

# 智能制造系统中人机协作安全机制与自动化控制优化分析

蓝国添<sup>1</sup> 沈佳<sup>1</sup> 费冰鑫<sup>2</sup>

1.天通新环境技术有限公司 浙江 嘉兴 314000

2.天通智能装备有限公司 浙江 嘉兴 314000

**【摘要】**：智能制造系统中人机协作已成为提升生产效率与柔性化水平的重要模式，但协作过程中潜在的安全风险对系统稳定性与人员安全构成挑战。围绕人机协作环境下的安全机制与自动化控制优化问题展开研究，分析现有安全防护技术与控制策略的局限性，探讨多源感知、实时监测与智能决策在协作安全中的应用路径。结合自动化控制系统的动态响应特性，提出以安全约束为导向的控制优化方法，实现安全性与生产效率的协同提升。研究表明，通过构建多层次安全防护体系与自适应控制机制，可有效降低人机交互风险，提高系统运行稳定性与智能化水平，为智能制造系统的安全高效运行提供理论支撑与实践参考。

**【关键词】**：智能制造；人机协作；安全机制；自动化控制；控制优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.083

## 引言

智能制造的发展推动生产模式由传统自动化向人机协同智能化转变，人类与智能设备在同一空间内协作成为常态。这种协作模式在提升生产灵活性与效率的同时也带来了复杂的安全问题与控制挑战。传统安全防护手段难以满足动态、多变的协作环境需求，自动化控制系统在响应速度与约束之间的平衡亟须优化。在此背景下，探讨人机协作安全机制与自动化控制优化具有重要意义。研究聚焦如何在保障人员安全的前提下提升系统运行效率，构建安全与控制协同发展的技术路径，以推动智能制造系统向更高水平发展。

## 1 智能制造系统中人机协作面临的安全挑战

### 1.1 人机协作中的安全隐患分析

智能制造系统中的人机协作不仅需要高效的生产流程和柔性化操作，还面临着复杂的安全隐患。在协作过程中，机器设备与人工操作之间的交互容易产生突发性风险，尤其是自动化设备高速运转时与人员的近距离接触，可能导致物理伤害。由于智能设备在执行任务时难以完全预测人员的行为，系统的安全防护机制往往不能有效预防这些突发事件。误操作、故障或人为干预等因素，往往在不经意间触发危险，造成生产中断或安全事故。因此，人机协作的安全隐患需通过精确的系统设计与持续的风险评估来加以识别与控制。

### 1.2 现有安全机制的局限性与不足

当前智能制造系统普遍依赖传统防护装置和程序化监控，虽能提供一定保护，但在复杂的人机协作环境中效果有限。传统机制侧重静态防护，如护栏和紧急停止装置，忽视了动态风险。由于人机协作中变量多，现有监测系统响应不及时，难以应对突发事件<sup>[1]</sup>。安全机制未充分利用智能感知和实时数据分析，导致响应时效差、灵敏度低。因此，需要探索更智能、适应性强的安全防护机制。

### 1.3 智能制造环境中的潜在风险评估

在智能制造环境中，潜在的安全风险来自多个方面，包括机械设备故障、系统软件漏洞和外部环境变化等。设备可能因长时间运转、维护不当或操作失误发生故障，影响人机协作的安全。系统软件的漏洞或未及时更新可能导致控制系统失效，甚至引发严重事故。此外，外部环境因素如温度、湿度和电力波动等，也可能威胁系统稳定性和设备安全。风险不仅源于设备本身，还涉及生产流程、人员操作及外部环境的相互作用。因此，全面评估与预判风险是有效防范安全隐患的关键。

## 2 优化人机协作安全机制的关键技术

### 2.1 多源感知与实时监测技术的应用

在智能制造系统中，人机协作的安全性与生产效率往往取决于感知技术的精确度和实时性。多源感知技术通过集成不同类型的传感器，如视觉传感器、力觉传感器和环境传感器，能够全面感知操作环境的变化，包括设备状态、人员位置、环境温度等信息。这些信息通过实时监测系统进行分析，并在发现潜在风险时立即反馈，从而有效减少人为操作的疏忽或系统故障带来的安全隐患。通过多源感知技术的融合与优化，智能制造系统能够更加精确地感知与判断环境中的不确定因素，从而实现精准的安全防护。同时，实时监测技术能够确保安全防护措施的及时调整与响应，降低系统安全事件的发生频率，提高人机协作的稳定性与可靠性。

