

AN-1314 应用笔记

One Technology Way • P.O. Box 9106 • Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. • Tel: 781.329.4700 • Fax: 781.461.3113 • www.analog.com

AMR角度传感器

作者: Robert Guyol

简介

在当今的位置检测技术中,各向异性磁阻(AMR)薄膜材料 变得日益重要。相比传统技术,磁阻(MR)位置测量具有多 种优势。可靠性、精度和整体鲁棒性是推动磁阻检测技术 快速发展的主要因素。低成本、相对较小的尺寸、非接触 式操作、宽温度范围、对灰尘和光的不敏感性、宽磁场范 围,这些特性共同造就出一种鲁棒的传感器设计。

MR效应指某种材料随外加磁场的方向或幅度而改变其电 阻的能力。AMR材料有两个不同的操作区间,即高场强区 和低场强区。本应用笔记将讨论高场强应用,当外加磁场 远远大于传感器的内部磁场时,我们就说该传感器处于饱 和工作状态。在这种工作模式下,电阻的改变仅仅取决于 磁场方向而非施加的磁场强度。受AMR薄膜性质影响,材 料的电阻变化在两个相反磁场方向下是相等的,即是说, 传感器本身无法区分北磁极和南磁极。因此,对应单个旋 转偶极磁体的输出信息会在整个机械旋转过程中重复两 次。这种效应使测量范围限制到180°。电阻变化可由下式 来模拟:

 $R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2(\alpha)$

其中:

R为传感器电阻。

R_o为未激励传感器电阻。

 ΔR_0 为传感器电阻的变化。

一般地,对于AMR传感器来说,ΔR₀约为电桥总电阻的 3%。由于电阻变化极小,因此,需要用一个仪表放大器, 把输出信号进一步放大到相对于电源电压的可用值。

目录

简介	1
修订历史	2
磁体配置	3
线性	3
离轴	3
轴尾	3
电桥配置	3
AMR传感器元件	4
磁角与机械角	4

选择磁体时的考虑因素	
磁体与传感器的关系	5
对齐误差和气隙测量	6
诊断	7
误差源	9
校准程序	9
布局建议和磁场干扰	
VTEMP输出	

修订历史

2014年10月—修订版0:初始版

磁体配置

AMR技术可以用来检测线性位置和旋转位置。有多种不同 类型的磁体配置可与AMR角度传感器配合使用,包括线 性、离轴、轴尾等配置方式。

线性

对于线性应用,磁体必须与传感器位于同一平面,如图1 所示。磁体的红边和蓝边表示北极和南极的定向。该定向 是可以互换的,因为AMR传感器不区分北极和南极。为了 从AMR传感器获得最佳线性响应,传感器的中心和磁体的 中心彼此相距距离必须等于磁体长度的一半。





离轴

旋转测量的一种磁体配置是使用一个磁极环。图2所示为 理想的磁极环。彩色区域表示AMR传感器感知到的外磁场 定向。类似于线性测量,要获得线性响应,磁极环必须与 传感器处于同一平面,并且二者间的距离为磁极长度的一 半。在整个机械旋转过程中,这类磁体配置下的传感器响 应将重复多次,重复次数与磁极数量相等。对于图2中的 磁极环,共有5个北极和5个南极,传感器可以感知到10个 磁极。对于图中所示磁极环,每旋转一次,AMR传感器输 出就会重复10次,因此,可以提供36°的绝对信息。



图2. 离轴磁体配置

轴尾

本应用笔记讨论的主要测量配置方式是一种简单的磁体配置,通常称为轴尾配置。在轴尾磁体配置中,一个已经径向磁化的偶极磁体位于旋转轴的尾部。传感器位于旋转轴和磁体的下方。在该机械设置中,径向磁体的北极和南极在磁体中心上方形成一个均强磁场。随着磁体和轴旋转,磁场也开始旋转。传感器如此放置是为了均强磁场始终与检测元件处于同一平面。图3所示为轴尾磁体配置。



