

# 设计坚固、容错的运动控制反馈系统

当今的工业应用迫切需要可以在苛刻条件下一天24小时连续工作的、可靠耐用的工业机器人和自动机械装置。这样的系统要求远比以前精确的电机和反馈控制，今天的大多数性能改进要归因于新技术和微电子技术的发展。这些创新消除了机器人共用工作空间时产生的碰撞，改进了任务分配并且提高了伺服系统的精确性，从而使自动机械系统更加可靠地工作。

一个坚固的工作系统的关键在于它处理机械和电气故障的方法。本文讨论了一个坚固、容错的运动控制系统的设计，它的反馈通道采用了正交编码器。

## 伺服系统

现代的自动化系统为了完成运动控制都要组成闭环系统。运动控制系统一般都含有一个伺服系统，它由电机驱动器和反馈元件组合而成，对于速度和位置提供精确、稳定的控制。一个典型的伺服系统的组成如图1所示。

对高性能、高速的应用系统，直流无刷电机是更可取的(直流有刷电机和步进电机适用于低速和要求不高的场合)。本文所述系统采用的都是无刷电机。这种电机的轴端装有测定轴速和换向点的正交编码器，用于控制电机的线圈切换顺序。有关反馈编码器的类型，参见正文后第8页的补充材料：反馈编码器的类型。第二个正交编码器安装在机械装置的旋转轴上，它输出旋转轴的位置数据信号，由于传动装置和导螺杆中的齿隙所导致的误差，使得旋转轴的位置和电机轴的位置不一致。

典型的运动控制卡或模块包含一个运动控制芯片，一个微处理器和一个用于处理高速编码信号的DSP或定制ASIC。控制器为驱动器或放大器提供一个控制转动速度和方向的信号，驱动器把它转换为适当的电压和电流(功率)去驱动电机运转。要设计一个坚固的、具有容错能力的运动控制反馈系统，在设计过程中要涉及以下几个方面的内容：

- 控制器—编码器输入电路(接收器电路)
- 接收器印刷电路板的设计
- 编码器信号电缆系统

尽管本文没有涉及，关于运动控制器输入还有一些问题应该考虑，例如硬接线方式的紧急制动和输入的限制等。

## 控制器接收电路

电机的正交编码器输出6路RS-422/RS-485信号(A、 $\bar{A}$ 、B、 $\bar{B}$ 、INDEX和 $\bar{INDEX}$ )，通过电缆传送至运动控制器的接收电路——编码器信号输入电路。接收电路把RS-422信号转换为逻辑电平信号(由于系统只有一个发送器，故假定它是RS-422信号)，并把信号送至运动控制电路进行处理。对于RS-422和RS-485的不同之处，可以访问[www.maxim-ic.com/an736](http://www.maxim-ic.com/an736)，参阅文章RS-485 (EIA/TIA-485) *Differential Data Transmission System Basics*。接收电路必须对来自伺服系统的各种故障包括开路、短路、噪声等做出反应。有关故障和ESD的说明，请参考正文后第7页的补充材料故障类型。

图2所示是一个典型的运动控制器的编码信号输入接收电路。U1是一个10Mbps、5V、四通道RS-422/RS-485接收器，具有±15kV ESD保护。对于一个容错系统来讲，由于编码信号输入电路要和外部

