

旋转系统伺服位置编码器

崔延光

(柏奥尼克机器人(宁波)有限公司北京分公司,北京 100000)

摘要:在现代工业自动化、机器人技术、高精度数控机床及航空航天等尖端装备制造领域,伺服控制系统作为实现精密运动执行的关键环节,其性能直接决定了整个系统的响应速度、定位精度与运行稳定性。作为伺服系统核心反馈单元,旋转系统伺服位置编码器承担着实时获取电机转子位置、速度及运动方向的关键任务,其性能优劣从根本上制约着伺服环路的控制品质。首先分析光电、旋变、磁电、电感4类旋转系统伺服位置编码器的技术原理,然后阐述各方案的核心信号处理算法、精度及其在工程应用中的优缺点,旨在为相关研究人员提供一定理论支撑与实践参考。

关键词: 伺服; 旋转系统; 位置编码器

中图分类号:TM921.54

文献标识码:A

DOI:10.19769/j.zdhy.2026.09.002

Rotating System Servo Position Encoder

CUI Yanguang

(Beijing Branch, PNDbotics Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: In the fields of modern industrial automation, robotics, high-precision computer numerical control machine tools, and aerospace and other cutting-edge equipment manufacturing, servo control systems serve as the key link for achieving precise motion execution, with their performance directly determining the response speed, positioning accuracy, and operational stability of the entire system. As the core feedback unit of the servo system, the rotating system servo position encoder undertakes the critical task of acquiring the real-time position, speed, and motion direction of the motor rotor, and its performance fundamentally restricts the control quality of the servo loop. Firstly, this paper analyzes the technical principles of four types of rotating system servo position encoders, namely photoelectric, resolver, magnetoelectric, and inductive encoders. Then, this paper elaborates on the core signal processing algorithms, accuracy levels, as well as their advantages and disadvantages in engineering applications, aiming to provide a certain theoretical supports and practical references for relevant researchers.

Key words: servo; rotating system; position encoder

0 引言

旋转伺服系统通常由位置、速度以及电流3个闭环回路协同工作。位置环依托伺服位置编码器的位置反馈实现高精度的轨迹跟随;速度环的调节律建立在伺服位置编码器速度与方向反馈之上;电流环必须借助高精度的位置编码器提供的角度信息来完成坐标旋转变换。在现代精密伺服控制系统中,高精度定位、高动态响应以及高可靠性的编码器技术已成为推动伺服系统发展的关键因素之一^[1]。

收稿日期:2025-11-30

修回日期:2025-12-29

作者简介:崔延光,男,1989年生,硕士,从事电机控制、电机设计等工作,E-mail:alicen_c@126.com。

1 旋转系统伺服位置编码器的分类

根据输出信号的不同,旋转系统伺服位置编码器主要分为增量式与绝对式两种基本类型。增量式编码器负责输出与角位移成正比的脉冲序列,具有结构简单、响应快的优点,但该编码器断电后位置信息便会丢失,而且每次上电均需执行回零操作。绝对式编码器负责为每个位置赋予唯一的二进制编码,能够直接输出当前所处的绝对位置。该编码器断电后,位置信息可以保留,且抗干扰能力更强,特别适用于对精度和可靠性要求严苛的应用场景。在此基础上,单圈绝对值编码器可记录一周内的位置,而多圈绝对值编码器能借助机械齿轮或电子计数,记录旋转圈数,

实现全行程的绝对位置感知。

根据物理检测机制的不同,旋转系统伺服位置编码器分为光电式、旋转变压器式、磁电式及电感式等类型。不同类型的旋转系统伺服位置编码器在信号生成原理、环境鲁棒性及精度极限上呈现显著的特征分化。

2 光电位置编码器

光电位置编码器结构主要包含光源、光栅以及光电接收器,如图1所示。在光电检测环节中,发光二极管或激光二极管作为激励源,负责输出稳定的光束。光束穿过光栅盘上蚀刻的高密度明暗条纹后,其强度受周期性调制。被调制的光信号由光敏二极管或光敏三极管阵列接收,并被转换为电信号:当光线透过透光区域时,接收单元输出高电平;当光线在不透明区域被遮挡时,接收单元输出低电平。若采用反射式编码器,则通过检测反射光与暗区的差异,产生与逻辑电平相反的输出序列。

