

## Application Note

## 使用反向偏置 3D 霍尔效应传感器进行轮齿检测



Scott Bryson

## 摘要

车辆传感系统（包括电动自行车踏频检测和防抱死制动系统）的工作原理是测量旋转踏板曲柄组或车轮的速度和方向。机械设计会随着时间的推移而磨损，而光学传感器可能笨重，而且难以避免灰尘和碎屑。

另一种使用固定位置反向偏置霍尔效应传感器的方法可实现高分辨率，不仅能提供旋转速度，还能进行方向和相对角度测量，以检测系统的微小变化。反向偏置传感器的工作原理是测量磁场与移动的铁磁性物体之间的相互作用。

## 内容

1 引言.....	2
2 实施和测试.....	3
2.1 编译配置.....	3
2.2 数据搜集.....	5
2.3 速度计算方法.....	7
2.3.1 连续采样.....	7
2.3.2 运行平均值.....	7
2.3.3 过零点.....	7
2.3.4 定期采样.....	7
3 总结.....	7
4 参考资料.....	9

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

汽车系统 (包括防抱死制动系统 (ABS)、里程表、速度表和牵引控制系统) 中的许多关键功能都需要测量每个车轮的转速。同样, 在电动自行车中, 不仅需要使用此功能来测量自行车的行驶速度, 还需要监测踏板曲柄组中的旋转速度。这些数据不仅对计算骑手能量输出的健身训练计算机有用, 而且还能确认骑手是否在积极蹬踏。在微控制器启用电机输出之前需要该信号, 该信号还用于根据已编程的骑手辅助设置来设定电机转速。

在许多踏频监测系统中, 实现该方法的方法是在踏板曲柄组上安装一个带有多个嵌入式磁体的圆盘。图 1-1 展示了使用 12 个磁体的示例。以交替极性安装磁体后, 可以使用 TMAG5110 等 2D 磁锁存储器来跟踪每个磁体的通道, 并在磁体旋转时提供一系列脉冲。

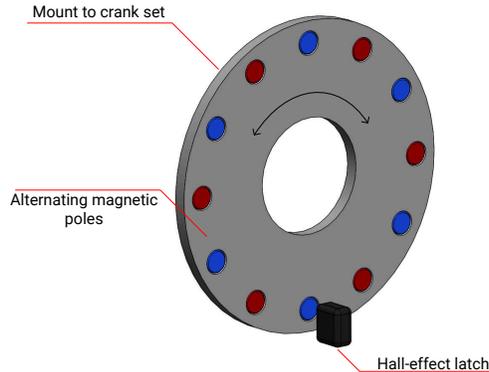


图 1-1. 分立式磁体踏频监测器

当配置为 2D 锁存器时, 每对磁体可能会产生多达 4 个过渡状态, 如图所示, 每转共产生 24 个状态。或者, 单个 1D 锁存器只能检测 12 种状态, 每个磁极一种状态。如果旨在实现 50% 的占空比, 则每种状态可以表示大约 15 度的旋转。虽然这只是一个相对较小的旋转量, 但当较重的自行车停在上坡道上时, 对骑手而言可能具有挑战性。此外, 磁体成本和安装难度也导致此设计不太可取。

使用安装在底部支架上的电机时, 另一种可能性是将踏频检测装置移至电机内部。在这些总成中, 踏板通过离合器连接到电机输出端。骑手向前踩踏板之前, 离合器是分离的, 这样可以保护骑手, 避免因迫使踏板与电机一起旋转而受伤。在该系统中, 可使用光学传感器将踏频传感器移至电机总成内部。然而, 即使在这种情况下, 随着时间的推移, 电机运行时产生的污垢和油脂仍有可能污染传感器。

无论是内置到系统中, 还是作为外部模块连接, 反向偏置磁传感器均可用于提供这一功能, 其分辨率比传统设计更高, 而且不会受到光污染物的影响。在反向偏置配置中, 磁体相对于磁传感器保持在固定位置, 如图 1-2 所示。