图3. 轴尾磁体配置

轴尾磁体配置非常适合无刷直流电机定位和控制。对于 ADA4571或任何180°角度传感器,所使用的无刷直流电机 必须是一个偶对极电机,因为奇对极电机需要完全的360° 位置信息。

多数闭环无刷直流电机控制使用霍尔传感器来提供转子位 置反馈,用以确定线圈换向的正确位置。这些传感器的精 度各不相同,但一般都在5°至10°之间。为了实现更平滑、 更高效的电机响应,减少扭矩波动,需要更精确的电机角 度信息。ADI公司的AMR传感器的机械精度典型值为 ±0.1°,最大值为±0.5°。通过更加传统的增量编码器,也可 使精度达到这一水平。然而,在启动、卡止错误和环境影 响时对于增量编码器来说问题表现地更加突出。ADI AMR 传感器可提供启动或卡止条件下的绝对位置信息,而不受 电机位置影响。借助这个绝对位置信息,可以更好地控制 扭矩,使电机启动时更加平顺,还能提高电机启动效率和 卡止时的性能。

电桥配置

ADI AMR传感器采用惠斯登电桥配置,与单一阻性元件相比,它支持更宽的输出电压摆幅,还能抑制较大的直流失调。当以差分方式测量单电桥对应单偶极磁体旋转时的输出,则只能获得90°的可用范围。单电桥元件在单偶极磁体 360°机械旋转过程中的输出波形如图4所示。请注意,对于每个电压输出水平,都有四个可能的机械位置。



把两个检测元件放置在同一管芯上,且相互呈45°旋转角, 这样,传感器就可以用作完整的180°范围的测量。图5所示 为两个电桥的简化电路图。



图5. 双路惠斯登电桥传感器的简化电路图

AMR传感器无论是朝向磁北极还是磁南极,其输出都是相同的。因此,当差分监测来自相应的惠斯登电桥的各个通 道信号时,只需相对旋转45°即可在两个正弦输出之间形成 一个90°的相移。图6所示为偶极磁体配置中,两个AMR电 桥在整个机械旋转中的两路输出。



AMR传感器元件

AMR检测元件的布局决定着器件的最终性能。ADI采用的 是Sensitec GmbH提供的AMR技术,后者是广受认可、处于 行业领先地位的MR传感器制造商。ADI产品中采用的Sensitec AMR传感器运用了PERFECTWAVE[®]技术。PERFECTWAVE 传感器运用弧形传感器元件来减少高阶谐波,提高精度。



磁角与机械角

对于AMR技术来说,必须了解两种不同的角度度量体系: 磁角和机械角。受AMR技术性质的影响,ADA4571是一款 面向单偶极磁体的180°机械角度传感器。由于两个相互旋转 45°的AMR电桥的输出信号为正弦曲线,相对相移为90°, 因此,180°的绝对角度可以通过计算arctangent2获得。



通过arctangent2计算获取的信息在360°范围内会重复两次 (单偶极磁体)或更多次(多极对磁体)。图7所示为单偶极磁 体在计算arctangent2之后的输出波形示例。



完成arctangent2计算即生成线性角度响应。在磁角的计算中,绝对电压和绝对磁场强度都不重要,因此,与竞争角度传感器技术相比,这些传感器对磁场强度和电压幅值变化及漂移都不敏感。

选择磁体时的考虑因素

在使用AMR传感器时,需要为传感器配上合适的磁体,才 能取得最佳性能。由于其方向取决于磁场,所以使用的磁 体必须径向磁化而非轴向磁化。图8所示即为这样的磁体。 磁体蓝色和红色区域表示北极和南极。磁场线从磁体北极 向南极运动。在磁体上方(如果是轴尾配置,必须把AMR 传感器置于此处,如图3所示),磁场线分布均匀于传感器 所在平面。



