

团体标准

T/CAMETA XX—2024

智能制造机器人协作控制技术规范

Intelligent Manufacturing Robot Collaborate Control Profile

(征求意见稿)

2024-XX-XX 发布

2024-XX-XX 实施

中国机电一体化技术应用协会 发布

目次

前 言	3
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 协作控制技术	5
4.1 整体实现逻辑框架	5
4.2 智能制造机器人移动端协作运动控制	6
4.3 智能制造机器人机械臂端协作力控制	7
5 智能制造机器人的协作控制技术要求	7
5.1 机器人本体技术要求	7
5.2 控制系统技术要求	8
5.3 机器人协作安全要求	11
6 重要功能模块的实现方法	13
6.1 控制系统技术要求	13
6.2 传感器与感知模块	15
6.3 伺服驱动与力控模块	16
6.4 通信拓扑模块	18
7 试验方法	20
参考文献	22

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国机电一体化技术协会提出。

本标准由中国机电一体化技术协会归口。

本标准起草单位：湖南大学

本标准主要起草人：

1 范围

本标准规定了智能制造机器人的术语和定义、协作控制技术、协作控制技术要求，以及协作控制关键模块实现。

本文件适用于工业企业智能工厂和数字化车间建设的智能制造用机器人。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性应用而构成本文件必不可少的条款。其中，标注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 5271.24-2000 信息技术 词汇 第 24 部分：计算机集成制造

GB/T 16642-2008 企业集成 企业建模框架

GB/T 37413-2019 数字化车间 术语和定义

GB/T 37393-2019 数字化车间 通用技术要求

3 术语和定义

GB/T 37413-2019 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

机器人本体 robot body

完成协作控制相关行为指令，具有物理形态的机电设备。

3.2

机器人机械臂机构 Robot manipulator mechanism

由一系列通过关节连接的可移动部件组成的系统，能够模拟人手臂的动作，在不同环境中完成特定任务。

注：机械臂机构按结构特点可分为串联机械臂，并联机械臂，SCARA 机械臂，Delta 机械臂等。

3.3

机器人移动端机构 Mobile robot mechanism

机器人为了完成任务而在空间中移动和定位的机械结构。

3.4

机器人末端执行机构 Robot end effector

机器人系统中直接与操作对象或环境进行物理交互的装置，是机器人机械臂的最末端部分，其功能涵盖了抓取、夹持、焊接、装配、测量、加工等各种任务，具体应用取决于其设计和集成的工具或设备。

3.5

控制系统模块 Control System Module

用于管理和执行操作的独立硬件或软件组件，负责处理输入信号、执行控制算法并生成控制信号以驱动机器人。

3.6

传感器与感知模块 Sensor and Perception Module

传感器是机器人用于检测物理量（如温度、压力、光线、声音等）并将其转化为可测量信号的设备。而感知模块则是这些传感器的集合体，用于收集和处理环境信息。

3.7

伺服驱动与力控模块 Servo drive and force control module

伺服驱动器是一种用于控制伺服电机的电子设备，它接收来自控制器的指令信号，并将这些信号转换为电机轴的精确运动。力控模块是用于控制机械系统中力的大小和方向的电子组件。

3.8

通信拓扑模块 Communication Topology Module

通信拓扑模块是智能制造移动机器人的关键组件，负责机器人各部件之间的信息传递与数据交换。

4 协作控制技术

4.1 整体实现逻辑框架

传统的机器人控制技术侧重于精确性和重复性，并且通常是在隔离的工作环境中运行，完成确定性简单任务。而协作控制技术是一种新型的多机器人控制方法，其组成包括感知机构、通信机构、决策执行机制、反馈与调整机制、安全机制等部分。依赖于先进的传感器技术和智能算法，允许机器人在非隔离的环境中与人类或其他机器人共享空间并协同完成复杂工作，提高工作效率和灵活性。图 1 为多机器人协作控制技术实现整体逻辑框架。

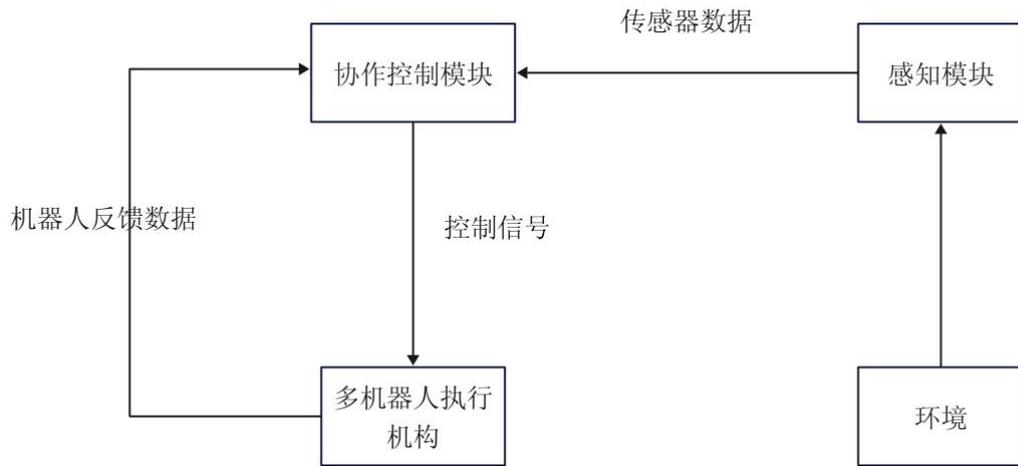


图 1 整体逻辑架构

4.2 智能制造机器人移动端协作运动控制

4.2.1 概述

智能制造机器人移动端协作运动控制技术是指通过无线通信技术，实现机器人在移动过程中与其他机器人或设备的协调与合作的运动控制技术合集。可以分为机器人实时运动控制、系统信息的通信交互、障碍环境的协调规划三方面。