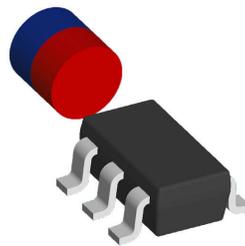


图 1-2. 反向偏置配置

然后, 永磁体产生的磁场可以自由地与周围环境相互作用。将静止磁体放置在铁磁齿轮或磁阻板附近时, 该磁体产生的磁场会被吸入齿轮的齿中。齿轮的每个齿尖和齿根通过时, 与磁体的距离会发生变化, 因此传感器处的磁通密度强度会沿多个轴振荡。图 1-3 中的模拟磁场行为展示了这种相互作用。在这里, 磁场向磁体右侧附近的链轮齿扭曲。

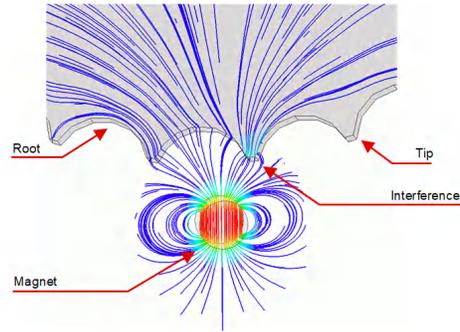


图 1-3. 磁场相互作用

## 2 实施和测试

### 2.1 编译配置

为了演示这种行为，我们将 32 齿曲柄组和底部支架安装到一个 3D 打印总成中。



图 2-1. 轮齿检测设置

我们设计了一个支架，用于安装 **TMAG3001**（采用 WCSP 封装的小型商用级 3D 传感器）或 **TMAG5173-Q1**（采用小型 SOT-23 封装的汽车级 3D 传感器），该支架带有反向偏置磁体，可将传感器放置在靠近旋转前链轮的位置。本演示中没有链条，但在实际环境中，需要将其安装在没有挂上链条的链轮段上。

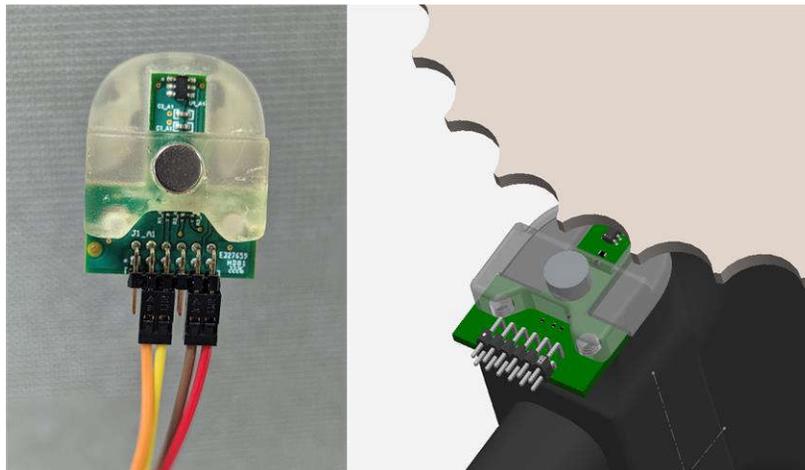


图 2-2. TMAG5173-Q1 传感器和反向偏置磁体放置

对于大多数骑手而言，80RPM 至 100RPM 的踏板转速是无辅助骑行时的目标设计转速。通常只有在冲刺时才能达到 110RPM 以上的转速。假设使用 32 齿齿轮将目标最高转速设定为 150RPM。在这种情况下，每齿的传输时间跨度约为 78ms。此时，我们可以根据每齿样片数来计算所需的采样速率。