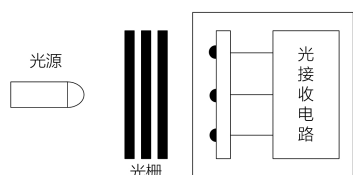


图1 光电位置编码器结构

增量式光学编码器码盘本体的表面沿周向精密刻有呈径向等间距分布的透光与不透光交替的光栅结构^[2],具体如图2所示。光栅在单圆周上形成了均匀且确定的光学周期,其总数即编码器的标称线数,构成了测量分辨率的物理基础。信号处理电路通过对脉冲沿的提取,可实现四倍频,甚至更高倍数的细分,获得高于物理光栅数量的等效分辨率。增量式编码器输出的脉冲信号仅反映相对位移,不具备绝对位置记忆能力。一旦系统断电,则当前位置信息丢失,且重新上电后必须执行回零操作。

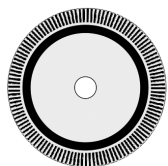


图2 增量式编码器光栅结构

与增量式编码器不同,绝对式编码器的码盘在物理结构上采用多码道同心圆环的并行布局方式。每圈码道对应编码器的1个数据位,码盘上的码道总数或与之对应的光电探测器阵列的数量,直接决定了编码器的二进制位数。多码道并行编码结构使得绝对式编码器在任意位置均可输出唯一的二进制码值,从而在断电后无需回零即可实现绝对位置检测。绝对式格雷码盘相邻两个数值之间,仅有一位二进制位发生变化,如图3所示。

正余弦编码器光栅架构(见图4)的核心在于莫尔条纹的光学干涉效应,将标尺光栅与指示光栅以极微小的夹角进行叠合,利用两组光栅线纹在空间上的周期性重叠与遮挡,在感光区域调制出明暗交替、呈周期性分布的莫尔条纹信号。

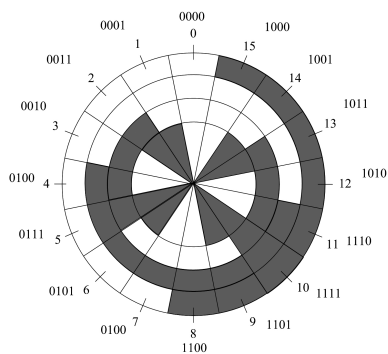


图3 绝对式编码器格雷码盘光栅结构

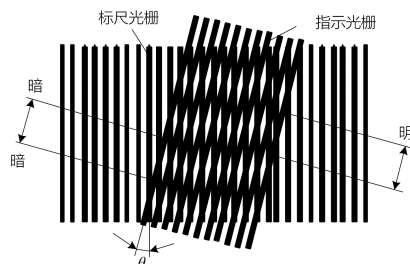


图4 正余弦编码器光栅结构

受限于光栅副间的空气隙、照明光源的非平行度、衍射效应以及栅线刻划误差等多重非理想因素的耦合作用,理论上理想的三角形莫尔条纹光强分布会发生显著畸变,其波峰与波谷被平滑处理,最终呈现出正弦波特征^[3]。通过高倍率电子细分技术,将一个信号周期划分为数千甚至数万个细分步距,获得远高于物理光栅线数的等效分辨率。由于正余弦编码器输出信号的模拟连续性,其测量分辨率不再受限于光栅的物理刻线密度,而是取决于后续电子细分的倍率。正余弦信号良好的连续性与线性度,可显著降低低速段的速度纹波,并在速度与加速度估算方面具备天然优势。光电位置编码器精度极高,响应快,抗电磁干扰能力强,但存在光对油污、灰尘、水雾等污染物非常敏感,玻璃光栅抗振动能力不足,价格高昂等问题。

3 旋转变压器

旋转变压器是一种基于电磁感应原理的模拟式角度传感器,与电机类似,主要由定子和转子两部分组成。旋转变压器等效结构如图5所示。

绕线式正余弦旋变系统在绕组布局上,旋变转子侧集成了励磁输入绕组与环形变压器的次级绕组,两者在电气层面实现了直连;定子侧则对应配置了正余弦信号输出绕组及环形变压器的初级绕组^[4]。

