

协作机器人在柔性制造系统中的安全交互机制研究

朴永泉

沈阳奇辉机器人应用技术有限公司 辽宁 沈阳 110000

摘要: 柔性制造动态化、多元化的生产特征,使人机共融作业的安全管控面临诸多不确定因素。现有固定防护模式难以适配柔性生产的复杂工况,无法满足人机协同作业的安全运行标准。本文系统探究柔性制造场景下人机交互的运行特征与底层安全逻辑,构建分层协同的安全交互架构,深度剖析环境避让、力控适配、多机联动及工况容错四类核心交互机制,从感知校准、参数优化、行为规范、长效运维多个维度完善体系优化策略,为柔性生产线人机安全协同作业提供完善的理论支撑。

关键词: 柔性制造;协作机器人;人机安全交互;机制优化;人机共融

引言:智能制造产业持续升级,柔性制造凭借灵活可调的生产优势,广泛应用于多品种、小批量的现代化加工场景。协作机器人作为人机共融生产的核心设备,凭借高灵活性适配各类复杂工序,逐步替代传统固定式作业设备。动态变化的生产环境、交错重叠的人机作业空间,持续增加生产交互的安全风险。传统防护模式适配性较差,难以应对柔性生产的动态变动工况。深入挖掘人机安全交互运行规律,搭建适配性更强的安全交互体系,是保障柔性制造生产线稳定、安全运行的核心关键。

1 柔性制造系统人机交互运行特征与安全逻辑

1.1 柔性制造动态生产运行特征

柔性制造体系区别于传统流水线固定生产模式,具备较强的动态调整能力,适配多品类、小批量的现代化生产需求。生产流程可以根据加工品类、工序需求完成自主调整,生产节拍保持非固定化运行状态。作业场景的设备布局、加工路径、工序排布存在可变属性,生产环境始终处于动态调整状态。传统制造流程工序固化、作业环境稳定,风险来源相对固定。柔性生产体系的动态变化属性,让现场作业环境、设备运行状态持续更新,作业场景具备更强的不确定性^[1]。生产任务的灵活切换,会改变设备运行模式与人机作业距离,塑造更加复杂多变的生工件况,为人机安全交互带来全新的运行条件与管控难度。

1.2 人机共融作业交互结构组成

人机共融作业体系打破传统人机分区作业模式,构建人员、设备、环境协同运作的交互结构。整套结构依托人工操作单元、协作机器人执行单元、现场环境单元共同组成完整作业体系。人工单元承担柔性工序判断、灵活操作、异常处置等工作,适配复杂多变的非标生产环节。机器人单元负责重复性、高精度、高负荷的机械

作业内容,保障工序执行的精准度。环境单元包含现场空间布局、设备排布、作业障碍等场景要素,约束人机作业的运动范围与交互方式。多单元相互穿插、相互制约,形成高度集成的人机交互结构,构成柔性制造安全作业的整体载体。

1.3 协作机器人动态交互行为规律

协作机器人摆脱传统工业机器人固定轨迹的运行限制,行为模式具备高度灵活的动态特征。设备运行轨迹、运动速度、作业范围可根据生产任务自主调整,运动状态随工序切换持续更迭。机器人在完成作业任务的过程中,会根据周边环境变化调整自身姿态与运动幅度,形成可变的作业行为模式。作业空间与人工作业区域存在大范围重叠,设备运动轨迹会随生产需求动态覆盖人机共融区域。灵活的行为特征可以适配柔性生产的多变工序,也让人机交互过程存在更多不确定性,成为安全交互管控需要重点把控的行为特征。

1.4 柔性生产安全交互内在逻辑

柔性制造场景下的安全交互,以人机行为协调、空间适配、状态匹配为底层运行逻辑。安全运行依托设备感知能力、行为调控能力与人工操作规范共同维持。机器人需要感知周边作业环境变化,根据人员作业状态调整自身运行行为,规避空间穿插带来的干涉问题。操作人员需要适配设备动态运行规律,调整自身作业节奏与操作方式,适应多变的设备运行状态。整套安全逻辑围绕动态适配展开,通过行为约束、空间避让、状态调控等方式,化解人机共融场景的不确定风险,维持柔性生产体系持续稳定的安全运行状态。

2 协作机器人安全交互体系架构与运行原理

2.1 分层式安全交互整体架构设计

协作机器人安全交互体系采用分层化架构设计,打

破单一防护模式的局限性,适配柔性制造动态多变的作业场景。整套架构按照功能层级完成划分,各层级承担独立的运行职能,层级之间相互联动、逐级支撑。基础层级负责现场作业环境与人机状态的原始信息采集,为整体系统运行提供数据支撑。中层层级聚焦信息整合、状态分析与安全研判,完成原始数据的筛选与处理。顶层层级承担指令输出与行为调控工作,根据研判结果调整机器人作业状态与人机交互模式^[2]。分层化的结构设计拆分复杂安全交互工作,细化各环节职能分工,搭建起适配柔性人机共融工况的系统化防护框架。

