

Design Guide: TIDA-010961

高分辨率、低延迟、低功耗绝对电感式角度编码器参考设计



说明

本参考设计展示了一款高分辨率绝对电感式角度编码器。该设计采用了一块印有导电图案的旋转目标印刷电路板 (PCB)。固定式 PCB 则包含励磁线圈与游标式接收线圈，并集成双通道非接触电感传感器前端 (含 LC 振荡器及正弦-余弦接口)。系统通过搭载 4MSPS 模数转换器 (ADC) 的 Arm® Cortex®-M0 微控制器 (MCU) 来计算绝对角度。

资源

TIDA-010961	设计文件夹
LDC5072、MSPM0G3507	产品文件夹
TPSM365R3、REF3533	产品文件夹
TLV9062	产品文件夹



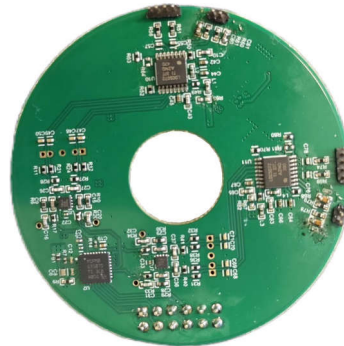
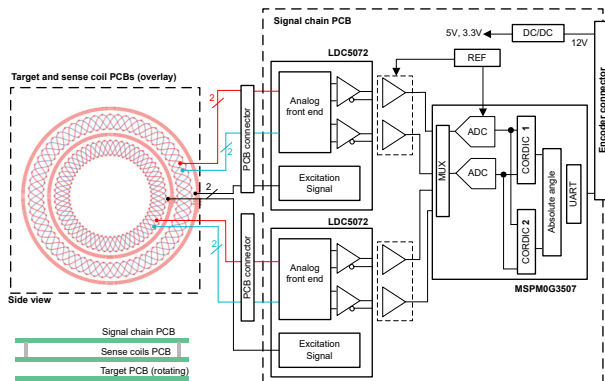
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

特性

- 绝对角度分辨率为 16.6 位有效位数 (ENOB)，静态角度精度 $< 0.04^\circ$ ， $9.6 \mu s$ 极低延迟
- 采用 58mm 直径导电目标与感应 PCB，配备每圈 16 周期和 15 周期的两组游标线圈，可实现超薄结构设计
- 具备抗杂散磁场干扰能力，可替代旋转变压器，系统成本更低，功耗低于 500mW，精度更高
- 集成非接触式电感位置传感模拟前端芯片，无需磁铁，有效降低系统成本
- 集成了双路 12 位模数转换器 (ADC)、过采样和三角函数数学加速器的 MCU 有助于提高分辨率并降低系统成本

应用

- 伺服驱动器位置传感器
- 机器人位置传感器
- 类人机器人位置传感器
- 牵引逆变器



1 系统说明

单圈或多圈绝对旋转角度编码器支持多种应用，包括伺服驱动器、工业机器人以及协作型仿人机器人等需要精密机械角度定位的场景。主流位置传感器类型包括光学式、磁式、电感式或电容式。当附近布线中存在大电流时，必须采用先进传感技术。以电感式传感器为例，它能够在强磁场环境中高效运行，且不受外部杂散磁场干扰，从而确保测量结果的可靠性。

图 1-1 展示了本参考设计所实现的一款单圈绝对电感式旋转角度编码器方案。该电感式编码器由三块印刷电路板 (PCB) 构成，分别为与电机转轴相连的目标 PCB、固定线圈 PCB 及信号链 PCB。

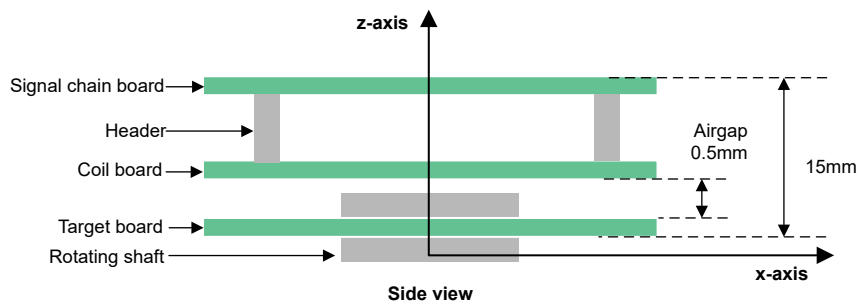


图 1-1. 电感角度传感原理

线圈 PCB 包含两组励磁线圈和两组接收线圈。两组接收线圈分别以每匝 16 周期和 15 周期的设计，用于系统启动时的绝对位置检测。相较于低周期数设计，此配置的分辨率更高。线圈 PCB 连接至信号链 PCB，后者采用双 LDC5072 电感前端与 MSPM0G3507 微控制器。图 1-2 所示旋转目标 PCB 是一个直径 58 毫米的无源盘，其表面印有双路导电图案。

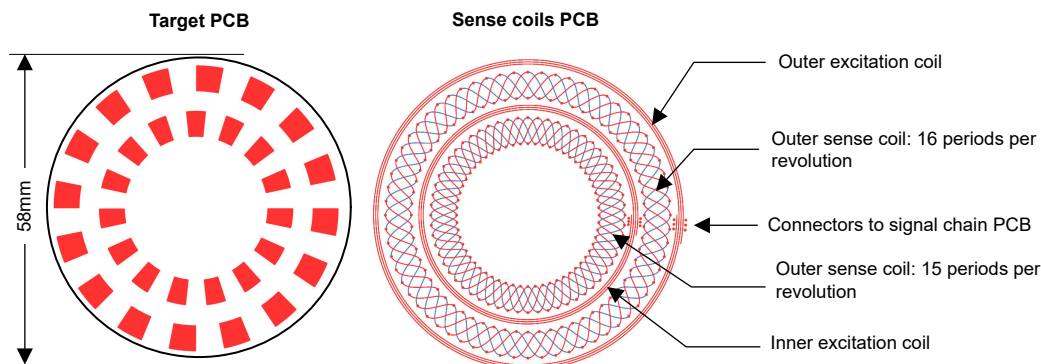


图 1-2. 目标 PCB 和感应线圈 PCB

两个 LDC5072 电感式前端 IC 分别生成高频励磁信号。这些信号将直接注入对应的励磁线圈。励磁线圈会根据目标 PCB 相对于接收线圈的旋转角度位置，在接收线圈上感应出次级电压；通过读取接收线圈的电压值，即可获取代表位置信息的信号。每个 LDC5072 器件都会对接收到的信号进行处理，滤除高频励磁频率，并提供一个能跟踪电角度的幅度调制差分模拟正弦-余弦信号。MSPM0G3507 的内部 ADC 以 32kHz 的采样率对 LDC5072 的输出信号进行采样。传感器首先对两条信号路径（一条为 16 周期，另一条为 15 周期）执行初始增益与偏移校准。随后，传感器检测启动时的旋转位置，并持续计算高分辨率的绝对角度。随后，传感器检测启动时的旋转位置，并持续计算高分辨率的绝对角度。

1.1 主要系统规格

表 1-1 提供了此参考设计的主要规格。

表 1-1. TIDA-010961 主要设计规格

参数	值 (典型)	注释
功能	单圈感应式绝对角度编码器	-
电感式传感器类型	LDC5072-Q1 电感式模拟前端	-
检测 PCB 线圈外径	58mm	-
检测 PCB 线圈轴孔	16mm	-
外线圈周期数	16	-
内线圈周期数	15	-
目标 PCB 与检测 PCB 之间的间隙	0.5mm (典型值), 1.2mm (最大值)	可配置, 请参阅图 1-1 中的定义
角度精度	$\leq 0.04^\circ$	25°C 时校准的偏移和增益误差
角度标准差分 (标准差)	$\leq 0.0015^\circ$	-
角度分辨率 (ENOB)	16.6 有效位数 (ENOB)	-
角度分辨率 (数值)	32 位 (IQ21)	定制, MSPM0G3507 上特定
角度传播延迟 (延时)	9.6 μ s	从电感式感应线圈有效采样点到角度计算完成的时间
有效角度采样率	32kHz	可配置
最大运行速度	未经过测试	更改低通滤波电容以提升性能, 参见节 3.1.3.1
模数转换器	双通道 12 位 ADC, 配备 8 倍过采样抽取滤波器	集成至 MSPM0G3507, 过采样率最高可配置至 128 倍
模数转换器过采样率	2.85MSPS (采样时间 250ns, 转换时间 100ns)	可配置采样时间, 最短 150ns
编码器连接器	12 引脚连接器	请参阅表 4-2
接口	UART	2.5M 波特率
电源电压	12V $\pm 10\%$	-
12V 输入下的功耗	468mW	-
工作温度范围	-40°C 至 125°C	在 25°C 环境温度下测试的参考设计
信号链 PCB 层数	6	-

2 系统概述

2.1 方框图

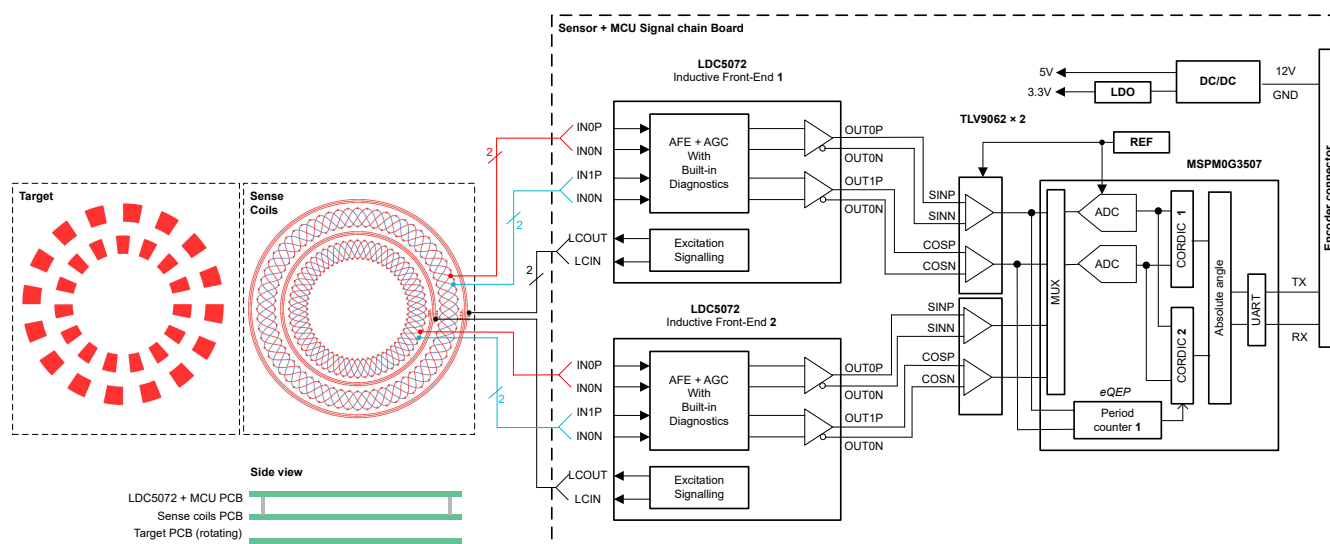


图 2-1. 系统方框图

2.2 设计注意事项

电感式编码器因其固有的抗外部杂散磁场干扰能力、低成本和相对较高的分辨率，正成为工业位置传感应用的新趋势。尽管机械式旋转变压器也能抵抗外部杂散磁场，但基于 **PCB** 的电感式角度传感器具有更低的系统成本、更低的功耗、更高的精度，并内置数字处理功能，通过高抗电磁干扰能力的双向数字接口与工业驱动器连接。

