

T/SAIAS

上海市人工智能行业协会团体标准

T/SAIAS XXXX—2025

机器人操作运动控制接口规范

Specification for manipulation motion and control interface of robots

(标准草案)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2025 - XX - XX 发布

2025 - XX - XX 实施

上海市人工智能行业协会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 控制接口分类	1
5 控制接口要求	2
5.1 基本要求	2
5.2 特性要求	2
6 证实方法	3
6.1 总则	3
6.2 实时控制接口	3
6.3 任务控制接口	4
6.4 安全控制接口	4
6.5 状态监控接口	4
6.6 参数配置接口	4
附录 A（资料性） 控制接口控制指令与作业操作状态示例	5
附录 B（资料性） 控制接口数据结构标准化格式示例	10
附录 C（资料性） 控制接口调用方法示例	11
附录 D（资料性） 控制接口时间同步要求示例	13
附录 E（资料性） 手臂系统异常事件参数示例	14
附录 F（资料性） 测试平台推荐配置示例	15
参考文献	16

前 言

本文件按照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专利的责任。

本文件由上海市人工智能行业协会提出。

本文件由上海市人工智能行业协会归口。

本文件起草单位：上海机器人产业技术研究院有限公司。

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

上海机器人产业技术研究院有限公司

机器人操作运动控制接口规范

1 范围

本文件规定了机器人操作运动控制接口的分类、要求，并描述了对应的证实方法。
本文件适用于机器人操作运动控制接口的相关软件开发。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，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 10111-2008 随机数的产生及其在产品质量抽样检验中的应用程序
GB/T 33745-2017 物联网 术语
ISO 8373 机器人技术词汇

3 术语和定义

ISO 8373、GB/T 33745界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

接口 interface

在两个功能实体之间，由这两个功能实体的功能特性、物理互联特性、信号交换特性及其他适当特性界定的共享边界。

[来源：GB/T 35319—2025，3.1，有修改]

3.2

控制接口 control interface

用于控制模块和后级模块之间，传递实时控制、任务控制、安全控制、状态监控、参数配置等消息的软件接口。

[来源：GB/T 34068—2017，3.1.2，有修改]

3.3

特性 characteristic

标准化对象所具有的可被辨识的特定属性。

[来源：GB/T 20001.5—2017，3.5]

4 控制接口分类

控制接口分为以下五类：

a) 实时控制接口，包括但不限于：

- 1) 控制指令（示例见附录 A）：位置/速度/力命令、控制周期等，宜支持肩部—肘部—腕部多关节协同控制指令；
- 2) 同步与心跳：心跳报文、最大延迟等，宜支持双臂协同操作的时间同步；

b) 任务控制接口，包括但不限于：

- 1) 作业操作模式切换：点到点（PTP）、直线/圆弧插补、复合轨迹等；
- 2) 动作序列管理：批量指令、预加载等；

c) 安全控制接口，包括但不限于：

- 1) 软件急停：信号电平、响应时间等；
- 2) 冗余通道切换：触发条件、切换逻辑等；

d) 状态监控接口，包括但不限于：

- 1) 作业操作状态（示例见附录 A）：关节角度、速度、温度等；
- 2) 故障报警：故障码、报警级别等；
- e) 参数配置接口，包括但不限于：
 - 1) 控制参数：PID 增益、阻抗参数、滤波器参数等，宜支持按关节模块独立配置；
 - 2) 作业操作参数：工具参数、坐标系参数、力控阈值等，宜提供典型作业操作场景的参数模板。

5 控制接口要求

5.1 基本要求

控制接口宜满足以下基本要求，包括但不限于：

- a) 兼容性：接口宜支持主流的机器人操作系统（如 ROS 等）及通信协议，确保不同控制模块与后级模块之间的兼容性。接口数据结构宜采用标准化格式（示例见附录 B），便于不同系统间的数据解析与交互；
- b) 可靠性：接口宜具备数据校验机制，确保数据传输的可靠性。校验失败时宜触发重传或报警机制；
- c) 可扩展性：接口设计宜考虑未来功能扩展需求，预留扩展字段和接口版本标识，确保不同版本之间的可扩展性；
- d) 可维护性：接口宜提供清晰的接口描述（如接口声明、作业操作功能说明、调用方法（示例见附录 C）、通信协议和注意事项等），便于开发和维护人员理解与使用。

