

Application Note

使用 **TMCS2100-Q1** 电流传感器进行三相系统线路结束校准



Levi DeVries, Current Sensing Applications

摘要

TMCS2100-Q1 环境磁场传感器可通过三相系统中的电流测量组合磁场。器件由用户进行预编程，在表征期间根据特定的汇流条几何形状调整相应的值。最终组装中的制造公差会改变传感器相对于汇流条的位置，从而在传感器输出中引入振幅误差，这些误差可以在生产线上解决。本应用手册介绍了用于测量制造流程中单位误差的下线 (EOL) 校准程序，以及如何通过调整增益 2 和频率补偿寄存器值来校正这些单位误差。

内容

1 简介.....2

2 误差测量.....3

 2.1 概述.....3

 2.2 平衡三相校准.....3

 2.3 串扰矩阵校准.....5

 2.4 成对相注入校准.....9

 2.5 方法比较.....11

3 灵敏度调整程序.....12

 3.1 公式.....12

 3.2 计算示例.....12

 3.3 频率补偿值调整.....12

 3.4 GUI 计算器.....13

4 故障排查.....16

5 总结.....17

6 参考资料.....18

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

TMCS2100-Q1 是一款专为隔离式汇流条电流测量而设计的环境磁场传感器。在三相汽车逆变器中，每个相汇流条附近安装了一个传感器对。由于传感器对所有环境磁场（而不仅仅是来自目标汇流条的磁场）都很敏感，因此每个传感器也会拾取两个相邻汇流条产生的一部分磁场。这种相邻汇流条的影响称为串扰。

在逆变器达到行结束 (EOL) 测试之前，每个 TMCS2100-Q1 器件都已使用从参考机械组件得出的表征增益值（增益 1、增益 2 和极性寄存器值）进行编程。这些值根据预期的汇流条几何形状进行调整，以更大限度地减少随频率变化的串扰、相和振幅误差。但是，制造容差（包括传感器放置、汇流条位置和传感器增益的微小变化）会导致实际磁耦合与表征参考单元略有不同。结果是振幅误差：三相运行期间的传感器输出可能会略高于或低于首选输出。

EOL 校准会测量每个器件上的此误差，并通过修整器件增益 2 寄存器来校正误差。目标是尽可能减小组合场输出（当所有三个相承载电流时传感器看到的信号）的振幅误差，而不是单个汇流条响应。这反映了系统的真实工作条件，包括信号链中仍然存在的任何串扰。

本文档不涉及直流偏移校准的主题。直流校准无法在传感器级别解决，但必须通过系统设计或数字校准来解决。

2 误差测量

2.1 概述

此处介绍了三种不同的方法，用于测量应用中预期的完整传感器误差 (图 2-1)。平衡三相校准部分所述的第一种方法直接在正常工作条件下测试传感器，方法是将输入电流波形复制并计算误差参考值。第二种方法，可在串扰矩阵校准部分找到，通过使用串扰矩阵线性组合组件信号来计算在操作中看到的组合信号。配对相注入校准部分中概述的第三种方法通过测量流经三相系统一个桥臂并返回另一个桥臂的电流信号来计算组合信号；根据这些测量结果，可以计算组合信号。所有三种方法的摘要比较见方法比较部分。

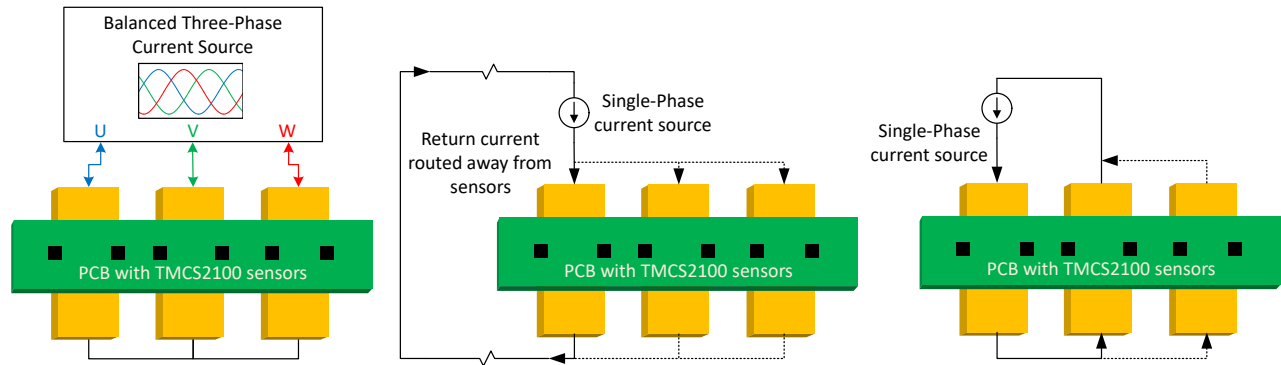


图 2-1. 不同误差测量方法概述

2.1.1 测量精度

校准期间所用测量的精度会限制校准的精度，因此在测量输入电流和器件输出时，必须使用适当的测量技术。关于测量精度的全面讨论超出了本文档的讨论范围，但本文介绍了一系列相关的最佳实践。