电感式传感技术通常需要一块目标板和一块线圈板。导电目标板可以是印制在 **PCB** 上的图案，而线圈板则包含接收线圈和励磁线圈。线圈 **PCB** 静止不动，而目标板则安装在电机轴上并随之旋转。激励线圈会根据目标相对于接收器线圈的位置，在接收器线圈上产生次级电压。通过读取并处理接收线圈上的电压，可获得代表目标板位置的电信号，该信号以模拟量形式输出，分别对应目标板位置的正弦与余弦分量。

如图 2-1 所示，电感式编码器通常采用多极对接收线圈获得更高分辨率，但此类设计仅提供增量式位置信息。游标编码法可用于获取绝对位置，该方法需要两组周期互质的接收线圈。

电信号链的偏移与增益，以及 **ADC** 的采样率、速度与分辨率，均会对角度精度产生影响。选用具有极低温漂特性的元件有助于减小角度误差。根据正弦和余弦传感器信号解码角度值时，需使用除法、乘法和累加及反正切等数学函数。

为实现更小尺寸的圆形 **PCB** 设计，采用高集成度、低功耗的小尺寸电路至关重要。由于编码器可以集成电机，因此通常要求环境工作温度至少达到 125°C。

2.3 重点产品

2.3.1 LDC5072-Q1

LDC5072-Q1 IC 是一款面向非接触式电感位置传感器的模拟前端，主要应用于汽车和工业领域的绝对旋转位置检测。该器件集成了非接触式电感位置传感器的模拟前端，以实现 0° 至 360° 的绝对旋转位置检测。同时，该期间配备了多重诊断功能，能够检测、监控并上报上电前已存在或运行过程中发生的各类故障。该设计的主要特性包括：

- 集成了非接触电感位置传感器模拟前端 IC，支持 0° 至 360° 绝对旋转位置检测
- 可适应恶劣工作环境，抗杂散磁场干扰，不受灰尘与污染物影响
- 功能安全合规型
- 工作温度范围： -40°C 至 160°

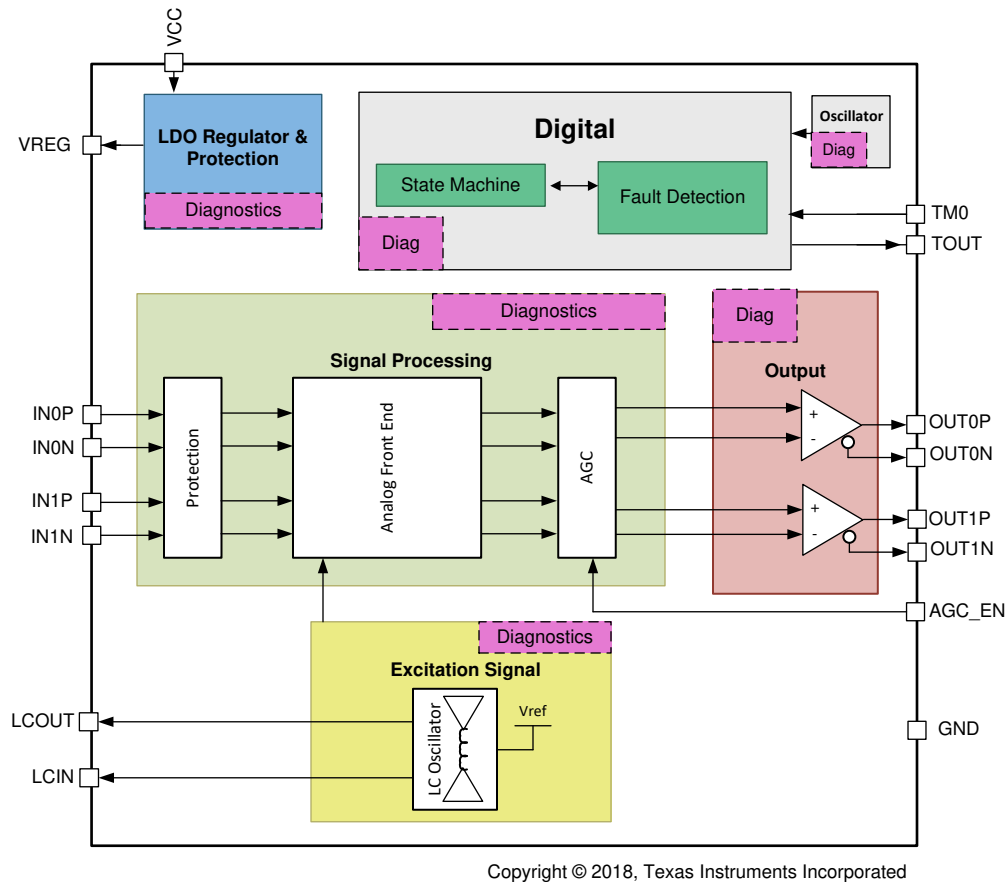


图 2-2. LDC5072-Q1 功能框图

2.3.2 MSPM0G3507

MSPM0G350x 微控制器 (MCU) 属于 MSP 高度集成的超低功耗 32 位 MCU 系列，该 MCU 系列基于增强型 Arm® Cortex®-M0+ 32 位内核平台，工作频率最高可达 80MHz。这些低成本 MCU 提供高性能模拟外设集成，支持 -40°C 至 125°C 的工作温度范围，并在 1.62V 至 3.6V 的电源电压下运行。此设计采用的 MSPM0G350x MCU 的主要特性有：

- 两个具有总计多达 17 个外部通道的 12 位 4MSPS 同步采样模数转换器 (ADC)
- 硬件均值计算可在 250kSPS 下实现 14 位有效分辨率
- 数学加速器支持 DIV、SQRT、MAC 和 TRIG 计算
- 经优化的低功耗模式：
 - RUN : 96µA/MHz (CoreMark)
 - STANDBY : 1.5µA，保留实时时钟 (RTC) 与静态随机存储器 (SRAM) 运行

2.3.3 TPSM365R3

TPSM365R3 是一款 300mA、65V 输入同步降压 DC/DC 电源模块，采用紧凑型 QFN 封装，集成了功率 MOSFET、电感及启动电容。其主要特性包括：

- 在 3.5mm × 4.5mm × 2mm QFN 封装中集成了 MOSFET、电感与控制器
- 宽输入电压范围：3V 至 65V
- 在全负载范围内实现 > 85% 的超高效率，功率耗散极低，便于电机集成
- 固有保护特性，可实现稳健设计
- 工业级工作温度范围：-40°C 至 125°C

2.3.4 TLV9062

TLV9062 是一款双路低电压 (1.8V 至 5.5V) 运算放大器，具备轨到轨输入和输出摆幅能力。该器件是非常具有成本效益的设计，适用于需要低电压运行、小型封装尺寸和高容性负载驱动能力的应用。其主要特性包括：

- 轨到轨输入和输出
- 低输入失调电压：±0.3mV
- 低宽带噪声：10nV/√Hz
- 低输入偏置电流：0.5pA
- 单位增益稳定
- 内置射频干扰 (RFI) 和电磁干扰 (EMI) 滤波器

3 系统设计原理

3.1 硬件设计

该硬件由三块 PCB 组成，分别为：(1) 连接到电机轴的旋转目标 PCB、(2) 固定线圈 PCB 和 (3) 信号链 PCB。

3.1.1 目标 PCB

目标板通常为 PCB 上的图案式铜层。图案的周期数需与线圈板上接收线圈的周期数保持一致。本参考设计采用 16 周期与 15 周期方案。每个图案的宽度和高度需与接收线圈的单个周期相匹配。

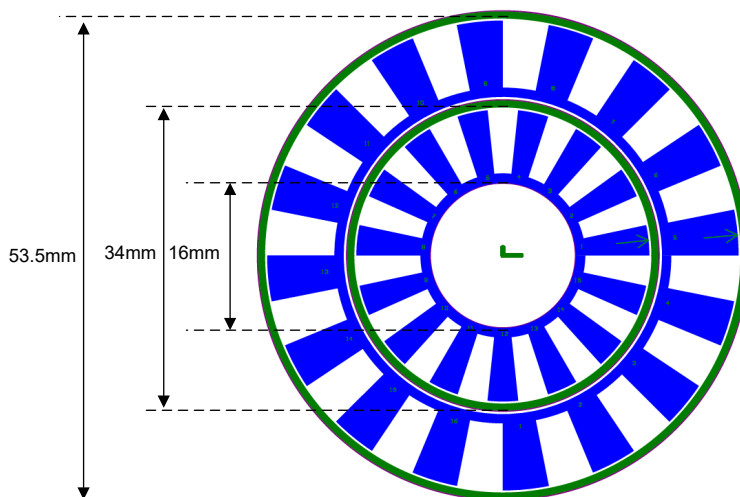


图 3-1. 目标 PCB

3.1.2 线圈 PCB

线圈板包含外线圈和内部线圈。每组线圈均包含励磁线圈和接收线圈。励磁线圈呈螺旋形状，接收线圈则呈正弦或余弦波形。

电感式编码器的分辨率主要取决于线圈的周期数。为获得高于 16 位 ENOB 的分辨率，本参考设计采用 16 周期外线圈和 15 周期内线圈。然而，PCB 尺寸亦随线圈周期数增加而增大，本设计将线圈外径限制为 58mm。

对于励磁线圈，其电感值需得到良好控制。励磁线圈作为电感元件，连接至 LDC5072 器件的 LCIN 和 LCOUT 引脚。另有两只电容接入这两引脚，共同构成 LC 振荡器。电感与电容值共同决定励磁信号频率。信号幅度与功耗之间存在平衡关系。较高的信号幅度需产生更强电磁场，这就要求励磁线圈匝数更多。为保持电感值不变，需减小线圈宽度，导致电阻增大、功耗升高。本参考设计将励磁线圈电感控制在约 $5 \mu\text{H}$ 。