### 2.2 智能决策与自适应安全控制

智能决策系统通过对大量数据的实时处理与分析，能够根据环境变化作出灵活的安全决策。在人机协作的过程中，智能决策系统不仅要对设备运行状态、人员行为进行监控，还需要根据实时数据推测潜在的风险，并通过自适应控制调整工作流程或操作模式。这种决策方式基于数据挖掘和机器学习算法，能够不断优化安全控制策略，形成灵活、有效的安全防护机制<sup>[2]</sup>。自适应安全控制则能够依据系统运行的实时反馈自动调整

控制参数,确保在出现异常情况时系统能快速响应,避免风险扩大。智能决策与自适应控制的结合,使得人机协作过程中的安全管理更加智能化与高效,为制造系统提供了一种高度灵活且动态的安全防护手段。

### 2.3 基于安全约束的控制优化方法

在智能制造系统中,安全约束的控制优化方法可以有效平衡系统的安全性与生产效率。通过建立数学模型,明确生产过程中的安全约束条件,控制优化方法可以在保证安全的前提下优化生产过程。例如,在自动化设备运行过程中,系统可以根据预设的安全约束条件调整设备的速度、路径或操作顺序,避免人员与设备的冲突,防止意外发生。这一方法能够结合实时反馈,动态调整安全参数,保障设备与人员的安全。通过优化控制策略,能够提高设备的运行效率,减少不必要的停机时间。基于安全约束的控制优化方法通过将安全性纳入生产决策的核心,可以有效提升智能制造系统的整体安全性与运行效率。

## 3 自动化控制优化对提升系统安全性的作用

### 3.1 自动化控制系统的响应特性分析

自动化控制系统的响应特性对智能制造系统的安全性起着至关重要的作用。在人机协作的环境中,控制系统需要迅速响应外部变化,尤其是在突发事件或异常状况下。例如,当传感器检测到危险接近时,控制系统必须立即做出反应,调整设备的操作或停止运行,以防止事故发生。自动化控制系统的快速响应能力直接影响到系统能否及时应对安全威胁。通过对控制系统的响应特性进行深入分析,能够识别并优化系统在高负荷、复杂环境下的响应速度与精度。进一步优化控制系统的响应特性,不仅能够提升生产过程中的安全性,还能确保设备与人员之间的高效协作,有效减少潜在的安全风险。

### 3.2 安全性与效率的平衡优化策略

在智能制造系统中,安全性与生产效率的平衡是控制优化中的一大难题。过度追求安全性可能会导致生产效率下降,频繁的安全停机或缓慢的设备响应可能影响生产线的流畅性。另一方面,忽视安全性而追求过高的生产效率,也会增加潜在的事故风险。通过采用先进的优化算法,如模糊控制、遗传算法等,可以在安全性与效率之间找到合适的平衡点<sup>[3]</sup>。这些优化策略基于实时数据反馈,综合考虑生产流程、设备运行状态以及人员安全等因素,动态调整生产调度与控制参数,使得安全和效率能够在最大程度上协同工作。实现这一平衡不仅能够提升系统的安全性,还能保证生产效能,降低资源浪费和运营成本。

### 3.3 协同控制与安全约束下的动态调整

协同控制系统的引入使得多个设备与工作单元能够协调运作,而在安全约束下进行动态调整则有助于优化人机协作的安全性。在复杂的智能制造环境中,设备与人员的行为、任务

分配及 workflows 的变化是常态。协同控制通过共享信息和资源,使得各个子系统能够根据全局目标进行调整,而安全约束的引入则确保系统在动态调整过程中不会出现危险或失控的情况。通过实时监测各子系统的状态与环境变化,协同控制系统能够根据设定的安全阈值进行及时调整,以规避潜在的安全风险。例如,当设备工作状态发生异常或工作人员进入危险区域时,协同控制系统可调整设备的操作或停止特定任务,确保系统整体的安全稳定运行。

## 4 智能制造系统中人机协作的综合优化策略

### 4.1 多层级安全防护体系的构建

多层级安全防护体系在智能制造系统中的作用是保障人机协作过程中的稳定与安全。该体系通常涵盖从物理防护到信息安全的多个层面,包括设备的机械防护、传感器监控、数据传输的加密以及控制系统的冗余备份等。通过将安全措施分层部署,可以有效减少单一防护失败带来的风险。例如,物理防护设施能够避免设备的直接碰撞,而传感器监控和数据加密则能防止信息泄露与设备操作的远程干扰。冗余控制系统能够在主系统发生故障时自动接管,保证生产过程不中断。多层级安全防护体系的构建,使得人机协作的整体安全性得到了显著提升,确保了系统在复杂环境中的稳定运行。

