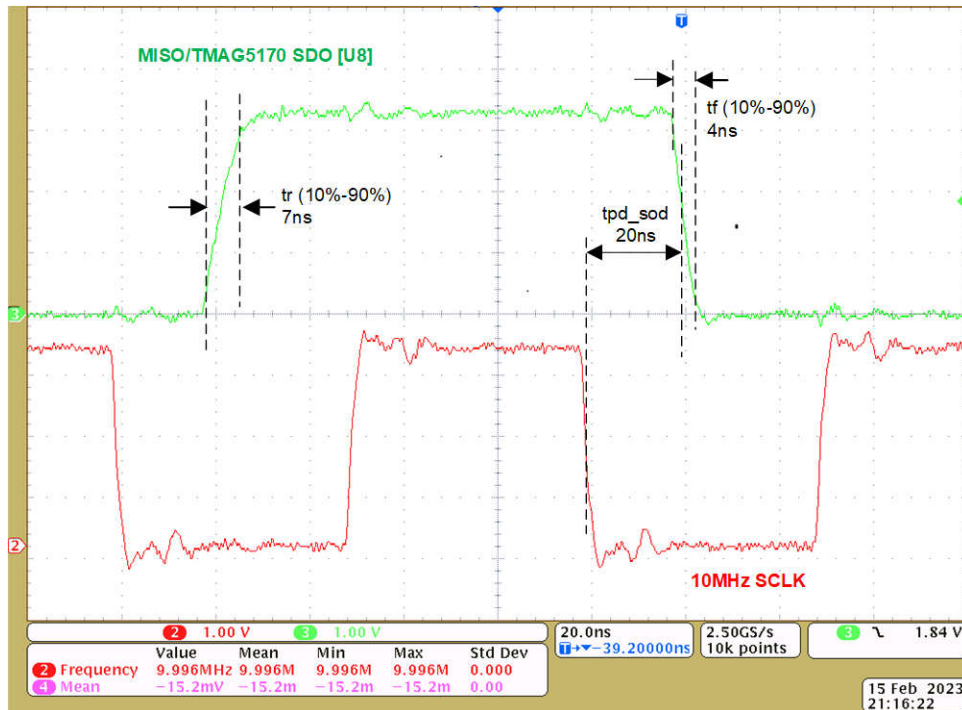


图 4-16. TMAG5170 U8 SDO (MISO) 和 SCLK

图 4-16 显示了 TIDA-060045 MCU 接头 J3-20 和 J2-13 处 SDO 输出的时序与 SPI 时钟 SCLK 输入之间的关系。相对于上升时钟沿，建立时间 t_{su} 为 22ns，保持时间 t_h 为 66ns。

