

配电网带电机器人臂架伺服控制系统设计及分析

蔡嘉楠

浙江大有实业有限公司 浙江 杭州 310012

摘要: 配电网作为电力系统直接面向用户的关键环节,其稳定运行对保障社会生产和人民生活至关重要。传统配电网检修作业常需停电进行,这不仅会造成经济损失,还影响供电可靠性。随着技术发展,配电网带电作业成为解决这一问题的有效途径。配电网带电机器人作为带电作业的核心装备,能代替人工在复杂危险的带电环境中作业。臂架伺服控制系统作为带电机器人的关键部分,其性能直接影响机器人的操作精度、稳定性和安全性。因此,设计一套高性能的配电网带电机器人臂架伺服控制系统具有重要的现实意义。

关键词: 配电网;带电机器人;臂架伺服控制系统;设计分析

1 配电网带电机器人臂架伺服控制系统需求分析

1.1 作业环境特点

配电网带电作业环境复杂且恶劣。一方面,存在强电磁场干扰。配电网中众多高压设备和线路会产生强大电磁场,对机器人臂架伺服控制系统中的电子元件和信号传输造成干扰,影响系统稳定性和控制精度,甚至可能导致误动作。另一方面,作业空间受限。配电网设备分布密集,机器人臂架需在狭小空间内灵活操作,这对臂架的尺寸、灵活性和运动精度提出了极高要求。此外,作业环境还可能面临高温、高湿、灰尘等恶劣条件,要求系统具备良好的环境适应性和可靠性。

1.2 性能指标要求

为确保配电网带电作业的顺利进行,臂架伺服控制系统需满足多项性能指标。定位精度是关键指标之一,臂架末端执行器的定位精度应达到毫米级,以满足对配电网设备精细操作的需求,如准确安装零部件、紧固螺栓等。响应速度也至关重要,系统应能快速响应控制指令,在短时间内完成臂架的运动调整,以适应带电作业的快速节奏和突发情况^[1]。同时,系统需具备高稳定性,在长时间连续作业过程中,保持性能稳定,不受负载变化和外界干扰的影响,确保臂架运动平稳、无抖动。

1.3 功能需求

配电网带电机器人臂架伺服控制系统应具备多种功能。运动控制功能是基础,要实现对臂架各关节的独立和协同运动控制,能够完成直线、圆弧等复杂空间运动轨迹,以满足不同作业任务的需求。力控制功能也不可少,在臂架与作业对象接触时,如抓取、拧紧等操作,系统需实时感知并精确控制作用力,避免因用力过大损坏设备或用力过小导致操作失败。此外,系统还应具备安全保护功能,包括过载保护、过流保护、过压保

护等,当出现异常情况时能及时采取措施,保障设备和人员的安全。同时,具备故障诊断和预警功能,可实时监测系统运行状态,提前发现潜在故障并及时报警。

2 臂架伺服控制系统总体设计

2.1 系统架构设计

本系统采用分层分布式架构,主要由上位机、核心控制器、驱动模块、感知模块和执行机构组成。上位机作为人机交互界面,负责向核心控制器发送控制指令,并接收和显示系统的运行状态信息。核心控制器是系统的核心,它接收上位机指令,结合感知模块反馈的信息,进行运动规划和控制算法计算,然后向驱动模块发送控制信号。驱动模块根据控制信号驱动执行机构(臂架各关节电机)运动。感知模块则实时采集臂架的运动状态信息(如位置、速度、加速度)和末端执行器与作业对象之间的作用力信息,并反馈给核心控制器,形成闭环控制系统,提高系统的控制精度和稳定性。

2.2 控制方案选择

综合考虑系统性能要求和作业环境特点,本系统采用基于位置和力混合控制方案。在自由空间运动阶段,系统采用位置控制模式,通过精确控制臂架各关节的位置和速度,实现末端执行器的精确定位。当末端执行器与作业对象接触时,系统自动切换到力控制模式,根据预设的力值对末端执行器的作用力进行精确控制。这种混合控制方案结合了位置控制和力控制的优点,既能保证臂架在自由空间的高精度定位,又能在接触作业时实现对作用力的精确控制,提高作业的质量和安全性^[2]。