2.1.1.1 失调电压消除

必须在测量中消除传感器偏移，以确保增益校准不会无意中校正偏移误差，从而导致更高的增益误差。偏移可以通过测量偏移并将值保存为稍后从测量的校准值中减去来数字消除。或者，测量可以在本身抑制失调的方式进行，例如测量峰峰值信号或应用傅里叶变换并检查输入信号频率的幅度。

2.1.1.2 信号幅度

为了向 TMCS2100-Q1 提供足够大的信号以克服噪声和残留失调电压影响，TI 建议使用至少为器件输出满量程范围 (FSR) 10% 的校准信号。更大的电流可提供更高的精度。此外，运行时使用低满量程范围的设计可能需要提供更大的电流以提高 SNR。

2.2 平衡三相校准

这种方法将平衡（零和）三相正弦电流应用于被测汇流条系统，并直接测量该情况下的 TMCS2100-Q1 振幅误差 (图 2-2)。由于传感器在测量过程中完全体验预期的工作环境，因此结果直接代表了要校正的误差。这种方法对于具有三相电流源且必须尽可能缩短测试时间的生产站是实用的。

TMCS2100-Q1 中的频率补偿旨在使振幅响应在整个频率范围内保持平坦，因此输入电流的频率理论上可以是工作范围内的任何频率，而不会影响校准的有效性。但是，机械变化可能会对振幅随频率变化产生二阶影响，因此 TI 建议在工作范围中心测量误差。

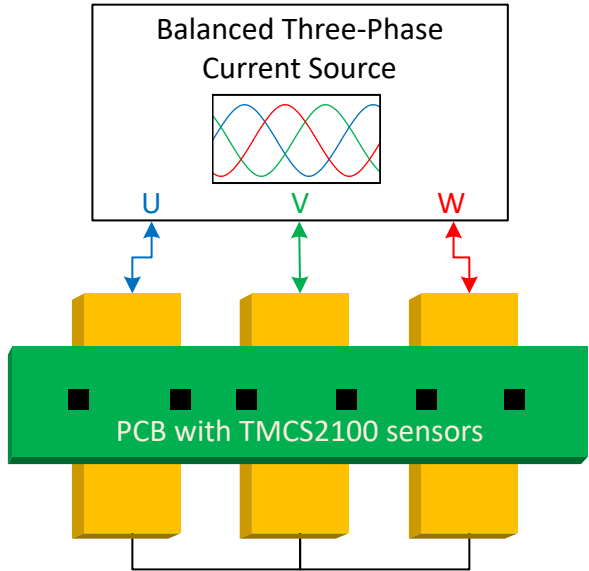


图 2-2. 平衡三相电流连接图

2.2.1 设备要求

备注

如果逆变器驱动硬件可用并可在 EOL 下控制，则逆变器可用作三相电流源，无需外部激励设备。

条目	要求
三相电流源	连接到适当的负载时提供平衡的正弦输出
平衡负载	匹配拉电流电源输入的三相电阻或 RL 负载；也可以同步电子负载
基准电流传感器	每相一个；精度 $\leq 0.1\%$
TMCS2100-Q1 编程接口	通过 I ² C 访问所有 TMCS2100-Q1 器件

2.2.2 测试配置

- 通过平衡负载将三相源连接到逆变器汇流条系统。
- 将一个基准电流传感器测量每个相导体，远离 TMCS2100-Q1 传感器。
- 连接 TMCS2100-Q1 编程接口，并将初始寄存器值编程到所有传感器，包括任何频率补偿值。
- 设置源参数：