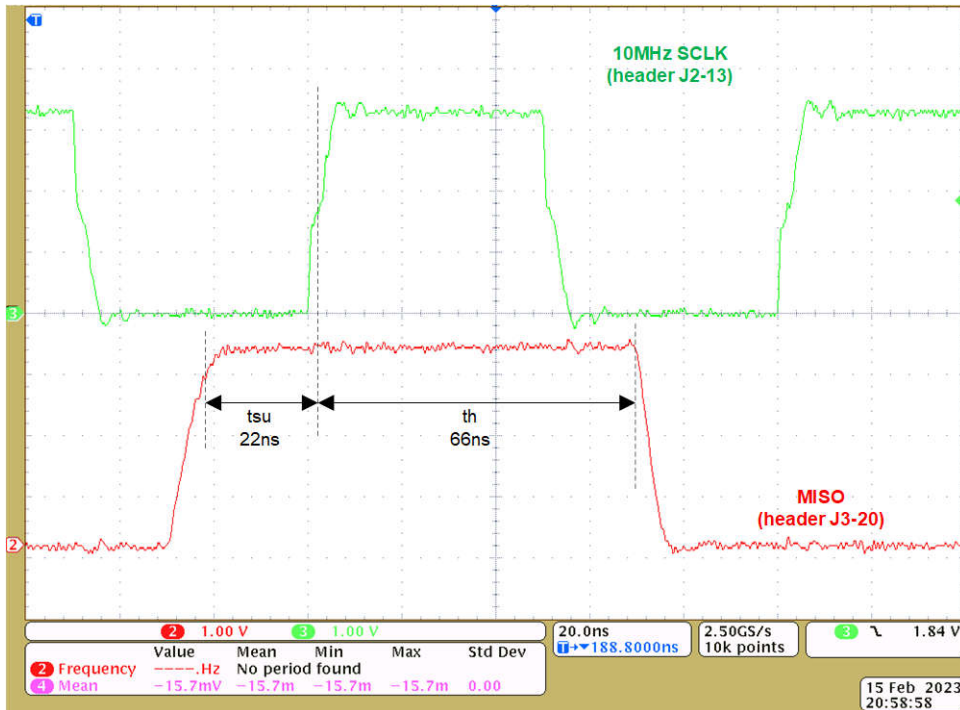


图 4-17. MCU 接头 J2 和 J3 处的 MISO 和 SCLK

图 4-17 显示了 TMAG5170 SDI 输入 (MOSI) 的时序与 10MHz SPI 时钟 (SCLK) 的时序之间的关系。建立时间 ($t_{su_si}=47ns$) 和保持时间 ($t_h_si=48ns$) 都符合 25ns (最小值) TMAG5170 要求。



图 4-18. TMAG5170 U8 SDI (MOSI) 和 SCLK

下图显示了在 SCLK 菊花链中第一个 TMAG5170 MCU (U7) 和最后一个 TMAG5170 (U8) 处测量的 SPI 时钟 (SCLK) 信号有/无交流并行端接的比较情况。