励磁线圈信号与接收线圈信号均为高频信号。为提升抗噪性能，本参考设计采用六层 PCB 板，并使差分信号走线在不同层间重叠布置。

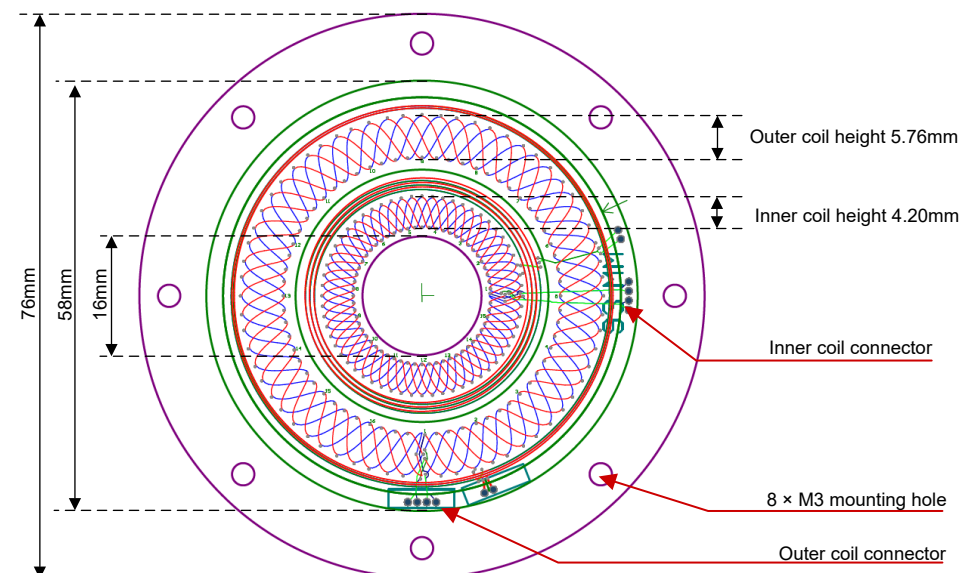


图 3-2. 线圈 PCB

3.1.3 信号链 PCB

3.1.3.1 电感式角度位置传感器前端原理图

图 3-3 显示了外感应线圈的电感式 AFE 原理图。此处的说明同样适用于内感应线圈的原理图。

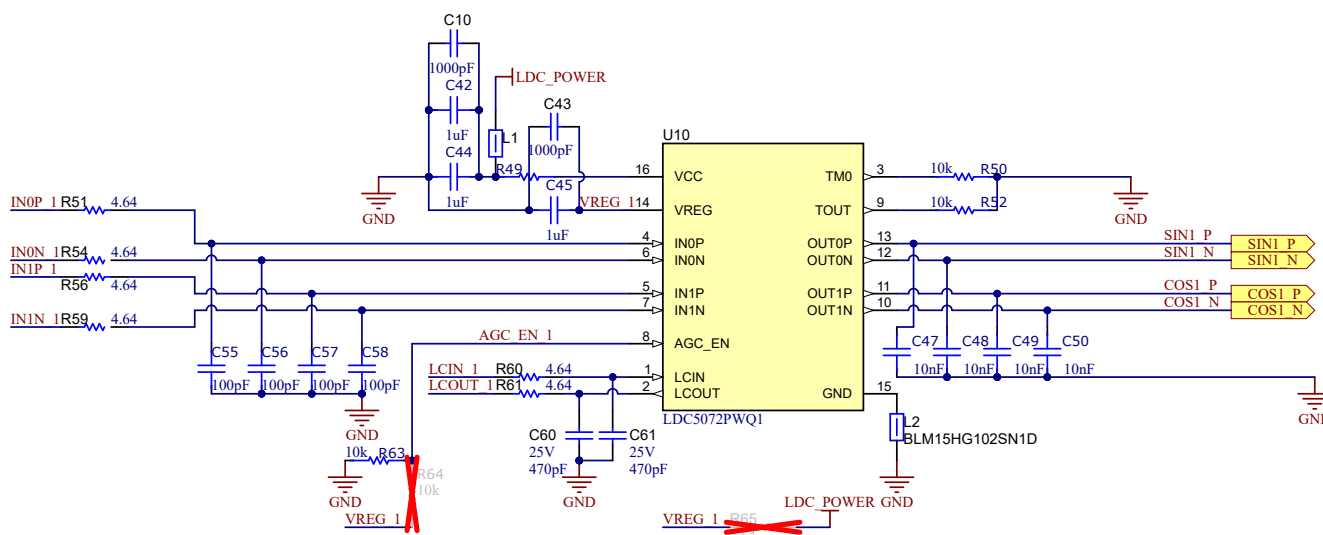


图 3-3. 电感式 AFE LDC5072 原理图

在 LDC5072 的 VCC 引脚和 GND 引脚附近添加了三个去耦电容 (C10、C42 和 C44)。C43 和 C45 去耦电容器放置在 VREG 引脚和 GND 引脚附近。

LDC5072 器件支持 VCC 引脚使用 3.3V 或 5V 供电电压。如果使用 3.3V 供电，则 VCC 和 VREG 均由外部 3.3V 电源供电，且需安装电阻 R65。如果使用 5V 供电，则 LDC5072 使用内部 LDO 为 VREG 生成 3.3V，且需移除电阻 R65。

LDC5072 器件支持固定增益模式和自动增益控制 (AGC) 模式。R63 和 R64 是控制增益设置的分压电阻。本参考设计未安装 R64，因此 LDC5072 器件能够以 AGC 模式工作。

C60、C61 (470pF) 以及感应线圈 PCB 上的励磁线圈共同构成 LC 电路。线圈的外励磁电感 (L) 设计为 $5\mu\text{H}$ ，因此 LC 电路的谐振频率为 4.6MHz，可通过以下公式计算：

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_{60}C_{61}}{C_{60}+C_{61}}}} \quad (1)$$

R51、C55、R54、C56、R56、C57、R59 和 C58 共同为传感器线圈的正弦和余弦输出实现低通滤波。

C47、C48、C49 和 C50 为 10nF 电容，与 LDC5072 的输出阻抗构成低通滤波器。要提高速度，可减小这些电容值，具体电容选择请参阅数据表。

3.1.3.2 差分转单端信号

TLV9062 用于构建差分转单端电路，以驱动 MSPM0 MCU 中的单端模数转换器 (ADC)。TLV9062 的差分增益配置为 0.5，在 3.3V 电压基准 (REF3533) 下，偏置电压设定为 1.65V，从而得到 0V 至 3.3V 范围内的单极性信号。

电路带宽配置为约 1MHz，低于 2.8MSPS ADC 采样率的一半。TLV9062 的一阶滤波器由 C9 (20pF) 与 C24、C26 (各 10pF) 构成，其截止频率设为 1.6MHz；二阶滤波器由 R17 (500) 和 C16 (200pF) 构成，截止频率同样设为 1.6MHz。

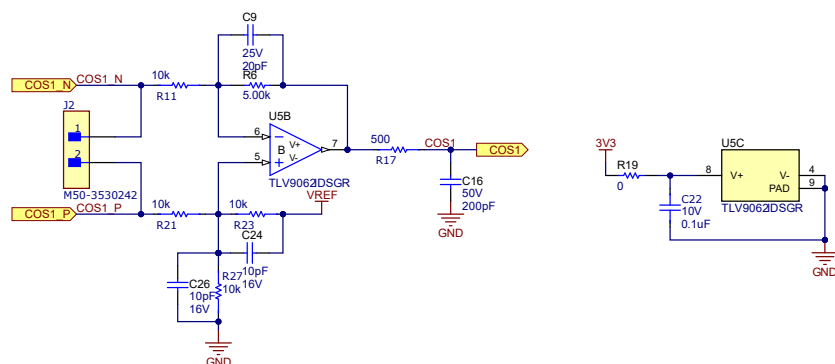


图 3-4. TLV9062 原理图

3.1.4 MSPM0G3507 原理图设计

陶瓷去耦电容器 C3 (10μF) 和 C4 (1μF) 跨接在 VDD 和 VSS 引脚上，C1 (100nF) 和 C2 (0.47μF) 跨接在 VCORE 和 VSS 引脚上。在 VDD 和 3.3V 电源轨之间添加了一个铁氧体磁珠 FB1，用以防止高频数字电流干扰模拟信号。

NRST 复位引脚通过 47kΩ 电阻器 (R2) 和 10nF 下拉电容器 (C7) 上拉至 VDD。SYSOSC 频率校正环路 (FCL) 电路在 ROSC 引脚和 VSS 之间安装了容差为 0.1% 的 100kΩ 外部电阻器 R5。

MSPM0 可接收外部 ADC 基准，以提高 ADC ENOB。在 TIDA-010961 中，以 REF3533 作为外部基准源，其输出连接至 M0 的 VREF+ 和 VREF- 引脚。在 VREF+ 和 VREF- 上跨接 C10(100nF) 去耦电容器。

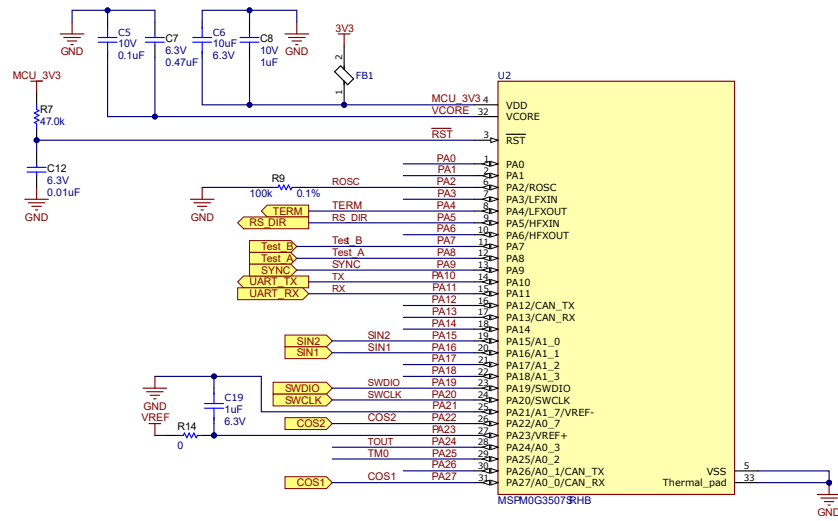


图 3-5. MSPM0G3507 原理图

3.1.5 电源设计

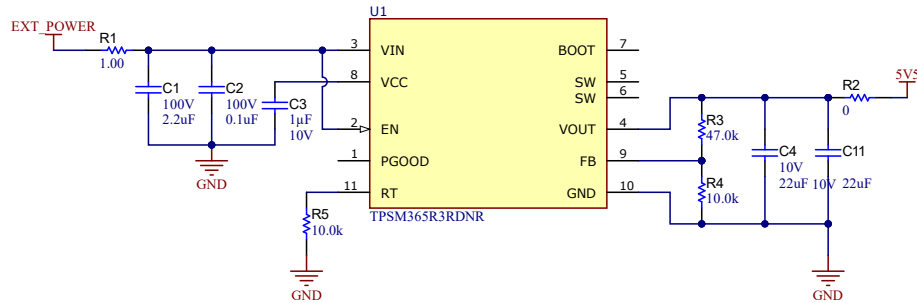


图 3-6. 输入电源原理图

额定输入电源电压为 24V，输入电压上限为 60V。TPSM365R3 DC-DC 降压模块最高可接受 65V 输入，并生成 5.5V 中间电源轨。C1、C2 和 C3 为去耦电容，布置在 VIN 引脚和 GND 引脚附近。R5 用于配置该转换器的开关频率，10kΩ 电阻设置为 1500kHz。R3 和 R4 将输出电压设定为 5.5V。方程式 2 显示输出电压可根据 $V_{FB} = 1V$ 计算得出。

$$V_{out} = V_{FB} \frac{R_4 + R_3}{R_4} \quad (2)$$

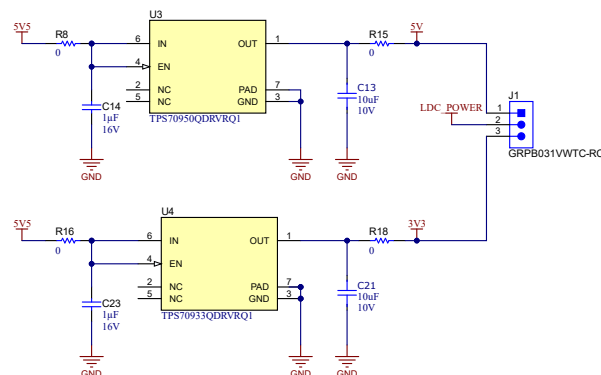


图 3-7. 5V 和 3.3V 负载点电源原理图

LDO TPS70950 从 5.5V 中间输入电压生成 5V 输出，为 LDC5072 供电。LDO TPS70933 生成 3.3V 电源轨，为 LDC5072、TLV9062 和 MSPM0G3507 供电。J1 跳线用于选择 LDC5072 的供电电压 (3.3V 或 5V)。添加 $1\mu\text{F}$ 电容 C14 和 C23 用于噪声去耦，添加 $10\mu\text{F}$ 输出电容 C13 和 C21 用于确保稳定运行。