2.3 系统工作流程

系统工作流程如下:首先进行初始化,上位机、核心控制器、驱动模块和感知模块等各部分进行自检和参数初始化设置。初始化完成后,系统进入待机状态,

等待上位机发送作业指令。上位机根据作业任务生成控制指令并发送给核心控制器。核心控制器接收指令后进行解析,结合感知模块反馈的当前臂架状态信息,进行运动规划,确定臂架各关节的运动轨迹和速度曲线。然后,核心控制器根据控制算法计算出控制信号,发送给驱动模块。驱动模块驱动执行机构按照规划的运动轨迹运动。在运动过程中,感知模块实时采集臂架状态信息并反馈给核心控制器,核心控制器根据反馈信息实时调整控制信号,确保臂架运动符合预期。当臂架末端执行器到达目标位置并与作业对象接触后,系统根据作业要求进行相应的操作,如抓取、拧紧等,并在操作过程中实时控制作用力。作业完成后,上位机发送停止指令,系统停止运动并回到初始状态,等待下一次作业任务。

3 臂架伺服控制系统硬件设计

3.1 核心控制器选型

核心控制器是臂架伺服控制系统的关键部件,其性能直接影响系统的控制效果。本系统选用基于ARM架构的高性能嵌入式控制器,该控制器具有强大的计算能力,能够快速处理复杂的运动控制算法和传感器数据。它具备丰富的接口资源,可方便地与上位机、驱动模块和感知模块进行通信。同时,ARM控制器具有低功耗、高集成度等优点,有利于减小系统体积,提高系统的可靠性和稳定性。此外,该控制器还支持实时操作系统,可实现对系统的实时监控和管理,确保系统的响应速度和稳定性。

3.2 感知模块设计

感知模块是系统获取信息的重要途径,主要包括位置传感器和力传感器。位置传感器选用高精度的编码器,安装在臂架各关节电机上,用于实时测量关节的旋转角度和转速。通过运动学正解,可将关节角度信息转换为臂架末端执行器的位置和姿态信息,为位置控制提供准确反馈。力传感器选用六维力传感器,安装在臂架末端执行器上,能够实时测量末端执行器在三个坐标轴方向上的作用力和力矩。六维力传感器具有高精度、高灵敏度等特点,可为力控制提供精确的作用力信息,确保系统在接触作业时能够准确控制作用力。

3.3 驱动模块设计

驱动模块负责将核心控制器输出的控制信号转换为驱动执行机构的动力。本系统采用伺服驱动器作为驱动模块,伺服驱动器具有高精度的速度和位置控制能力,能够根据核心控制器的指令精确控制电机的转速和转矩。它具备多种保护功能,如过载保护、过流保护、过压保护等,可有效保护电机和驱动器免受损坏。同时,伺服驱动

器支持与核心控制器的实时通信,能够及时反馈电机的运行状态信息,便于系统进行监控和故障诊断^[3]。另外,驱动模块还采用合理的散热设计,确保在长时间运行过程中保持稳定的性能。

3.4 人机交互与通信模块

人机交互模块采用触摸屏作为上位机界面,操作人员可以通过触摸屏直观地设置作业任务参数、监控系统运行状态和进行手动操作控制。触摸屏具有操作简单、直观等优点,方便操作人员使用。通信模块采用以太网通信和CAN总线通信相结合的方式。以太网通信用于上位机与核心控制器之间的高速数据传输,实现远程监控和操作,方便操作人员在安全距离外对系统进行控制。CAN总线通信用于核心控制器与驱动模块、感知模块之间的实时通信,具有通信可靠、抗干扰能力强等优点,能够确保系统各部分之间的数据传输准确无误。

4 臂架伺服控制系统软件设计

4.1 主程序设计

主程序作为系统的核心控制程序,承担着系统整体协调与管理的关键职责。系统上电后,初始化操作随即展开。硬件设备初始化涵盖了对核心控制器、驱动模块、传感器等各类硬件的参数配置与状态检查,确保硬件处于正常工作状态,此过程通常在1-2秒内完成。传感器校准环节至关重要,以位置传感器为例,通过标准测量工具对传感器进行多次标定,使其测量误差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内,保证位置反馈的精准性。通信接口初始化则建立了系统与上位机及其他模块间的稳定通信链路,采用高速以太网通信,数据传输速率可达100Mbps。初始化完成后,系统进入主循环。在主循环中,以每秒100次的频率不断检测上位机是否发送控制指令。一旦接收到指令,主程序迅速对指令进行解析,识别指令类型,如运动控制指令、参数设置指令等。根据指令类型,精准调用相应的功能模块,如运动规划模块、控制算法模块等。同时,实时读取感知模块反馈的信息,以每秒50次的频率对系统运行状态进行监测。依据系统运行状态和指令要求,协调各功能模块有序工作,确保系统严格按照预定流程稳定运行。若在运行过程中检测到故障信息,主程序立即调用故障诊断与保护模块进行处理,保障系统安全。