4.2.2 机器人实时运动控制

机器人实时运动控制是指将轨迹规划中生成的轨迹、速度规划方案通过控制器实时地映射到机器人电机的运动上，以实现机器人按要求精确完成任务。实时控制需要考虑机器人的动力学模型和控制策略，以控制机器人的位置及姿态。

4.2.3 系统信息的通信交互

多机器人之间需要在一种统一的通信规则下进行信息交互，共享各自的局部状态，目标及意图等信息。通信协议应选择 TCP/UDP 通信协议或者 SOAP 通信协议。机器人的运动控制通信系统结构应采取模块化的形式，各模块采用面向对象的设计方法，且尽量降低全局通信量。

4.2.4 障碍环境的协调规划

障碍环境的协调规划是指根据多机器人可用的自由度和任务要求，通过路径规划算法设计出各协作机器人运动的轨迹和速度规划方案。在轨迹规划过程中需要考虑多机器人本

身的动态特性、物理约束和运动学约束。通过运动学模型分析，可以推导出机器人的关节角度、角速度、加速度，以及多机器人的位置和姿态信息等。

4.3 智能制造机器人机械臂端协作力控制

机械臂端协作力控制技术是指在机械臂操作过程中，通过传感器和控制系统实时监测和调整机械臂与环境或物体接触时产生的力，以确保操作的精确性和安全性。这种技术通常涉及到力传感器的应用及相应的控制算法，使得机械臂能够在与人类或其他机械臂协作时，实现柔和、精确的接触和操作。智能制造机器人机械臂端协作力控制包括力传感器数据获取与力控策略两部分。

4.3.1 力传感器数据获取

根据力传感器的通讯协议（如 Modbus、TCP/IP 等）对力传感器数据进行读取。并对力传感器数据进行滤波。以保证力反馈信息的准确性和稳定性。在力传感器工具侧装有末端执行器时，应对力传感器数据进行重力补偿，消除数据中末端执行器重力产生的力和力矩。

4.3.2 力控策略

力控策略负责控制机器人末端输出期望的力和力矩。根据控制策略的不同可分为阻抗控制、导纳控制、力/位混合控制。每种控制策略需要通过给定信号和反馈信息计算出相应的控制信号。

阻抗控制策略是使用阻抗模型将机器人末端位置误差转换为机器人末端力/力矩控制信号，并通过雅可比矩阵将机器人末端力/力矩控制信号转换为机器人关节力矩控制信号，从而实现机器人末端位置跟踪。

导纳控制策略是使用阻抗模型将机器人末端力/力矩误差转换为机器人末端位置控制信号，并通过雅可比矩阵将机器人末端位置控制信号转换为机器人关节位置控制信号，从而实现机器人末端力/力矩跟踪。

力/位混合控制策略是使用力/位混合控制器，通过解耦的方式分别对机器人末端的力和位置进行控制。

5 智能制造机器人的协作控制技术要求

5.1 机器人本体技术要求

本体稳定性、电气布局、接口要求、互换性要求等。

5.1.1 本体稳定性

本体结构应具备足够的刚度和强度，在其前提下尽可能采用轻量化材料，并合理分布负载，以提高机器人的运动效率和稳定性。试验方法应符合 GB/T 38871-2020 中 7 的规定，具体数值由各制造商产品规定。

5.1.2 电气布局

应根据应用场景和任务要求确定具有协作控制功能的智能制造机器人电磁隔离、电气空间布局、电气防护等电气布局要求，并符合 GB/T 5226.1 的规定。

5.1.3 接口要求

实现协作控制技术的智能制造机器人本体应配置电源接口、通讯接口、I/O 接口、外部设备接口、末端执行器接口等满足实现协作控制需求的接口。

5.1.4 互换性要求

实现协作控制技术的智能制造机器人本体应采用统一标准和模块化设计，并满足互换性要求。当机器人出现故障而需要更换零部件时，不同供应商提供的标准化替换部件能够无缝集成到系统中，各模块可独立更换或升级。更换后应保证或提高运行效率及工作精度。

5.2 控制系统技术要求

主要包括通用要求、硬件系统要求、软件系统要求等。

5.2.1 通用要求

面向智能制造的机器人硬件系统应采用模块化设计，并包括控制模块、伺服驱动模块、逻辑控制、电源管理模块及安全备份模块等功能模块。硬件系统应支持总线接口并具备实现外轴扩展、I/O 扩展以及各种通信接口的柔性扩展能力。

5.2.2 硬件系统要求

6.2.2.1 控制器模块

控制器模块应具备浮点运算能力、逻辑运算能力、接口扩展能力，并应具有实时操作系统。主控平台应具备通用的如串口、以太网、USB、VGA、LCD 等接口。

6.2.2.2 驱动模块

驱动模块应具备 EtherCAT、PowerLINK、Profinet 等总线接口。

6.2.2.3 I/O 模块

I/O 接口模块应包含数字量输入输出，模拟量输入输出，RS232、RS485 接口、RJ45 接口、USB、SD 卡等接口。

6.2.2.4 硬件接口

同类总线设备硬件应使用 RJ45、D 型数据接口连接器等通用、一致的封装以及对应引脚信号的接口。

5.2.3 软件系统要求

6.2.3.1 通用要求

为实现智能制造机器人控制功能，软件系统应具有独立运行的控制软件系统和伺服驱动软件系统，并应开放相应的接口以供柔性控制模块的二次开发调用。

6.2.3.2 控制软件系统

为满足智能制造机器人控制功能要求，机器人应配备控制软件系统，并应开放如表 1 所示的函数接口。

表 1 控制软件系统应开放的函数接口

函数名	描述
运动操作函数	a) 上位机系统相关运动函数，包括关节运动、直线运动、圆弧运动以及各运动之间的平滑过渡函数； b) 其他运动函数； c) 运动学正逆解
机器人状态操作函数	a) 读取机器人当前运动状态（运动暂停、停止等标志位）； b) 运动停止，终止当前运动； c) 运动暂停，暂停当前运动，且可以继续未完成运动； d) 运动中中断，中止当前运动，完成其他操作后可继续回原轨迹完成运