图 4-19. U7 处的 SCLK，U8 处具有交流并联端接

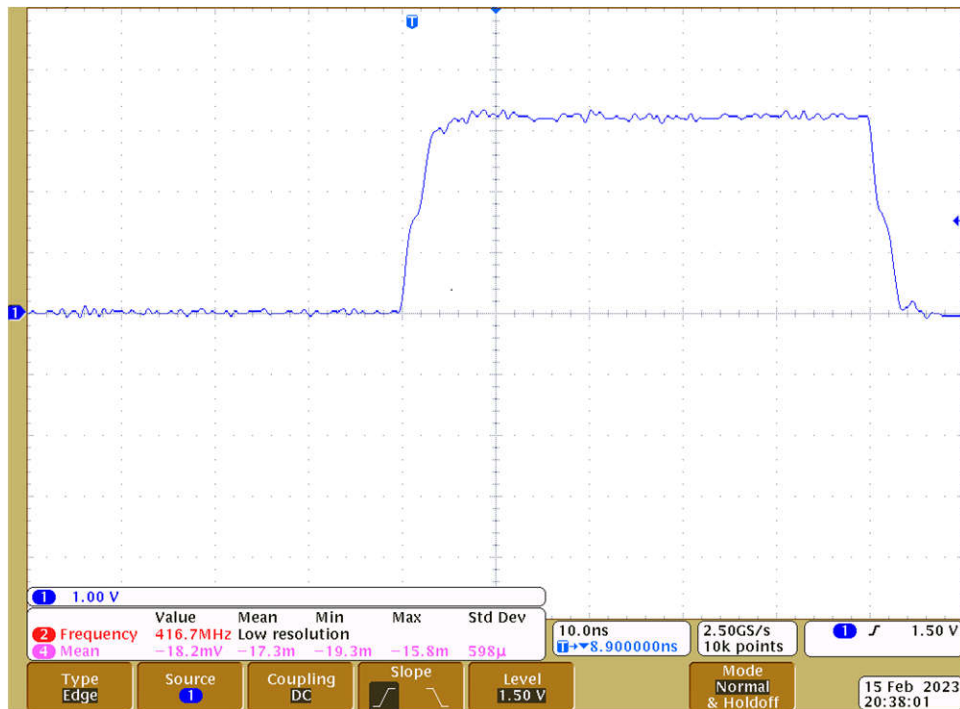


图 4-20. U7 处的 SCLK，U8 处没有并行交流端接

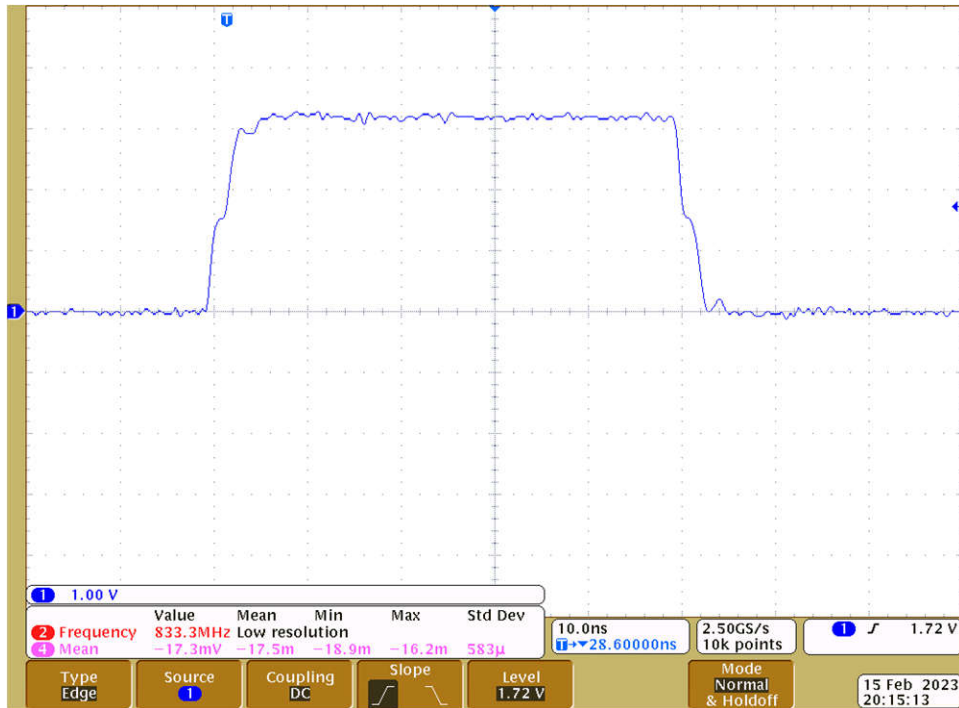


图 4-21. U8 处的 SCLK，U8 处具有交流并联端接

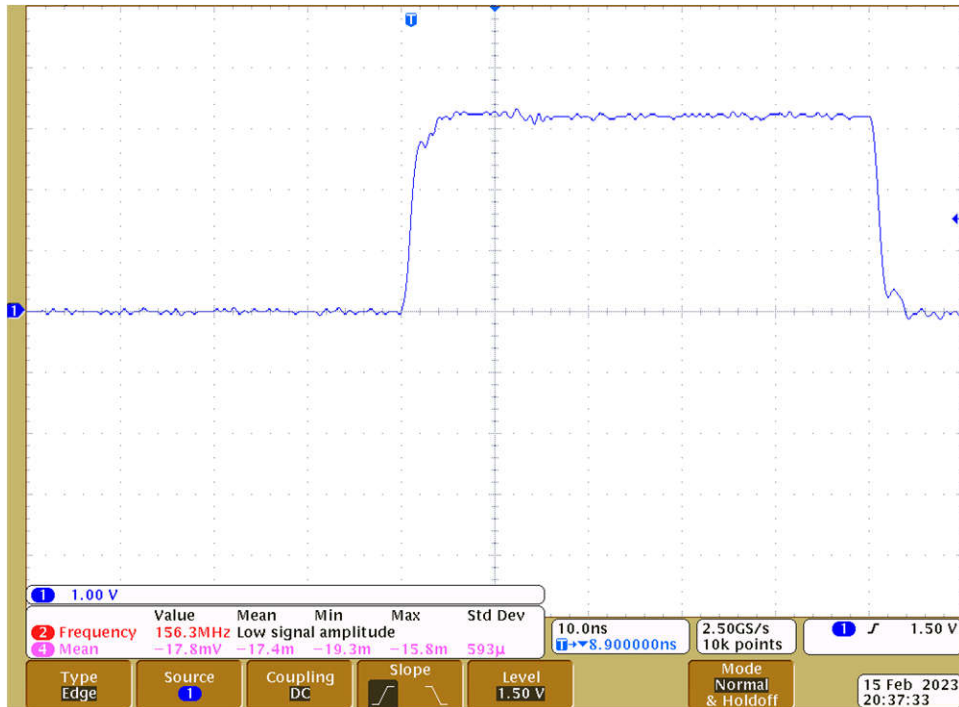


图 4-22. U8 处的 SCLK，U8 处没有并行交流端接

MCU 输出信号 nALERT、MOSI、SCLK 以及 nCS1 至 nCS4 的串联线路端接电阻器在 MCH 接头附近装有一个 0 Ω 串联线路端接电阻。默认情况下，这些电阻器为 0 Ω 的原因是 TMS320F280049C LaunchPad 上的相应布线长度与 TIDA-060045 上的相应布线长度相似。

TIDA-060045 上的 SPI 布线小于 20cm (8 英寸)。与上升和下降时间相比，约 1.3ns 的相应传播延迟是相当小的。连接 F280049C LaunchPad 后，交流并联端接不会产生显著影响。