2.2 多维度交互信息感知层级原理

人机安全交互的精准运转,依托多维度感知层级实现全域信息采集。感知体系覆盖空间位置、运动状态、环境工况、人员行为等多个感知维度,摆脱单一信息采集的局限性。空间维度捕捉人机相对位置、作业间距与障碍物分布情况,划定安全作业边界。运动维度采集机器人运行速度、运动轨迹、姿态变化等动态参数,捕捉设备实时运行状态。环境维度收录现场光照、空间布局、工况变动等场景信息,补齐环境变量带来的感知盲区。多维度感知模块互为补充,完整采集现场人机作业的各类动态信息,为工况研判和动态调控筑牢信息基础。

2.3 安全状态实时研判运行机制

安全状态研判是衔接感知环节与调控环节的核心枢纽,决定人机交互安全管控的精准度。体系依托采集的多维信息,结合柔性生产安全交互准则,完成现场工况的动态判定。系统对人机间距、设备运动参数、作业环境状态进行综合比对,划分不同的安全运行等级。针对平稳正常的作业工况,维持机器人常规作业模式,保障生产推进效率。针对存在安全隐患的异常工况,识别风险诱因与风险等级,生成对应的调控指令。动态化的层级研判模式贯穿人机作业全过程,实现安全风险的前置识别与分级处置。

2.4 人机双向交互响应逻辑架构

人机双向交互响应逻辑以动态适配、双向协同为核心,构建闭环式的安全响应体系。整套逻辑涵盖指令传输、设备调控、人员适配、状态反馈多个环节,形成完整的交互运行链路。系统根据安全研判结果调整机器人运动参数,通过减速、姿态调整、路径重置等方式规避交互风险。人员结合设备运行状态的变动,调整自身作业节奏与操作行为,适配动态化的人机共融场景。交互过程持续接收现场工况反馈,根据实时状态更新调控策略,实现作业状态的动态平衡。双向联动的响应模式打通设备调控与人工作业的衔接壁垒,构建闭环的安全交

互运行链路。

3 柔性制造下协作机器人核心安全交互机制

3.1 动态环境自适应安全避让交互机制

柔性制造生产场景存在持续的环境变动,作业空间内的人员位移、工件摆放、设备排布都会产生动态变量。动态环境自适应安全避让机制依托实时环境感知数据,完成作业空间风险区域的自主识别。系统持续捕捉周边空间变化,针对突发闯入、作业区域偏移、障碍物增减等工况,自主调整机器人作业路径与运动姿态。运行过程摒弃固定避让逻辑,依靠环境数据更新完成动态判断,适配柔性生产无规律的场景变动^[3]。通过主动调整作业范围、变更运动轨迹、降低作业速度等方式,规避人机干涉与设备碰撞问题。这套机制可以适配复杂多变的共融场景,提升机器人在动态生产环境中的自主防护能力。

3.2 人机协同作业力控安全交互机制

人机近距离协同作业过程中,肢体接触、工件传递、辅助操作都会产生物理作用力。力控安全交互机制依托精准的力感知单元,捕捉人机接触力度与受力位置的细微变化。系统设定分级力阈值标准,区分正常作业接触与异常碰撞挤压。轻微受力判定为常规协同操作,设备保持稳定作业状态保障工序连续性。受力数值超出合理区间时,设备启动柔性调控策略,缓冲刚性冲击力道,及时调整作业姿态或暂停作业进程。力控模式弱化传统设备刚性运行缺陷,缓解人机接触带来的安全隐患,适配高频次、近距离的人机协同加工场景。

3.3 多机器人协同联动安全交互机制

复杂柔性生产线会搭载多台协作机器人分区作业,不同设备的运动范围存在交叉重叠区域,容易产生设备间运动干涉。多机器人协同联动安全交互机制统筹各设备的作业轨迹与运行状态,统一规划全域作业路径。系统划分独立作业区域与公共交互区域,规范各机器人的作业权限与运动边界。单台设备运行状态发生变动时,全域体系及时更新作业排布,调整周边设备的运动节奏与轨迹规划。通过区域划分、轨迹统筹、状态互检的运行方式,规避设备间轨迹冲突、空间抢占等问题,实现多机作业的有序配合与安全联动。