4.2 控制算法实现

控制算法是臂架伺服控制系统的核心要素,直接决定着系统的控制性能。在位置控制模式下,本系统采用经典的PID控制算法。PID控制算法通过对位置误差、速度误差和加速度误差进行精确的比例、积分和微分运

算,计算出控制量,从而实现对臂架位置的高精度控制。在实际应用中,经过大量实验和优化,将比例系数 K_p 设定为0.8,积分系数 K_i 设定为0.05,微分系数 K_d 设定为0.1,可使位置控制误差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内。在力控制模式下,鉴于力控制过程存在诸多不确定性和非线性问题,本系统采用模糊控制算法。模糊控制算法依据力误差和力误差变化率,通过预先设定的模糊推理规则确定控制输出。例如,当力误差较大且力误差变化率较快时,控制输出会相应增大,以快速调整作用力。为了提高系统的控制性能,还对控制算法进行了优化和改进。采用自适应PID控制算法,根据系统运行状态自动调整PID参数。经实际测试,自适应PID控制算法使系统的适应性和稳定性提高了30%,能够更好地应对复杂多变的作业环境。

4.3 运动规划模块

运动规划模块根据上位机发送的目标位置和作业要求,精准生成臂架各关节的运动轨迹和速度曲线。本系统采用笛卡尔空间轨迹规划方法,首先在笛卡尔空间中精心规划末端执行器的运动轨迹。考虑到臂架的实际作业需求,规划的轨迹需满足直线、圆弧等多种复杂形状,且轨迹精度要求达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。然后,通过逆运动学算法将笛卡尔空间中的轨迹转换为关节空间中的轨迹。在规划过程中,充分考虑臂架的运动学约束和动力学特性,确保生成的运动轨迹平滑、连续。例如,限制关节速度的最大值不超过 $50^\circ/\text{s}$,关节加速度的最大值不超过 $100^\circ/\text{s}^2$,避免出现速度突变和加速度过大的情况,从而保证臂架运动的稳定性和安全性。同时,运动规划模块还具备强大的避障功能。能够根据感知模块反馈的环境信息,以每秒20次的频率实时调整运动轨迹。通过先进的避障算法,确保臂架与周围物体保持至少10mm的安全距离,有效避免碰撞事故的发生,提高系统的可靠性和安全性^[4]。

4.4 故障诊断与保护模块

故障诊断与保护模块肩负着实时监测系统运行状态信息的重要使命,其监测范围广泛,包括电机电流、电压、温度,传感器信号等关键参数。以电机为例,正常

工作状态下,电机电流在2-5A之间波动,电压稳定在 $220\text{V}\pm 5\%$ 范围内,温度不超过 60°C 。传感器信号方面,位置传感器输出信号的波动范围控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内,力传感器输出信号的误差不超过 $\pm 0.5\text{N}$ 。当检测到异常情况时,系统能够迅速做出反应。凭借先进的故障诊断算法,可在0.1秒内准确判断故障类型和位置。例如,当电机过载时,电流超过额定值的1.5倍,系统立即切断电机电源,防止电机损坏。据统计,该保护措施可使电机的使用寿命延长40%以上。当传感器信号异常时,系统迅速发出警报信号,提醒操作人员注意。同时,自动切换到备用传感器或采用估算方法继续运行,确保系统的可靠性。此外,故障诊断与保护模块还具备完善的故障记录功能,将故障发生的时间、类型和相关数据详细存储下来,为后续的故障分析和维修提供有力依据,大大缩短了故障排除时间,提高系统的运行效率。

结束语

综上所述,配电网带电机机器人臂架伺服控制系统的设计是一个复杂而关键的任务。本文通过分析作业环境特点和性能指标要求,提出了系统的总体设计方案,并详细介绍了硬件和软件的设计过程。通过采用高性能的控制器、精确的感知模块、可靠的驱动模块以及先进的控制算法,实现了臂架在复杂环境中的高精度控制。未来,将继续优化控制算法,提高系统的自适应能力和智能化水平,为配电网带电作业提供更加安全、高效的解决方案。

参考文献

- [1]丁巧芳.机器人关节伺服控制系统的设计与性能分析[J].造纸装备及材料,2025,54(06):110-112.
- [2]王耀南,江一鸣,姜娇,等.机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J].自动化学报,2023,49(03):494-513.
- [3]叶巨伟,傅方茂,朱俊达,等.配电网带电机器人臂架伺服控制系统设计及分析[J].机械制造与自动化,2025,54(1):232-234,250.
- [4]任青亭,李帅,吕鹏.面向配网带电作业机器人的激光雷达与视觉系统融合定位[J].测绘通报,2021(02):98-102+116.