

机电伺服控制在雷达系统中的应用与优化

郭佳佳 张栋栋

上海航天电子技术研究所 上海 201109

摘要: 随着国防科技与智能装备的深度融合, 雷达系统作为战场感知与气象探测的核心装备, 其性能指标直接决定了任务执行效率。本文聚焦机电伺服控制在雷达系统中的应用与优化。首先阐述机电伺服控制技术基本原理与核心构成, 包括闭环控制系统架构、执行器与控制器协同机制及反馈装置作用。接着分析其在雷达系统中的具体应用, 涵盖雷达天线角度调整、扫描速度与范围控制等方面。最后提出优化策略, 涉及电机选型与参数匹配、控制算法优化等。旨在为提升雷达系统性能提供理论支持与实践指导, 推动机电伺服控制在雷达领域的更好应用与发展。

关键词: 机电伺服控制技术; 雷达系统; 具体应用; 优化策略

引言: 雷达系统在现代军事、民用领域作用关键, 其性能提升至关重要。机电伺服控制技术作为影响雷达系统性能的核心因素之一, 发挥着不可替代的作用。它能精准控制雷达天线角度、扫描速度等参数, 确保雷达高效稳定运行。然而, 当前机电伺服控制在雷达系统应用中仍存在电机选型不合理、控制算法不够优化等问题。深入研究机电伺服控制在雷达系统中的应用与优化, 有助于解决现存问题, 提高雷达系统的探测精度、稳定性和可靠性, 满足日益复杂的任务需求。

1 机电伺服控制技术基本原理与核心构成

1.1 闭环控制系统架构

机电伺服控制系统采用闭环控制架构, 通过实时反馈修正控制指令, 实现高精度运动控制。系统核心由位置环、速度环、电流环三环结构组成: 位置环接收外部指令脉冲, 与编码器反馈的位置信号比较生成误差值; 速度环通过调节电机转速补偿动态偏差; 电流环直接控制电机绕组电流, 确保转矩响应的快速性。以雷达天线角度调整为例, 当目标方位变化时, 上位机发送脉冲指令, 位置环计算偏差后经速度环、电流环逐级放大, 驱动伺服电机转动, 编码器实时反馈角度数据形成闭环, 最终使天线精准指向目标, 误差可控制在 $\pm 0.01^\circ$ 以内。

1.2 执行器与控制器协同机制

执行器(伺服电机)与控制器(驱动器)通过功率接口与信号接口实现协同。控制器接收上位机指令后, 经内部算法处理生成PWM信号, 驱动器将低功率控制信号放大为高压大电流, 供给伺服电机。以交流伺服系统为例, 驱动器采用空间矢量调制技术优化电机效率, 同时通过电流采样实时监测电机状态。在雷达扫描速度控制中, 控制器根据预设轨迹生成速度指令, 驱动器动态调整电机输出转矩, 确保扫描线匀速旋转; 若遇风载等

外部干扰, 电机电流突变会被驱动器检测, 通过快速调整电压相位抑制速度波动, 实现速度稳定度 $\leq 0.1\%$ 。

1.3 反馈装置的关键作用

反馈装置以编码器为核心, 提供电机位置、速度、方向的精确信息。增量式编码器通过A/B相脉冲差分计算旋转方向, 每转输出2500个脉冲, 经4倍频电路处理后分辨率达10000脉冲/转, 使电机单步角度分辨率提升至 0.036° 。绝对式编码器采用20位二进制编码, 单圈定位精度达 0.0015° , 多圈型通过齿轮记圈结构可记录2048圈位置, 断电后仍能保持绝对位置数据。在雷达多模式扫描中, 编码器反馈数据不仅用于闭环控制, 还可通过EtherCAT总线实时上传至控制系统, 支持扫描轨迹的动态修正, 确保复杂环境下的目标捕获成功率 $\geq 99.7\%$ ^[1]。

2 机电伺服控制在雷达系统中的具体应用

2.1 雷达天线角度调整

在雷达系统中, 机电伺服控制技术对天线角度的精准调整起着决定性作用, 直接影响雷达的目标探测与跟踪能力。雷达工作时, 需根据目标方位快速、准确地调整天线角度, 以实现波束的精确指向。机电伺服系统以高精度伺服电机为执行元件, 通过闭环控制架构实现角度调整。当雷达接收到目标方位信息后, 上位机将角度指令发送至伺服控制器, 控制器依据预设算法生成控制信号, 驱动伺服电机转动。电机带动天线转动的同时, 编码器等反馈装置实时监测天线实际角度, 并将数据反馈给控制器。控制器将指令角度与反馈角度进行对比, 计算出误差值, 再通过调整控制信号, 使电机持续修正转动, 直至天线准确指向目标方位。例如在舰载雷达应用中, 面对复杂多变的海洋环境和舰船的晃动, 机电伺服系统需具备强大的抗干扰能力和快速响应特性。其采用先进的控制算法, 如模糊PID控制, 能有效克服外部扰