5.2 特性要求

5.2.1 实时控制接口

实时控制接口宜满足以下特性要求：

- a) 控制周期：接口宜支持不大于 10ms 的控制周期。对于高精度作业场景，控制周期宜不大于 1ms。宜支持不同关节模块的差异化周期配置；
- b) 传输延迟：控制指令从发送到接收的端到端延迟宜不大于 500 μ s；
- c) 同步机制：宜支持基于时间戳的同步方式，所有接口消息宜包含绝对时间戳（UTC 毫秒）与单调时钟时间戳，时间同步误差宜不大于 ± 1 ms（示例见附录 D）。双臂协同操作时的关节运动同步误差宜小于等于 2ms；
- d) 心跳机制：宜实现心跳报文机制，心跳间隔宜可配置。连续 3 次未收到心跳报文时，宜触发报警机制；
- e) 控制模式支持：宜支持位置、速度、力矩等基本控制模式，模式切换宜平滑无冲击；
- f) 带宽保障：在满负载情况下，实时控制数据传输带宽利用率不宜超过通信链路总带宽的 70%。

5.2.2 任务控制接口

任务控制接口宜满足以下特性要求：

- a) 作业操作模式支持：宜支持点到点（PTP）、直线/圆弧插补及复合轨迹等作业操作模式；
- b) 动作序列管理：宜支持至少 100 条动作指令的预加载和队列管理，支持任务控制批量下发；
- c) 任务优先级：宜支持至少 3 级任务优先级设置。高优先级任务能中断低优先级任务并保存断点，低优先级任务可在高优先级任务完成后继续执行；
- d) 异常处理：任务执行过程中遇到异常情况时，宜根据预设策略（继续、暂停或终止）进行处理，并实时反馈执行状态。

5.2.3 安全控制接口

安全控制接口宜满足以下特性要求：

- a) 软件急停：软件急停信号的响应时间宜不大于 50ms，急停触发后宜立即停止作业操作并进入安全状态；

- b) 冗余设计：安全控制信号宜采用双通道冗余设计，任一通道故障时宜能自动切换至另一通道，切换时间宜不大于 10ms；
- c) 安全边界监控：宜支持基于位置、速度、力矩的安全边界监控，超出预设阈值时宜触发相应的安全保护机制；
- d) 故障分级：宜支持至少 3 级故障分级机制，不同级别对应不同的处理策略：
 - 1) 一级故障：警告，不影响正常运行；
 - 2) 二级故障：需降低性能运行或限制部分功能；
 - 3) 三级故障：紧急停止运行；
- e) 故障诊断：宜能识别各类异常事件（示例见附录 E），故障码上报延迟宜不大于 100ms；
- f) 通信安全：安全控制相关数据传输宜采用加密机制，防止恶意篡改或伪造指令；
- g) 手动干预：宜支持手动干预接口，允许操作人员通过软件方式中断人形机器人当前任务。

5.2.4 状态监控接口

状态监控接口宜满足以下特性要求：

- a) 作业操作状态参数完整：宜至少包含以下作业操作状态参数的监控（示例见附录 A）：
 - 1) 各设备位置、速度、力矩实时值；
 - 2) 设备温度、电机电流等运行参数；
 - 3) 设备在线状态与通信质量；
 - 4) 控制模式与任务执行状态；
- b) 数据采集频率：关键作业操作状态参数（如位置、速度、力矩等）的采集与更新频率宜不低于 1kHz，非关键参数更新频率宜不低于 10Hz；
- c) 数据同步：不同来源的数据宜进行时间同步，时间戳偏差宜不大于 1ms（示例见附录 D）；
- d) 存储能力：宜支持至少 24 小时的关键状态数据本地缓存，数据记录间隔可配置；
- e) 远程监控：宜支持标准的远程监控协议，允许监控系统实时获取人形机器人状态信息。