对于定制设计，串联线路端接电阻器应直接放置在 MCU 的输出端，这是在使用 TMS320F280049C LaunchPad 时无法实现的。根据 SPI 布线长度，考虑或不考虑交流并联端接均可。

5 设计和文档支持

5.1 设计文件

5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-060045](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-060045](#) 的设计文件。

5.1.3 PCB 布局

5.1.3.1 布局图

要下载布局图，请参阅 [TIDA-060045](#) 的设计文件。

5.1.3.2 布局指南

SPI 时钟信号 SCLK 的布局如图 5-1 所示。SCLK 布设在顶层，以菊花链形式从第一个 [TMAG5170 \(U7\)](#) 连接到最后一个 [TMAG5170 \(U8\)](#)，带有串行线路端接电阻器和可选的远端交流并联端接。nALERT 和 MOSI ([TMAG5170 SDI](#)) 信号布线方式相同。下面的中间 1 层上的纯色 GND 平面用作返回 GND。

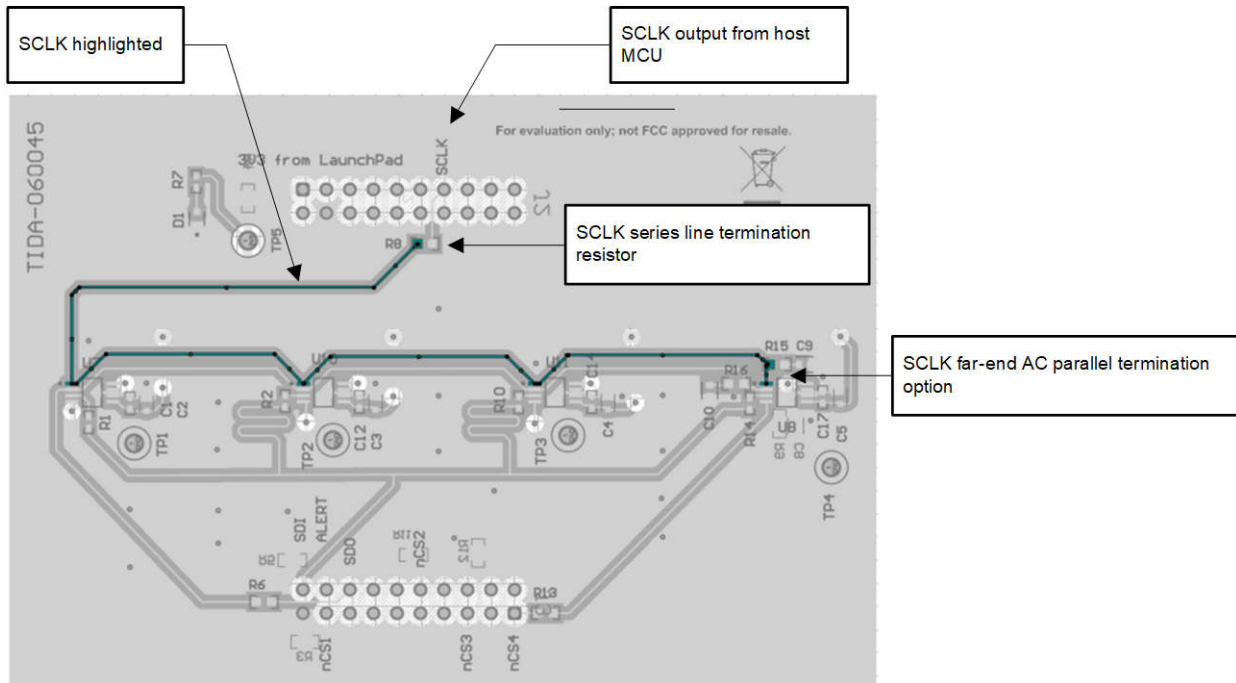


图 5-1. SPI 时钟 (SCLK) 布线

每个 [TMAG5170](#) 的单独 SDO 输出 (SPI MISO) 都有一个串行线路端接电阻器。每个 [TMAG5170](#) 的四条 SDO 迹线以星型方式布线，长度相似，然后合并为单条迹线以连接到主机处理器 MISO 输入引脚。