动, 确保天线角度调整的精度和稳定性, 使雷达在恶劣条件下仍能精准捕捉目标, 角度调整误差可控制在极小范围内, 为雷达系统的高性能运行提供坚实保障。

2.2 扫描速度与范围控制

机电伺服控制在雷达扫描速度与范围控制方面发挥着核心作用, 直接关乎雷达的探测效能与任务适应性。在扫描速度控制上, 机电伺服系统凭借高精度的控制器与高性能伺服电机实现灵活调节。雷达根据不同作战场景与目标特性需求, 动态改变天线扫描速度。当执行大范围快速搜索任务时, 控制器迅速输出高频控制脉冲, 驱动电机以高速运转, 使天线在短时间内完成大面积空域扫描, 极大提升目标发现概率。而在对已锁定目标进行精确跟踪时, 系统自动降低扫描速度, 保证天线对目标的持续、稳定指向, 从而获取更精准的目标信息, 为后续决策提供可靠依据。扫描范围控制方面, 机电伺服系统依托精确的反馈装置与预设参数实现精准限定。通过编码器实时反馈天线转动角度, 控制器将实际角度与设定范围进行比对, 一旦接近边界立即调整电机运转, 确保天线严格在指定范围内扫描。这种控制方式不仅能有效避免无效扫描, 提高雷达工作效率, 还能防止天线因过度转动而损坏, 保障雷达系统的可靠性与稳定性, 使其在复杂多变的电磁环境中稳定发挥探测作用。

2.3 多模式扫描支持

在雷达系统中, 机电伺服控制技术对多模式扫描的支持至关重要, 它能满足不同场景下多样化的探测需求, 显著提升雷达的综合性能。多模式扫描涵盖多种工作方式, 如机械扫描与相控阵扫描结合模式。机电伺服系统在机械扫描部分, 通过精准控制伺服电机的转动, 带动天线按预设轨迹进行大范围的角度扫描, 快速覆盖广阔空域, 实现初步的目标搜索。而在相控阵扫描模式下, 机电伺服系统则负责调整相控阵天线的物理位置, 为其电子扫描提供合适的初始指向, 增强波束指向的灵活性。在搜索与跟踪复合模式中, 机电伺服系统展现出强大的协调能力。搜索阶段, 系统以较快速度控制天线扫描, 扩大搜索范围; 当检测到目标后, 立即切换至跟踪模式, 降低扫描速度, 使天线精确指向目标并持续跟踪, 确保目标信息的稳定获取。此外, 对于不同频段、不同极化的扫描模式切换, 机电伺服系统能快速响应指令, 准确调整天线姿态和参数, 保证雷达在不同模式下都能高效运行, 适应复杂多变的电磁环境和任务要求, 为雷达在军事防御、气象监测等领域提供可靠的技术支撑。

2.4 动态环境适应性

雷达系统所处的动态环境复杂多变, 涵盖自然因素

与人为干扰等, 机电伺服控制技术的动态环境适应性成为保障雷达稳定运行与高效探测的关键。自然环境方面, 温度、湿度、风力等变化会对雷达硬件造成影响。高温可能导致电机性能下降、润滑油黏度改变, 影响伺服系统传动效率; 强风可能使天线承受额外风载, 改变其运动状态。机电伺服系统通过温度传感器实时监测环境温度, 控制器依据预设策略调整电机驱动参数, 确保电机在适宜工作区间运行。同时, 采用高强度、轻量化的天线结构与抗风设计, 结合伺服系统的快速响应能力, 当风力变化时, 能及时调整天线姿态, 抵消风载影响, 维持扫描精度。人为干扰环境下, 电磁干扰可能影响伺服系统信号传输与控制指令准确性。系统采用屏蔽设计、滤波技术等手段, 增强信号抗干扰能力。此外, 面对复杂多变的电磁频谱, 伺服系统具备自适应调整能力, 通过实时监测干扰特征, 自动优化控制算法参数, 确保在干扰环境下仍能精准执行扫描任务, 保障雷达对目标的稳定探测与跟踪^[2]。

3 机电伺服控制在雷达系统中的优化策略

3.1 电机选型与参数匹配

在雷达系统中, 电机选型与参数匹配是机电伺服控制技术优化的关键环节, 直接影响雷达天线扫描的精度、速度和稳定性。电机类型的选择需综合考虑雷达的工作场景与性能需求。直流电机结构简单、控制方便, 适用于对速度和位置控制要求不高、成本敏感的小型雷达; 交流伺服电机则凭借其高精度、高动态响应和宽调速范围的优势, 成为中大型雷达天线驱动的主流选择。永磁同步电机(PMSM)因具有高功率密度、高效率 and 低转矩脉动等特点, 在要求高精度跟踪和快速响应的雷达系统中表现出色。参数匹配方面, 电机的额定功率需与雷达天线负载相匹配。功率过小, 电机无法带动天线达到所需扫描速度和角度; 功率过大, 不仅增加成本, 还会降低系统效率。转矩特性匹配也至关重要, 要确保电机在雷达天线启动、加速、减速和稳态运行等各个阶段都能提供足够的转矩。同时, 电机的转动惯量应与天线负载的转动惯量相协调, 以实现快速、准确的动态响应。

