

高精度电子传感技术在机电运动控制中的应用

张朋亮¹, 张立琛²

(1. 杭州集益科技有限公司, 浙江 杭州 310012;

2. 杭州神踪科技有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要 随着传感器元件性能的不断提高, 以及融合算法不断发展, 高精度电子传感推动高端机电设备向着智能化、超精密化方向发展。高精度电子传感技术是机电运动控制系统达成高精度定位以及动态稳定性的关键。本文对光栅编码器、磁致伸缩传感器、激光干涉仪和电容/电涡流传感器等主要传感技术进行系统的阐述, 分析了信号调理、温度补偿、动态匹配等精度保证方法, 并对多传感器融合、传感控制一体化、实时同步等系统集成结构进行了研究。结果表明, 在数控机床、工业机器人以及微纳制造等典型场景里, 该技术凭借改善反馈信息的质量来明显加强运动系统轮廓精度、重复定位水平和环境适应程度。

关键词 高精度; 电子传感技术; 机电运动控制; 高精度定位; 动态稳定性

中图分类号 TP212; TM921.5

文献标志码 A

DOI 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.007

0 引言

机电运动控制系统性能的提高, 使其对位置、速度、力的感知精度要求也越来越高。在这种情况下, 高精度电子传感技术成了形成闭环反馈的关键部分, 它的性能界限直接影响到整个系统的动态反应和稳定性。面对复杂的工况下非线性、多干扰的问题, 单个传感元件很难同时达到精度、鲁棒性、实时性这三个要求。因此, 对典型的高精度传感元件工作机理进行研究, 分析其精度保证的关键技术, 建立高效的传感器融合架构, 对于打破目前运动控制的瓶颈、推动高端装备的发展有着重要的理论和工程意义。

1 高精度电子传感技术的核心类型与原理

1.1 光栅编码器与精密位移感知

光栅编码器是目前机电运动控制系统中应用最广的高精度位移传感装置之一。其工作原理是利用莫尔条纹和光电转换作用, 当光栅尺和读数头之间有相对运动的时候, 透射或者反射形成的光强发生变化, 被光电元件接收后经过细分处理, 得到数字位移信号。光栅编码器的分辨率是由光栅刻线密度和电子细分倍数决定的, 目前主流产品已经可以达到纳米级的分辨能力。在直线运动控制中, 封闭式光栅尺可以很好地抵抗油污、粉尘等环境因素的影响, 配合高倍数细分芯片, 可以得到亚微米级的重复定位精度。旋转运动控制时, 圆光栅编码器利用全周刻线来检测角位移,

它的好坏直接关系到转台、机器人关节这些执行机构的运动品质。光栅编码器的测量范围大、动态响应快、数字输出方便接口, 但是它的安装精度要求高、对污染敏感等特点也给系统设计带来一定的限制^[1]。

1.2 磁致伸缩传感器与绝对位置检测

磁致伸缩传感器用威德曼效应和逆磁致伸缩效应做非接触式的绝对位置测量。传感器由波导丝、磁环和电子模块组成, 激励脉冲沿波导丝传播时, 磁环所在位置会产生弹性波, 用回波时间差来计算位置信息。该技术直接给出绝对位置值, 断电后不需要回零, 特别适合行程长、工况恶劣的液压缸、大型滑台等运动系统。相比于光栅编码器, 磁致伸缩传感器在抗污染、耐冲击、安装容差等各方面都比光栅编码器更好, 但是分辨率一般较低, 适合于对绝对位置可靠性和环境适应性要求较高、分辨率要求为微米级的场合。近年来, 由于信号处理技术的改善, 其分辨率逐渐提高, 部分高端型号已经可以达到亚微米级的测量精度, 在大型精密运动平台上得到了应用。

1.3 激光干涉仪与超精密测量

激光干涉仪利用光的干涉原理, 用波长作为测量基准, 可以达到纳米级甚至亚纳米级的位移测量精度。在机电运动控制系统中, 激光干涉仪一般被用作校准设备或者嵌入超精密运动平台上, 用以检验定位精度或者创建闭环控制回路。激光干涉测量最大的优点是

作者简介: 张朋亮 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 智能传感与控制技术。

测量基准稳定、非线性误差小、动态测量范围广。双频激光干涉仪采用塞曼效应产生两个频率接近的偏振光,用外差干涉法克服直流漂移问题,在高速运动测量时有较好的信噪比。但是激光干涉仪对环境温度、气压、振动等比较敏感,使用成本高,不能广泛应用于一般的工业设备中。在光刻机、超精密机床、计量仪器等对精度要求达到纳米级的领域中,激光干涉仪仍然是不能被取代的主要传感手段。