虽然在奈奎斯特速率下，最低只需要每次振荡采集 2 个样片就能检测到每个齿，但通常需要更高的采样速率才能采集到更完整的轮廓。考虑以下奈奎斯特速率与每次振荡采样 5 次的对比情况。对于图 2-3 所示的情况，采样与每个过零点和峰值保持一致。如果存在这种特殊情况下的任何偏移，则正弦波每半个周期始终至少有 2 个样片。

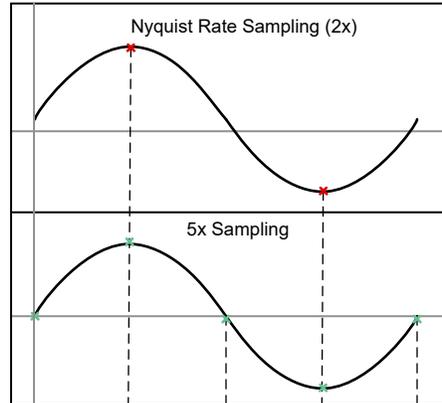


图 2-3. 采样速率

如果在每个 78ms 时间段内使用 5 个样片，则每个样片之间的间隔时间约为 15.6ms。要利用速度和方向信息测量踏频，使用 3D 霍尔效应传感器会很有帮助。TMAG3001 和 TMAG5173-Q1 均能对角度检测所需的 2 个轴进行采样，每次采样约需 75us 的时间。可以启用均值计算来减少噪声对最终结果的影响，但代价是需要更长的采集时间。这些传感器支持每个样片进行高达 32 倍求平均值，两个轴的有效采样时间接近 1.625ms。然而，在该特定应用中，建议不要将求平均值的倍数设置得高于所需值。由于齿在采样期间一直在移动，过度求平均值会产生不必要的系统延迟。此报告中收集的数据采用 8 倍求平均值来限制角度噪声。

## 2.2 数据搜集

本演示使用 **TMAG3001** 来检测每齿的通道。要充分利用磁场消除静止磁体产生的固定偏置，需要运行初始校准例程。图 2-4 展示了链轮四个齿在传感器附近旋转时 X 轴和 Z 轴场矢量测量值。

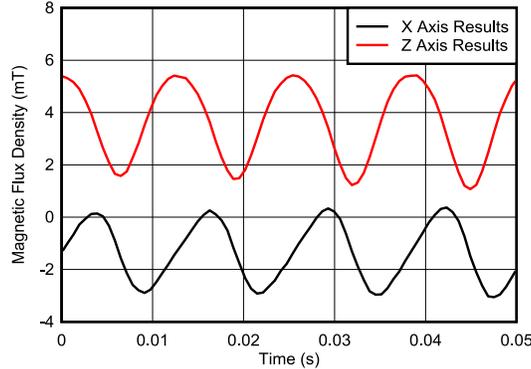


图 2-4. 采样数据

可以看到，在每个轴上，霍尔效应传感器观测到的某个额定磁通密度附近发生振荡。如果踏板曲柄组不存在，则该场在反向偏置条件下会保持静态。测量过程中的固定偏移对角度计算提出了直接的挑战。

用于计算反正切角的目标输入具有 X 和 Y 分量，分别为余弦分量和正弦分量，其振幅相匹配。绘制成图 2-5 所示的利萨如曲线，可以很容易观察到这是一个单位圆。同样，将图 2-6 中的反偏置结果绘制成线时，由于偏移和振幅显著不匹配，产生的输出无法生成完整的 0 至 360 度角计算。

