Application Brief

线性电机传输系统中多个动子的位置感应

Martin Staebler, Scott Bryson

Analog Signal Chain – Sensing

线性电机传输系统简介

线性电机传输系统是一种新兴的工业应用，可替代和增强基于传送带的传统型工厂自动化系统。与传送带（旋转电机以一定速度驱动传送带）不同，线性电机传输系统使用多个基于线圈的静态、非移动线性电机模块来驱动磁动子，而磁动子承载待组装或加工的产品。与基于传送带的传统系统相比，线性电机传输系统有几项系统性优势。

由于该机制的多功能性，基于线圈的线性电机各段模块现在可以实现更小的新几何形状，涵盖直线、曲线、平移甚至二维运动。由于可以单独控制段内的每个线性电机，因此可在同一段内以不同的速度驱动不同位置上的多个动子。例如，一个动子停下来处理或分析该动子承载的产品，与此同时，下一个动子上的其他产品则以最大速度前进到下一个工艺状态。与传统的传送带驱动系统相比，这种独立控制机制显著提高了吞吐量。

图 1 展示了一个简化的线性电机传输系统，包括静态直线段和曲线段以及动子。每个段通常包括：通过相应线圈实现多个三相线性电机的*线性电机功率级*；一个用于感应每段各动子位置和速度的*线性电机位置传感器*和一个实现动子位置和运动实时控制的*线性电机段控制器*。图 2 中显示了一个动子的简化图。

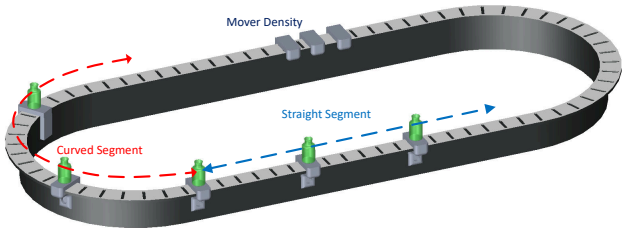

图 1. 带有磁动子的简化线性电机传输系统

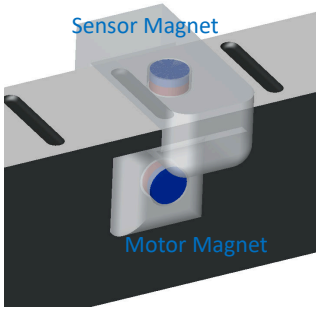

图 2. 带有传感器和磁体的动子的简化视图

要求

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 10 m/s，线性位置精度和可重复性低至 0.01 mm。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，磁场范围是从 50 mT 到 300 mT。根据空间要求，具有高度集成的 3D 霍尔传感器片上系统 (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。

English Document: SBAA540
Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

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、霍尔元件或电源电压诊断，从而提高系统可靠性。

表 1. 线性电机传输系统中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 10 m/s	会影响传感器采样率，闭环位置控制频率可以是 4 kHz 或更高。
动子位置准确度/可重复性	低至 0.01 mm	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 霍尔传感器	3D 霍尔传感器可实现二维位置感应。
传感器磁场范围	50 mT ··· 300 mT	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	连接至 MCU
传感器延迟	低至 100 us	更高速度的 SPI，例如 10 MHz 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 3D 霍尔 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 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 霍尔传感器检查、电源电压检查、内核温度检查等。	例如，通过具有 SPI 接口和集成诊断的传感器实现。