参数	值
相位	电流相角必须使用相同的相换向顺序与终端应用的相角匹配
频率	标称工作范围的中心
振幅	至少 10% 的 FSR

2.2.3 校准过程

- 采集振幅数据：在标称测试电流下激活平衡三相励磁时，可同时从 TMCS2100-Q1 差分输出和基准电流传感器捕获数据。

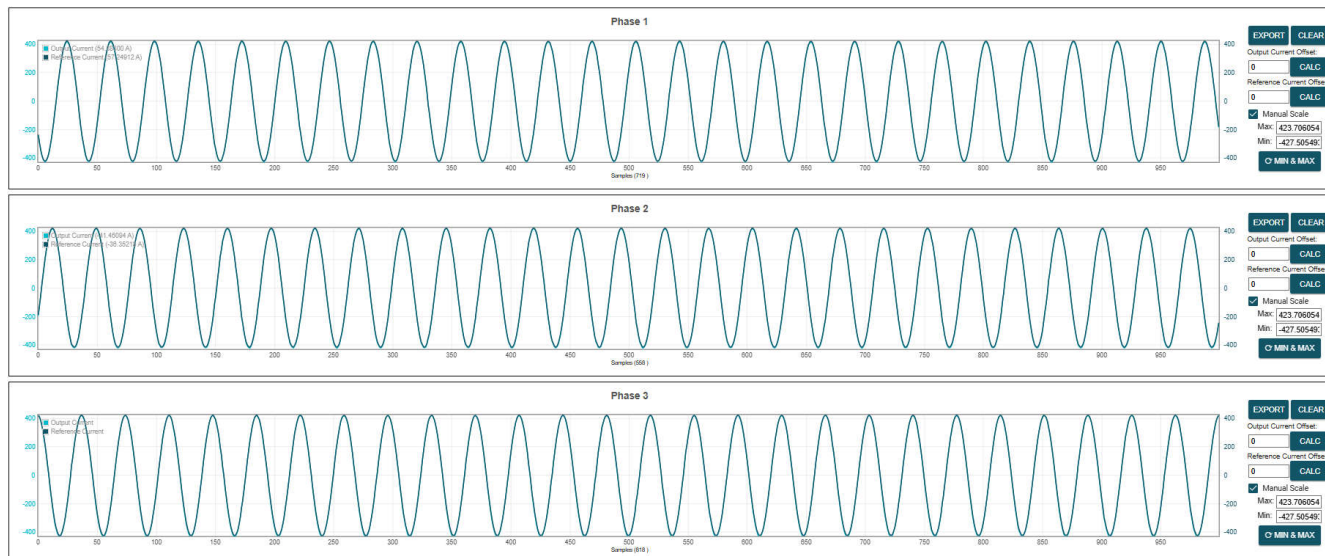


图 2-3. 使用 TMCS2100 表征板 GUI 进行三相数据采集

2. 计算预期输出并计算振幅误差：

$$V_{\text{expected}} = I_{\text{ref}} \times S_{\text{ideal}} \quad (1)$$

其中 S_{ideal} 是表征期间建立的表征或标称灵敏度 (V/A)。

$$\text{Error}(\%) = \frac{V_{\text{measured}} - V_{\text{expected}}}{V_{\text{expected}}} \times 100 \quad (2)$$

正值表示灵敏度高于标称值；负值表示灵敏度低于标称值。

3. 应用增益校准：

- 使用节 3.1 计算主传感器和辅助传感器的 C_{new} 。
- 使用节 3.3 计算两个传感器的更新频率补偿代码。
- 使用新的器件值对 TMCS2100-Q1 传感器进行编程。

2.3 串扰矩阵校准

这种方法通过一次为一个相通电并测量所有三个 TMCS2100-Q1 传感器响应 (I) 来单独描述每个汇流条的特性。九个测得的灵敏度构成了一个串扰矩阵，从中以数学方式计算平衡三相运行下的振幅误差，甚至没有同时应用所有三个相。这种方法对于只有单相直流电流源可用的生产站很实用，还会生成详细的每相诊断信息，而同时施加三相信号则不会提供这些信息。此外，该方法产生的串扰矩阵可在应用程序固件中用于消除运行时的残余串扰，从而提供比单独增益 2 校准更高的精度 (请参阅节 2.3.5)。

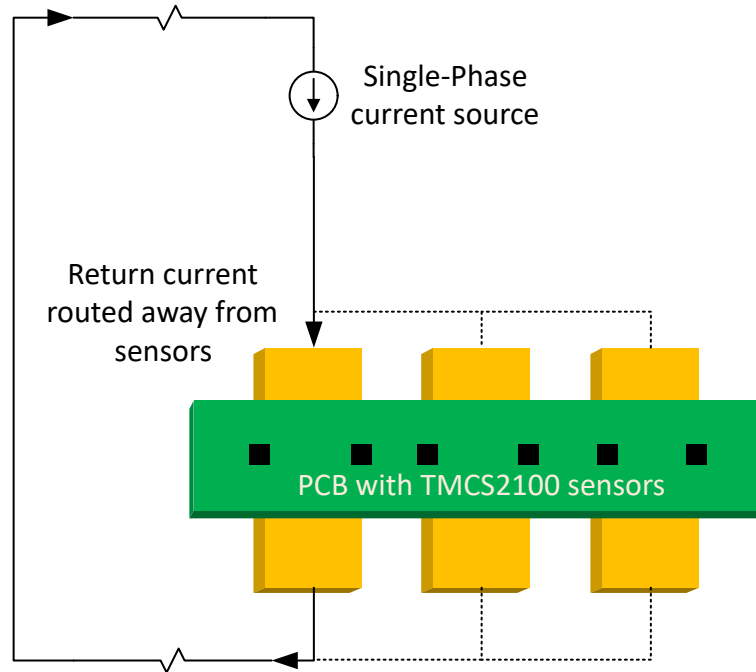


图 2-4. 用于提取串扰矩阵的单相连接图

2.3.1 理论基础

本节确立了单相灵敏度测量值与组合场振幅误差之间的数学关系，为误差计算奠定了基础。

2.3.1.1 串扰模型

每个传感器输出都是三个相字段的线性叠加：

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} & S_{AC} \\ S_{BA} & S_{BB} & S_{BC} \\ S_{CA} & S_{CB} & S_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