一般地,AMR传感器要搭配稀土磁体使用,因为后者具有 较高的磁能重量比。然而,只要能达到传感器的最小饱和 磁场强度要求,也可以使用成本较低的铁氧体磁铁。但 是,对于高性能和高温应用来说,如果使用稀土磁体,性 能会得到提升,因为AMR传感器可以感知到更高的磁场强 度。较高的磁场强度也有助于降低杂散磁场对传感器精度 的影响。

用于制造稀土永磁体的两种最常见的材料是钕(NdFeB)和 钐钴(SmCo)。表1所示为两种不同磁性材料的比较情况, 列出了各自的主要优势。这两种磁性材料都有多个不同的 等级,因此,表中只是粗略比较。对于具体特性,必须分 开考察每个等级的材料。磁性材料的等级表示材料的磁能 积,单位为百万高斯-奥斯特(MGOe)。该值等于具体磁性 材料BH曲线的最大值。一般地,MGOe两倍的材料,其拉 拔强度为同样大小的磁体的两倍。

表1. NdFeB和SmCo磁性材料比较

参数	NdFeB	SmCo
价格	中	盲
磁场强度	盲	中到高
最高温度	80℃至180℃	160℃至300℃
温度系数	0.08 %/K至0.13 %/K	0.03 %/K至0.04 %/K
腐蚀防护	镍(典型)	不需要

对于AMR技术,强度较高的磁体,其性能始终优于强度较低的磁体。

增加AMR传感器元件可以感知到的磁场强度,可以提高器件性能。因为器件存在的物理限制,所有AMR传感器中都

存在较高阶的谐波。ADI产品中使用的Sensitec AMR传感器 采用弧形结构,可减少许多其他传感器中存在的四阶谐波, 如此,即可在较低的磁场强度条件下实现类似的性能。

ADA4571中采用的AMR检测元件的最小工作磁场强度为 25 kA/m。低于此值也可工作,但结果会导致精度下降。较 高的磁场强度可以提高精度,而且不会损坏器件。受AMR 传感器磁场方向测量的影响,与磁通量测量不同,如果磁场 强度具有较大的温度系数,结果仍是可以接受的,同时依 旧能达到器件规定的误差规范。然而,在选择磁体时必须 确保,要充分考虑极端工作温度条件下的磁场强度下降问 题。该下降幅度可以用额定磁场强度和温度系数来计算。

磁体与传感器的关系

机械对齐对于最大限度地提高AMR传感器的性能至关重 要。在设计物理系统时,必须记住几个关键参数。必须严 格控制磁体与传感器之间的x-y对齐容差,使传感器感知到 的磁场方向符合要求。传感器中心与磁体中心的物理对齐 误差会给整个系统带来误差,该误差取决于传感器位置周 围磁场的大小和一致性。在ADA45718引脚SOIC封装中,磁 体传感器中心位于封装中心引脚2和引脚7的上沿之间。封 装过程中,该额定位置各个方向上的位置精度在±50 µm之 内。有关具体的对齐图,请参阅ADA4571数据手册。受控 轴尾系统的磁体轴中心必须与磁传感器中心在一直线上。

气隙或z向间距对于AMR传感器的性能也很重要。虽然在 绝对对齐中不如x-y相对位置重要,但也必须了解气隙参 数,才能使传感器性能最大化。为了实现AMR传感器的额 定性能,磁激励在设计时必须考虑至少提供传感器要求的 最小磁场强度。ADA4571要求的磁场强度为25 kA/m。提 高传感器所感知的磁场强度的一种方法是减小工作气隙。 然而,要特别注意,减小与磁体的距离不一定能提高器件 的性能。在接近磁体表面的地方,磁场强度变得不均匀。

对气隙不敏感,这是AMR技术的一个重要特性。只要传感 器在激励磁场下进入完全饱和状态,从该传感器获取到的 角度信息就不会随磁场强度而变化。这意味着,因振动、 应力或全寿命机械漂移导致z方向的较小位移对角度精度 的影响非常小。位移容差量取决于磁体材料和几何尺寸, 但范围可能达到几毫米到一厘米,甚至更多。