1.4 电容式与电涡流式位移传感器

电容式位移传感器是利用电极间的电容变化来反映位移量的,具有很高的分辨率和频率响应特性,适合于微小位移的测量以及精密对准。由于测量原理不同,传感器对被测表面的导电性、介电常数和环境湿度都有一定的要求,一般用于洁净环境下的精密运动控制。电涡流传感器是利用电磁感应原理来检测线圈的阻抗变化,从而得到位移信息的传感器,它具有非接触、响应速度快、耐油污等特点,在主轴跳动监测、振动控制等方面有广泛应用。这两种传感器的量程一般小于光栅尺、磁致伸缩传感器,但是对局部微小位移的高频动态检测有较好的效果。在机电运动控制系统当中,常常被用作辅助传感单元,用来补偿主反馈传感器的局部误差或者检测高频振动成分。

2 高精度电子传感的精度保障机制

2.1 信号调理与噪声抑制

高精度电子传感技术的实现不单依靠敏感元件本身性能的好坏,信号调理电路的品质也起着非常重要的作用。传感器输出的微弱电信号要经过放大、滤波、模数转换等环节,任何一个环节引入的噪声都会影响到最终测量的精度。低噪声放大器、差分传输结构、高分辨率模数转换器属于构成高精度信号链的主要部分。编码器信号处理中,正交编码信号的毛刺消除、相位偏差校正、细分误差补偿等技术直接决定角度或者位移的测量保真度。现代高精度传感系统大多采取数字信号处理技术,用数字滤波、自适应补偿算法进一步减小周期性干扰和随机噪声^[2]。

2.2 温度补偿与热稳定性控制

温度变化属于影响电子传感器准确度的主要环境因素之一。传感器材料的热膨胀、电子元件的温漂、光源波长的变化都会造成测量误差。高精度应用场合下,单靠材料本身的低热膨胀系数已经不能满足要求了,必须采用主动式的温度补偿方式。常用的温度补偿方法有:在传感器结构内部集成温度传感元件,建立热

误差模型,用实时补偿算法修正输出值;采用对称结构设计,使热变形相互抵消;对关键部位进行恒温控制。光栅编码器系统当中,栅尺和读数头之间的热匹配设计非常重要,一些高端产品使用零膨胀玻璃或者复合材料栅尺来减小热敏感性。温度补偿效果的好坏直接影响到传感器在变温工况下的长期稳定性^[3]。

2.3 动态响应与带宽匹配

高精度电子传感技术在保证静态精度的同时,也不能忽视动态性能。机电运动控制系统在高速启停、轨迹跟踪时,由于传感器输出滞后于实际运动造成相位裕度降低或者产生振荡。传感器的动态响应特性有截止频率、延迟时间、采样率等参数,要和伺服控制器的带宽相适应。高动态运动环境下信号传输延迟、滤波环节引入的相位滞后也要在系统设计中充分考虑。传感器和执行器、控制器之间时序同步成了高性能运动控制的重要技术之一,基于以太网的高速实时总线和同步采样机制被广泛地应用到多轴协同运动系统当中^[4]。

3 传感器融合与系统集成架构

3.1 多传感器融合策略

单一的传感器在量程、分辨率、动态响应、环境适应性等各方面都存在着固有的不足,不能满足各种工况下高精度的要求。多传感器融合技术把各种类型、各种特性不同的传感器信息进行协同处理,依靠各个传感器之间互相补充的优势来提高整个运动控制系统对环境的感知能力。典型的融合结构有以下几种形式:一是用绝对式传感器和增量式传感器组合起来,先用绝对式传感器获得初始位置,再用增量式传感器给出高分辨率的动态反馈。二是用大行程传感器和局部高精度传感器级联起来,在大范围运动中兼顾全程定位和局部微调的能力。三是用位置传感器和力/力矩传感器结合起来,实现位置控制和力控制的平滑切换。融合算法的关键是信息同步、数据配准、动态权重的合理分配,卡尔曼滤波、粒子滤波等估计理论在传感器融合中得到了广泛的应用。

3.2 传感与控制的一体化设计

传统的运动控制系统采用的是“传感器-控制器-执行器”串联的结构,各个环节都是独立设计的,接口处存在着信号转换延迟和噪声耦合的问题。将传感器的信息处理和控制算法的执行放在同一个硬件平台上,中间环节被去掉,系统变得更紧凑、反应也更快。集成化的方式有多种,把传感器细分电路和伺服驱动器结合在一起,缩短了模拟信号传输的距离,降低了

电磁干扰的风险。在驱动器里嵌入高精度的位置插补和闭环控制算法,形成了智能执行单元。在系统级芯片上集成传感接口、控制核心和通信模块,构建出高度集成的运动控制节点。一体化设计不但提高了系统功率密度和可靠性,也给实现更高一级的自适应控制、预测控制打下了基础。