每个矩阵元件 S_{XY} 是以 V/A 为单位测量的灵敏度，定义为：

$$S_{XY} = \frac{V_X}{I_Y} \quad (4)$$

也就是说，当只有汇流条 Y 承载电流时，传感器 X 输出与汇流条 Y 中的电流之比。对角元素 S_{AA} 、 S_{BB} 和 S_{CC} 是直接灵敏度；偏对角元素代表串扰灵敏度。偏对角元素可以是正的或负的，具体取决于几何形状。

2.3.1.2 单相激励的矩阵填充

一次为一个汇流条通电并测量所有三个传感器响应，每次测试可得到一系列 $[S]$ ：

表 2-1.

激励相	测量	灵敏度已确定
仅 A	V_A, V_B, V_C 电流 I_A	$S_{AA} = V_A / I_A$ $S_{BA} = V_B / I_A$ $S_{CA} = V_C / I_A$

表 2-1. (续)

激励相	测量	灵敏度已确定
仅 B	V_A, V_B, V_C 电流 I_B	$S_{AB} = V_A / I_B$ $S_{BB} = V_B / I_B$ $S_{CB} = V_C / I_B$
仅限 C	V_A, V_B, V_C 电流 I_C	$S_{AC} = V_A / I_C$ $S_{BC} = V_B / I_C$ $S_{CC} = V_C / I_C$

2.3.1.3 平衡运行下的组合场振幅

对于振幅为 I_0 的平衡三相电流，每个传感器的组合场灵敏度可通过测量的元件灵敏度计算如下。

A 相：

$$S_{\text{Total}, A} = \frac{|V_A|}{I_0} = \sqrt{\left(S_{AA} - \frac{1}{2}S_{AB} - \frac{1}{2}S_{AC}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{AB} - S_{AC})^2} \quad (5)$$

B 相：

$$S_{\text{Total}, B} = \frac{|V_B|}{I_0} = \sqrt{\left(S_{BB} - \frac{1}{2}S_{BA} - \frac{1}{2}S_{BC}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{BA} - S_{BC})^2} \quad (6)$$

C 相：

$$S_{\text{Total}, C} = \frac{|V_C|}{I_0} = \sqrt{\left(S_{CC} - \frac{1}{2}S_{CA} - \frac{1}{2}S_{CB}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{CA} - S_{CB})^2} \quad (7)$$

备注

推导说明：这些表达式是相量增加三个正弦分量产生的。

X 相的振幅误差为：

$$\text{Error}_X(\%) = \frac{S_{\text{Total}, X} - S_{\text{Ideal}, X}}{S_{\text{Ideal}, X}} \times 100 \quad (8)$$

其中 $S_{\text{Ideal}, X}$ (以 V/A 为单位) 是 X 相的理想灵敏度。

2.3.2 设备要求

条目	要求
单相电流源	可调交流或直流电流源，能够产生至少 10% 的 FSR 电流
相切换装置	继电器矩阵或手动接插板按顺序将电路路由至每个汇流条；在每次测试期间，非通电相必须打开
基准电流传感器	一个传感器与源串联使用；测量精度 $\leq 0.1\%$
TMCS2100-Q1 编程接口	I ² C 可访问所有 TMCS2100-Q1 器件

2.3.3 校准过程

1. 激活阶段 A：测量矩阵列 1

- 通过 A 相汇流条路由测试电流。B 相和 C 相必须断开且无电流。
- 同时获取全部三个 TMCS2100-Q1 差分输出： V_A 、 V_B 和 V_C 。
- 记录基准电流： I_A 。
- 计算不同器件灵敏度： $S_{AA} = V_A / I_A$ ， $S_{BA} = V_B / I_A$ ， $S_{CA} = V_C / I_A$

2. 对 B 相和 C 相重复步骤一。

3. 计算合成场幅度误差：应用节 2.3.1.3 中的公式计算 S_{Total} 值，并将各相的 S_{Total} 与 S_{Ideal} 进行比较。

4. 应用增益校准

- 使用节 3.1 计算主传感器和辅助传感器的 C_{new} 。
- 使用节 3.3 计算两个传感器的更新频率补偿代码。
- 使用新的器件值对 TMCS2100-Q1 传感器进行编程

2.3.4 工作示例

设置：测试电流 $I_{test} = 50A$ ；表征灵敏度 $S_{ideal} =$ 所有相 $0.0500V/A$ 。

测量的矩阵元素（每个 $S_{XY} = V_X / I_Y$ ，单位 V/A ）：

表 2-2.