5.2.5 参数配置接口

参数配置接口宜满足以下特性要求：

- a) 参数分类：宜支持控制参数、作业操作参数等参数的分类管理与配置。宜支持按肩部—肘部—腕部—末端执行器进行参数配置模块化分组；
- b) 场景模板：宜支持典型作业操作场景的参数模板（如精密装配、重载抓取等），支持用户自定义模板存储；
- c) 读写权限：宜支持参数读写权限管理，宜设置关键安全参数写保护，修改宜授权验证；
- d) 参数有效性：宜包含参数配置有效性校验机制，宜拒绝超出合理范围的参数值并提示原因；
- e) 参数备份与恢复：宜支持参数配置的备份、导出和恢复功能，备份文件宜包含时间戳和版本信息；
- f) 版本管理：宜支持至少 3 个历史版本的参数配置记录，宜支持追溯和回滚到历史参数配置。

6 证实方法

6.1 总则

在实际评价中，宜根据本文件制定证实方法细则。

开展控制接口基本要求和特性要求的证实方法包括但不限于：

- a) 人工审查：
 - 1) 文件审查：对提供满足评价指标描述的文件材料的真实性和有效性进行审查；
 - 2) 接口样本审查：可根据 GB/T 10111 确定随机抽样规则，人工检查接口的有效性。
- b) 可视化工具或测试平台（测试平台推荐配置示例见附录 F）测评：通过算法/模型/系统/仿真平台对接口进行测试和评价。

控制接口应满足 5.1 的基本要求。

6.2 实时控制接口

实时控制接口应满足5.2.1的特性要求，包括但不限于：

- a) 控制周期；
- b) 传输延迟；
- c) 同步机制；
- d) 心跳机制；
- e) 控制模式支持；
- f) 带宽保障。

6.3 任务控制接口

任务控制接口应满足5.2.2的特性要求，包括但不限于：

- a) 作业操作模式支持；
- b) 动作序列管理；
- c) 任务优先级；
- d) 异常处理。

6.4 安全控制接口

安全控制接口应满足5.2.3的特性要求，包括但不限于：

- a) 软件急停；
- b) 冗余设计；
- c) 安全边界监控；
- d) 故障分级；
- e) 故障诊断；
- f) 通信安全；
- g) 手动干预。

6.5 状态监控接口

状态监控接口应满足5.2.4的特性要求，包括但不限于：

- a) 作业操作状态参数完整；
- b) 数据采集频率；
- c) 数据同步；
- d) 存储能力；
- e) 远程监控。

6.6 参数配置接口

参数配置接口应满足5.2.5的特性要求，包括但不限于：

- a) 参数分类；
- b) 场景模板；
- c) 读写权限；
- d) 参数有效性；
- e) 参数备份与恢复；
- f) 版本管理。

附录 A
(资料性)
控制接口控制指令与作业操作状态示例

A.1 控制指令示例

控制接口的控制指令为上层软件向下层作业操作控制接口发送的数据和消息。

以向机器人上肢作业操作控制接口下发控制指令为例。接口通过ROS通讯机制实现，将数据装入ROS:message，通过ROS::talker将数据发布至/motion/armTarget主题下。硬件通讯软件通过ROS:listener订阅消息。

A.1.1 控制指令数据描述如表A.1所示：

表A.1 控制指令数据描述

描述	更新周期	表示方法	
右1号关节当前工作模式	5~1000Hz	int8, 编码器模式=-3 位置周期同步模式=8 转矩周期同步模式=10	
右2号关节当前工作模式			
右3号关节当前工作模式			
右4号关节当前工作模式			
右5号关节当前工作模式			
右6号关节当前工作模式			
左1号关节当前工作模式			
左2号关节当前工作模式			
左3号关节当前工作模式			
左4号关节当前工作模式			
左5号关节当前工作模式			
左6号关节当前工作模式			
腰部关节当前工作模式			
左臂1号关节目标力矩			float32, Nm
左臂2号关节目标力矩			
左臂3号关节目标力矩			
左臂4号关节目标力矩			
左臂5号关节目标力矩			
左臂6号关节目标力矩			
右臂1号关节目标力矩			
右臂2号关节目标力矩			
右臂3号关节目标力矩			
右臂4号关节目标力矩			
右臂5号关节目标力矩			
右臂6号关节目标力矩			
腰部关节目标力矩			
左臂1号关节目标速度		float32, rad/s	
左臂2号关节目标速度			
左臂3号关节目标速度			
左臂4号关节目标速度			
左臂5号关节目标速度			
左臂6号关节目标速度			
右臂1号关节目标速度			
右臂2号关节目标速度			
右臂3号关节目标速度			
右臂4号关节目标速度			
右臂5号关节目标速度			