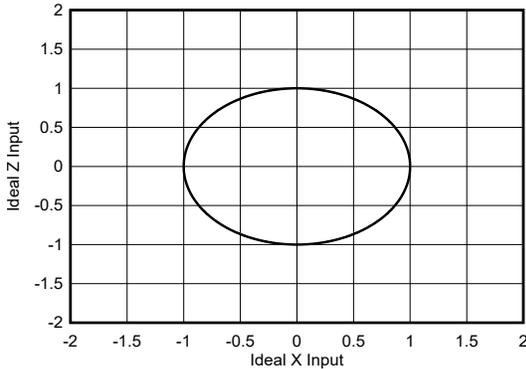


图 2-5. 目标输出利萨如图

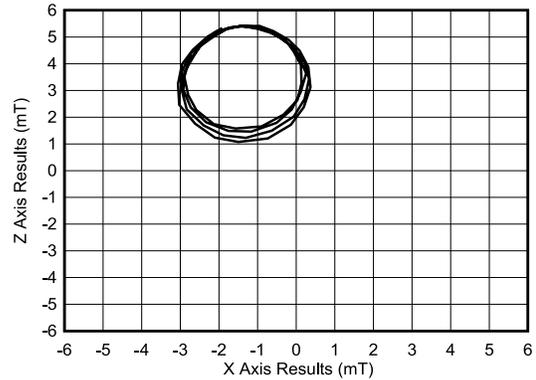


图 2-6. 测量的利萨如图

执行短暂的校准例程以测量峰值输出值之后，可以使用方程式 1 确定要从每个测量值中减去的偏移量。

$$Offset = \frac{(Out_{max} + Out_{min})}{2} \quad (1)$$

将每个输出值除以方程式 2 中计算出的总振幅，可将振幅不匹配归一化。

$$Amplitude = (Out_{Max} - Out_{Min}) \quad (2)$$

校准后的结果将通过方程式 3 得出。

$$Calibrated\ Output = \frac{(Output - Offset)}{Amplitude} \quad (3)$$

由此产生的测量数据移位如图 2-7 和图 2-8 所示。

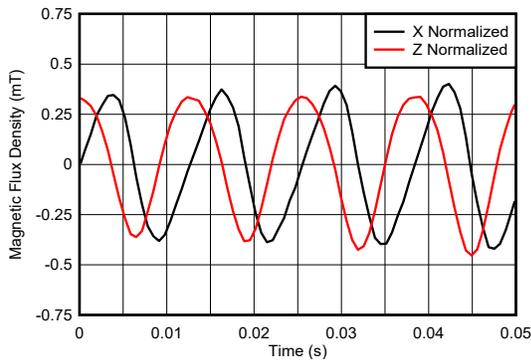


图 2-7. 归一化输出图

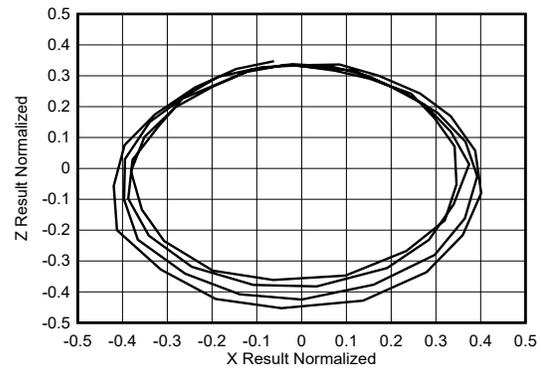


图 2-8. 归一化利萨如图

在输出图中，齿与齿之间确实存在一些偏移，这与链组链轮相对于底部支架轴上的安装有一定倾斜度有关。这种制造缺陷会导致踏板移动时与磁体的距离发生轻微变化。对于图 2-7 中所示的旋转段，振幅未处于峰值，因此归一化结果未完全达到  $\pm 0.5\text{mT}$ 。尽管存在这一缺陷，但经过此短暂校准后得到的角度如图 2-9 所示。