电压基准源 REF3533 由 5V 电源供电，并为 MSPM0 ADC 生成精确的 3.3V 基准电压。类似地，对于 TPS7A0533，需使用 C8 (100nF) 进行去耦，使用 C9 ($1\mu\text{F}$) 确保稳定运行。

3.2 绝对位置计算

为获得绝对位置，本参考设计采用周期数互质的双轨道线圈。外侧轨道使用 16 周期线圈，内侧轨道使用 15 周期线圈。

为简化说明，本设计指南以 4 周期外线圈和 3 周期内线圈为例阐述绝对位置的计算方法。

图 3-8 展示了在机械旋转一周内，周期数分别为 4 和 3 的外线圈与内线圈电角度之间的关系，采用较低周期数旨在简化示意。

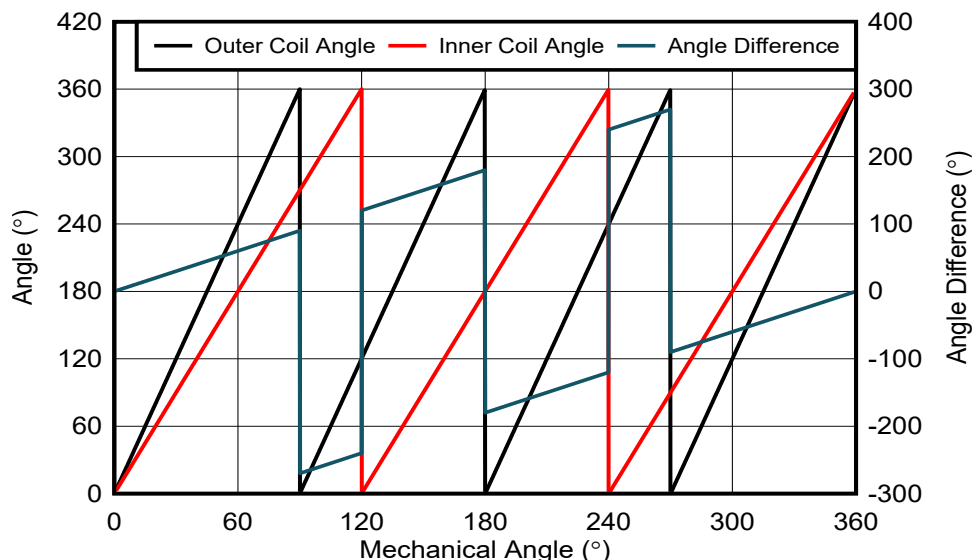


图 3-8. 周期数互质 (4 与 3) 的外线圈与内线圈角度关系

在此 4 和 3 周期示例中，绝对机械角度由互质线圈间的电角度差确定。

表 3-1. 电角度差与绝对角度的关系

差值角度 (°)	绝对角度 (°)
0 至 90	$N4^{(1)}$
-270 至 -240	$90 + N4^{(1)}$
120 至 180	$90 + N4^{(1)}$
-180 至 120	$180 + N4^{(1)}$
240 至 270	$180 + N4^{(1)}$
-90 至 0	$270 + N4^{(1)}$

(1) 注：N4 表示外线圈的机械角度。

本参考设计采用周期数互质 (16 与 15) 的线圈。16 周期线圈将绝对角度划分为 16 个扇区。假设绝对角度落在第 n 扇区内，则外线圈角度相较于内线圈角度，可能大于 $n \times 22.5^\circ$ ，也可能小于 $360^\circ - n \times 22.5^\circ$ 。方程式 3 计算出了扇区编号。

$$\text{sector} = \begin{cases} \text{FLOOR}\left(\frac{(\text{outer coil angle} - \text{inner coil angle})}{22.5}\right) & \text{outer coil angle} \geq \text{inner coil angle} \\ \text{FLOOR}\left(\frac{(\text{outer coil angle} - \text{inner coil angle} + 360)}{22.5}\right) & \text{outer coil angle} < \text{inner coil angle} \end{cases} \quad (3)$$

随后，绝对角度可通过以下公式计算得出：

$$\text{absolute position} = \text{sector} \times 22.5^\circ + \text{fine angle}/16 \quad (4)$$

图 3-9 展示了游标编码器中的绝对位置计算流程图。

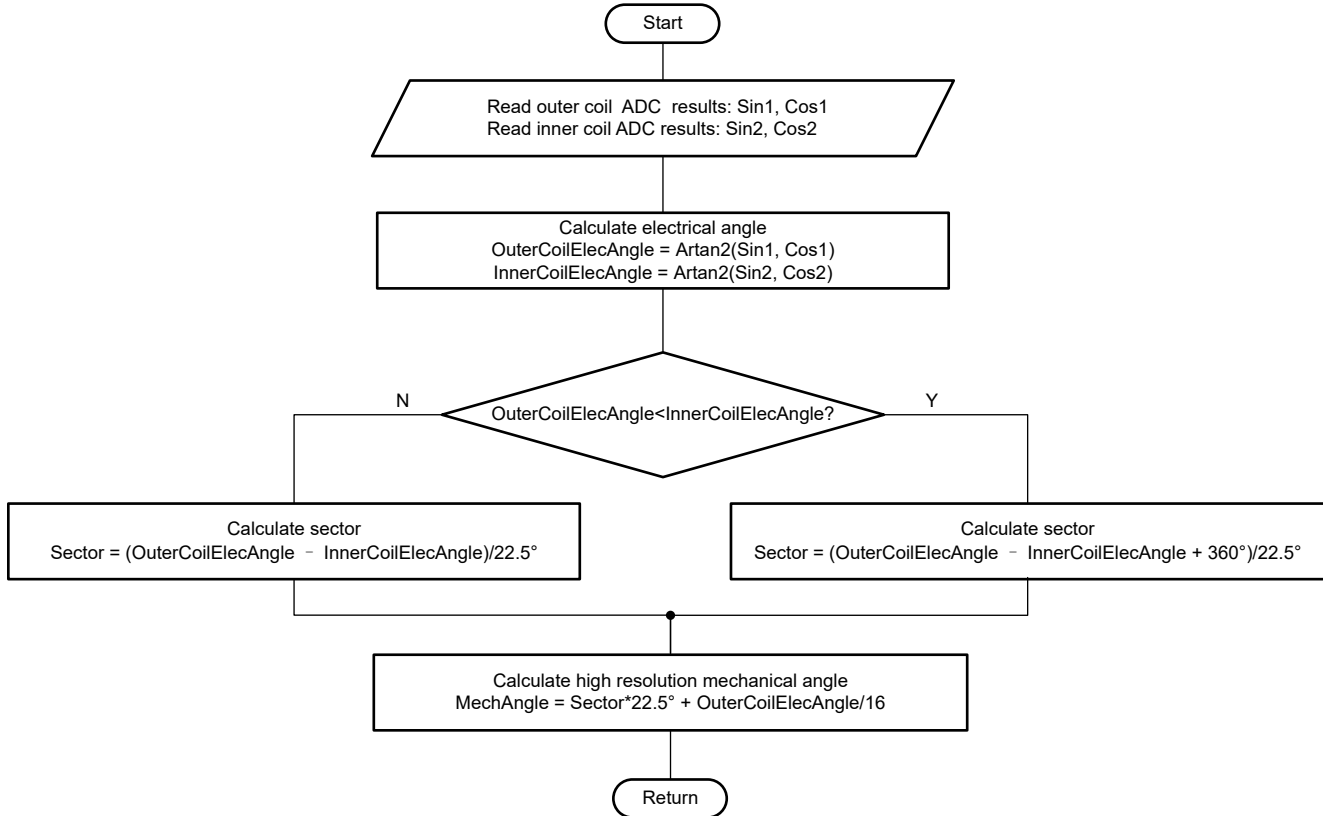


图 3-9. 旋转角度计算流程图

3.3 软件设计

德州仪器 (TI) 的一款内部测试软件，使用面向 M0 微控制器 (MCU) 的 MSPM0 软件开发工具包，通过 MSPM0G3507 对该参考设计进行了验证。

3.3.1 角度计算时序

在 TIDA-010961 参考设计中，MSPM0G3507 以 8 倍过采样率采集 LDC5072 器件的正弦与余弦输出信号，并计算绝对角度。TMAG6180 器件中的 ADC 由内部 32kHz Timer0 触发，并将 ADC 结果保存到数组。ADC 转换完成后产生中断，MCU 在中断期间执行绝对角度计算。

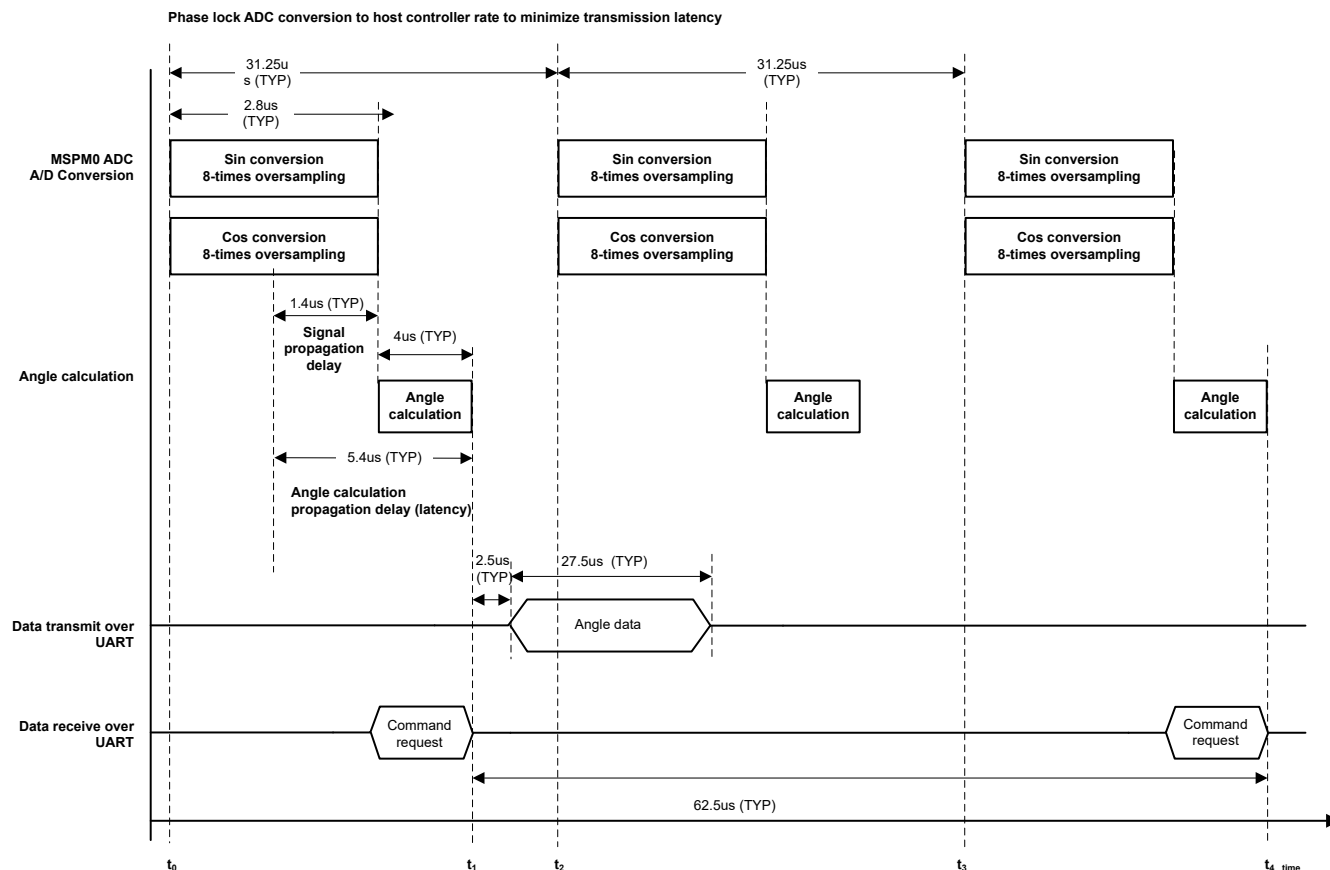


图 3-10. MSPM0G3507 时序图

主机控制器通过发送命令请求从 TIDA-010961 获取位置数据。命令触发 MSPM0 的 UART 中断后，MCU 将返回位置数据。

表 3-2. 系统延迟分析

子系统	传输延迟 (典型值)
LVD5072	4 μ s
差分转单端滤波器：	0.2 μ s
8 倍过采样 ADC	1.4 μ s
角度计算	4 μ s
总计	9.6 μ s