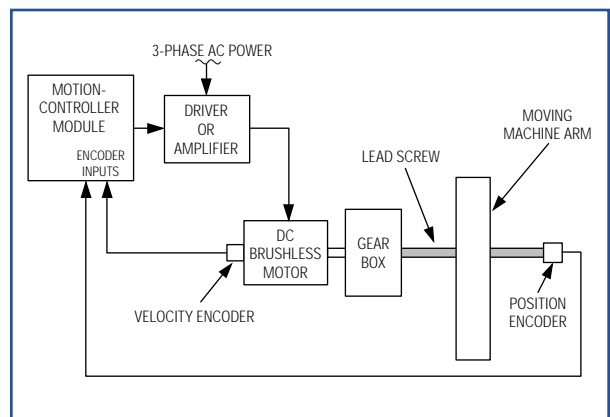


图1. 用正交编码器反馈速度和位置信号的直流无刷伺服系统。

元件相连接, ESD 保护是必须的。省去外部ESD防护部件, 可以大大减少印刷电路板的面积。

从正交编码器发出的信号通过双绞线传送到接收电路, 每对互补信号线之间跨接一个 $150\Omega$ 电阻提供适当的端接(电缆的端接及相关问题在后面会详细讨论)。当发生电缆断裂或脱离等开路故障时, 要想运动控制器采取适当的行动, 首先必须检测到这些故障。作为一种失效保护措施, 当输入信号线开路时, MAX3095 接收器会输出逻辑高。 $1k\Omega$ 偏置电阻使输入端“*A*”的电压至少比输入端“*B*”高 $200mV$ 。当有输入端接电阻时, 它们仍需保持失效保护输出。这个电路具有ESD防护、开路检测和输出短路保护, 但不能检测输入短路。

另一种改进的电路(图3)包含了2片IC, 每片都包含三路RS-422/RS-485接收器。各接收器均具有内置的故障检测、 $\pm 15kV$  ESD保护和 $32Mbps$ 的数据速率。MAX3098E能检测接收器输入开路和短路故障, 也能检测低电压差分信号和共模范围超限等其它故障。它的逻辑电平输出能够指示哪一路接收器输入发生了故障。这种直接的故障报告降低了软件开销, 并将外部逻辑元件减到最少。

任何一路编码器输入发生故障都会立即在相应输出发出逻辑高信号: ALARMA、ALARMB或ALARMZ。伺服系统移动缓慢时, 会在正交编码器信号的过零区域产生瞬时故障, 触发“假故障”。通过选择电容C\_DELAY的值, 可将ALARMZ输出(ALARMA、ALARMB和ALARMZ的逻辑或)延迟