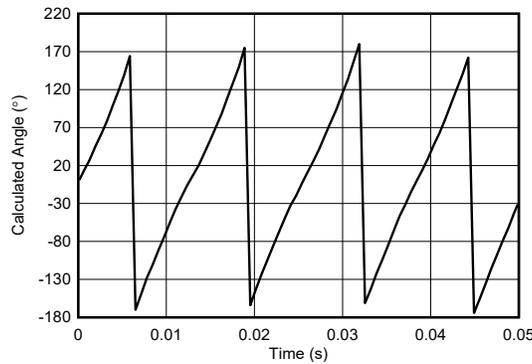


图 2-9. 计算出的角度

计算得出的链轮旋转一周的角度相对于整个齿轮的角度如图 2-10 所示。虽然输出角度仍存在一些偏移，但考虑到这只占总旋转量的一小部分，这种非线性对整体角度测量的影响会减小。由于每个齿的角度输出范围为 0 至 360 度，因此用每个齿上观测到的有效角度非线性度除以齿总数。在本例中，齿数为 32。即使观测到每个齿的角度非线性度为 10 度，整个链轮旋转的等效误差也可限制在 0.31 度以内。

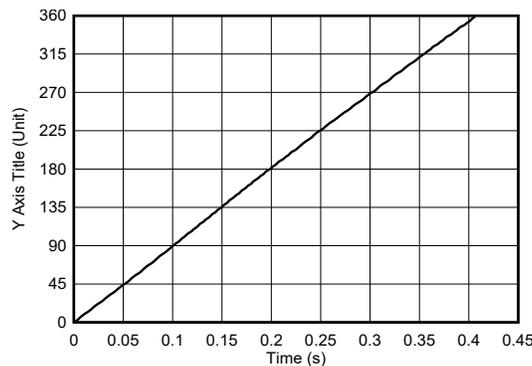


图 2-10. 计算出的链轮角位置

在本演示中，旋转速度是手动控制的，因此存在一些速度波动。为了估算角度误差，使用一个齿跨度的变化率来确定从一个样片到下一个样片的预期角度期变化。连续采样用于确定从起始位置开始的相对角度变化，归一化角度误差如图 2-11 所示。

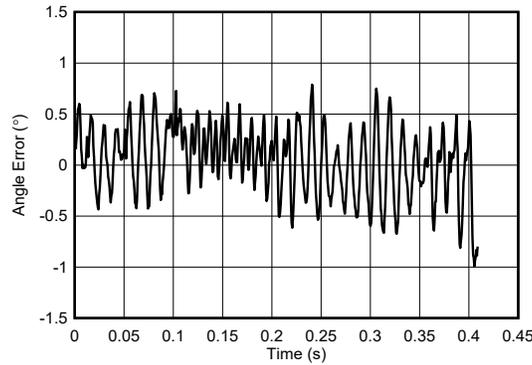


图 2-11. 速度归一化角度误差

使用 32 齿齿轮和每齿 0 至 360 度响应，产生的相对角度误差小于  $\pm 1$  度机械误差。

## 2.3 速度计算方法

利用角度数据计算速度的方法有多种。以下几节介绍了每个概念。

### 2.3.1 连续采样

在连续采样配置中，目标是测量所测角度的变化率 ( $\delta \theta / \delta t$ )，以确定齿轮在任何给定时刻的角速度。这种方法可以为每个测量的齿轮齿生成一个 0 至 360 度的结果，并且还提供方向信息。这对于需要瞬时反馈的系统很有帮助。

这种方法的缺点是传感器必须有效并持续转换，这就不太适合电池供电的应用。此外，角度响应中的任何非线性都可能表现为速度的暂时变化，这会降低总体系统精度。

### 2.3.2 运行平均值

由于每个轮齿通常能够进行多次角度测量，因此也可以针对  $\delta \theta / \delta t$  生成运行平均值。对于  $n$  个样片，系统可以为最后  $n$  个结果实现一个移位寄存器，并提供一个平均值，该值在每次采样后都会更新。虽然这样做的缺点是会增加 MCU 的内存消耗，但计算出的速度更新更慢、更容易预测。这种方法尤其适用于反馈逐渐变化的系统（如速度表）和人机界面控制（如踏频）。