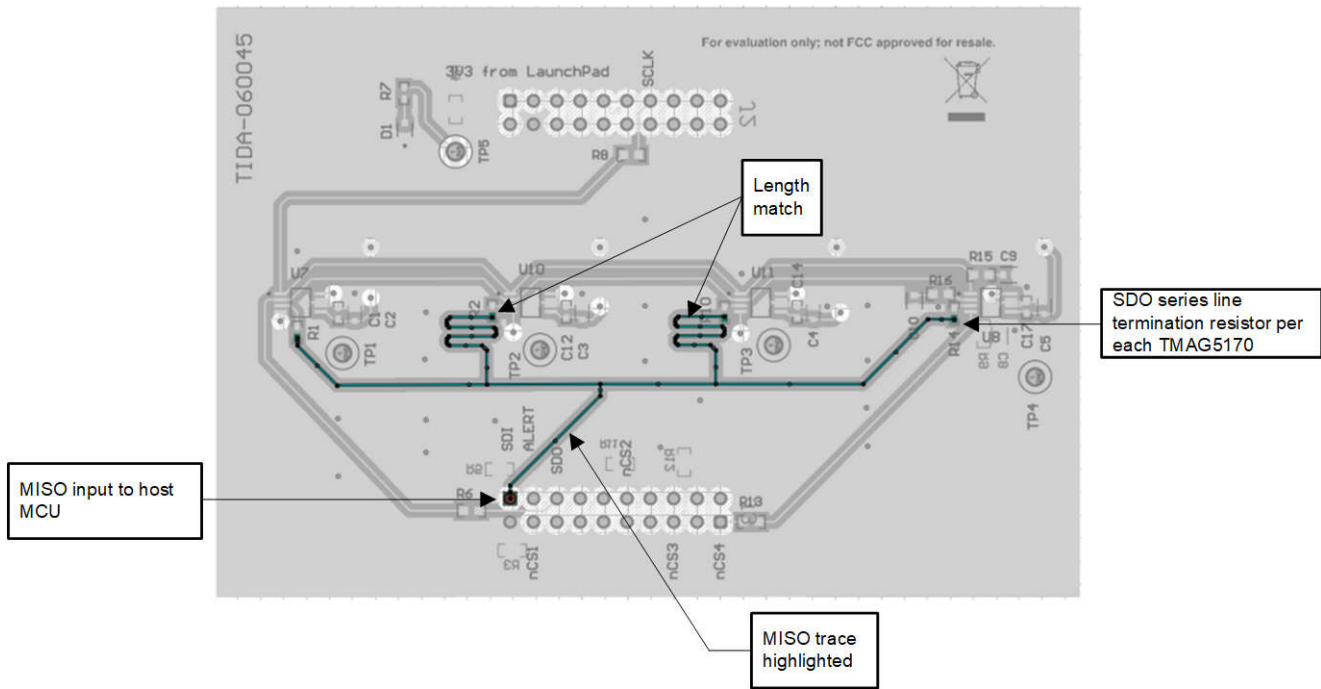


图 5-2. MISO 长度相似的星型拓扑

5.2 工具与软件

工具

[TI-MAGNETIC-SENSE-SIMULATOR](#)
[LAUNCHXL-F280049C](#)

包括机械运动和传感器输出的磁性仿真软件。
F280049C LaunchPad™ 开发套件 C2000™ Piccolo™ MCU。

软件

[TMAG5170-CODE-EXAMPLE](#)
[C2000WARE](#)

[TMAG5170](#) 和 [TMAG5170-Q1](#) C 代码示例。

C2000Ware 是一套全面的软件和文档集，旨在最大限度地缩短开发时间。它包括特定于器件的驱动程序、库和外设示例。

5.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [线性电机传输系统中多个动子的位置感应](#), 应用简报
2. 德州仪器 (TI), [使用 3D 霍尔效应传感器进行设计：线性位置编码](#), 视频
3. 德州仪器 (TI), [线性位置应用的磁体选择 \(修订版 A\)](#), 应用报告
4. 德州仪器 (TI), [实现更高系统角度检测精度](#), 应用报告
5. 德州仪器 (TI), [TI 磁感应模拟器功能简介](#), 应用简报
6. 德州仪器 (TI), [适用于 EnDat2.2 绝对编码器的稳定接口参考设计](#)

5.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

5.5 商标

TI E2E™, LaunchPad™, C2000™, and Piccolo™ are trademarks of Texas Instruments.

MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc.
所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

MARTIN STAEBLER 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统工程师和高级技术人员，负责为工业驱动器指定和开发系统解决方案。

致谢：非常感谢 **SCOTT BRYSON**、**ESTER VICARIO** 和 **JACK BOLTON** 等作者为本参考设计的文档、设计和测试所做的贡献。

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司