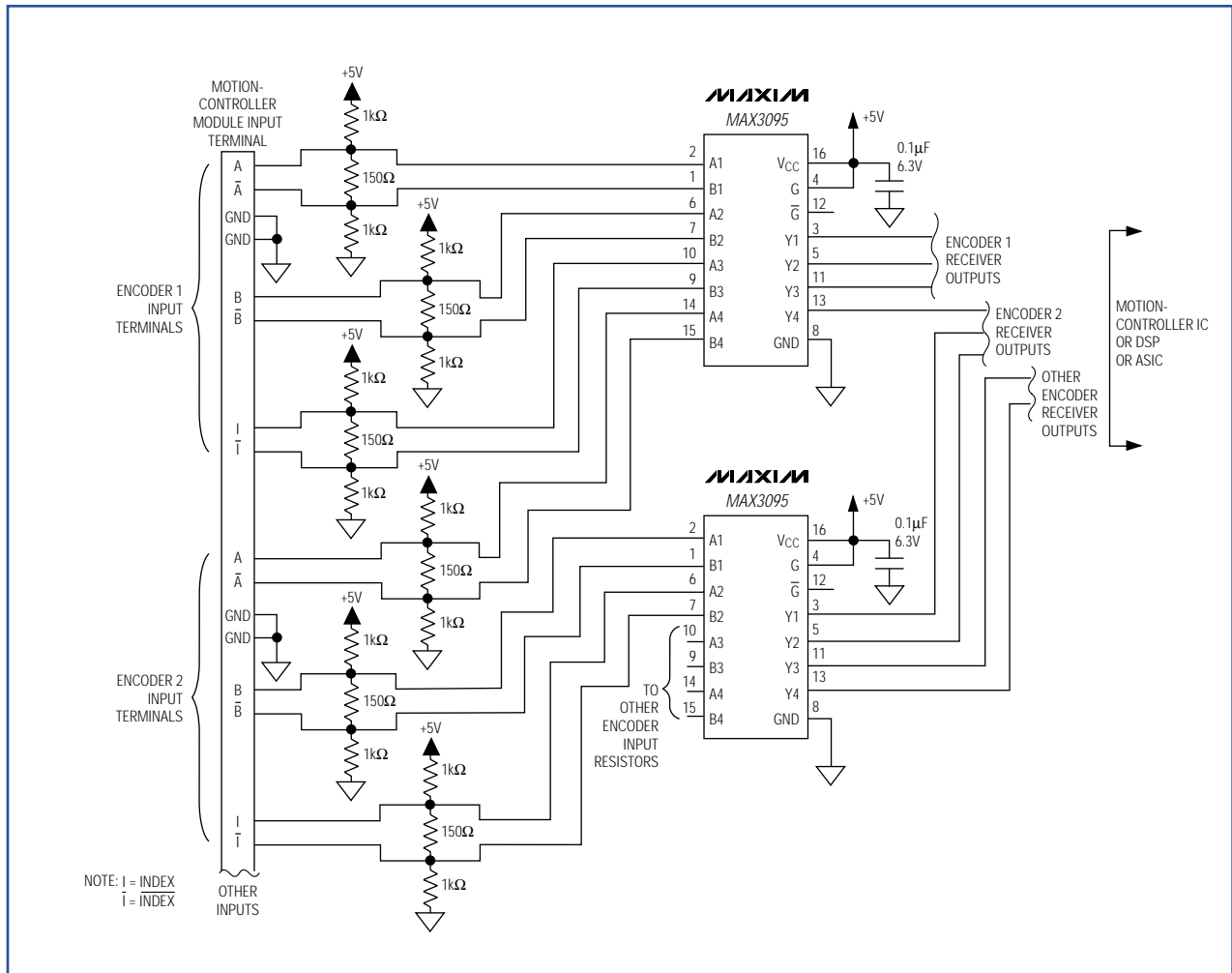


图2. 运动控制器的一部分, 这个编码器接收电路在每条编码器输入线上都具有开路检测和ESD保护(内置于MAX3095)。

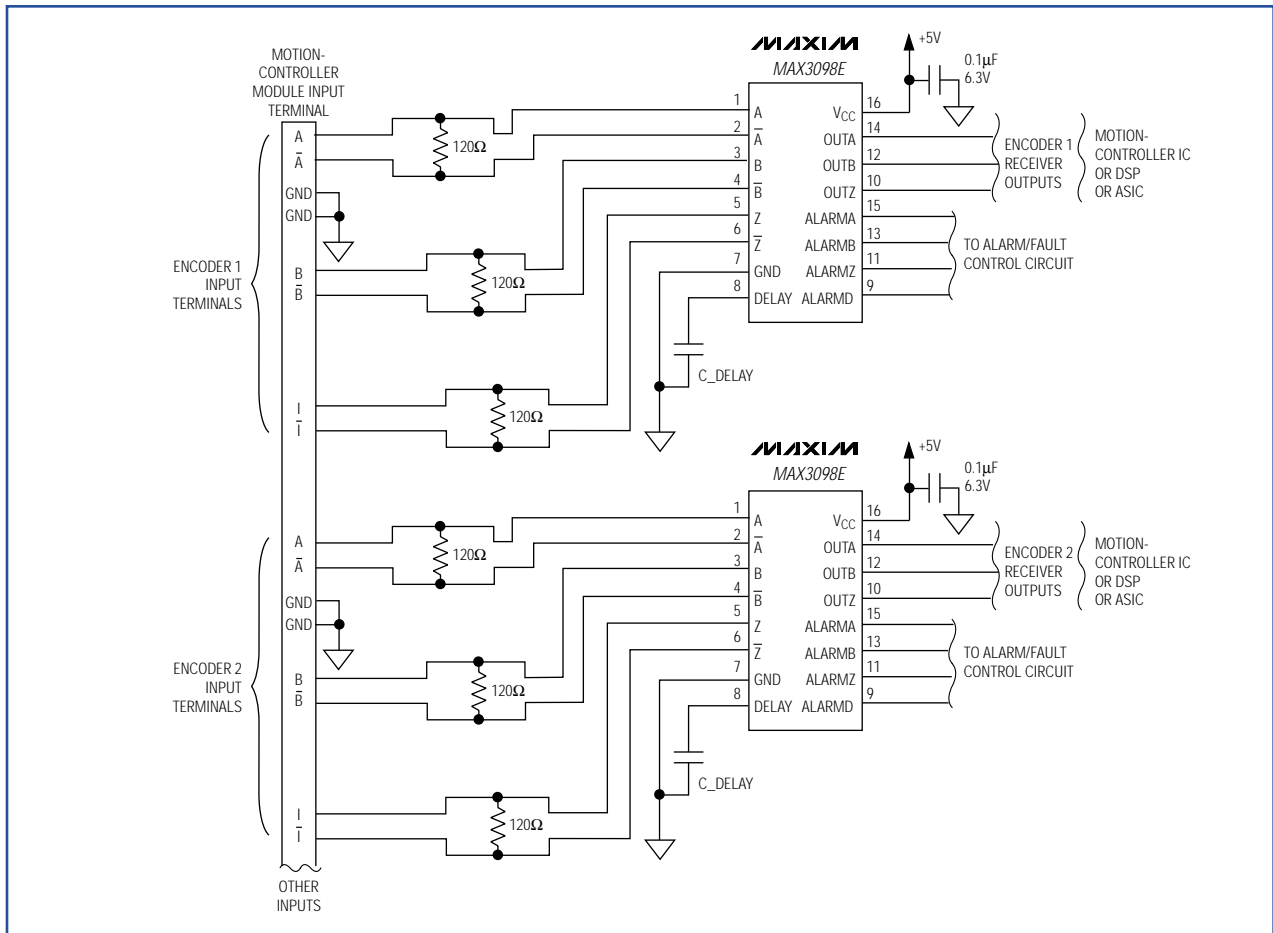


图3. 该电路是对图2的改进，提供开路、短路和中间状态故障检测，所有编码器输入线上的ESD保护，以及延迟的告警/故障输出。

适当的时间。120Ω电阻为RS-422电缆提供适当的端接。由于IC采用16引脚QSOP封装，仅需很少的外围元件，因而在印刷电路板上占用的空间也很小。

### 接收电路印制板布局

正确的接收电路布局要从RS-422编码器的输入连接器开始。差分信号对A/ $\bar{A}$ 、B/ $\bar{B}$ 和INDEX/ $\bar{INDEX}$ 必须占据连接器的相邻引脚。这种方式可使各差分对的信号电流通路相叠相消。典型的元件放置如图4所示。为保证印刷电路板上每一条走线有相同的寄生电容，每对信号线要尽量靠近、长度相同并且尽量对称。

为减小数字信号的感性和容性串扰，并降低电感，来自于连接器和接收电路的差分RS-422信号应该布置在大面积地层上，接地层通常位于印制板中间。这个接地层上不应有大电流信号流动。