3.3.2 旋转角度误差源和补偿

将目标板的中心与线圈板的中心对齐，容差在可接受范围内，以实现精确的角度测量。按照以下步骤校准编码器以获得理想精度：

- 根据磁体与传感器的对齐情况设置参考角。该误差可保存在微控制器中，用于运行时绝对位置计算。该误差在系统中也称为角度偏移。
- 电气偏移校准 - 有关偏移校准的步骤，请参阅《AMR 角度传感器校准》应用报告。如果传感器无法在整个范围内旋转，则无法校准电偏移。
- 幅度失配校准 - 有关幅度失配校准的步骤，请参阅《AMR 角度传感器校准》应用报告。如果传感器无法在整个范围内旋转，则无法校准振幅不匹配。

其他误差源包括传感器信号链非线性（如三次谐波），以及通过将参考角度编码器耦合到绝对电感编码器轴所产生的机械误差。下图概述了误差源及其对角度误差的影响，以便理解和补偿此类误差。

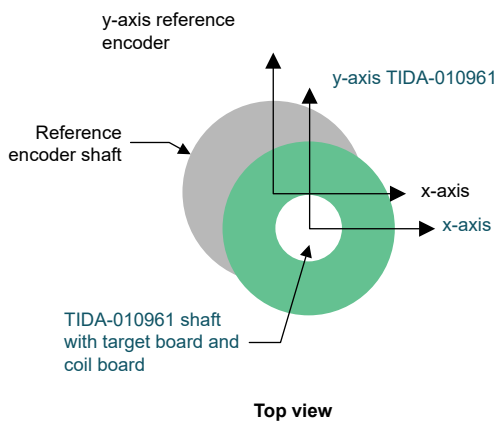


图 3-11. 轴适配器机械位移

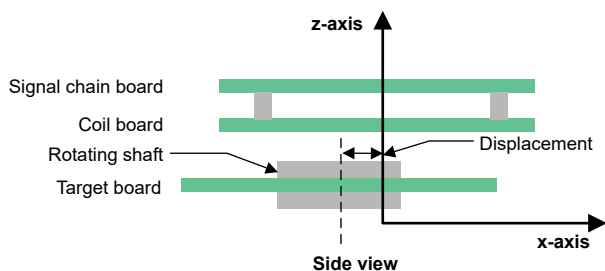


图 3-13. 目标板和线圈板位移

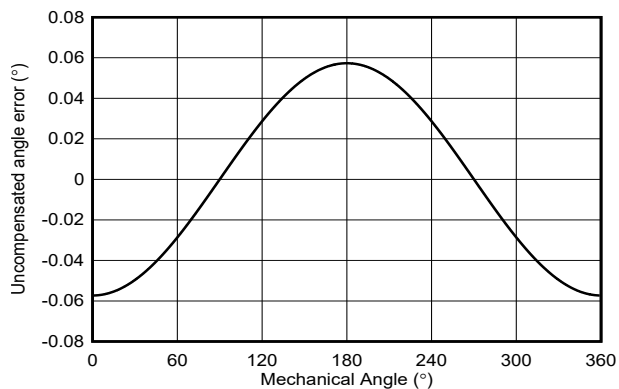


图 3-12. 由轴适配器位移引起的机械角度误差

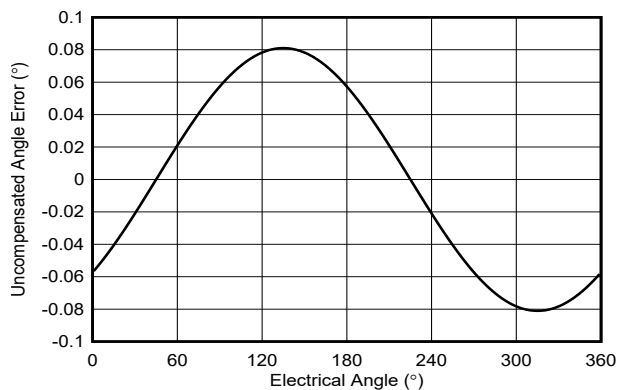


图 3-14. 由目标板和线圈板位移引起的电角度误差

图 3-15 至图 3-17 展示了传感器信号链的电偏移、增益失配和非线性（三次谐波）对角度误差的影响示例。

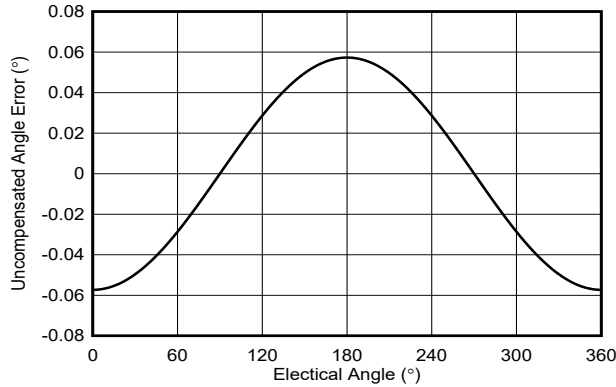


图 3-15. 由正弦与余弦信号链偏移 (0.1%) 引起的电角度误差

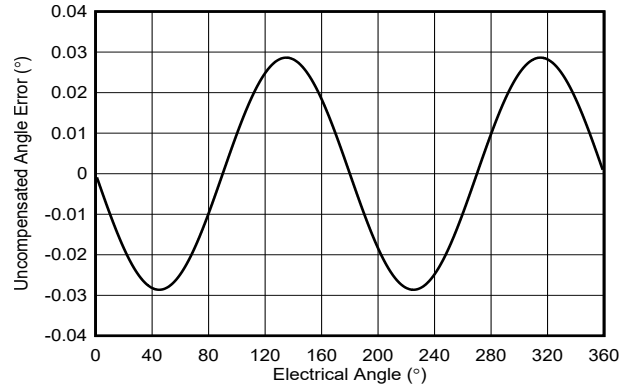


图 3-16. 由正弦与余弦信号增益失配 (0.1%) 引起的电角度误差

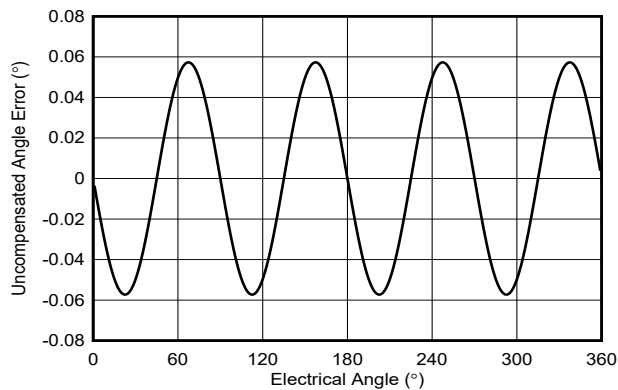


图 3-17. 由正弦与余弦信号链非线性 (0.1%) 引起的电角度误差

由于外线圈为 16 周期，需将电角度误差阶数乘以 16 以获得机械角度误差阶数。表 3-3 总结了上述因素对角度误差形态的影响。

表 3-3. 误差源以及对角度误差谐波的影响

误差源	轴耦合位移	目标板和线圈板位移	信号链偏移	信号链增益失配	信号链非线性（三次谐波）
电角度误差谐波	-	1st	1st	2nd	4th
机械角度误差谐波	1st	16th	16th	32nd	64th

有关角度位置计算算法的更多信息，请参阅《实现更高系统角度检测精度》应用报告。

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

表 4-1 中列出的硬件设备用于评估此参考设计。

表 4-1. 硬件必备条件

设备	注释
TIDA-010961	此参考设计
LBY80-C	二维线性平台
TIDA-010956	用于集成电机驱动的 48V、85A 三相逆变器参考设计
MS1H4-40B30CA	带 23 位光学编码器的伺服电机