	动； e) 设定运动模式； f) 控制机械臂或者单轴上使能或下使能； f) 控制移动底盘使前后左右运动； g) 读取、获得、放弃控制权限（其中权限范围由制造商给定）； h) 清除错误
I/O 读写操作函数	读取、设定指定 I/O
文件读写操作函数	读取、修改、保存目标文件

控制软件系统应具备如下程序扩展功能：

a) 指令自定义添加功能：

- 1) 通过用户自定义方式定义系统中的新指令；
- 2) 在系统中注册用户自定义的新指令；
- 3) 使用所定义的新指令编写运动控制程序。

b) 运动规划扩展功能：

- 1) 预留接口添加运动规划算法；
- 2) 直接替代系统中的运动规划算法；
- 3) 集群机器人协作控制算法。

c) 功能或工艺模块自主添加功能：

- 1) 焊接工艺包；
- 2) 磨抛工艺包；
- 3) 装配工艺包；
- 4) 视觉功能包；
- 5) 其他功能或工艺包。

6.2.3.3 伺服驱动软件系统

为满足智能制造机器人控制功能要求，机械臂伺服驱动软件系统应具备可扩展性，并应开放 GB/T 38839—2020 中规定的数据传输接口接口。

5.3 机器人协作安全要求

主要包括通用要求、硬件系统要求、软件系统要求等。

5.3.1 通用要求

6.3.1.1 安全设计原则

风险评估：在设计和使用机器人系统之前，必须考虑到所有可能的风险并采取适当的控制措施。

冗余设计：关键安全功能应具备冗余设计，以确保在系统故障时能够有效保护人员和设备。

6.3.1.2 操作安全

隔离与防护：确保机器人与人类工作区域之间有物理隔离，如围栏或保护罩，防止意外接触。

紧急停止：在机器人工作区域内设置明显易用的紧急停止装置，以便在紧急情况下迅速停止机器人操作。

安全警示：在机器人周围设置清晰的警示标志和指示灯，提醒工作人员注意安全。

6.3.1.3 协作安全

协作模式：在多机器人协作的场景中，确保机器人具备安全的协作模式，机器人应配备足够传感器，能够实时检测与人或设备的接触情况。存在潜在碰撞风险时，采取适当行动（如降低速度或者停止）以避免发生伤害。

传感器与检测：配备足够的传感器和监测设备，以实时检测机器人之间的相对位置和状态，防止意外接触。

6.3.1.4 培训与操作

操作培训：确保所有操作人员经过充分培训，掌握机器人操作的安全要求和应急处理措施。

操作规程：制定详细的操作规程，确保操作人员按照规定的安全流程进行操作，避免违规行为。

6.3.1.5 维护与检查

定期检查：定期对机器人系统进行安全检查和维护，确保所有安全装置和功能正常工作。

故障处理：制定故障处理程序，确保在发生故障时能够迅速、有效地解决问题，保障系统安全。

6.3.1.6 法规与标准

遵循标准：遵循适用的国家和国际安全标准和法规，如 ISO 10218、ISO/TS 15066 等，确保机器人系统符合行业安全要求。

文档记录：保持详细的安全文档记录，包括风险评估报告、操作手册和维护记录，以便进行安全审查和改进。

5.3.2 硬件系统要求

6.3.2.1 物理接口

硬件接口应避免直接暴露，若存在可物理接触的调试接口，需在软件层面进行禁用，或者实施严格的授权验证机制以确保只有合法用户才能进行操作。

6.3.2.2 数据存储

存储芯片应具备安全机制，防止数据被未经认证的账户恶意篡改。

6.3.2.3 身份认证

第三方外设如摄像头、激光雷达等，应具备身份认证机制，并具有抵御身份验证攻击的机制。

6.3.2.4 数据维护

数据维护工作专用计算机及配套工具设备，如洁净工作台、固件操作工具、万用表等。

5.3.3 软件系统要求

6.3.3.1 访问控制

系统软件应具备授权访问机制，以满足正常功能的最小权限运行。

6.3.3.2 异常验证防护

系统软件应具备抵御对身份验证机制进行攻击的机制。

6.3.3.3 身份验证

系统软件应具备用户身份验证机制。

6.3.3.4 代码加密

系统软件应具备反汇编防范措施。

6.3.3.5 防篡改

系统软件应具备防篡改措施。

6.3.3.6 隐私保护

系统软件安装包中应不含隐私信息。

6.3.3.7 安全更新

系统软件应保障在线或离线安装包升级的安全性。

6 重要功能模块的实现方法

6.1 控制系统技术要求

控制系统的技术要求应涵盖实时性、鲁棒性、模块化、协同控制、安全性、通信能力和可调节性等多个方面，具体如表 1 所示。系统必须具备实时处理能力，以确保机器人在动态环境中的即时响应，同时需要具备高鲁棒性和可靠性，能够在存在噪声或部分故障的情况下维持稳定运行。控制系统应设计为模块化，支持升级和维护，并具备与不同硬件和任务需求的兼容性。在协同控制能力方面，系统需支持多机器人或人机协同操作，确保多设备间的同步与协调。在安全性方面，系统应包含防护机制，以防止误操作或外部攻击，同时保证人机协作环境中的安全。通信能力要求系统支持多种通信协议，实现与其他设备或系统的无缝集成，并在数据传输中保证足够的带宽和低延迟。最后，控制系统还应允许