表 A.1 控制指令数据描述 (续)

描述	更新周期	表示方法
右臂 6 号关节目标速度	5~1000Hz	float32, rad/s
腰部关节目标速度		
左臂 1 号关节目标位置		float32, rad
左臂 2 号关节目标位置		
左臂 3 号关节目标位置		
左臂 4 号关节目标位置		
左臂 5 号关节目标位置		
左臂 6 号关节目标位置		
右臂 1 号关节目标位置		
右臂 2 号关节目标位置		
右臂 3 号关节目标位置		
右臂 4 号关节目标位置		
右臂 5 号关节目标位置		
右臂 6 号关节目标位置		
腰部关节目标位置		

A.1.2 控制指令消息描述如表A.2所示:

表A.2 控制指令消息描述

消息名称	ArmTarget.msg		
变量类型	变量名称	默认值	含义
Header	head_msg	0	报头, 包含时间戳 stamp、帧名 frame_id
uint8	motor_mode	0	电机控制模式
JointTarget	jointArmL1	0	左臂关节 1 目标值
JointTarget	jointArmL2	0	左臂关节 2 目标值
JointTarget	jointArmL3	0	左臂关节 3 目标值
JointTarget	jointArmL4	0	左臂关节 4 目标值
JointTarget	jointArmL5	0	左臂关节 5 目标值
JointTarget	jointArmL6	0	左臂关节 6 目标值
JointTarget	jointArmL7	0	左臂关节 7 目标值
JointTarget	jointArmR1	0	右臂关节 1 目标值
JointTarget	jointArmR2	0	右臂关节 2 目标值
JointTarget	jointArmR3	0	右臂关节 3 目标值
JointTarget	jointArmR4	0	右臂关节 4 目标值
JointTarget	jointArmR5	0	右臂关节 5 目标值
JointTarget	jointArmR6	0	右臂关节 6 目标值
JointTarget	jointArmR7	0	右臂关节 7 目标值

ArmTarget.msg中使用的自定义消息JointTarget.msg如表A.3所示:

表A.3 自定义消息 JointTarget.msg 描述

消息名称	JointTarget.msg		
变量类型	变量名称	默认值	
float32	torq	0	
float32	speed	0	
float32	pos	0	

A.2 作业操作状态示例

控制接口的作业操作状态为下层作业操作控制接口向上层软件发送的数据和消息。以向上层软件发送机器人上肢作业操作状态为例。接口通过ROS通讯机制实现, 将数据装入ROS:message, 通过ROS::talker将数据发布至/motion/armCurrent主题下。上层软件通过ROS:listener订阅消息。

A.2.1 作业操作状态数据描述如表A.4所示：

表A.4 作业操作状态数据描述

描述	表示方法	
右1号关节当前工作模式	int8, 编码器模式=-3 位置周期同步模式=8 转矩周期同步模式=10	
右2号关节当前工作模式		
右3号关节当前工作模式		
右4号关节当前工作模式		
右5号关节当前工作模式		
右6号关节当前工作模式		
左1号关节当前工作模式		
左2号关节当前工作模式		
左3号关节当前工作模式		
左4号关节当前工作模式		
左5号关节当前工作模式		
左6号关节当前工作模式		
腰部关节当前工作模式		
右1号关节状态字		uint16
右2号关节状态字		
右3号关节状态字		
右4号关节状态字		
右5号关节状态字		
右6号关节状态字		
左1号关节状态字		
左2号关节状态字		
左3号关节状态字		
左4号关节状态字		
左5号关节状态字		
左6号关节状态字		
腰部关节状态字		
右1号关节转速	float32, rad/s	
右2号关节转速		
右3号关节转速		
右4号关节转速		
右5号关节转速		
右6号关节转速		
左1号关节转速		
左2号关节转速		
左3号关节转速		
左4号关节转速		
左5号关节转速		
左6号关节转速		
腰部关节转速		
右1号关节转矩	float32, Nm	
右2号关节转矩		
右3号关节转矩		
右4号关节转矩		
右5号关节转矩		
右6号关节转矩		
左1号关节转矩		
左2号关节转矩		
左3号关节转矩		