4.1.1 PCB 概述

图 4-1 和图 4-2 分别显示了 PCB 顶视图和底视图。

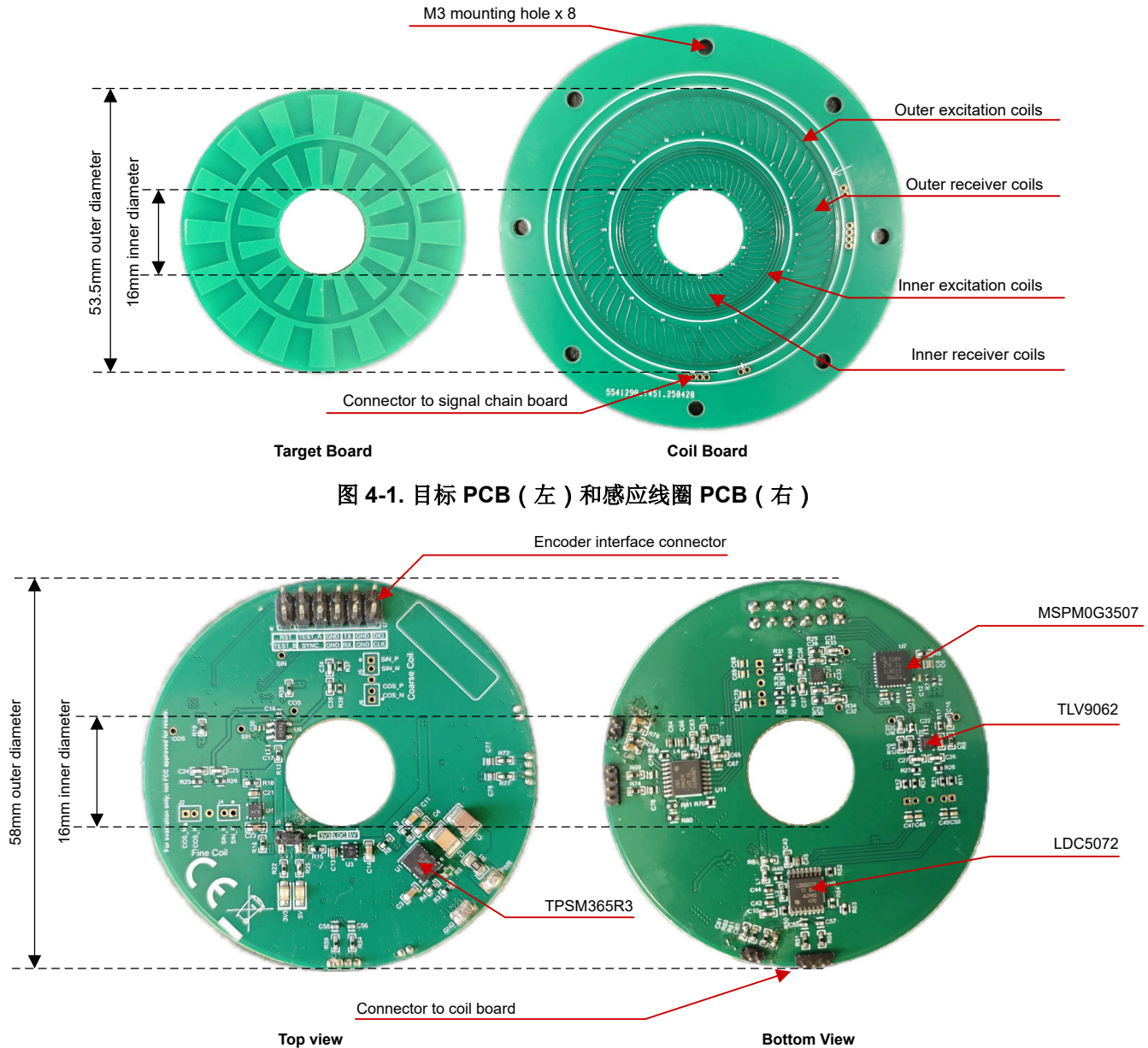


图 4-2. 信号链电路板顶视图 (左) 和底视图 (右)

4.1.2 编码器接口

表 4-2 展示了 TIDA-010961 的 J3 接口。表中还列出了 UART 和 JTAG 接口。UART 用于向主机 MCU 传达角度数据。JTAG 用于下载和调试软件。接口还预留了若干测试引脚用于调试。

表 4-2. 接口规格接头

引脚	信号	I/O	引脚	信号	I/O
J3-1	TEST_A	O	J3-2	RST	I
J3-3	SYNC	I	J3-4	TEST_A	O
J3-5	GND	-	J3-6	GND	-
J3-7	UART RX	I	J3-8	UART TX	O
J3-9	GND	-	J3-10	GND	-
J3-11	CLK	I	J3-12	DIO	I/O

4.2 软件

德州仪器 (TI) 的一款内部测试软件，使用面向 M0 微控制器 (MCU) 的 MSPM0 软件开发工具包，通过 MSPM0G3507 对该参考设计进行了验证。

表 4-3 中列出了关键软件配置。

表 4-3. 软件配置

子系统	参数	值
中断	ADC 触发频率	32kHz
	位置计算频率	32kHz
ADC	硬件过采样率 (OSR)	8
	采样时间	280ns
UART	波特率	2.5M
	字长	8 位

4.3 测试设置

图 4-3 展示了编码器测试台。

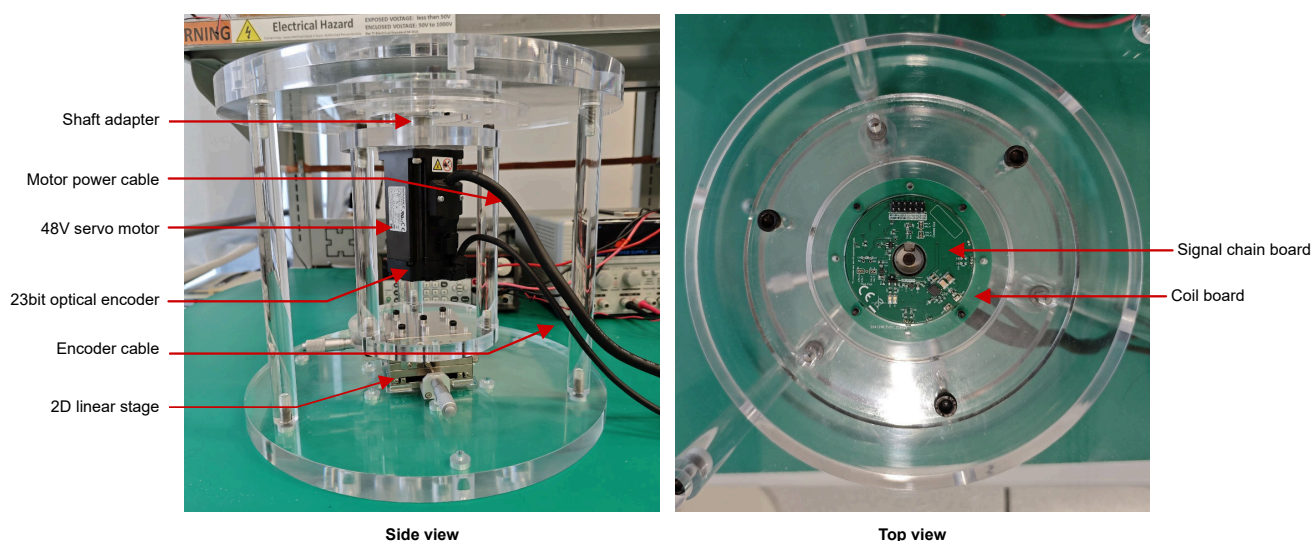


图 4-3. 编码器测试台

图 4-3 展示了整体测试设置。MS1H4-40B30CA 是一款 48V 伺服电机，内置 23 位光学编码器。该高分辨率光学编码器可提供精确的参考位置，用于计算位置测量误差。

二维线性平台用于调整接收板的 XY 位置，从而实现目标板与接收板的精确对中。

TIDA-010956 三相逆变器驱动电机以恒定速度运行。测试台采用 TMS320F280039 实时 MCU LaunchPad™ 开发套件控制三相逆变器，并同时向参考编码器和 TIDA-010961 发送位置请求命令。

4.4 测试结果

4.4.1 电感式传感器正弦与余弦噪声测量

图 4-4 和图 4-5 展示了在一个电周期内，第 7 扇区外线圈 16 个周期所测得的正弦与余弦信号。对应机械角度范围为 135 度至 157.5 度。正弦信号电压最大值为 3.036V，最小值为 0.123V。余弦信号电压最大值为 3.176V，最小值为 0.232V。正弦与余弦信号之间存在增益与偏移失配，这会导致 1 次谐波电角度误差。通过校准可最大程度减小该误差。

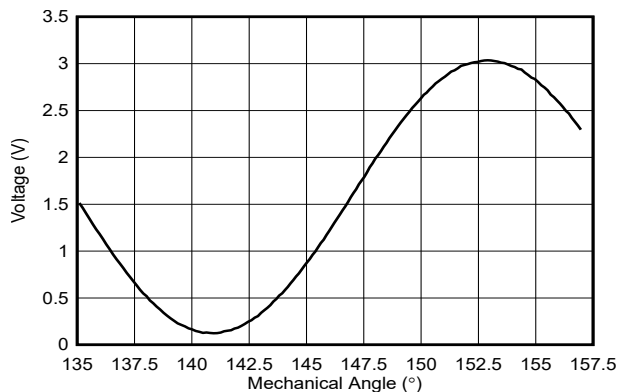


图 4-4. 一个电周期内的正弦信号

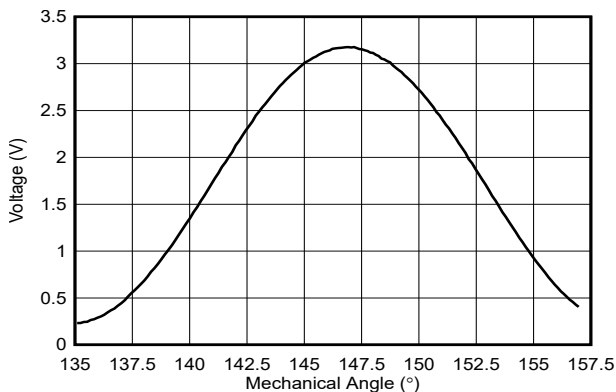


图 4-5. 一个电周期内的余弦信号

下图展示了在固定机械角度为 0.5 度时，正弦与余弦信号的噪声分布及其直方图。为进行信号分析，在外圈与内圈正弦、余弦信号上以 32kHz 采样率、8 倍过采样方式采集了 2000 个样本。

表 4-4 展示了标准差、信噪比 (SNR) 和有效位数 (ENOB) 随满量程范围的变化关系。绝对角度位置数据由外圈线圈在启动阶段检测获得，内圈噪声对最终精度无影响。