根据任务和环境需求进行参数调整，以优化其性能。

表 1 控制系统技术要求

技术要求	描述
实时性	确保机器人在动态环境中的即时响应。
鲁棒性和可靠性	系统需在存在噪声、干扰或部分故障的情况下保持稳定运行，且具备容错和自我诊断能力。
模块化和可扩展性	控制系统应设计为模块化，支持升级、维护和适应不同的硬件及任务需求。
协同控制能力	系统应支持多机器人或人与人之间的协同操作，确保多设备之间的同步与协调。
安全性	系统应包含安全机制，防止误操作或外部攻击，并在紧急情况下提供有效的停机和防护措施，确保人机协作环境中的安全。
通信能力	系统应支持多种通信协议，实现与其他设备或系统的无缝集成，并保证数据传输的带宽、延迟和可靠性。
可调节性	控制系统应允许根据具体任务和环境需求进行参数调整，以优化系统性能。

控制系统模块实现的核心是实现硬件与软件的集成，需要逐步地实现传感器接口设计、信号处理、控制算法实现、执行器接口设计和通信模块设计。智能制造机器人控制系统模块的实现方法如图 1 所示。由传感器采集到的数据经过传感器接口传输到数据处理单元。数据处理单元负责完成数据的分析和处理，以确保数据的有效性。之后，编写控制算法，实现 PID 控制、模糊控制或模型预测控制等算法。控制信号经执行器接口输出到驱动电机、气动执行器或其他执行装置，使机器人完成相应的操作。通信接口负责模块间或与外部系统的通信和数据交换。

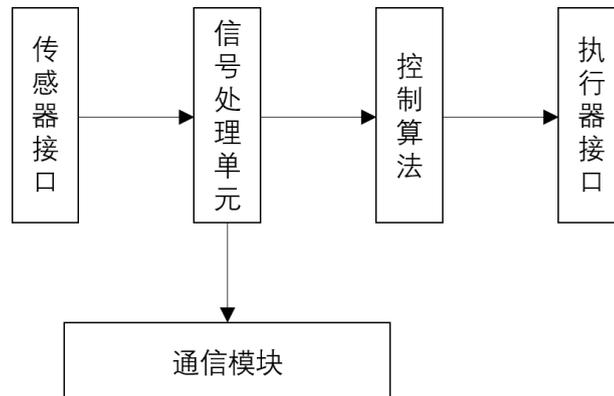


图 1 智能制造机器人控制系统模块的实现方法

6.2 传感器与感知模块

7.2.1. 概述

传感器与感知模块是机器人协作系统中的关键组成部分，负责收集和理解环境中的信息，以支持多机器人系统的协调和合作。此类模块通过集成多种传感器来获取环境数据，并运用算法进行数据处理和分析，使得机器人能够在复杂环境中进行高效的协作。有效的传感器与感知模块不仅能够提升每个机器人对环境的理解能力，还能通过信息共享和协调感知优化多个机器人的集体行动和决策。

7.2.2. 硬件系统

7.2.2.1 传感器类型

- **视觉传感器：**包括摄像头和深度相机，用于捕捉环境的图像和深度信息，支持视觉信息共享和目标识别。视觉数据在多个机器人间共享，有助于构建全局视图。
- **激光雷达（LiDAR）：**通过激光扫描生成高精度的环境地图，支持障碍物检测和机器人间的相对定位。多个机器人可以共享激光雷达数据以实现环境的协同建模。
- **超声波传感器：**用于近距离障碍物检测和避障。超声波传感器的数据可在机器人之间共享，以提高避障系统的协作效率。
- **惯性测量单元（IMU）：**提供机器人的姿态和运动信息，帮助机器人进行自我定位和动态调整。IMU数据的共享可用于协调多机器人系统中的相对运动。
- **触觉传感器：**用于检测接触和压力，支持机器人与环境中的物体进行高效的交互和协作。

7.2.2.2 硬件接口

传感器的硬件接口设计应支持机器人之间的高效数据交换和系统兼容。常见的接口包括：

- **数字接口（如 I2C、SPI）：**用于高速的数据传输，确保传感器数据的实时共享。
- **模拟接口：**处理传感器输出的模拟信号，并进行必要的转换以支持多机器人系统中的数据同步。
- **串口通信（如 UART）：**用于跨机器人通信，实现数据传输和系统间的信息交换。

7.2.3. 软件

7.2.3.1 数据采集与同步

软件负责从各个传感器收集数据，并确保数据的时间同步和一致性。在多机器人系统中，数据采集和同步是确保协作效果的基础，软件应支持跨机器人数据共享机制，以便实现统一的数据视图。

7.2.3.2 数据融合与共享

传感器数据融合是提高感知系统准确性和可靠性的关键。软件应实现多传感器数据融合，通过整合来自不同传感器的数据，生成统一的环境表示。数据共享机制应支持机器人之间的实时数据传输，使得每个机器人能够访问和使用其他机器人的感知数据，从而优化整体协作。