旋转变压器的工作原理基于电磁感应机制设计。当高频交流激励信号施加于环形变压器初级定子绕组时,其次级转子励磁绕组将感应出电动势。鉴于该次级绕组与旋变励磁绕组串联形成闭合回路,回路内随即产生感应电流。该电流驱动励磁绕组建立脉振磁场,而该磁场的空间分布严格受控于转子的机械角位置。定子侧的正余弦输出绕组通过切割该位置的相关磁场,感应出幅值随转子角度呈正余弦规律变化的电压信号,随后计算正余弦信号的幅值,二者相除即可得到角度的正切值,再利用反三角函数或者锁相环等方法得出角度,实现高精度的位置解算。

旋转变压器可在高温、低温、高湿、强振动、强冲击等恶劣环境下长期稳定工作。旋变本体轴向尺寸较大,解算延迟长,难以满足超精密定位需求。

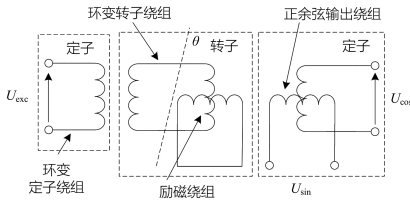


图5 旋转变压器等效结构

4 磁编码器

基于不同的自旋电子学效应,现代磁编码器形成了多元化的技术架构:涵盖传统的霍尔效应、进阶的各向异性磁阻(AMR)与巨磁阻(Giant Magnetoresistance, GMR),以及代表最新量子隧穿方向的隧道磁阻(TMR)技术。磁编码器通过传感器获取转子磁场的正交分量信号,并对信号进行调理与误差补偿,然后利用CORDIC算法对正弦和余弦信号进行反正切运算,实时解算出高精度的旋转角度。利用磁畴壁在GMR材料构成的螺旋形纳米线中的运动,实现无源、非易失的多圈记忆。

在轴式磁编码器由圆形磁铁及磁编码器解码芯片构成,其传感器和磁铁都位于转轴中心,如图6(a)所示。在轴式磁编码器信号线性度好,算法简单,但轴向尺寸长且难以实现空心走线,适用于传统伺服电机等对轴向空间不敏感的场景^[5]。离轴式磁编码器由磁环与磁编码器解码芯片构成,其磁环安装在转动轴,传感器布置于转轴侧面,如图6(b)所示。离轴式磁编码器压缩了轴向尺寸且支持中空走线,适用于协作机器人关节、扁平电机等。传感器端感应到的磁场为椭圆形,所以必须依赖高阶谐波补偿算法校正。



图6 两种磁编码器

磁编码器体积小,成本相对较低。磁编码器虽然可以

提高分辨率,但绝对精度较低,容易受周围存在的强磁干扰。

5 电感式位置编码器

电感式位置编码器由激励线圈、接收线圈及随被测轴同步旋转的金属导体制成的扇区状齿轮构成,如图7所示。

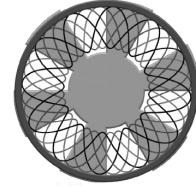


图7 电感式位置编码器

激励单元采用圆形线圈设计,当施加交流激励信号时,其会在气隙中建立近似匀强的交变磁场。当转子在该磁场中旋转时,其表面因电磁感应产生涡流,进而激发出与激励磁场方向相反的次级反作用磁场,使接收线圈所在区域的合成磁场发生畸变^[6]。接收线圈组由偶数个极性交替的线圈构成,并严格遵循中心径向对称布局。在无转子介入的初始状态下,基于对称抵消原理,接收端输出电压趋近于零;转子介入后,磁路耦合状态被打破,接收线圈感应出幅值随转子角位置调制的电压信号。通过解算两组正交布局接收线圈的输出电压比值,即可精确重构转子的圆周角度信息。电感式位置编码器环境适应性强,抗外部磁场干扰能力强,分辨率与精度较高,但信号处理电路较为复杂,且线圈需设置金属避让区。

6 结语

本研究系统梳理了光电、旋变、磁电、电感4类伺服位置编码器的技术原理,阐述了各方案的核心信号处理算法、精度及其在工程应用中的优缺点。在伺服系统设计中,不存在绝对最优的单一传感器,关键在于依据系统需求寻找最佳平衡点。

参考文献

- [1]王震. 伺服电缸驱动系统开发与控制效果测试分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- [2]徐晓丹. 增量式光电编码器的细分技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [3]吕孟军. 光栅莫尔条纹电子学细分技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [4]陈尚. 旋变解码技术研究及其在伺服系统的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [5]生迪迪. 磁编码器设计及误差补偿研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [6]陈赛锋. 电感式角度编码器研究[D]. 吉林: 华北电力大学, 2024.