表 A.4 作业操作状态数据描述 (续)

描述	表示方法
左 4 号关节转矩	float32, Nm
左 5 号关节转矩	
左 6 号关节转矩	
腰部关节转矩	
右 1 号关节位置	float32, rad
右 2 号关节位置	
右 3 号关节位置	
右 4 号关节位置	
右 5 号关节位置	
右 6 号关节位置	
左 1 号关节位置	
左 2 号关节位置	
左 3 号关节位置	
左 4 号关节位置	
左 5 号关节位置	
左 6 号关节位置	
腰部关节位置	
右 1 号加速度计 X 值	
右 1 号加速度计 Y 值	
右 1 号加速度计 Z 值	
右 2 号加速度计 X 值	
右 2 号加速度计 Y 值	
右 2 号加速度计 Z 值	
右 3 号加速度计 X 值	
右 3 号加速度计 Y 值	
右 3 号加速度计 Z 值	
右 4 号加速度计 X 值	
右 4 号加速度计 Y 值	
右 4 号加速度计 Z 值	
左 1 号加速度计 X 值	
左 1 号加速度计 Y 值	
左 1 号加速度计 Z 值	
左 2 号加速度计 X 值	
左 2 号加速度计 Y 值	
左 2 号加速度计 Z 值	
左 3 号加速度计 X 值	
左 3 号加速度计 Y 值	
左 3 号加速度计 Z 值	
左 4 号加速度计 X 值	
左 4 号加速度计 Y 值	
左 4 号加速度计 Z 值	
设备在线状态	int8, 0-有设备离线, 1-设备全部在线
腰部 IMU 四元数 Q1	float32, 四元数
腰部 IMU 四元数 Q2	
腰部 IMU 四元数 Q3	
腰部 IMU 四元数 Q4	
左手六维力传感器 Fx	float32, N
左手六维力传感器 Fy	
左手六维力传感器 Fz	
左手六维力传感器 Mx	float32, Nm
左手六维力传感器 My	
左手六维力传感器 Mz	

表 A.4 作业操作状态数据描述 (续)

描述	表示方法
右手六维力传感器 Fx	float32, N
右手六维力传感器 Fy	
右手六维力传感器 Fz	
右手六维力传感器 Mx	float32, Nm
右手六维力传感器 My	
右手六维力传感器 Mz	

A.2.2 作业操作状态消息描述如表A.5所示:

表A.5 作业操作状态消息描述

消息名称	ArmCurrent. msg		
变量类型	变量名称	默认值	含义
Header	head_msg	0	报头, 包含时间戳 stamp、帧名 frame_id
int8_t	dev_online	0	设备在线状态
uint8[13]	motor_mode	0	电机控制模式
uint16[13]	motor_sta	0	电机状态字
JointTarget	jointArmL1	0	左臂关节 1 当前值
JointTarget	jointArmL2	0	左臂关节 2 当前值
JointTarget	jointArmL3	0	左臂关节 3 当前值
JointTarget	jointArmL4	0	左臂关节 4 当前值
JointTarget	jointArmL5	0	左臂关节 5 当前值
JointTarget	jointArmL6	0	左臂关节 6 当前值
JointTarget	jointArmL7	0	左臂关节 7 当前值
JointTarget	jointArmR1	0	右臂关节 1 当前值
JointTarget	jointArmR2	0	右臂关节 2 当前值
JointTarget	jointArmR3	0	右臂关节 3 当前值
JointTarget	jointArmR4	0	右臂关节 4 当前值
JointTarget	jointArmR5	0	右臂关节 5 当前值
JointTarget	jointArmR6	0	右臂关节 6 当前值
JointTarget	jointArmR7	0	右臂关节 7 当前值
JointTarget	jointHip	0	腰部关节当前值
float32[3]	accR1	0	右 1 号加速度计值
float32[3]	accR2	0	右 2 号加速度计值
float32[3]	accR3	0	右 3 号加速度计值
float32[3]	accR4	0	右 4 号加速度计值
float32[3]	accL1	0	左 1 号加速度计值
float32[3]	accL2	0	左 2 号加速度计值
float32[3]	accL3	0	左 3 号加速度计值
float32[3]	accL4	0	左 4 号加速度计值
float32[4]	quaternion	0	腰部 IMU 四元数
foat32[6]	l_footFT	0	左手六维力数据, FxFyFzMxMyMz
foat32[6]	r_footFT	0	右手六维力数据, FxFyFzMxMyMz

附录 B
(资料性)

控制接口数据结构标准化格式示例

控制接口数据结构标准化格式示例见表B.1:

表B.1 控制接口数据结构标准化格式示例

接口字段	数据类型	单位	是否必填	默认值	取值范围/精度	说明
timestamp	int64	ms	是	-	$\geq 1970-01-01$	数据采集或发送的绝对时间戳 (UTC毫秒)。
msg_id	string	-	是	-	UUIDv4	消息唯一标识。
device_id	string	-	是	-	字母数字	设备或子模块唯一标识。
pos	float32[]	rad	是	0	± 3.1416 , 精度 $1e^{-4}$	关节位置数组。
vel	float32[]	rad/s	否	0	± 50 , 精度 $1e^{-4}$	关节速度数组。
torq	float32[]	Nm	否	0	± 200 , 精度 $1e^{-3}$	关节力矩数组。
status	uint16	-	是	0	$0 \sim 65535$	状态字, 按位定义状态。
crc	uint32	-	是	自动生成	-	校验码, 用于数据完整性验证。

附录 C
(资料性)
控制接口调用方法示例

C.1 作业操作控制接口调用方法示例：

```

// move 状态（摆臂）
if (state == 1)
{
    dh = 30f; // 作业操作控制的高度
    d0 = 0f;
    T1 = 50; // 作业操作周期

    // 控制各个关节的角度变化
    if (tp >= 0 && tp <= T1 + 0)
    {
        tp0 = tp - 0;
        uff[2] = d0 + dh * (-Mathf.Cos(3.14f * 2 * tp0 / T1) + 1f) / 2f;
        uff[7] = d0;
        uff[3] = -2 * d0 - 2 * dh * (-Mathf.Cos(3.14f * 2 * tp0 / T1) + 1f) / 2f;
        uff[8] = -2 * d0;
        uff[4] = d0 - dh * (-Mathf.Cos(3.14f * 2 * tp0 / T1) + 1f) / 2f;
        uff[9] = d0;
    }
    if (tp > T1 && tp < 2 * T1 + 0)
    {
        tp0 = tp - 0;
        uff[7] = d0 + dh * (-Mathf.Cos(3.14f * 2 * tp0 / T1) + 1f) / 2f;
        uff[2] = d0;
        uff[8] = -2 * d0 - 2 * dh * (-Mathf.Cos(3.14f * 2 * tp0 / T1) + 1f) / 2f;
        uff[3] = -2 * d0;
        uff[9] = d0 - dh * (-Mathf.Cos(3.14f * 2 * tp0 / T1) + 1f) / 2f;
        uff[4] = d0;
    }
    if (tp >= 2 * T1 + 0)
    {
        tp = 0;
    }
}

```

C.2 稳定性优化算法控制接口调用方法示例：

```

// 在OnActionReceived中控制机器人关节的动作
public override void OnActionReceived(ActionBuffers actionBuffers)
{
    var continuousActions = actionBuffers.ContinuousActions; // 获取连续动作输入
    var kk = 0.9f;

    // 为每个关节分配动作