7.2.3.3 数据处理与分析

数据处理软件应包括图像处理、深度学习模型的推断和传感器数据解析。分析工具应能够实时处理数据并生成有用的信息，以支持机器人之间的协同决策。特别是在复杂环境中，软件需要快速响应和适应，以支持机器人团队的高效运行。

7.2.4. 算法设计

7.2.4.1 识别数据清洗与预处理

数据处理的首要步骤是对原始数据进行清洗。清洗过程包括删除或修正缺失值、异常值，以及处理噪声数据。这一步骤可以采用多种技术，如平均值填补法、插值法、回归分析等，目的是去除或减小数据中的误差，以提高后续分析的准确性和可靠性。

7.2.4.2 多传感器数据融合

数据清洗和校准之后，进行多传感器数据融合。多传感器数据融合技术通过整合来自不同传感器的多维度信息，以克服单一传感器的局限性，增强整体感知的鲁棒性和准确性。这种融合可以采用多种算法，包括但不限于卡尔曼滤波、贝叶斯网络、粒子滤波等，以提高感知系统的性能。

6.3 伺服驱动与力控模块

伺服驱动与力控模块是机器人协作系统中的关键组成部分，该模块的结构如图 6.1 所示。伺服驱动负责将控制指令转化为驱动关节电机的驱动信号，并通过相应的传感器（如

编码器、关节力矩传感器) 获取反馈信号, 从而形成控制闭环, 使得关节电机动作到指定状态。力控模块负责控制机器人末端输出期望的力和力矩。伺服驱动与力控模块的实现通常包含硬件选择与设计, 控制策略制定以及软件开发。

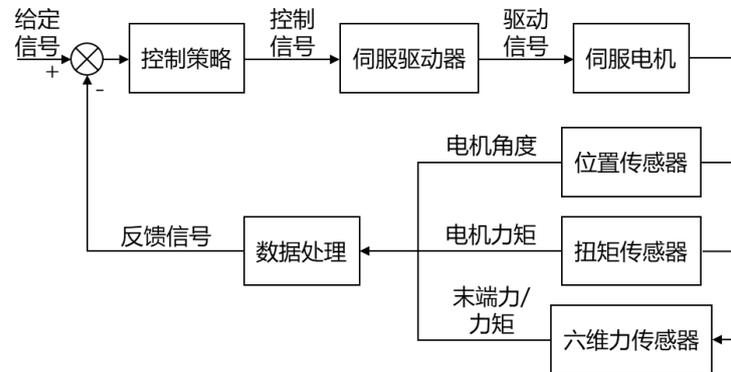


图 6.1 伺服驱动与力控模块结构图

6.3.1. 硬件选择与设计

6.3.1.1 伺服电机选择

伺服电机的种类繁多, 不同种类的伺服电机在性能和控制方式上各有不同。选择伺服电机时, 应根据机器人的性能需求选择额定转速、额定扭矩和惯量合适的伺服电机。

6.3.1.2 驱动器选择

选择驱动器的种类需要与选取的伺服电机的种类相对应。并且, 应考虑机器人的性能需求选择控制精度、分辨率、响应速度、过载能力、动态性能和抗扰性能满足要求的驱动器。

6.3.1.3 传感器选择

需要选择的传感器包含两种, 位置传感器和力/力矩传感器。位置传感器用来测量伺服电机旋转的角度。在选取位置控制器时, 需要根据机器人的性能需求选择分辨率、反应速度满足要求的位置控制器。力/力矩传感器根据用途不同可分为用于测量关节力矩的扭矩传感器和用于测量机器人末端作用力的六维力传感器。在选取扭矩传感器时, 需要根据机器人的性能需求选择量程、过载能力、精度、分辨率、重复性、非线性、迟滞和温度漂移满足要求的扭矩传感器。在选择六维力传感器时, 需要根据机器人的性能需求选择量程、过载能力、精度、分辨率、重复性、非线性、迟滞、串扰和温度漂移满足需求的六维力传感器。

6.3.1.4 集成设计

集成设计时应结合机器人的应用场景, 考虑防护性能、散热性能、空间利用率、维护难度和可靠性等因素对机器人的硬件结构集成进行设计。

6.3.2. 控制策略

6.3.2.1 伺服控制策略

根据控制目标的不同对伺服电机的控制策略可以分为位置控制、速度控制和力矩控制三种。每种控制策略需要通过给定信号和反馈信息计算得出相应的控制信号。设计伺服控

制策略时，需要根据机器人的性能需求设计动态性能、稳态误差满足要求的控制策略。

6.3.2.2 力控策略

力控策略负责控制机器人末端输出期望的力和力矩。根据控制策略的不同可分为阻抗控制、导纳控制和力/位混合控制。每种控制策略需要通过给定信号和反馈信息计算出相应的控制信号。设计力控策略时，需要根据机器人的性能需求设计动态性能、稳态误差满足要求的控制策略。

6.3.3. 软件开发

6.3.3.1 传感器数据获取

软件应实现各种通讯协议（如 Modbus、TCP/IP 等）的传感器数据的获取。并根据需求对力传感器数据进行滤波、类型转换等处理。确保力反馈信号的准确性和稳定性。

6.3.3.2 控制策略算法

软件应实现对应的控制策略算法。并且可以将计算的出的控制信号通过相应的通讯协议（如 Modbus、TCP/IP 等）输出给伺服驱动器，从而对伺服电机进行控制。

6.4 通信拓扑模块

为了实现智能制造机器人中的通信模块，其核心在于明确通信协议、接口设计和技术要求。

6.4.1 多机通信协议

OPC UA (开放平台通信统一架构): 用于不同制造设备之间的安全数据交换和控制指令传输，支持复杂网络环境中的工业自动化应用。

EtherCAT (以太网控制自动化技术): 适用于需要高实时性和同步精度的应用，如多机器人协作控制。EtherCAT 提供了极低的通信延迟，确保控制指令在多个机器人之间同步执行。