运动控制器电路中的高速电流切换会产生共模噪声。使用滤波器和旁路电容有助于减小耦合到供

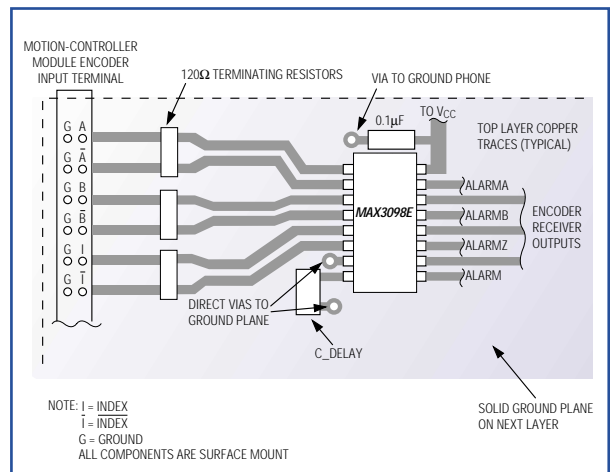


图4. 运动控制器的编码信号输入电路中，具有故障检测功能的MAX3098 RS-422/RS-485三接收器的印刷电路板的正确走线和元件放置。

电线路中的共模电压。可以紧靠接收器的 $V_{CC}$ 输入端放置一个 $0.1\mu F$ 的旁路电容。为减小旁路回路的电感，电容器的接地引脚应直接接到地线层，芯片的接地引脚也是一样，应通过一个靠近的过孔打到地。最后，为减小耦合到接收器电路中的噪声，应避免接收器的信号线靠近功率电路。

## 编码器信号电缆

由于正交编码器的差分信号是平衡的，因而可以在常规电缆上传送。不过，双绞线更好一点。双绞线具有很低的感应耦合，在高达数兆赫兹的频率范围具有恒定的阻抗，特别适合于运动控制系统的高速特性。双绞线也有助于减小辐射和接收电磁干扰(EMI)。

双绞线有屏蔽和非屏蔽两种。非屏蔽线尺寸小、造价低、重量轻，弯曲半径小等特点。然而，差分正交编码器信号必须使用屏蔽线。由于屏蔽层可提供额外的EMI防护，屏蔽双绞线具有更好的共模抑制。实际的非屏蔽双绞线中不太理想的绞合会产生显著增加的EMI噪声。在编码信号输入连接器中应把屏蔽层接至接收器的地线上。