	汇流条 A 电流	汇流条 B 电流	汇流条 C 电流
传感器 A	$S_{AA} = 0.0490$	$S_{AB} = 0.0024$	$S_{AC} = -0.0036$
传感器 B	$S_{BA} = 0.0030$	$S_{BB} = 0.0504$	$S_{BC} = 0.0040$
传感器 C	$S_{CA} = -0.0040$	$S_{CB} = 0.0036$	$S_{CC} = 0.0496$

A 相组合场增益：

$$|V_A|/I_0 = \sqrt{(0.0490 - 0.0012 + 0.0018)^2 + 0.75 \times (0.0024 + 0.0036)^2} = \sqrt{(0.0496)^2 + 0.75 \times (0.0060)^2} \quad (9)$$

$$= \sqrt{0.002460 + 0.000027} = 0.04987V/A$$

A 相误差：

$$Error_A = \frac{0.04987 - 0.0500}{0.0500} \times 100 = -0.26\% \quad (10)$$

应用于相 B 和 C 的相同计算使用 [S] 中相应的对角线和对角线元素。确定所有三个相的误差后，将节 3.1 中的增益 2 校正公式应用于每个传感器的初级和次级传感器，并可选择重复矩阵测量以验证结果。

2.3.5 运行时串扰消除

由于串扰矩阵校准方法表征了每个汇流条与每个汇流条上传感器之间的耦合，因此串扰矩阵 [S] 可用于在运行时实施基于软件的串扰补偿，以牺牲处理时间为代价提供更高的精度。

节 2.3.1.1 提供：

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

对该关系式求逆，即可从传感器输出中还原出真实的相电流：

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $[S]^{-1}$ 是测量串扰矩阵的反向矩阵。假设所有三个传感器输出同时进行测量，该操作会在缓解串扰的情况下产生三相电流。

2.3.5.1 实现

- 调整校准值的 [S]：EOL 校准完成后，必须调整 [S] 中的传感器灵敏度以匹配新的校准传感器灵敏度。对于 [S] 的每一行，传感器灵敏度必须通过针对相应汇流条测量的误差量来降低。
- 预计算 $[S]^{-1}$ ：调整校准值的 [S] 后，在测试站主机上计算 [S] 的矩阵逆函数。每台装置只需执行一次计算。
- 存储九个系数：将 $[S]^{-1}$ 的元素编程到微控制器上的内存中。这些是特定于单位的串扰消除值。

4. 在运行时应用：对于每个测量周期、将三个传感器输出乘以 $[S]^{-1}$ 可获得补偿后的相电流。这需要在每个周期使用全部三个传感器输出进行九次乘法累加运算。

2.4 成对相注入校准

此方法使用更常用的线对线注射方案 (图 2-5)。直流测试电流被驱动到一个相汇流条并通过另一个相汇流条返回，第三个汇流条保持开路。在多个相对中重复此操作（每个相对都在两个电流方向上以消除偏移），可提供足够的信息来计算标称三相运行条件下的组合场振幅误差。

与节 2.3 中所述的方法一样，该方法通过分析方法计算平衡误差，只需要一个单相直流电源；与节 2.3 中不同，电流流经逆变器，而无需外部返回路径。代价是各个串扰矩阵元件无法从配对相数据中恢复，因此无法进行如节 2.3.5 中所示的运行补偿。

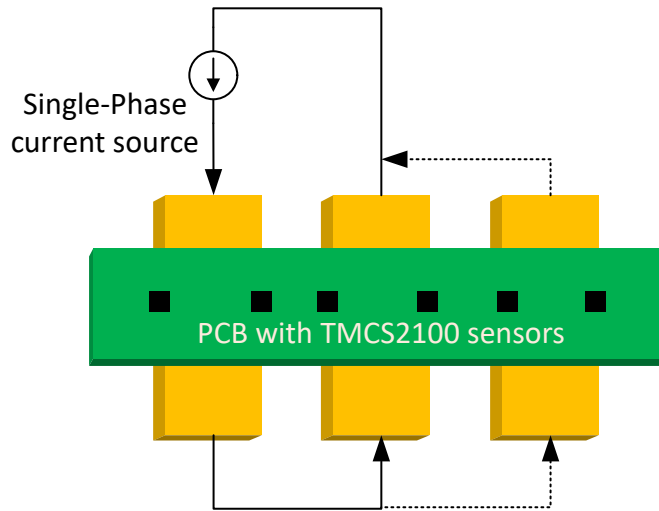


图 2-5. 配对相电流注入

2.4.1 理论基础

每个线间注入都会在两个汇流条中驱动相等且相反的电流 I 。测量此信号产生的电压可用以下公式表示，其中 A 相和 B 相分别作为正向电流和返回电流的示例：

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} & S_{AC} \\ S_{BA} & S_{BB} & S_{BC} \\ S_{CA} & S_{CB} & S_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} & S_{AC} \\ S_{BA} & S_{BB} & S_{BC} \\ S_{CA} & S_{CB} & S_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ -I \\ 0 \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} S_{AA} - S_{AB} \\ S_{BA} - S_{BB} \\ S_{CA} - S_{CB} \end{bmatrix} \quad (13)$$