对齐误差和气隙测量

以下各节将展示不同磁体尺寸、强度、气隙和对齐误差条 件下的测量结果。同时还用描述的方法测试了其他磁体。 欲了解如何针对具体应用选择磁体,请联系ADI公司。

测量设置

把每个磁体装在一个无槽、无刷直流电机上,并以3000 rpm 的恒定转速转动。

电机装在一个带有两个线性执行机构的位移平台上,一个 用于相对于传感器的x向位移,一个用于y向位移。图9所 示为x和y位移的规定方向。



图9. 相对于ADA4571封装的规定对齐方向

z向间距(从传感器到磁体的气隙)在测量期间固定不变。图中显示的每次测量的气隙指从磁体到封装顶部的距离。AMR 传感器距离封装顶部0.38 mm(额定值),容差为±0.025 mm。 把该距离值与气隙测量结果相加,即可得到从ADA4571封 装中AMR传感器管芯到磁体的距离。

两个线性执行机构以50 μm的增量移动,以覆盖2 mm×2 mm 的整个方形,即每个方向各距AMR传感器中心1 mm。用这 种方法测试得到的最大径向对齐误差是1.4 mm,位于扫描 范围的角落处。

注意,所有结果均经数字滤波和升采样处理,以使示意图 看起来更加平滑。绝对误差值保持不变。

磁场强度研究

表2. 用于比较1的磁体尺寸

参数	NdFeB (35 MGOe)	SmCo (32 MGOe)
直径	6 mm	6 mm
厚度	3 mm	3 mm

为了研究不同磁场强度对对齐误差的影响,我们选择了两个 磁体。二者直径均为6 mm,厚3 mm。一个磁体为NdFeB, 能量等级为35 MGOe,另一个磁体为SmCo,能量等级为 32 MGOe。选择SmCo磁体而放弃NdFeB磁体的其他原因包 括:SmCo具有更高的温度等级,温度系数也比较低。这 些因素在高温应用中更加重要。我们以所选磁体为例,说 明不同磁场强度的影响。市场上也有能量等级各异的不同 NdFeB和SmCo磁性材料。

在图10和图11中,色标指以度为单位的角度误差。在这些 示意图中,最小角度误差位于示意图的中心,即磁体与传 感器完美对齐时,其值为0.07°。



由于NdFeB磁体的磁场强度更大,因此,与SmCo磁体相比,这种磁体能在离磁体位置更大的位移范围内,保持更好的性能。在1mm气隙条件下,这两种磁体在传感器元件处的有效磁场强度约为60kA/m(NdFeB磁体)和50kA/m(SmCo磁体)。下一节将考察一种尺寸更大、能量等级更低的磁体。

能量等级较低的大磁体

表3. 用于比较2的磁体尺寸

参数	SmCo (24 MGOe)
直径	10 mm
厚度	5 mm

我们在2mm、4mm和6mm气隙条件下分别测试了表3中描述的SmCO磁体,如表4所示,其中还列出了最小和最大报告误差(示意图的中心和边沿)。

表4.比较2的最小和最大误差

参数	2 mm	4 mm	6 mm
最小误差	0.0774	0.1002	0.1477
最大误差(对齐误差: 1.4 mm)	0.6118	0.7522	0.7074
近似磁场强度(kA/m)	60	35	20

在图12至图14中, 色标指以度为单位的角度误差。这些示 意图的最大角度误差为0.8°。

在这些示意图中心,最小误差增大,如表4所示,其原因是 在AMR传感器处,磁场强度要低许多,尤其是在6mm处。 根据设计,该磁体能在3mm条件下提供25kA/m的磁场强度。