3.3 工业通信与数据同步

分布式运动控制架构当中,各个传感节点同中央控制器之间数据交换依赖工业现场总线或者实时以太网。传感器数据的实时性、确定性、同步精度都会影响到多轴协同运动轨迹精度以及动态协调性能。目前主流的实时工业以太网协议(EtherCAT、PROFINET IRT、SERCOS III等)都具有分布式时钟同步的功能,可以达到微秒级的节点间同步精度。高精度电子传感器用集成的同步接口可以保证在同一个时间基准下输出采样数据,从而消除由于采样时刻不一致而造成的轮廓误差。

4 典型应用场景与效能分析

4.1 数控机床与精密加工

数控机床加工精度很大程度上受位置反馈系统分辨率和稳定性影响。高端数控机床大多采取全闭环控制架构,把高精度光栅尺或者激光干涉仪安放在工作台和床身之间,直接对末端执行器的位置实施检测,从而消除丝杠、导轨等机械传动环节造成的误差。实际使用中,光栅编码器的分辨率一般在 $0.1\ \mu\text{m}$ 到 $1\ \mu\text{m}$ 之间,配合高带宽伺服驱动器可以达到复杂的曲面加工高轮廓精度的目的。五轴联动机床的旋转轴用圆光栅编码器提供角度反馈,和直线轴一起构成完整的空间误差补偿系统。高精度电子传感技术的应用使得数控机床的定位精度由原来的丝杠级几十微米提高到现在的光栅级几微米,大大提高了加工表面质量以及尺寸的一致性^[5]。

4.2 工业机器人及伺服系统

工业机器人轨迹精度和重复定位精度是由关节位置反馈是否准确决定的。现代工业机器人每一个关节都装有高分辨率的多圈绝对式编码器,既能保证开机时就得到关节的角度,又能支持高速的动态响应。协作机器人对于力的感知能力要求较高,在关节处装有扭矩传感器,把位置传感和力传感的信息结合起来,从而达到柔顺控制以及人机安全交互的目的。伺服系统上高精度电子传感技术使电机控制由原来的半闭环变为全闭环,电机尾部编码器和负载端传感器一起形成双反馈回路,补偿了减速器和传动机构的弹性变形

和间隙误差。该技术路线大大提高了机器人末端的动态定位精度,给精密装配、激光加工等高附加值应用打下了基础。

4.3 精密定位平台与微纳制造

半导体制造、光学对准、生物芯片点样等微纳制造中,运动平台的定位精度要求达到亚微米甚至纳米级别。该类系统一般会使用到多层的传感结构,即宏动层用光栅尺或者磁栅尺来完成大行程粗略定位,微动层则用电容式传感器或者激光干涉仪来达成纳米级微调,两者之间依靠控制策略共同发挥作用。压电陶瓷驱动的纳米定位平台上的电容式位移传感器可以直接测量平台的位移,并且可以作为闭环控制回路的一部分,用来补偿由于压电材料迟滞、蠕变引起的非线性。在光刻机工件台上,多组激光干涉仪和平面光栅一起工作,实时解算出六自由度位姿,达到纳米级的定位和亚纳米级的稳定度。高精度电子传感技术在微纳制造领域中的应用,冲破了传统机械导向和传动方式的精度极限,促使制造技术向着微观尺度发展。

5 结束语

高精度电子传感技术正持续向更高分辨率、更强环境适应性与更深系统融合度发展。光栅编码器、磁致伸缩传感器、激光干涉仪、电容式位移传感器等元件各有优势,在信号调理、温度补偿、动态匹配等精度保证的基础上,给机电运动控制系统提供位置、速度反馈。多传感器融合和传感控制一体化设计,冲破了单个传感技术性能的束缚。它在数控机床、工业机器人、微纳制造等诸多方面起着举足轻重的支撑作用,其持续发展将有力推动高端装备向着更加精密、更加智能的方向迈进。

参考文献:

- [1] 王海鹏,郭瑜,尹兴超.工业机器人工况下的增量式光栅编码器误差补偿法[J].振动与冲击,2024,43(22):225-231.
- [2] 陈冠廷,魏海峰,闵琦.基于滑窗滤波器的改进MRAS转动惯量辨识[J].组合机床与自动化加工技术,2024(04):110-114,120.
- [3] 周学文,王彩年,毛范海,等.旋转主轴轴系温升预测模型[J].组合机床与自动化加工技术,2024(01):5-8.
- [4] 汪惟桢,张驰,李荣,等.直线电机高速高精运动分段式三元复合控制[J].组合机床与自动化加工技术,2024(01):114-117,122.
- [5] 司卫征,卫紫君,罗良传,等.高精度数控机床的导轨平行度测试方法研究[J].机床与液压,2024,52(15):128-136.