因此，我们可以计算每个汇流条传感器对从一个汇流条流向另一个汇流条的电流的灵敏度（对于汇流条 A 与从 A 流向 B 的电流的灵敏度，表示为 $S_{A,A \rightarrow B}$ ）：

$$\begin{bmatrix} S_{A,A \rightarrow B} \\ S_{B,A \rightarrow B} \\ S_{C,A \rightarrow B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{A,A \rightarrow B} \\ V_{B,A \rightarrow B} \\ V_{C,A \rightarrow B} \end{bmatrix} \div I_{A \rightarrow B} = \begin{bmatrix} S_{AA} - S_{AB} \\ S_{BA} - S_{BB} \\ S_{CA} - S_{CB} \end{bmatrix} \quad (14)$$

等效于其他两个连接的电流流动：

$$\begin{bmatrix} s_{A,A \rightarrow C} \\ s_{B,A \rightarrow C} \\ s_{C,A \rightarrow C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} - S_{AC} \\ S_{BA} - S_{BC} \\ S_{CA} - S_{CC} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} s_{A,B \rightarrow C} \\ s_{B,B \rightarrow C} \\ s_{C,B \rightarrow C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AB} - S_{AC} \\ S_{BB} - S_{BC} \\ S_{CB} - S_{CC} \end{bmatrix} \quad (16)$$

现在，回顾节 2.3.1.3 中的公式，估算汇流条对平衡三相电流的总灵敏度：

$$S_{Total,A} = \sqrt{\left(S_{AA} - \frac{1}{2}S_{AB} - \frac{1}{2}S_{AC}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{AB} - S_{AC})^2} \quad (17)$$

使用测量的 $s_{A,A \rightarrow B}$ 、 $s_{A,A \rightarrow C}$ 和 $s_{A,B \rightarrow C}$ ，方程可以改写为：

$$S_{Total,A} = \sqrt{\left(\frac{s_{A,A \rightarrow B} + s_{A,A \rightarrow C}}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}(s_{A,B \rightarrow C})^2} \quad (18)$$

也就是说，可以计算传感器对平衡三相信号的总灵敏度。

2.4.2 设备要求

条目	要求
单相电流源	能够提供至少 10% TMCS2100-Q1 满量程的直流电源
线对线布线装置	意味着在第三个汇流条断开的情况下，将电源连接到选定的一对汇流条（电流下降一个，通过另一个返回）之间。
基准电流传感器	一个传感器与信号源串联；精度 $\leq 0.1\%$
TMCS2100-Q1 编程接口	通过 I ² C 访问所有 TMCS2100-Q1 器件

2.4.3 校准过程

通过在两个电流方向上驱动每个对并减去两个测量值，可以抑制偏移。请注意，在 *所有* 三个传感器通道上读取相同的三个电流路径；每个注入为每个传感器的误差计算贡献了一项。

- 将校准电流从 A 相传输至 B 相；读取所有传感器。
 - 在汇流条 A 下驱动 I_{test} 并通过汇流条 B 返回，汇流条 C 断开。
 - 同时测量全部三个 TMCS2100-Q1 差分输出： $V_{A,A \rightarrow B}$ 、 $V_{B,A \rightarrow B}$ 、 $V_{C,A \rightarrow B}$ 和基准电流 $I_{A \rightarrow B}$ 。
 - 反转极性（ I_{test} 从 B 端流入，经 A 端返回）并测量 $V_{A,B \rightarrow A}$ 、 $V_{B,B \rightarrow A}$ 、 $V_{C,B \rightarrow A}$ 和 $I_{B \rightarrow A}$ 。
 - 对于每个传感器 X，计算偏移抵消响应：

$$s_{X,A \rightarrow B} = \frac{V_{X,A \rightarrow B} - V_{X,B \rightarrow A}}{I_{A \rightarrow B} + I_{B \rightarrow A}} \quad (19)$$

- 对汇流条电流 $I_{A \rightarrow C}$ 和 $I_{B \rightarrow C}$ 重复步骤一，直到测量到所有灵敏度值 $s_{X,X \rightarrow X}$ 。
- 一致性检查（可选）：确认每个传感器的 $s_{X,A \rightarrow B} \cong s_{X,A \rightarrow C} - s_{X,B \rightarrow C}$ 。较大差异表示存在测量、布线、泄漏或线性问题。
- 计算组合场振幅误差：对于每个相，应用 方程式 18 可获得 S_{Total} 并与 S_{Ideal} 进行比较，以使用 方程式 8 得出误差百分比。
- 应用增益校准。对于每个相：
 - 使用节 3.1 计算主传感器和辅助传感器的 C_{new} 。
 - 使用节 3.3 计算两个传感器的更新频率补偿代码。
 - 使用新的器件值对 TMCS2100-Q1 传感器进行编程