编码器的信号电缆不应携带功率信号或其它任何信号。也不能和其他载有功率信号或噪声信号，包括60Hz电源的电缆或管道靠近或平行布线。

现代的高速伺服控制系统中的编码器在工作时可提供高达数兆赫兹的数据速率。在这么高的速率下，编码器信号电缆必须在接收器端采用端接电阻或网络正确地端接。理想情况下，端接电阻值和电缆的特性阻抗相同。

由于在RS-422网络(一个发送器和一个接收器)上只有一个发送器(编码器输出)，因此在发送器端就不需要端接电阻了。

末端接接收器输入端上的振荡和反射会将数据吞吐量限制在数百kbps。通常匹配在电缆特性阻抗的 $\pm 20\%$ 就足够了。正确的编码器电缆端接如图2和图3所示。

这样，就可以为坚固的具有容错能力的运动反馈控制系统设计一个现代高速伺服系统。运动控制器的接收电路必须对产生的各种故障做出预知的反应，为了预防编码器数据的噪声问题，还要合理地设计接收器电路的印刷电路板。设计者也要考虑正交编码器的信号电缆系统，包括接收器电路的端接。有了这些预防措施，就可以设计出性能稳定、故障期间具有预知状态的运动控制反馈系统。

## 名词术语

**齿隙：**两个或多个齿轮间的间隙。

**Index：**正交编码器的一条输出信号，每旋转一周发出一个脉冲。

**锁定：**IC完全失效或短时丧失功能。

**分辨率：**输出信号的位数，或(对于正交编码器)每旋转一周的周期数。

## 参考书目

Barnes, John R., *Electronic System Design, Interference And Noise Control Techniques*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1987.

“New RS-485 IC Increases System Reliability and Fault Detection in Motor-Control Circuits,” [www.maxim-ic.com/an578](http://www.maxim-ic.com/an578).

Thomas, Sokira J. & Jaffe, Wolfgang, *Brushless DC Motors, Electronic Commutation and Controls*, Blue Ridge Summit, PA, TAB Books Inc., 1990.

类似文章发表于2003年2月3日的*Electronic Design*。

## 故障类型

从系统层面来看，最为明显的故障有开路、短路和介于两者之间的一种中间状态。电机和反馈编码器通常位于距离伺服系统控制器/放大器几十到几百英尺的地方。连接器安装在长电缆的两端，导线有可能从连接器上脱落，连接器有可能断开，电缆有可能在不经意之间断开。当由于机器振动导致终端连接器断开或电线切断，开路或短路故障通常会表现为多次的断开/再连接这样的循环，恰似开关在完全打开或闭合之前的抖动。由于编码器反馈信号通常由双绞线传输，差分信号很有可能在短路故障期间被短到一起。

中间故障发生在反馈导线的电阻或电容增加的情况下，例如在安装时如没有很好地夹紧电缆就会产生这种问题。这种问题会在以后的运行过程中表现出来。比如，当潮气通过损坏的护套进入电缆时，随着时间的推移，电缆的电容会增加，造成信号强度的减弱。这种情况在重工业环境是常见的，这里的自动化设备要求每日清洗。尽管性能日益恶化，电缆还要维持工作。作为一个预防措施，应该增加一个湿度-污染故障检测电路。

噪声故障很难排除，因为噪声可能来自于电磁干扰(EMI)、射频干扰(RFI)和/或地线或系统级接地环路。系统级噪声源(辐射源)包括：

- 直流电机在换向时电刷产生的电孤
- 来自PWM电机放大器的高速dv/dt 开关噪声
- 高功率继电器、开关和执行器，比如电磁铁
- 60Hz 交流系统中，SCR和TRIAC器件的随机接通
- 开关电源
- 静电放电

噪声接收器(天线)包括长电缆线、接地线、印刷电路板上高阻抗长线条和变压器。噪声传播需要在接收器和辐射源之间有一种耦合方式，比如电容、电感或传导耦合。电容耦合一般发生在高阻抗电路，导线或其它类型的未接地金属片会拾取或产

生电场。要发生容性噪声耦合，电路的回路阻抗必须超过空间的本质阻抗(376.7Ω)。

电感耦合一般出现在低阻抗电路里，电路回路的阻抗要小于376.7Ω。导线、开磁路的电感和变压器会拾取或产生磁场并导致EMI噪声。在设计和安装时要尽量减少电路中的这些电流回路。