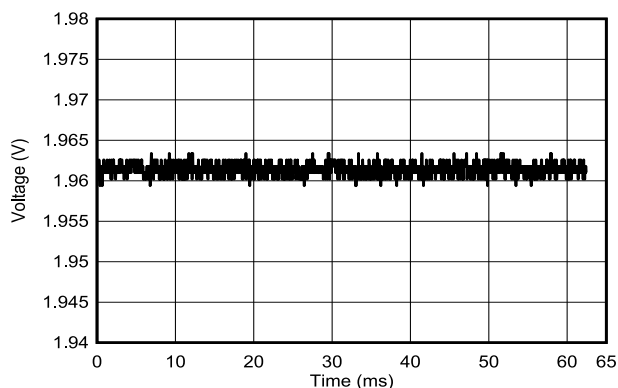


图 4-6. 0.5 度时外线圈正弦信号

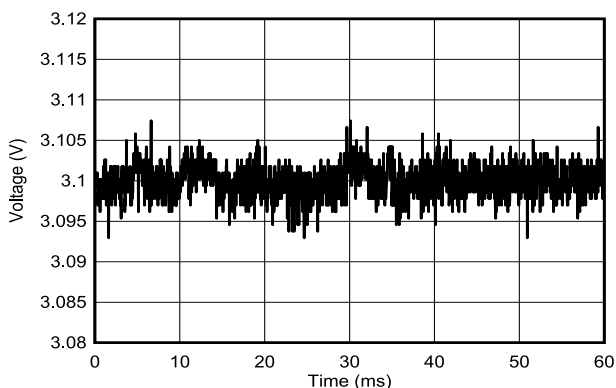


图 4-7. 0.5 度时外线圈余弦信号

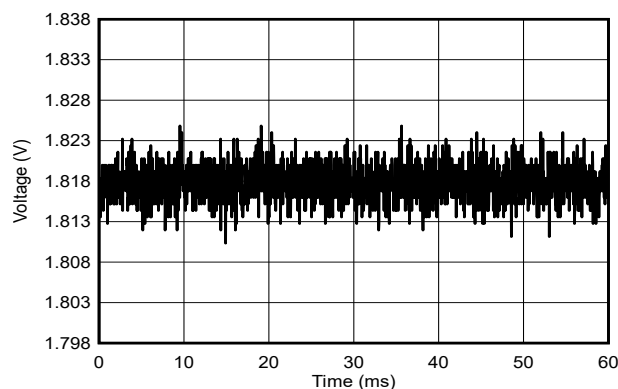


图 4-8. 0.5 度时内线圈正弦信号

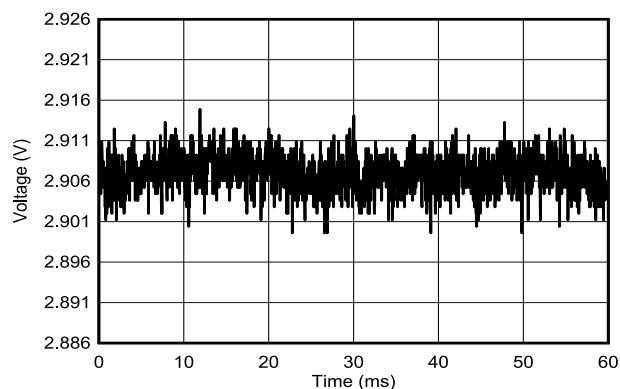


图 4-9. 0.5 度时内线圈余弦信号

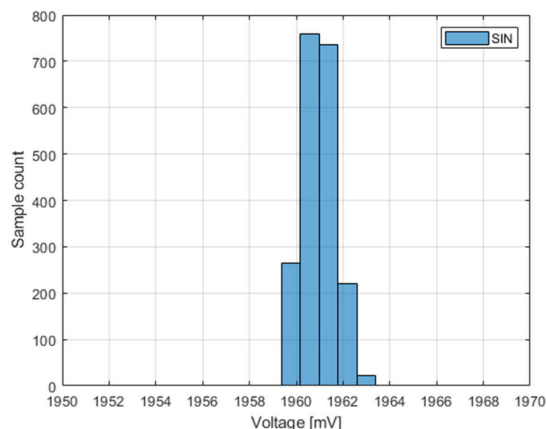


图 4-10. 外线圈正弦信号直方图

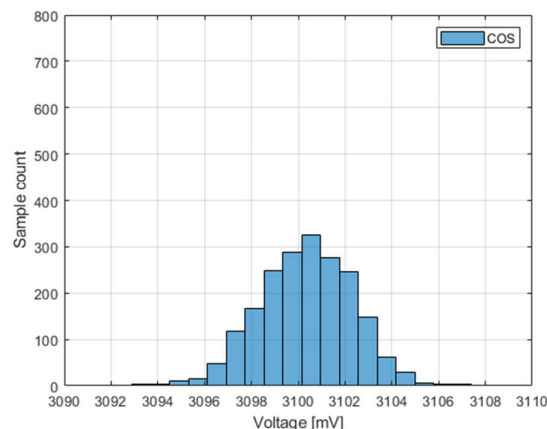


图 4-11. 柱外线圈余弦信号直方图

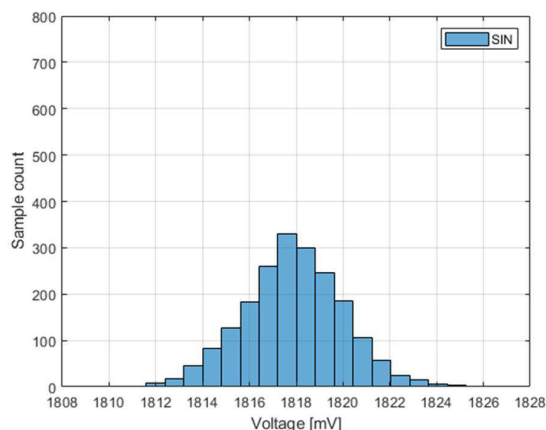


图 4-12. 内线圈正弦信号直方图

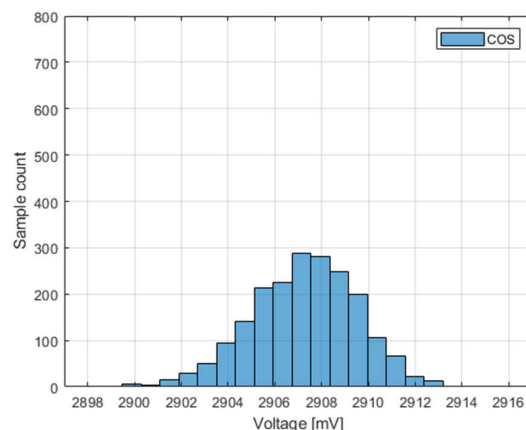


图 4-13. 内线圈余弦信号直方图

表 4-4. 标准差、SNR 及 ENOB 随 MSPM0 ADC 满量程范围的变化关系

参数	外线圈正弦信号	外线圈余弦信号	内线圈正弦信号	内线圈余弦信号
正弦/余弦振幅 (V)	1.45			
标准差 (mV)	0.73	2.00	2.13	2.24
SNR (dB)	66.0	57.2	56.7	56.2
ENOB (位)	10.66	9.21	9.12	9.05

4.4.2 绝对角度噪声测量

此项测试中，机械角度固定为 5.1 度。角度数据以 16kHz 采样率读取。分析过程中，共采集了 2000 个样本。图 4-14 和图 4-15 分别显示了时域噪声及其分布直方图。

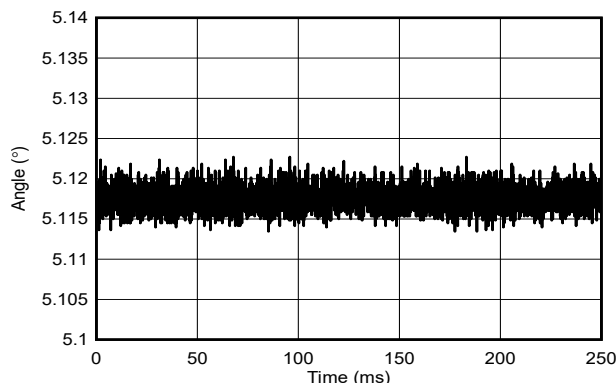


图 4-14. 5.1 度时的静态角度 (16kHz 采样率下采集 2000 个样本)

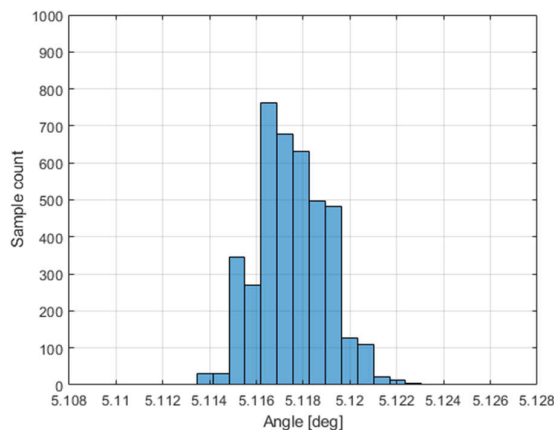


图 4-15. 5.1 度时的角度直方图

表 4-5 展示了全量程位置测量范围内对应的标准差及 ENOB。

表 4-5. 5.1 度静态机械角度时的标准差、SNR 和 ENOB

参数	绝对角度	注释
标准差 (度)	0.0015	RMS
SNR (dB)	101.6	$SNR = 20 \times \log_{10} (\pm 180^\circ / STDEV)$
ENOB (位)	16.6	$ENOB = (SNR - 1.76) / 6.02$

在后续测试中，角度以 22.5° 为间隔变化，以验证覆盖所有 16 个电周期 (即一整圈) 的噪声基底。在八个电周期中，每个电周期都没有发现显著差异。静态角度噪声的峰峰值约为 0.02 度，最大值出现在 225 度位置。

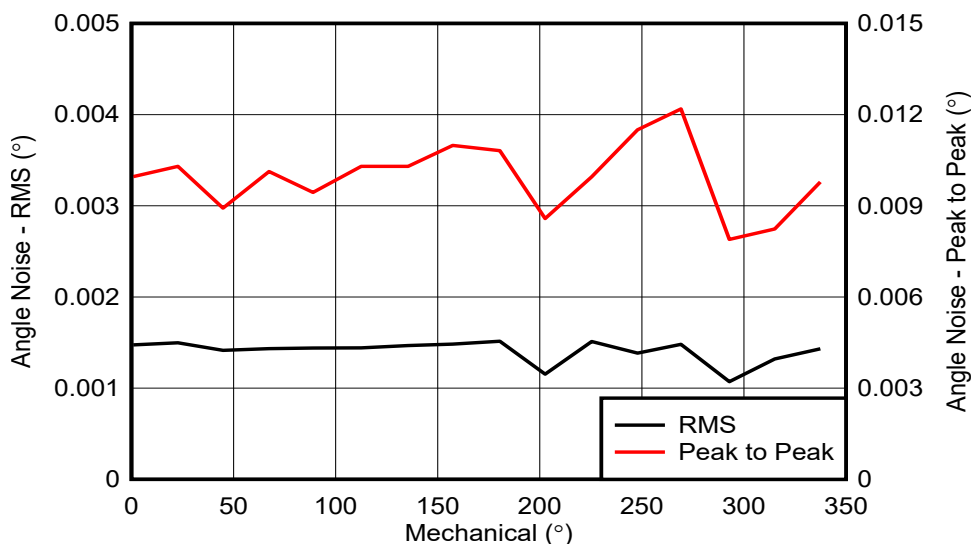


图 4-16. 旋转一周过程中的静态角度噪声

以下测试用于分析静态噪声与气隙的关系。

随着气隙增大，目标板中产生的涡流减弱，接收线圈的输出信号幅度降低，导致角度噪声增大，编码器分辨率相应下降。当气隙增至 1.5mm 时，因接收线圈信号过弱，内线圈上的 LDC5072 器件会进入故障模式。这样就无法计算出绝对位置，因此需要保持气隙小于 1.5mm。

表 4-6. 外线圈角度噪声与气隙间的关系

气隙 (mm) ⁽¹⁾	0.5 (默认值)	0.8	1.2	1.5
静态角度噪声 (1σ) (度)	0.0015	0.0023	0.0025	0.0048

(1) 气隙是指目标板顶部与线圈板底部之间的距离。

4.4.3 旋转角度精度测量

本节测试电机以 30rpm 恒速运行时的角度精度。主机控制器以 16kHz 频率发送位置数据请求命令，并同步采集参考编码器与 TIDA-010961 的同步位置数据时间。然后，将参考编码器角度与电感式编码器角度进行对比分析。气隙设定为默认值 0.5mm。单圈旋转共采集 2500 个角度样本。

图 4-17 和图 4-18 展示了经偏移和增益校准后的机械角度误差。

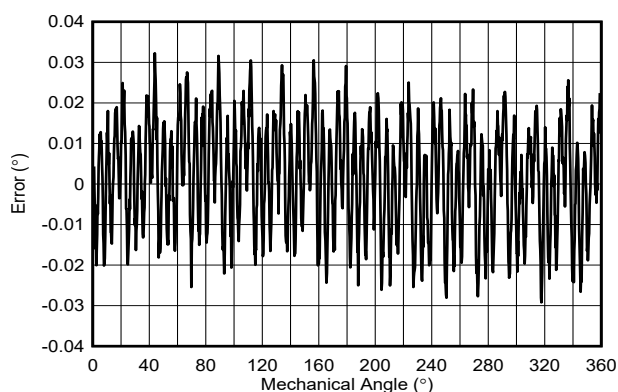


图 4-17. 在 25°C 环境下经偏移和增益校准后、一个机械周期内的旋转角精度

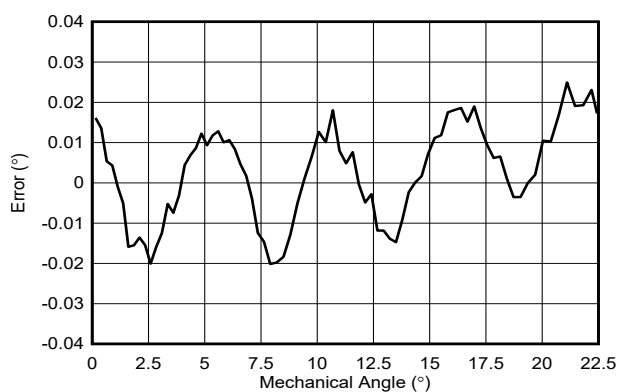


图 4-18. 在 25°C 环境下经偏移和增益校准后、一个电周期内的旋转角精度

在重复性测试中，采用相同校准参数对角度数据进行两次采集。图 4-19 展示了校准后、两个周期的误差结果。周期 1 与周期 2 的数据曲线几乎完全重合，表明 TIDA-010961 具有可靠的重复性。