诊断

对于监控ADA4571而言,多种后期处理诊断有助于确保系 统正常运行,也/或有利于监控系统性能。在轴尾或离轴配 置中,磁场强度必须在整个机械旋转过程中保持均匀。该 磁场的强度必须超过25 kA/m,才能使传感器完全饱和,以 克服其内部磁化效应。在达到该条件的基础上,必须使正 弦通道和余弦通道的输出幅度同步,相位差为90°。受此输 出同步性影响,在恒定温度条件下,半径保持不变。半径 可用下式计算:

$$V_{RAD} = \sqrt{(V_{SIN} - \frac{V_{DD}}{2})^2 + (V_{COS} - \frac{V_{DD}}{2})^2}$$

当半径V_{RAD}由外部处理器或电子控制单元(ECU)监控时, 如果相对于额定半径出现任何显著偏差,就表示系统出现 了故障。实时机械故障和对齐误差以及磁场强度下降等情 况,都可以通过计算该半径来监控。

根据ADA4571增益控制引脚(GC)的配置,允许的输出半径 以下列值为边界。该范围在图15和图16中表示为阴影区 域。图中同时给出了-40℃、+25℃、+125℃和+150℃条件 下的典型V_{RAD}值。最小值和最大值见ADA4571数据手册。 监控器件处的温度可以进一步收窄该允许范围。



Rev. 0 | Page 7 of 10



虽然正弦和余弦信号的幅度很大程度上独立于磁场强度, 但是相比饱和传感器,未饱和传感器的输出幅度开始表现 出下降迹象。

下面的半径和快速傅里叶变换(FFT)图(图17至图20)是用前 面讨论的SmCo磁体(直径为10mm,厚度为5mm)测试所得。 传感器以5 V电源供电,并保持在室温下。

图17所示为一个饱和传感器和一个未饱和传感器的半径 图,分别以40 kA/m和10 kA/m激励。



正弦和余弦输出信号的FFT是一个强大的工具,可以用来 考察传感器的性能,也可用于排查整个系统的故障。

图18所示为一个对齐良好的传感器的FFT。图19所示为一 个与磁体中心对齐误差为1mm的传感器的FFT。图20所示为 一个未饱和、大气隙传感器的FFT,其激励强度为10kA/m。

注意,在对齐误差和未饱和传感器图中,测得的噪底增加 了。对于未饱和传感器,在系统中,高阶谐波占据明显优 势。这些谐波是导致传感器精度下降的主要原因。



误差源

为了尽量减小传感器的角度误差,有必要了解导致误差的 不同原因及其校准方式。

失调误差

传感器失调导致的误差是造成系统误差的罪魁祸首。然 而,经适当校准后(见"校准程序"部分),失调误差可以降 至接近零的水平。

幅度同步误差

对于ADA4571,针对检测元件和信号调理电路的正弦和余 弦通道布局都必须仔细考量,以确保获得良好的匹配性 能。作为结果,ADA4571上因幅度同步导致的误差可以忽 略不计,无需对幅度失配误差进行校正。

相位误差

由于两个AMR惠斯登电桥在单个芯片上的生产布局,正弦 通道与余弦通道之间的内在相位误差可以忽略不计。然 而,如果输出信号用多路复用模数转换器(ADC)而没有进 行同步采样,结果就会引入相位误差。在较高的磁场旋转 速度下,异步采样导致的误差更大,因为采样之间的相位 滞后变大了。建议用两个独立的ADC,或者一个多路复用 ADC配合两个同步跟踪保持放大器,对正弦和余弦输出同 步采样,防止相位滞后导致误差。采样相位误差的大小直 接关系到计算得到的电气误差的大小。

校准程序

为了使ADA4571达到最佳性能,要求执行一次校准程序。 根据关于磁体-传感器对齐和气隙距离的建议,把机械容差 固定下来,并尽量对齐机械设置。一旦系统设置完毕,传 感器的失调和失调漂移就成为角度误差的主要来源。可以 实施两种不同的校准:动态校准或单点校准。相比单点校 准,虽然动态校准得到更小的角度误差,但要求进行更多 的实时处理。