MTConnect: 引入 MTConnect 协议，用于需要标准化数据采集和监控的制造环境，特别是针对多个制造设备和机器人的集成。

MQTT (消息队列遥测传输协议): 一种轻量级的发布/订阅通信协议，适合低带宽、不稳定网络环境中使用，特别适用于传感器数据的收集和远程状态监测。

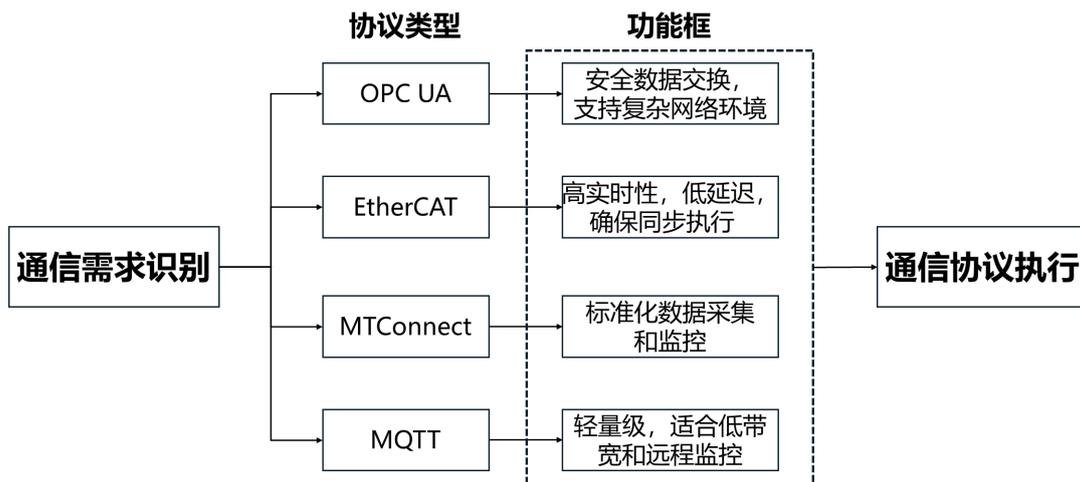


图 2 多机通信协议流程

6.4.2 接口设计

标准化接口：通信模块应提供标准化的物理和逻辑接口，如以太网接口、无线 WIFI、蓝牙接口以及 API 接口，接口设计应符合国际和行业标准，如 IEEE 802.3（以太网标准）和 IEEE 802.11（WIFI 标准）。

物理接口：通信模块应支持快速插拔和自动配置功能，简化机器人在不同生产线间的快速部署和重配置过程。

实时性接口：为了满足高实时性要求，接口设计应支持高速数据传输，特别是在多机器人协作任务中需要保证数据同步的场景下。

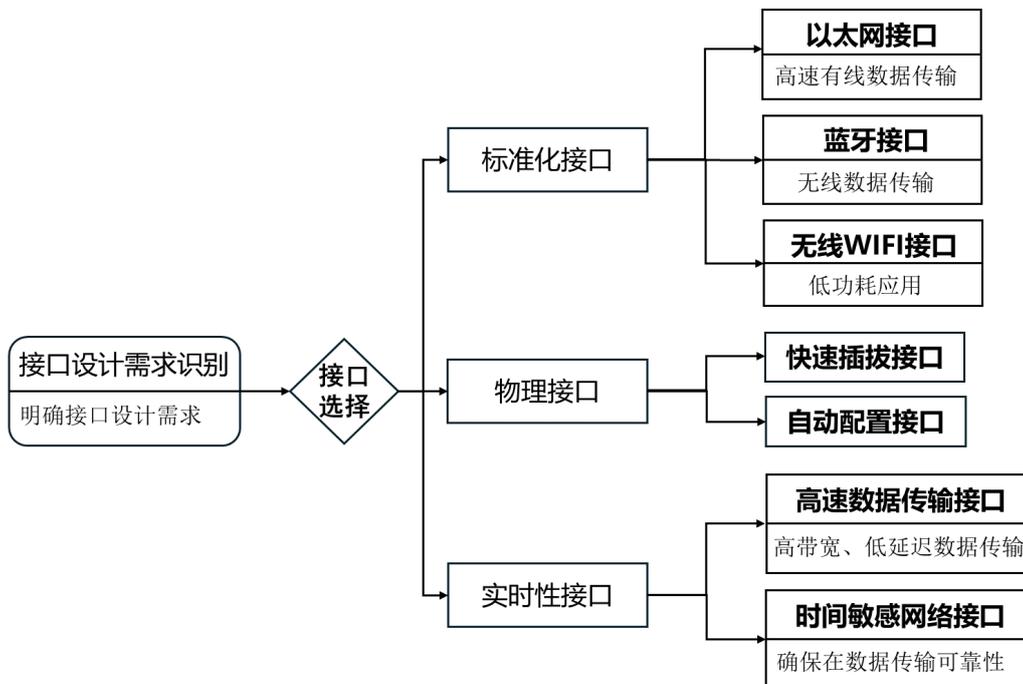


图 4 接口设计

6.4.3 技术要求

数据安全性：通信模块应实现数据加密和认证机制，防止数据在传输过程中被截获或篡改，并符合工业通信网络安全标准（如 GB/T 33007-2016）。

通信可靠性：应实现冗余设计，确保通信在网络中断或节点故障时能够自动切换和恢复。数据传输应具备错误检测和纠正机制，保证数据的完整性。

扩展性与兼容性：通信模块应具备良好的扩展性，能够适应未来技术发展和标准更新。接口和协议的设计应兼容现有的主流工业设备和系统。

7 试验方法

7.1.1 本体稳定性测试

将机器人置于标准测试台上，目测检查机器人外观和结构，使用专业检测工具检测外形尺寸。在检测无误的情况下，对机器人进行无载荷测试、逐步加载测试以及极限负载测试。

首先，在未施加任何额外负载的情况下，启动机器人并执行一系列标准化运动操作（如移动平台简单的直线移动，机械臂的旋转、抓取等），测量机器人本体的形变和振动情况，并记录初始数据，作为基准值。