2.5 方法比较

方法之间的选择主要取决于 EOL 站提供的测试设备。表 2-3 总结了主要差异。

表 2-3. 不同测量方法的比较

标准	平衡三相校准	串扰矩阵校准	成对相注入校准
电源设备	所需的三相源（建议使用逆变器）负载和源必须同时提供平衡的电流信号	单相 AC/DC 电流源足够	单相 AC/DC 电流源足够
每单位参考测量	每相一个（共 3 个）	如果其他相打开，则只需要一个基准测量	如果电流不流经开相，则只需要一次基准测量
错误类型	直接测量；不受非线性行为的影响	根据矩阵计算；假设为线性	根据对响应计算；假定为线性
运行时串扰补偿	不可用；未测量各个耦合系数	$[S]^{-1}$ 可计算并应用于固件以完全消除串扰 (节 2.3.5)	不可用；矩阵无法与成对数据隔离
推荐使用的场合	三相负载/源可用；吞吐量优先级	使用单相或直流负载；需要超低串扰；或需要每相诊断	在物理上无法实现单汇流条隔离的单相站

3 灵敏度调整程序

TMCS2100-Q1 灵敏度由四个可编程寄存器值控制：增益 1、增益 2 和极性位。在 EOL 校准期间，仅调整增益 2；不修改增益 1 和极性位。每个相都使用初级和次级 TMCS2100-Q1 传感器。在校准期间，两个器件必须更新各自的增益 2 值。仅对一个器件进行校准会导致传感器表征失真，无法正确校准器件。

8.2.2 MEM1 Register (Address = 0x11)

The Memory Register 1 is show below.

Table 8-12. MEM1 Register Field Descriptions

Bit	Field	Type	Description
15-14	OC_CONFIG	R/W	Register used to select the sensor channel for comparison or to disable the comparator for Over Current Detection Overcurrent Detection Configuration. 00b = Enable Sensor 1 01b = Enable Sensor 2 10b = Disable Comparator and Output 11b = Disable Comparator and Output
13-0	GAIN2	R/W	Gain Value for Gain 2

图 3-1. 数据表中的增益 2 寄存器值

3.1 公式

使用节 2 中的方法之一确定振幅误差后，新的增益 2 值计算如下：

$$C_{new} = C_{original} + 0.01 \times (C_{original} - 18687.13) \times \text{Error} \quad (20)$$

符号	定义
C_{new}	要编程到器件的新增益 2 值 (无符号整数，四舍五入为最接近的整数)
$C_{original}$	此调整之前的电流增益 2 代码
错误	有符号振幅误差，以百分比表示 (例如，灵敏度比标称值低 5% 时为 -5，灵敏度比标称值高 3% 时为 +3)

值 18687.13 是与器件内部增益相关的器件常量。

3.2 计算示例

给定预先编程的特性代码：初级增益 2 = 6062，次级增益 2 = 3160。

测得的振幅误差：-0.895%

主传感器：

$$C_{new} = 6062 + 0.01 \times (6062 - 18687.13) \times (-0.895) = 6062 + 113 = 6175 \quad (21)$$

辅助传感器：

$$C_{new} = 3160 + 0.01 \times (3160 - 18687.13) \times (-0.895) = 3160 + 139 = 3299 \quad (22)$$

对这两个值进行编程可校正 0.895% 下冲。

3.3 频率补偿值调整

TMCS2100-Q1 包含两个频率补偿值 *FREQ_SLP1* 和 *FREQ_SLP2*，它们在特定频率点应用增益校正来使传感器的频率响应变得平坦。存储在这些寄存器中的代码是最初使用表征的增益 2 代码计算的增量代码值 (方程式 20 中的第二项)。由于代码是相对于原始增益 2 值表示的，因此只要增益 2 作为 EOL 校准的一部分进行调整，就必须重新计算代码。

3.3.1 第 1 步：将频率补偿代码转换为误差百分比

对于每个频率补偿寄存器，使用预校准增益 2 代码 $C_{original}$ 恢复寄存器编码的误差百分比：

$$Error_{FS1} = \frac{FREQ_SLP1_{original}}{0.01 \times (C_{original} - 18687.13)} \quad (23)$$

对于与 $FREQ_SLP2$ 相关的误差，公式变为：

$$Error_{FS2} = \frac{FREQ_SLP2_{original}}{0.01 \times (C_{original} + FREQ_SLP1_{original} - 18687.13)} \quad (24)$$