动态校准只能在360°连续或自由运转应用中执行。在该模 式下,可以连续监控失调,以校准ADA4571,消除系统寿 命周期和系统温度范围内的失调和失调漂移可能导致的误 差。有多种方法可以从传感器输出信号获取失调信息。从 整体波形中获取最大值和最小值可以准确地表现失调。通 过求出在多次全机械旋转下获得的过去采样值的平均值, 也可以得到准确的失调值。每个通道的失调并不相同,必 须分开存储。

在获取到每个通道的失调时,控制器必须从各个通道减去 相应的失调,然后计算arctangent2从器件获得角度信息。



单点校准可用于自由运转应用,也可用于静态应用。这种 应用下,角度测量值移动范围不会达到一整个机械旋转。 要在360°范围内实施单点校准,必须捕捉偶数次电气旋转 来抽取精确的失调值。对于180°位移应用,只能捕捉到一 次电气旋转用于抽取精确的失调值。把每个输出通道的相 关失调信息保存在控制器中,以便进行失调补偿。

无论用哪种方法捕捉失调值,我们都建议在计算失调时, 至少使用两次完全的机械旋转。然后,从信号输出中减去 该失调值,再恢复角度信息。虽然单点初始校准有助于减 少失调导致的角度误差,但应尽量采用动态校准以最大限 度地减少传感器误差。动态校准有助于应对AMR传感器内 在与温度相关的失调漂移问题。



布局建议和磁场干扰

鉴于磁性检测应用的性质,在接近传感器处使用的材料必 须为非铁质材料或非磁性材料。承载交流和直流大电流线 缆或走线也不得置于AMR传感器附近。根据楞次定律,任 何承载大电流的线缆或走线都可能造成磁场干扰,结果可 能干扰扭曲所检测的磁场方向,给系统带来更多误差。随 着远离磁体,磁场强度呈三次方下降。由于存在这种立方 关系,所以,承载大电流线缆与传感器之间增加任何额外 间距,结果都会使传感器周围的杂散磁场量大幅减少。

如果大电流必须位于传感器附近,则可通过几种方法来减 少干扰。采取磁屏蔽措施,在传感器周围设置导磁性材料 (如钢),有助于使磁传感器和激励源与外部环境隔离开 来。采用强度较高的磁体也有助于减小干扰磁场的影响。

VTEMP输出

ADA4571有一个片内粗略温度传感器,可以用于诊断目的。如果需要测量温度,必须在已知温度条件下对读数进行初始校准。可以运用下式,根据VTEMP引脚读数计算温度信息:

$$T_{VTEMP} = \frac{\begin{pmatrix} V_{TEMP} \\ V_{DD} \end{pmatrix} - \left(\begin{pmatrix} V_{CAL} \\ V_{DD} \end{pmatrix} - T_{CAL} \times T_{CO} \right)}{TC_{VTEMP}}$$

其中:

 T_{VTEMP} 为根据VTEMP输出电压计算出的温度(℃)。

V_{TEMP}是工作期间的VTEMP输出电压。

V_{DD}是电源电压。

V_{CAL}是在受控温度下校准期间的VTEMP输出电压。

T_{CAL}是校准期间的受控温度。

T_{co}为内部电路的温度系数

TC_{VTEMP}为VTEMP读数的线性温度系数。

为了提高精度,建议使V_{DD}在初始已知温度校准时和工作 时之间保持一致。TC_{VTEMP}为VTEMP读数的线性温度系 数。TC_{VTEMP}随所用电源电压而变化,当TC=3.173 mV/V/C 时,典型的T_{VTEMP}精度为±5°C。无论是否使用,必须用一 个22 nF电容接地,以达到电磁干扰(EMI)要求。

©2014 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. AN12487sc-0-10/14(0)



www.analog.com