解决方案方法

图 3 展示了使用多个具有 SPI 接口的等间距、高精度线性 3D 霍尔效应传感器进行线性位置感应的解决方案。

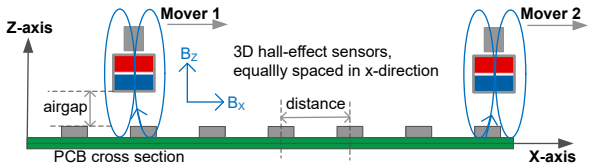

图 3. 3D 霍尔效应传感器阵列 PCB 的工作原理断面图

每个 3D 霍尔传感器之间的距离是系统特定的，取决于动子的磁场强度和磁体直径、空气间隙和所需的位置精度。相邻 3D 霍尔传感器之间的典型距离是系统特定的，可以在几毫米到几十毫米的范围内。Z 轴和 x 轴的最大场强不能相同，因此允许对每个磁场轴进行单独范围编程和优化的 3D 霍尔传感器将有助于支持更高的位置分辨率和精度。

图 4 显示了使用高精度 3D 霍尔传感器 TMAG5170 的系统方框图。一个专用的转换启动引脚 ($\overline{\text{ALERT}}$) 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。

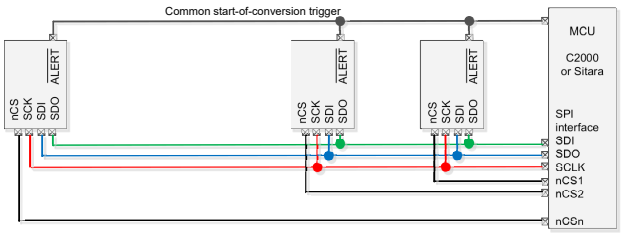

图 4. 主机 MCU SPI 接口与 TMAG5170 传感器阵列连接

10 MHz SPI 接口带有实现连续高速数据传输的单独片选引脚，最大限度地减少了与主机 MCU 进行通信所需的信号布线数量。如果系统要针对绝对最低延迟进行优化，还可以将每个 TMAG5170 的 SDO 信号独立路由到主机 MCU。

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

然后由主机 MCU 计算每个传感器的线性位置。在第一步中，MCU 需要检测距离每个动子最近的传感器，例如采用搜索传感器阵列中的 Z 轴峰值这一方式。接下来，通常是对 Z 轴和 X 轴进行偏移和增益校正。根据这些校正结果，然后可以通过 MCU 或使用传感器的 CORDIC 输出计算传感器和磁体之间的相对角度。上述计算也可以进一步线性化，以优化机械设置的位置跟踪。

图 5 显示了在 x 轴上与 3D 霍尔传感器位置偏移 +/-20mm 时，直径为 10 mm 的 N52 磁体的模拟 Z 轴和 X 轴磁场强度 Bz 和 Bx。

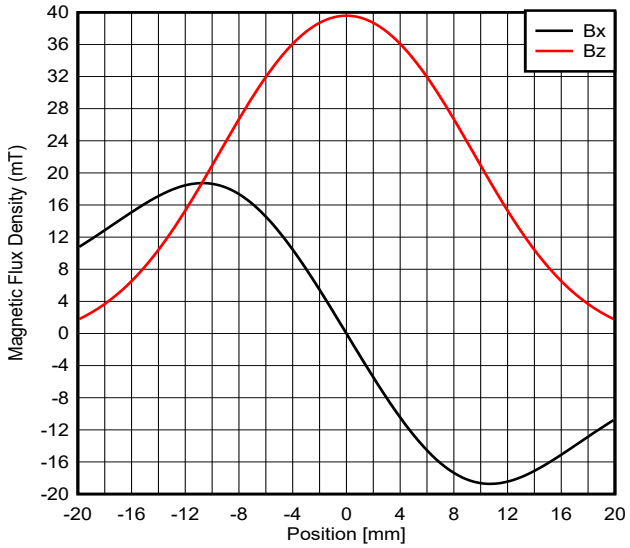

图 5. 10 mm 磁体的磁场输入

借助简单的灵敏度增益和偏移校正，使用 图 5 中所示的磁场输入计算绝对位置时，可以产生在 +/- 13mm 范围内位置误差小于 0.1 度的结果。有关校正算法的更多详细信息，请参阅使用线性霍尔效应传感器跟踪滑动位移。