### 2.3.3 过零点

在需要较低分辨率的系统中，可以调整控制环路以寻找过零点。即使存在明显的非线性，过零点也会在每个轮齿的同一相对点上重复出现。跟踪每次过零事件之间的时间可消除由金属目标形状引起的任何角度线性度问题，但不会额外增加 MCU 的内存需求。

但是，这样做的缺点是需要完成一整段行程才能计算出速度。以 32 齿自行车链轮为例，旋转角度为 11.25 度。虽然这相比 12 度磁体所需的 30 度旋转有所改进，但反馈却不那么直接。

### 2.3.4 定期采样

采样方式的最后一个注意事项是唤醒传感器以进行一系列测量。如果系统响应在较长时间内保持恒定，则可在不需要器件时，使器件保持低功耗状态以节省电量。在某个所需的时间间隔内，可将器件从低功耗睡眠模式唤醒，让其计算  $n$  个样片的  $\delta \theta / \delta t$  值，然后再返回睡眠模式。此方法保持了运行平均值计算的优点，但只提供定期更新。对于不需要持续更新的功能，以更大的时间间隔运行计算是降低功耗的不错方法。

## 3 总结

当使用多个磁体不切实际，并且需要无接触检测时，实施反向偏置磁感应将非常有用。这一特性在车轮和齿轮转速检测等应用中特别有用，因为该检测功能有助于满足电动自行车和汽车系统的防抱死制动系统 (ABS)、速度表和其他动力总成的监测要求。

除了反向偏置磁感应之外，还可以利用 LDC0851 等器件来设计和实现电感式感应线圈，以跟踪旋转导电表面的接近程度。有关应用信息，请参阅表 4-1 中的参考资料。

有关电动自行车和汽车应用中磁感应的更多信息，请参阅[表 4-1](#) 和[表 4-2](#)。

## 4 参考资料

表 4-1. 备选器件信息

器件	等级	温度额定值	接口	ASIL 等级	封装类型	设计注意事项
<a href="#">TMAG3001</a>	商用级	-40°C 至 125°C	I2C : 400kHz、1000kHz	不适用	WCSP	采用非常小的芯片级封装尺寸、可编程角度阈值和可选 I2C 寻址
<a href="#">TMAG5173-Q1</a>	汽车级	-40°C 至 125°C	I2C : 400kHz、1000kHz	ASIL-B	SOT-23	采用小型封装和 I2C 通信的汽车级 3D 霍尔效应传感器。
<a href="#">TMAG5170 (TMAG5170-Q1)</a>	商用级 ( 汽车级 )	-40°C 至 150°C	SPI : 10MHz	(ASIL-B)	VSSOP-8	汽车级和商用级器件均使用 SPI 接口提供完整的磁场矢量测量。
<a href="#">TMAG5170D-Q1</a>	汽车级	-40°C 至 150°C	SPI : 10MHz	ASIL-D	TSSOP-16	独立的 3D 霍尔效应传感器可设计到 ASIL-D 等级较高的系统中
<a href="#">TMAG5273</a>	商用级	-40°C 至 125°C	I2C : 400kHz、1000kHz	不适用	SOT-23	具有 I2C 接口的低成本商用级器件

表 4-2. 相关内容

标题	内容描述
<a href="#">电动自行车应用中的位置检测</a>	使用位置传感器的电动自行车功能概述
<a href="#">两轮车/三轮车牵引驱动器和参考设计</a>	与连接到牵引逆变器的电动自行车系统内各种功能相关的内容链接
<a href="#">动力总成系统中传感器的基本注意事项</a>	有关动力总成系统中汽车检测功能的白皮书讨论。
<a href="#">电感式传感：让开关应用变得简单易行</a>	介绍包括轮齿检测在内的电感式传感应用
<a href="#">LDC 器件选型指南</a>	讨论电感式传感器并帮助选择器件

## 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