3.4 生产工况切换容错安全交互机制

柔性制造模式需要频繁切换加工品类与工序流程,工况切换阶段容易出现参数匹配偏差、路径规划疏漏等不稳定问题。工况切换容错安全交互机制针对流程更迭的不稳定特征,建立容错防护运行模式。系统在工序切换、参数更新、任务更迭阶段,自动降低设备运行激进

程度,放缓作业行进速度,拓宽安全防护阈值。针对临时参数偏差、感知数据波动等非故障类异常,系统不会直接终止生产流程,而是通过自主微调完成状态修正,平稳过渡工况切换阶段。容错机制有效弥补工况切换阶段的运行漏洞,保障流程更迭过程的作业稳定性与安全性。

4 柔性制造人机安全交互体系优化与运维保障策略

4.1 安全交互感知精度优化与误差修正策略

人机安全交互的稳定运行,依托感知系统的精准采集能力作为核心支撑。柔性生产场景环境变量繁杂,工况频繁变动容易引发感知数据漂移、信息偏差等问题,影响安全研判的准确程度。针对感知环节存在的不稳定因素,可通过优化感知模块布局方式,补齐空间感知盲区,提升全域场景的信息捕捉完整性。结合柔性生产工况特征搭建动态误差修正方式,针对光线变化、设备震动、工件遮挡等干扰因素,对采集数据开展实时校准处理^[4]。弱化外界环境对感知精度的干扰,保障空间位置、运动状态、人员行为等关键数据的真实有效。精准的感知优化方式可以从源头降低误判概率,为人机安全交互研判提供稳定的数据支撑。

4.2 动态工况下安全交互参数自适应优化方法

固定化的安全参数无法适配柔性制造全场景的生产变动,容易出现防护标准适配不足或防护冗余的问题。结合生产任务、作业环境、协同模式的动态变化,搭建参数自适应优化体系。针对常规平稳作业场景,适度调整防护参数,维持生产运行效率。针对人员密集作业、多设备交叉工况、工序切换等复杂场景,自动升级安全防护等级,收紧交互约束参数。依托长期工况运行规律迭代参数适配逻辑,让安全阈值、运动约束、避让范围等参数,始终匹配现场实际作业需求。动态化的参数优化模式可以平衡生产效率与安全防护需求,提升交互体系的场景适配能力。

4.3 人机协同行为规范与交互适配优化路径

人机共融作业中的人为操作差异,是影响安全交互稳定性的关键变量。操作人员的作业习惯、操作节奏、行为路径存在个体化差异,会持续改变人机交互状态。统一柔性生产场景下的标准化作业规范,梳理协同操作的行为准则与作业路径,减少无序操作带来的工况

扰动。结合协作机器人交互运行特征,优化人员与设备的配合模式,理顺工件传递、工序衔接、空间穿插的作业逻辑。弱化人为操作带来的交互干扰,让人员行为与设备运行状态形成稳定适配关系。规范化的人机行为管理,能够减少交互冲突诱因,筑牢安全交互的人为管控基础。

4.4 安全交互体系长效运维与迭代升级机制

安全交互体系需要长期稳定的运维管理,维持持续有效的防护能力。结合柔性生产线的运行频次与工况变动规律,制定常态化的设备巡检与系统维护模式。定期排查感知模块、控制模块、响应模块的运行状态,及时处理部件老化、程序偏移、响应滞后等问题。依托日常运行工况数据积累,持续梳理交互体系存在的适配短板,针对性迭代系统运行逻辑与防护模式。适配生产设备更新、工序升级、场景改造带来的工况变化,让安全交互体系始终匹配柔性制造的生产发展需求,保障人机共融作业长期稳定、安全有序推进。

结束语

人机安全交互是柔性制造人机共融作业稳定推进的重要保障,整套交互体系依托场景特征、架构体系、核心机制与优化策略形成完整运行体系。动态的生产环境与机器人可变作业行为,共同构成人机交互的不确定因素,分层架构与多元交互机制可以有效化解各类协同风险。通过优化感知精度、适配动态参数、规范人机行为、落实长效运维,能够持续完善安全交互体系性能,提升柔性制造场景人机共融作业的安全水平与运行质量。

参考文献

- [1]曹光明,陈淑玲.面向柔性制造的多机器人协作系统设计及其在汽车装配线中的应用[J].内燃机与配件,2025(18):71-73.
- [2]舒鑫东,孔祥杰,陈思鲁,等.柔性关节协作机器人自适应跃度的鲁棒跟踪控制[J].组合机床与自动化加工技术,2025(3):114-118,123.
- [3]李胜军,罗赞,李修明,等.基于特种机器人柔性制造生产线的物流模型研究[J].模具制造,2025,25(2):29-32.
- [4]陈畅.工业机器人在柔性制造系统中的应用与优化[J].信息系统工程,2025(1):20-23.