剩余的系统误差与两个轴上的非理想正弦和余弦磁场有关，可以使用三角数学进一步校正。然而，这种更复杂的分析超出了本报告讨论的范围。

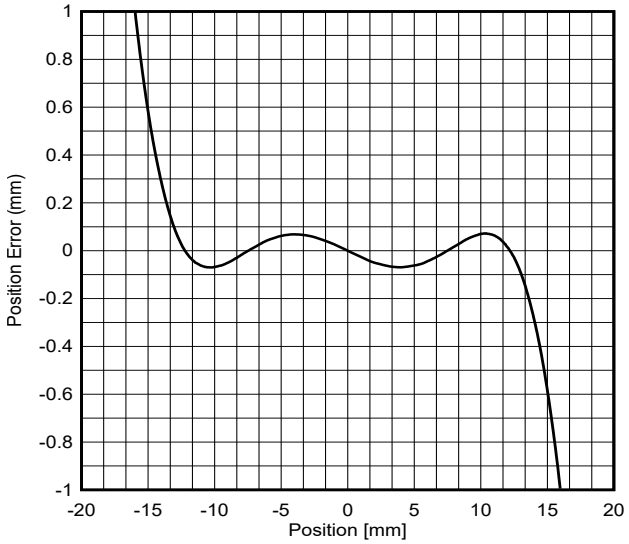

图 6. 10 mm 直径磁体的绝对位置误差

TMAG5170 具有 SPI 的高精度 3D 线性霍尔效应传感器 中 3D 霍尔传感器 SoC 的其他优势与该器件的各种其他集成特性有关。

TMAG5170 3D 霍尔效应传感器

TMAG5170 是一款高精度线性霍尔效应传感器，具有三轴灵敏度。该器件是高度可定制的，能够使用相互正交霍尔效应元件来检测 B 场矢量的每个分量。该器件对每个通道进行串行采样，然后使用集成的 12 位 ADC 以最大 20 ksps 的采样率转换结果。

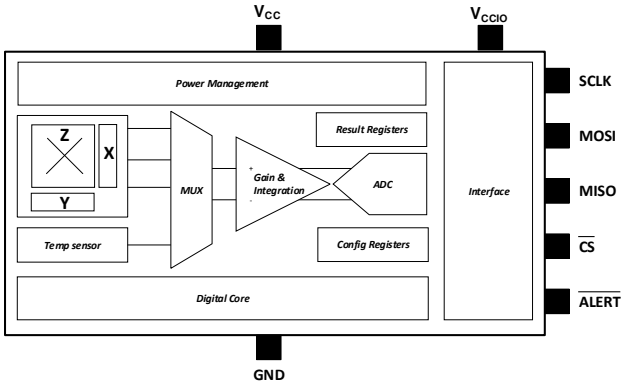

图 7. TMAG5170 方框图

English Document: SBAA540
Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

TMAG5170 的众多功能包括集成自诊断、可编程警报阈值和用于确定性采样的可定制触发。

TMAG5170 的自诊断功能能够监控 Vcc 状态、上电复位、输出引脚状态、器件存储器、温度和现场运行期间的各种其他内部检查。这一优势使微控制器能够轻松验证系统中的每个传感器是否保持运行，并有助于标记可能导致可靠性或安全风险的系统级问题。

从 TMAG5170 启动磁场转换有三种触发模式。该器件的警报引脚可用作输入引脚，可由主机控制器的任何适当 IO 引脚驱动。这种硬件触发既方便又简单。此外，转换可以通过单独的 SPI 命令或器件的 CS 引脚触发。在触发时序已知的情况下，器件的转换率可用于将任何给定测量与线性动子的实际位置相关联。

图 8 显示了使用 $\overline{\text{ALERT}}$ 引脚以 8 kHz 位置采样率通过主机 MCU 触发新转换的示例时序。对于此示例，TMAG5170 配置为 Z 和 X 两个轴的伪同步采样模式。有效采样到数据传输延迟约为 60 us。