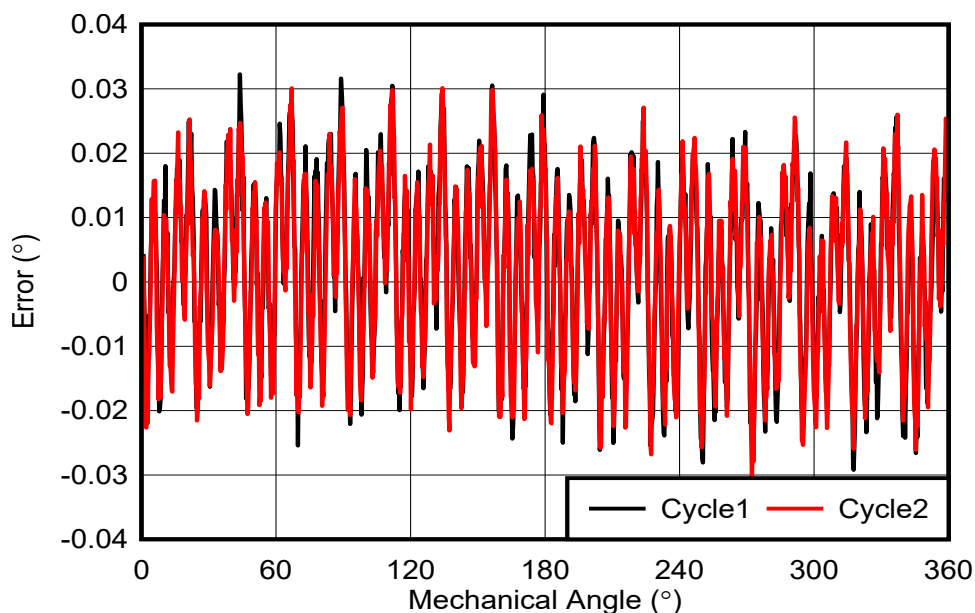


图 4-19. 在 25°C 环境下经偏移和增益校准后的旋转角精度 (重复测试运行)

4.4.4 气隙对噪声、四次电谐波及整体角度精度的影响

随着气隙增大，励磁线圈产生的电磁场减弱，导致 LDC5072 噪声升高。本节分析气隙对 TIDA-010961 的影响。通过使用不同的电机轴适配器，将气隙控制在 0.5mm 至 1.2mm 范围内。重复本节所述测试流程。图 4-20 到图 4-25 展示了测试结果。

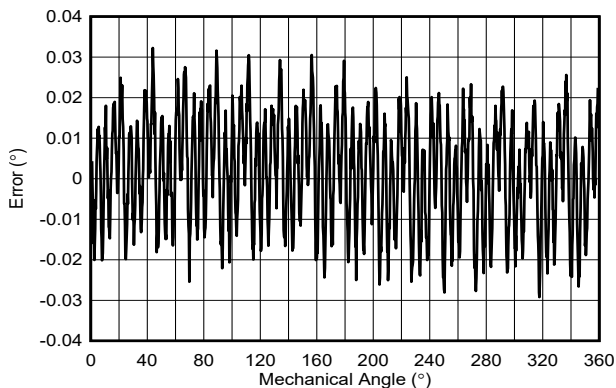


图 4-20. 0.5mm 气隙下、一个机械周期内的旋转角度精度

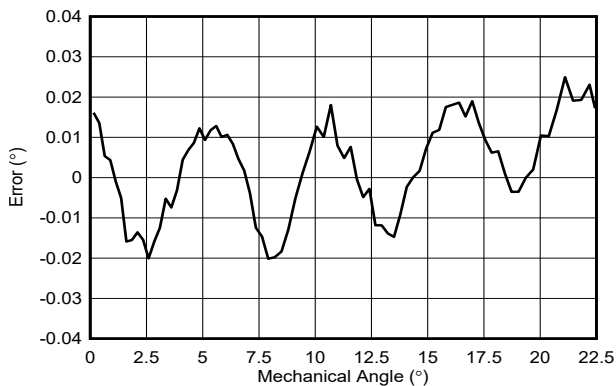


图 4-21. 0.5mm 气隙下、一个电周期内的旋转角度精度

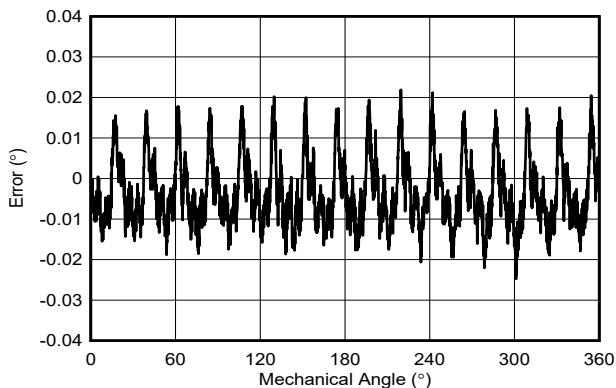


图 4-22. 0.8mm 气隙下、一个机械周期内的旋转角度精度

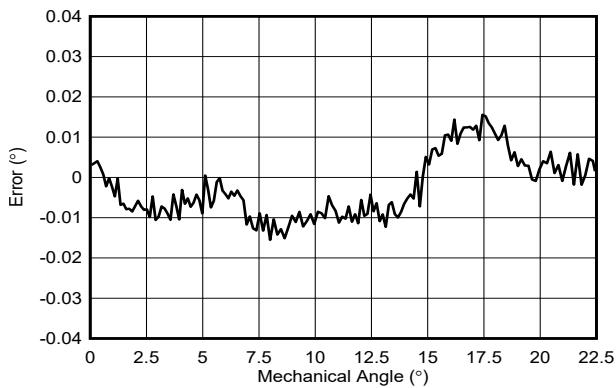


图 4-23. 0.8mm 气隙下、一个电周期内的旋转角度精度

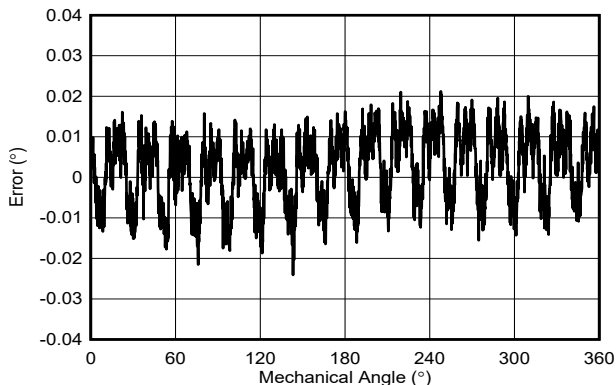


图 4-24. 1.2mm 气隙下、一个机械周期内的旋转角度精度

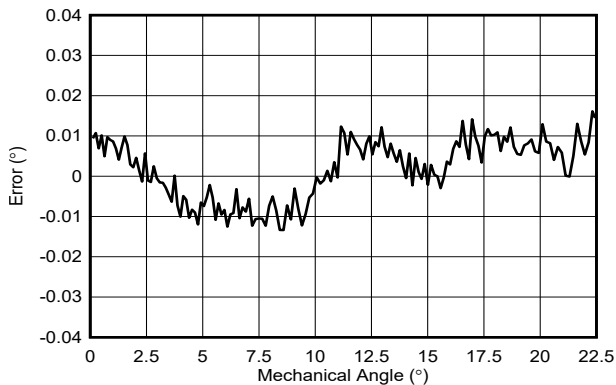


图 4-25. 1.2mm 气隙下、一个电周期内的旋转角度精度

在不同气隙下，角度误差均低于 ± 0.04 度。此外，一个电周期的旋转角度精度图显示了谐波随气隙的变化。

通过 FFT 分析进一步研究气隙对谐波的影响。结果见表 4-7。气隙越小，四次谐波就越大。但随着气隙增大，静态噪声会升高，而四次谐波误差会减小。编码器分辨率和编码器精度之间需要进行权衡。

表 4-7. 电角度中的谐波

气隙	静态噪声 (度) ⁽¹⁾	一次谐波 (度) ⁽²⁾	二次谐波 (度) ⁽²⁾	四次谐波 (度) ⁽²⁾
0.5mm	0.0015	0.0068	0.0043	0.0110
0.8mm	0.0023	0.0085	0.0042	0.0039
1.2mm	0.0025	0.0080	0.0045	0.0038

(1) 所有数据均为 1 Σ RMS 值

(2) 谐波阶次均相对于电周期

4.4.5 功耗测量

将编码器连接至 12V 电源，并记录其整体电流消耗。

测得在 12V 供电下的电流消耗为 39mA。该数值同时包含了线圈部分以及整个信号链所有芯片的功耗。旋转变压器与电感编码器工作原理相似，均需注入励磁信号，但旋转变压器通常需要更高的励磁电流，范围在 40mA 至 200mA 之间。因此，在功耗方面，电感编码器相比旋转变压器具有显著优势。

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-010961](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单，请参阅 [TIDA-010961](#) 中的设计文件。

5.1.3 PCB 布局

要下载 PCB 布局，请查看 [TIDA-010961](#) 中的设计文件。

5.1.4 Altium 工程文件

要下载 Altium Designer® 文件，请参阅 [TIDA-010961](#) 中的设计文件。

5.1.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-010961](#) 的设计文件。

5.1.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010961](#) 的设计文件。

5.2 工具与软件

LDC507x 传感器设计工具 LDC5072X 设计工具是一种强大的资源，可加速电感式 PCB 传感器的设计和实现，从而使用 LDC5072-Q1 监测电机位置。

MSPM0-SDK MSPM0 SDK 通过单个软件包提供软件、工具和文档的精选集合，可以加快 MSPM0 MCU 平台应用程序的开发。

5.3 文档支持

1. 德州仪器，《电机控制中位置传感器的选型模拟设计期刊》
2. 德州仪器，《AMR 角度传感器校准应用报告》
3. 德州仪器，《实现更高系统角度检测精度应用笔记》
4. 德州仪器，《采用 AMR 传感器的高分辨率、低延迟、紧凑型绝对角度编码器参考设计》
5. 德州仪器，《用于集成电机驱动的 48V/85A 小尺寸三相逆变器参考设计》。
6. 德州仪器，《TMS320F28003x 实时微控制器技术参考手册》。

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](#)。

商标

TI E2E™ and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of ARM Limited.

are registered trademarks of Arm Limited.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

YUFENG ZHANG 现任德州仪器工业系统电机驱动团队系统工程师，主要负责工业应用定制驱动部件与组件的规格制定与开发工作。

MARTIN STAEBLER 现任德州仪器工业系统电机驱动团队高级技术专家，主要负责工业应用定制驱动部件与组件的规格制定与开发工作。

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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月