然后，逐步增加负载至设计极限，在每一级负载下重复标准化运动操作，记录机器人本体在不同负载条件下的形变量和振动幅度，并评估其工作精度。

最后，将机器人本体加载至设计极限负载，并再次执行标准化运动操作，并记录几项重要参数。时刻注意机器人本体是否出现异常情况，如过度形变、剧烈振动或失稳现象。

7.1.2 电气系统测试

(1) 预检

检查机器人电气系统的布线、电气组件和接地措施是否符合设计图纸及规范要求。

(2) 电磁兼容性(EMC)测试（包括辐射干扰测试和传导干扰测试）

辐射干扰测试：在屏蔽环境下，使用 EMC 测试设备对机器人进行辐射干扰测试，测量电磁辐射强度及频谱分布，确保辐射水平符合标准要求。

传导干扰测试：测试机器人电源线和信号线的传导干扰，确保传导噪声在规定的限值内。

(3) 电气空间布局测试（包括温度分布测试和散热性能测试）

温度分布测试：使用热成像仪检测机器人在运行过程中的电气组件和布线温度，观察温度分布是否均匀，是否存在过热现象。

散热性能测试：在不同工作负载条件下，长时间运行机器人，监测温度变化，评估电气布局的散热性能是否合理。

(4) 电器防护测试（包括接地测试和绝缘性能测试）

接地测试：使用接地电阻测试仪，测量机器人接地系统的电阻，确保接地电阻符合安全标准，防止电击危险。

绝缘性能测试：使用绝缘电阻测试仪，测试电气组件之间的绝缘电阻，确保其在规定的范围内，防止漏电或短路。

(5) 其它

使用示波器监测电流、电压、信号的波形，观察是否有干扰现象，确保无明显干扰或异常波动。

7.1.3 接口及互换性测试

验证机器人各类接口的功能，以及不同设备、模块之间的兼容性，确保接口和模块均满足协作控制需求。

参考文献

- [1] GB/T 1.1-2020 标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则
- [2] GB/T 39116-2020 智能制造能力成熟度模型
- [3] GB/T 39117-2020 智能制造能力成熟度评估方法
- [4] GB/T 41255-2022 智能工厂 通用技术要求
- [5] GB/T 41392-2022 数字化车间可靠性通用要求
- [6] GB/T 41257-2022 数字化车间功能安全要求
- [7] GB/T 41260-2022 数字化车间信息安全要求

《智能制造机器人协作控制技术规范》

编制说明

一 工作简况

（一） 任务来源

随着工业 4.0、智能制造的快速发展和中国制造 2025 等计划的逐步推进，工业生产和智能制造对于机器人控制系统的需求正在快速增加，以智能制造机器人控制为核心的工业机器人在行业内的普及和应用正处于高速增长阶段。

国家政策层面，如《“十四五”智能制造发展规划》中明确提出，要加快新一代信息技术与制造业的深度融合，推动智能制造技术的发展和應用。在此背景下，工业机器人控制系统的标准化工作成为推动智能制造发展的关键一环。但是工业机器人控制系统是控制技术、传感器、感知模块、伺服驱动、力控模块、通信模块为一体的应用系统，其所涉及的学科领域较多，因此现阶段国内缺乏一套完整、实用的工业机器人控制系统术语标准。制定《智能制造机器人协作控制技术规范》标准有助于统一工业机器人控制系统相关的技术语言，促进国内工业机器人控制系统的良性发展，并为同步参与相关国际工业机器人控制系统标准编制打下坚实基础。为了规范智能制造工业机器人协作控制技术的设计、开发和应用，确保其在智能制造领域的有效性和可靠性，制定一套通用技术规范显得尤为重要。经调研，未发现已发布的工业机器人控制系统通用技术规范标准，因此本标准不和已有标准冲突。

（二） 国内关于工业机器人控制系统通用技术规范的制定情况及最新要求

2020 年发布的国家标准《GB/T 39360-2020 工业机器人控制系统性能评估与测试》，为机器人控制系统的设计、开发、集成和应用提供了指导。

随着制造企业数字化转型和智能制造应用的深入，一大批具备较高数字化和智能化水平的工业机器人控制系统正在建设或准备建设。在工业机器人协作控制技术建设前期，规划设计工程师需要明确智能制造工业机器人协作控制技术的设计目标和总体设计框架，以及各模块的设计任务和要求，但是市场上出现的多种设计和实施方案，缺乏统一的标准可能导致产品质量参差不齐，影响行业的健康发展。因此，《智能制造机器人协作控制技术规范》的制定有助于统一行业标准，提高整体技术水平和产品质量。