使用 TMAG5170 进行 32 位数据的 SPI 传输在 10 MHz SPI 时钟和相应的建立和保持时间下需要 3.2 us，因此当多条 TMAG5170 SDO 数据线并行连接到主机 MCU 时，总延迟约为 64 us。当多个 TMAG5170 使用相同的多路复用 SDO 数据线时，总延迟取决于顺序读取的 TMAG5170 传感器的数量。总延迟等于 60 us 加上 N 乘以 4 us 到 5 us，其中 N 是 SPI 传输的数量，包括片选信号设置和保持时间的开销。

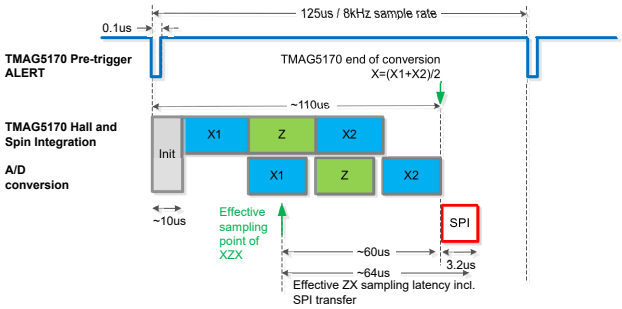

图 8. 8 kHz 采样率通过转换信号启动的时序图 ($\overline{\text{ALERT}}$)

使用 SPI 命令触发器或 CS 触发器的一个好处是，它使警报引脚可用于向控制器提供额外的反馈。使用可编程阈值限制功能时，系统中的每个 TMAG5170 都可以提供有关任何单个线性动子的相对接近度的反馈。通过仅识别正在接收有用输入的传感器，系统可以在器件阵列上实现更高效的 SPI 读取。

更多相关信息，请参阅以下备选器件和支持文档。

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

表 2. 备选器件

器件	说明	设计注意事项
TMAG5170 (TMAG5170Q1)	具有 SPI 接口、采用 8 引脚 DGK 封装的商用（汽车）级线性 3D 霍尔效应位置传感器	通过 SPI 接口提供的完全磁矢量灵敏度。TMAG5170 提供有利于系统监控的高精度和自诊断功能。
TMAG5273	具有 I2C 接口、采用 6 引脚 SOT-23 封装的线性 3D 霍尔效应位置传感器	通过 I2C 接口提供的完全磁矢量灵敏度。TMAG5273 不提供诊断功能。
DRV5055 (DRV5055Q1)	具有模拟输出、采用 SOT-23 和 TO-92 封装的商用（汽车类）单轴双极性线性霍尔效应传感器	DRV5055 是一款具有模拟输出的一维线性霍尔效应传感器。单轴灵敏度导致线性阵列设计将需要更高密度的传感器放置。模拟输出将需要一个 ADC 来对单个器件输出进行采样。

表 3. 支持文档

名称	说明
线性霍尔效应传感器阵列设计	指导如何设计可用于跟踪长路径运动的传感器阵列
使用线性霍尔效应传感器跟踪滑动位移	浅谈滑动磁感应的线性位置计算
适用于 TMAG5170 具有 SPI 总线接口的高精度 3D 线性霍尔效应传感器的评估模块	GUI 和附加装置采用精确的三维线性霍尔效应传感器进行角度测量
适用于 TMAG5273 具有 I²C 接口的低功耗线性 3D 霍尔效应传感器的评估模块	GUI 和附加装置采用精确的三维线性霍尔效应传感器进行角度测量
DRV5055 评估模块	EVM 包含一个数字显示屏，具有多种拟合直线的线性灵敏度。
TI 高精度实验室 - 磁传感器	一个实用的视频系列，介绍霍尔效应及其在各种应用中的使用方式

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

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出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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司