传导性噪声通常从地线进入电路。直流耦合噪声是沿地面最小电阻通路进入的，交流耦合噪声则是从最小阻抗处进入的。其结果是，电路的参考点(地)往往高于或低于它的正常值，最坏情况下，它是一个动态变化值。

交流电源零线和系统地线形成的地环路上有地电流流动时会产生随机噪声。地电流由电压差驱动，而这个电压差可能感应自其它电缆或设备，错误的接线，错误的接地，或者是正常的设备漏电(常见于工业环境)。

共模噪声，两个浮动的或高阻的节点上共有的噪声，具有交流或直流形式。共模噪声是系统设计中所固有的，但通常是通过感性或容性方式耦合自外部噪声源。例如，一个来自电源线的60Hz信号就会被感性耦合到与之相邻的一对模拟传感器的信号线中，并会淹没这个低电平的传感器信号。

当两种不同材料相接触、交换电荷和分离时，会在它们之间产生一个电压，从而产生了静电放电(ESD)。IC引脚和外部连接器相连在一起，当技术人员进行检修时，连接或断开电缆时很容易使它受到ESD的影响。

ESD进入IC会导致IC锁定甚至完全失效。锁定时很大的电流会进入IC，导致主电源进入限流状态或使系统进入失控的关断状态。IC引脚暴露于外部信号或连接器，而又没有内部ESD保护时，必须在外部增加ESD保护或硅雪崩抑制器，如金属氧化物压敏电阻或TransZorbs。内置ESD保护的IC可以节省印刷电路板的面积，使驱动器外形更小、更易于封装。

## 反馈编码器的类型

为实现精确定位，伺服系统必须有一个反馈信号使反馈形成闭环。能提供这种反馈信号的装置包括光电编码器、旋转变压器和正交磁致伸缩线性位移传感器。其它类型还有测速电机和感应发电机，霍尔效应元件和电位器等，不在讨论之列。

光电编码器输出一个数字方波信号，包括正交(增量)型、绝对值型和伪随机型。一个典型的光电编码器包括光发射器、光接收器、输出原始模拟信号的编码轮。这个模拟信号被送至编码器的处理电路，转换为数字信号输出。信号输出方式有集电极开路输出和单端输出，逻辑电平为5V至24V。为了降低噪声干扰，最可靠的输出是互补、差分的RS-422。

正交光电编码器输出的反馈信号有A、B、Z三种形式的脉冲。信号A和B来自编码器码轮并具有90°的相差，所以称之为正交(也就是相隔1/4个周期)。当A超前于B时，表明编码器是顺时针旋转的，反之，编码器为逆时针旋转。因而由这两个信号就可得到位置、方向和速度数据。信号Z表示电机转子的位置和编码器的轴是否转过360°。它还能校验信号A和B的误算。采用RS-422接口时，编码器提供互补的A、B和Z输出。

绝对光电编码器采用的信号处理部件与正交光电编码器相似，只是它在每旋转一周时输出一个并

行二进制字。一般是十二至十三位的BCD、格雷或自然二进制码，13位输出只用于低频响应(1200 RPM输出12位；600 RPM输出13位)，但每转360°具有更精细的分辨率。这种类型的编码器很适于监测上电和掉电期间的轴的位置，因为和正交编码器不同的是，在编码器没有移动时，轴的位置也可通过编码输出读得。

新型的伪随机光电编码器输出3个信号：A和B给出了方向和空间同步信号，另一个信号给出位置数据。这种编码器需要有1°到2°旋转才能确定位置。

旋转变压器是具有正弦和余弦信号输出的反馈编码器，通过伺服系统控制器的处理，可以从中获得速度和位置数据。当轴旋转时，旋转变压器的反馈信号能够提供绝对位置信息，但其低速性能较差。这种编码器的主要缺点是将信号转换为数字信号时，要对信号进行必要的处理，造价相对较高。

正交型磁致伸缩线性位移传感器(LDT)是用来测量直线移动的反馈编码器/传感器，不适用于转动位置测量。它的工作原理是：LDT的线性位移杆带动磁铁的移动，磁铁作用于磁致伸缩导线，产生一个电流脉冲信号，再由一个拾取传感器检测这个脉冲信号——模拟位置信号。最后由LDT对它进行处理，转换为和正交编码器相似的数字输出信号A、B、和Z。