在此背景下，湖南大学机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心结合自

身在智能制造及工业机器人控制方面所积累的丰富经验，作为主编单位承担了《智能制造机器人协作控制技术规范》的标准编制工作。

（三）标准编制的目的、意义

编制该标准的主要目的在于为智能制造工业机器人协作控制技术搭建提供规范指导，即明确定义工业机器人控制系统的设计目标，归纳必需开展的模块任务。随着智能制造的快速发展，工业机器人在自动化生产线中的作用日益凸显。通过制定通用技术规范，可以提升智能制造工业机器人协作控制技术的性能和可靠性，进一步推动工业自动化水平的提升。其次，通用技术规范的制定有助于确保不同制造商和不同应用场景下的控制系统能够达到一致性，从而保证产品质量的稳定性。再次，统一的技术规范可以为研发人员提供清晰的指导和参考，激发创新思维，推动新技术、新方法的研发和应用，加速智能制造工业机器人协作控制技术的进步。最后，在智能制造环境中，不同设备和系统之间的兼容性和扩展性至关重要。通用技术规范可以确保工业机器人控制系统具有良好的兼容性和扩展性，便于与其他系统集成和扩展。

编制本标准的意义非常重大，原因在于：1）设计搭建工业机器人协作控制系统通用技术规范亟需标准指导；2）国家智能制造标准体系建设指南明确了工业机器人控制系统通用技术规范标准的重要性；3）目前缺乏智能制造工业机器人协作控制技术通用技术规范标准。

（四）标准特点

1. 本标准完全遵循了《国家智能制造标准体系建设指南》的总体要求。本标准就是智能生产中工业机器人协作控制技术搭建指南的一部分，目前针对智能制造机器人协作控制系统尚无相关标准出台。

2. 本标准在《GB/T 39360-2020 工业机器人控制系统性能评估与测试》《GB/T 38559-2020 工业机器人力控制技术规范》国家标准指导下进行工业机器人协作控制系统通用性技术规范编制。并规定工业机器人控制技术、传感器、感知模块、伺服驱动、力控模块、通信模块为一体的应用系统的基本要求。

（四）主要工作过程

1. 编制准备阶段

二 标准编制原则 2024年1月-4月。主编单位接到编制任务后，组织专业技术人员成立编制组，开展大量的资料收集和前期调研工作，编写完成标准大

纲、标准初稿等。

2. 征求意见阶段

未进行

3. 送审阶段

未进行

4. 报批阶段

未进行

二 标准编制原则

（一）科学性原则：本标准编制是在科学理论和实践经验基础上，确保技术要求和规范具有科学性和可行性，能够有效指导实际施工过程。

（二）统一性原则：本标准编制统一了各方的要求和标准，确保项目参建单位在制定说明书时过程中能够按照该标准进行操作，参照统一标准，减少歧义。

（三）公正性原则：本标准编制过程公正、公平、透明，确保标准的制定过程中各方利益的平衡，不偏袒任何一方，保证标准的客观性和公信力。

（四）可操作性原则：本标准编制时充分考虑了可操作性，确保项目参建单位能够对照标准的要求进行智能制造工业机器人协作控制技术搭建，避免标准过于理论化或难以实施的情况。

（五）合规性原则：本标准编制符合国家法律法规和相关行业的规范和标准，确保标准的合法性和合规性，遵循国家政策和法律要求。

三 标准主要内容

1. 内容：本标准界定了“智能制造工业机器人协作控制技术”基本定义、概念、各重要模块的功能、性能参数及可靠性等；
2. 范围：本文件适用于智能制造工业机器人协作控制技术研发设计单位、生产制造企业、科研院所、行业协会以及第三方服务商进行智能制造工业机器人协作控制技术开发、应用。
3. 规范性引用文件：本标准编制时引用的标准规范等文件；
4. 术语与定义：对本标准中所涉及的名词术语进行定义；

5. 缩略语：对本标准中的缩略语进行解释；
6. 智能制造工业机器人协作控制技术概述，子模块介绍：分别对工业机器人控制技术、传感器、感知模块、伺服驱动、力控模块、通信模块进行详细的介绍。

四 预期经济效果

智能制造工业机器人协作技术规范标准的实施，预期将带来显著的经济效果。首先，它将促进智能制造工业机器人协作控制技术的标准化和产业化，降低研发和生产成本，提高产品的市场竞争力。其次，规范的实施有助于提升产品质量和生产效率，减少因控制不准确导致的生产损失和返工成本。此外，统一的技术标准将增强系统的兼容性和扩展性，便于系统集成和升级，降低企业的技术更新成本。同时，规范的制定和推广将推动技术创新，促进新产品和服务的开发，开拓新的市场机会。长远来看，这将有助于提升整个制造业的智能化水平，增强中国制造业在全球市场的竞争力，为经济增长注入新动力。

五 采用国际标准和国外先进标准情况

在编制智能制造工业机器人协作技术规范标准过程中，我们充分借鉴了国际标准和国外先进标准，结合国内实际情况进行了深入研究与修订。通过与国际接轨，确保我国工业机器人协作系统通用技术规范标准达到国际先进水平，为产业发展提供有力支撑。

六 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

在编制智能制造工业机器人协作技术规范过程中，我们严格遵循了相关的现行法律、法规和强制性国家标准，确保标准的合规性和权威性。同时，我们也充分考虑了智能制造工业机器人协作技术规范的发展趋势和应用需求。

七 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在起草过程中未出现重大分歧意见。

八 标准性质的说明

建议本标准为推荐性标准。

九 贯彻标准的要求和措施建议

本标准经征求各相关方意见，已形成共识，标准实施之日起，各相关方将遵照执行。

十 废止现行有关标准的建议

无。

十一 主要起草单位和联系方式

本标准主编单位：湖南大学机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心

本标准参编单位：XXXXX，XXXXX

本标准主要起草人：XXX、XXX、