3.3.2 第 2 步：计算新的频率补偿代码

替换新的 GAIN 2 代码 C_{new} 以获得更新的频率补偿代码：

$$FREQ_SLP1_{new} = 0.01 \times (C_{new} - 18687.13) \times Error_{FS1} \quad (25)$$

$$FREQ_SLP2_{new} = 0.01 \times (C_{new} + FREQ_SLP1_{new} - 18687.13) \times Error_{FS2} \quad (26)$$

在编程之前，将 $FREQ_SLPx_{new}$ 四舍五入到最接近的整数。

3.3.3 计算示例 (续) (针对频率补偿)

假设 $C_{original} = 6062$ ， $C_{new} = 6175$ ， $FREQ_SLP1_{original} = -92$ ， $FREQ_SLP2_{original} = -374$ ，首先计算频率补偿中使用的原始误差百分比：

$$Error_{FS1} = \frac{-92}{0.01 \times (6062 - 18687.13)} = 0.729\% \quad (27)$$

$$Error_{FS2} = \frac{-374}{0.01 \times (6062 - 92 - 18687.13)} = 2.94\% \quad (28)$$

然后，使用这些百分比来计算新的频率补偿寄存器值：

$$FREQ_SLP1_{new} = 0.01 \times (6175 - 18687.13) \times 0.729\% = -91 \quad (29)$$

$$FREQ_SLP2_{new} = 0.01 \times (6175 - 91 - 18687.13) \times 2.94\% = -371 \quad (30)$$

辅助传感器使用原始寄存器值重复相同的计算。

3.4 GUI 计算器

这些计算在 TMCS2100 表征 GUI 中完全实现，可用于测量误差和执行示例计算。误差测量使用从 [TMCS2100 Characterization EVM](#) 进行的数据采集，并对数据执行 FFT 以提取显性频率下的振幅和相误差：

Calculate Errors

Amplitude and Phase ☐ Crosstalk

CALCULATE ERRORS

☐ Auto Calculate Errors

Phase 1:	Amplitude Error:	-0.5903	%	Phase Error:	-0.2006	°
Phase 2:	Amplitude Error:	-0.8953	%	Phase Error:	-0.7596	°
Phase 3:	Amplitude Error:	-0.4889	%	Phase Error:	0.1053	°

图 3-2. GUI 误差计算示例

如果误差是在外部测得的，请选中 *manual amplitude error* 框，以覆盖用于校准的误差值：

End-of-Line Calibration

CALCULATE EOL CAL VALUES

☒ Also adjust Freq Comp values

☐ Manual amplitude errors

图 3-3. EOL 校准选项

如果选中了“Also adjust Freq Comp values”框，GUI 还会执行所需的计算以调整 *FREQ_SLP* 值：

End-of-Line Calibration

Use "PROGRAM" buttons below to apply EOL Cal.



Device	Slope 1	Slope 2	Gain 2
P1 Primary	43	101 → 100	7538 → 7604
P1 Secondary	65	153 → 152	1717 → 1817
P2 Primary	-92 → -91	-374 → -371	6062 → 6175
P2 Secondary	-113 → -112	-460 → -456	3160 → 3299
P3 Primary	-12	-1943 → -1934	4911 → 4978
P3 Secondary	-8	-1257 → -1251	9774 → 9818

PROGRAM TO TRIM

PROGRAM TO EEPROM

DONE

图 3-4. GUI EOL 寄存器计算

4 故障排查

如果应用 EOL 校准后系统中的串扰性能下降，则表明校准值未正确应用到两个器件。一些可能的原因包括：

- 在编程前未设置存储器控制位
- 正在覆盖存储器寄存器 0
- 增益 2 值之一会使寄存器字段饱和
- 通信或计算错误破坏了增益 2 寄存器代码

要纠正此问题，请修复任何 I2C 通信错误。如果修改后的增益 2 值饱和，不要简单地钳制增益 2 值。相反，两个 TMCS2100-Q1 器件的增益值必须更改相同的量。使用节 3.1 中的公式计算可能的最大误差校正（以百分比表示）并应用此校正而不是计算得出的校正。饱和或接近饱和的增益 2 值表示表征中使用的 FSR 太小。通常，表征后建议增益 2 值小于 16128。

5 总结

最好使用传感器在工作过程中经历的总信号来实现 **TMCS2100-Q1** 磁性电流传感器的线路结束校准。这可以通过多种方式实现，本文介绍了其中三种方式。从概念上讲，在逆变器运行时直接测量磁场是最简单的选择，但需要更多的测量硬件以及控制大电流以进行测量的能力。另一种方法是计算来自各个信号分量的总信号，通过将信号与每个汇流条隔离来单独测量。最后，所介绍的第三种方法提供了一种替代方法来计算具有最低设备要求的组合信号。所有方法的结果相同，但在行末有不同的要求。方法的选择最终取决于在给定制造流程的生产中可行的方法。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [TMCS2100-Q1 无磁芯多传感器霍尔效应电流传感器](#), 数据表。

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