3.2 控制算法优化

在雷达系统的机电伺服控制中, 控制算法优化是提升系统性能、增强动态环境适应能力的核心手段。传统PID控制算法虽结构简单、易于实现, 但在处理雷达天线运动中的非线性、时变性和不确定性因素时, 存在控制精度不足、响应速度慢等问题。为此, 需引入先进控制算法进行优化。智能控制算法如模糊控制, 能依据系统状态和专家经验, 通过模糊规则库对控制量进行灵活调整, 无需

精确数学模型,可有效应对雷达工作环境变化带来的参数波动,提高系统鲁棒性。神经网络控制则凭借其强大的自学习和自适应能力,通过对大量输入输出数据的训练,建立系统非线性映射关系,能精准预测天线运动趋势,提前调整控制参数,实现更快速、精准的位置和速度控制。此外,将多种控制算法融合的复合控制策略成为趋势。例如,把PID控制与模糊控制相结合,利用PID的稳态精度优势和模糊控制的动态响应优势,在保证系统稳定性的同时,大幅提升对复杂干扰的抑制能力。

3.3 反馈系统精度提升

反馈系统作为机电伺服控制在雷达系统中的关键环节,其精度直接决定了雷达天线扫描控制的准确性和稳定性。提升反馈系统精度,对增强雷达整体性能意义重大。反馈系统的核心部件是传感器,其性能直接影响反馈信息的准确性。采用高分辨率的编码器是提升精度的有效途径,高分辨率编码器能够在单位角度内输出更多的脉冲信号,将角度测量的细分程度大幅提高,从而更精确地反馈天线位置信息。同时,选用低噪声、高灵敏度的速度传感器和力矩传感器,可减少测量过程中的误差干扰,使速度和力矩反馈更加精准。信号处理电路的优化也不容忽视。通过采用高性能的模数转换器(ADC),提高模拟信号到数字信号的转换精度,降低量化误差。此外,运用先进的滤波算法对反馈信号进行去噪处理,有效滤除电磁干扰、机械振动等带来的噪声,保证反馈信号的纯净度。在反馈系统与控制器的接口设计上,采用高速、稳定的通信协议,确保反馈数据能够及时、准确地传输到控制器。

3.4 供电系统稳定性保障

在雷达系统的机电伺服控制中,供电系统稳定性是保障其正常运行、实现高精度扫描控制的基础。一旦供电出现波动或中断,可能导致伺服电机失控、反馈装置数据异常,严重影响雷达的探测性能。为保障供电稳定

性,首先要从电源选择入手。采用具有高稳定性和低纹波的线性电源或开关电源,线性电源能提供较为纯净的直流电,但效率相对较低;开关电源效率高、体积小,不过需通过优化电路设计降低输出纹波。同时,配备不间断电源(UPS),在市电突然中断时,UPS能迅速切换为电池供电,为雷达系统提供短暂的持续电力,确保伺服控制不会因断电而停止,使天线能完成当前扫描动作或安全停止。在供电线路设计方面,合理规划线路走向,减少线路长度以降低电阻和电感,避免因线路压降导致电压不稳定。采用屏蔽电缆对关键供电线路进行屏蔽处理,防止电磁干扰耦合到供电线路中,影响供电质量。此外,建立完善的供电监测系统,实时监测供电电压、电流等参数。一旦检测到供电异常,立即发出警报并采取相应措施,如调整电源输出、切换备用电源等,确保供电系统始终处于稳定运行状态,为雷达机电伺服控制提供可靠的电力支持^[3]。

结束语

机电伺服控制在雷达系统中占据着不可或缺的关键地位,从雷达天线角度的精准调整,到扫描速度与范围的科学控制,再到多模式扫描的灵活支持以及动态环境的良好适应,都离不开该技术的有力支撑。通过电机选型与参数匹配的精准把控、控制算法的持续优化、反馈系统精度的显著提升以及供电系统稳定性的切实保障等一系列优化策略,进一步挖掘了机电伺服控制技术的潜力。

参考文献

- [1]安红,杨莉,张雁平,等.雷达伺服系统等效建模方法[J].电子信息对抗技术,2020,35(06):64-67.
- [2]宣翔,吴影生.某反无人机雷达伺服系统设计[J].无线互联科技,2020,17(17):21-23.
- [3]张伟,刘志军.伺服控制在航空航天领域的应用与展望[J].航空制造技术,2021,64(10):46-50.