### 4.2 智能制造系统的自适应协作模式

智能制造系统中的自适应协作模式能够根据实际工作环境和任务需求灵活调整人机交互的方式。在传统的制造系统中,操作流程和设备控制通常是预定的,缺乏灵活应对变化的能力。而在自适应模式下,系统能够通过持续的环境感知和数据分析,对工作环境 and 生产需求的变化做出快速反应。例如,当生产过程中设备负载过高时,系统可以自动调整生产节奏,避免过度负荷带来的安全隐患<sup>[4]</sup>。人员的行为模式也能被实时感知与分析,当发现人员进入危险区域或进行危险操作时,系统会及时调整设备行为,确保操作安全。

### 4.3 优化控制策略对系统稳定性的影响

优化控制策略对智能制造系统的稳定性具有直接影响。通过采用先进的控制算法,如PID控制、模糊控制和自适应控制等,系统可以实时调整各项操作参数,确保设备始终在最优状态下运行。例如,针对生产过程中的负荷波动,优化控制策略能够根据实时监测数据调整设备运行速度和负载,以维持稳定的生产节奏。优化控制策略不仅有助于提高生产效率,还能减少设备故障和故障停机的风险,从而保证系统的稳定性。通过精确的控制优化,系统能够在不同工作条件下维持高效且安全的运行,减少资源浪费,延长设备寿命,为智能制造系统提供可靠的技术保障。

## 5 基于安全机制的自动化控制系统实现路径

### 5.1 安全机制与自动化控制的协同设计

安全机制与自动化控制的协同设计是确保智能制造系统安全高效运行的核心。自动化控制系统不仅需要高效调度生产资源，还要在系统出现异常时迅速响应，保障操作安全。因此，在设计控制系统时，需要将安全机制深度嵌入系统架构中。例如，结合多层次的防护措施，如传感器监测与紧急停机机制，能够实时识别并应对潜在安全风险。安全机制与自动化控制系统的协调设计还包括软件和硬件的整合，确保在系统运行过程中，各种安全策略能够无缝对接，实时调节工作状态，避免危险的发生。

### 5.2 安全性保障与生产效率提升的协同路径

在智能制造系统中，安全性保障与生产效率提升的协同路径是实现系统高效稳定运行的关键。安全性和效率往往是两个看似对立的目标，过于注重安全可能会导致生产速度降低，而过度追求效率可能增加安全风险。因此，通过优化控制策略与安全约束的综合应用，可以在确保安全的同时提升生产效率。例如，在生产过程中，系统可根据实时数据调节设备的工作负荷，既能保障设备在安全范围内运行，又能最大化生产效能<sup>[5]</sup>。通过智能决策和实时反馈机制，自动化控制系统能够动态调整工作参数，以实现安全性和生产效率的双重提升，从而保持系

统的稳定性与灵活性。

### 5.3 优化路径在实际应用中的效果与挑战

优化路径在实际应用中的效果表现为智能制造系统能够在高效、安全的条件下持续稳定运行。在实际应用中，优化路径也面临一定的挑战。首先，由于生产环境和任务的多样性，制定一个通用的优化路径并不容易，需要根据不同场景进行针对性的调整。其次，系统的复杂性和实时数据处理的需求，要求优化控制策略具有较高的计算能力和响应速度，这对于硬件设施的要求较高。生产过程中的不确定性因素，如人员操作误差、设备故障等，也可能影响优化路径的效果。因此，如何克服这些挑战，并在实际生产中实现优化路径的最大效能，仍是智能制造系统需要解决的问题。

## 6 结语

智能制造系统中，人机协作的安全机制与自动化控制优化至关重要。通过多源感知、智能决策和自适应控制等技术，能够有效提升系统的安全性与生产效率。协同设计与优化路径的应用，不仅解决了安全性与效率之间的矛盾，也促进了系统的稳定运行。尽管在实际应用中仍面临诸多挑战，但通过持续的技术创新与优化，智能制造系统将在保障安全的同时，实现更加高效、灵活的生产过程。

### 参考文献：

- [1] 时夕然,苏晓瑞.智能制造中的工业机器人技术与协作机器人应用探索[J].电子元器件与信息技术,2025,9(04):142-145.
- [2] 郭孝阳,张秀武,杨静怡.智能制造、人机协作与能源利用效率——基于工业机器人应用的视角[J].环境经济研究,2024,9(03):43-65.
- [3] 黄海松,朱云伟,张国章.人机协作技术的发展与应用研究综述[J].贵州大学学报(自然科学版),2025,42(04):1-8.
- [4] 刘泽双,韩金,王一帆.智能制造人机协作运行功能标准模型研究[J].科技进步与对策,2022,39(20):21-31.
- [5] 杨晓楠,房浩楠,李建国,等.智能制造中的人-信息-物理系统协同的人因工程[J].中国机械工程,2023,34(14):1710-1722+1740.