```

```
float[] kb = new float[10]{ 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30 };
for (int i = 0; i < 10; i++)
{
    u[i] = u[i] * kk + (1 - kk) * continuousActions[i]; //根据输入和历史值更新控制信号
    utotal[i] = kb[i] * u[i] + uff[i]; //最终控制信号
    SetJointTargetDeg(jh[i], utotal[i]); //调用SetJointTargetDeg设置目标角度
}
}

// 设置关节的目标角度
void SetJointTargetDeg(ArticulationBody joint, float x)
{
    var drive = joint.xDrive;
    drive.stiffness = 180f; // 设置关节的刚度
    drive.damping = 8f; // 设置关节的阻尼
    drive.target = x; // 设置目标角度
    joint.xDrive = drive; // 应用到关节驱动
}
```

附录 D
(资料性)
控制接口时间同步要求示例

控制接口时间同步要求示例见表D.1:

表D.1 控制接口时间同步要求示例

类型	含义
时间戳对齐	所有接口消息宜包含绝对时间戳 (UTC毫秒) 与单调时钟时间戳 (用于抖动分析)。使用NTP或PTP进行全网时间同步, 误差 $\leq \pm 1\text{ms}$ 。
协议一致性验证	抽取不同模块的接口消息, 通过JSON Schema或IDL文件进行结构校验。
语义一致性验证	同一任务的不同模态数据 (如视觉检测到目标、力传感器检测到接触) 在时间戳上差值 \leq 接口定义的最大容忍延迟 (如50ms)。
自动化测试实现方法	在ROS 2/DDS中, 通过ros2 bag record对多话题数据进行采集, 离线对比时间戳和字段一致性。

附 录 E
(资料性)
手臂系统异常事件参数示例

手臂系统异常事件参数示例见表E.1:

表E.1 手臂系统异常事件参数示例

异常事件	参数
0x0000	系统正常
0x1001	关节通信异常
0x1002	目标角度超过限位
0x1003	该处不可达, 为奇异点
0x1004	实时内核通信错误
0x1005	关节通信总线错误
0x1006	规划层内核错误
0x1007	关节超速
0x1008	末端接口板无法连接
0x1009	超速度限制
0x100A	超加速度限制

附录 F
(资料性)
测试平台推荐配置示例

推荐配置：

- a) 操作系统：Ubuntu 22.04 LTS+RT-Preempt Patch (实时内核)；
- b) 中间件平台：ROS 2 Humble/DDS (Cyclone DDS/Fast DDS)；
- c) 通信总线：
 - 1) 控制面：EtherCAT，周期 1ms，抖动 $\leq 1\mu\text{s}$ ；
 - 2) 数据面：千兆以太网；
- d) 硬件环境：
 - 1) 工控机：Intel i7/32GB RAM/NVMe SSD；
 - 2) 实时 I/O 板卡，支持多路模拟/数字信号采集；
- e) 软件工具：
 - 1) Wireshark (协议分析)；
 - 2) PlotJuggler (数据可视化)；
 - 3) pytest+ROS 2 launch test (自动化测试)。

上海机器人产业技术研究院有限公司

参 考 文 献

- [1] GB/T 32197-2025 工业机器人控制器开放式通信接口规范
 - [2] GB/T 33267-2016 机器人仿真开发环境接口
 - [3] GB/T 33745—2017 物联网 术语
 - [4] GB/T 35319—2025 物联网 系统接口要求
 - [5] GB/T 41780.3—2025 物联网 边缘计算 第3部分：节点接口要求
 - [6] GB/T 41784—2022 信息技术 实时定位 视觉定位系统数据接口
 - [7] GB/T 43047—2023 物流机器人 控制系统接口技术规范
 - [8] GB/T 45280—2025 人工智能 异构人工智能 加速器统一接口
 - [9] T/SAIAS 017-2024 人形机器人 分类分级应用指南
 - [10] 20240675-T-604 工业应用移动机器人调度系统数据接口要求
 - [11] 20250863-T-604 人形机器人技术要求 第5部分：作业操作
 - [12] 20251070-T-604 人形机器人技术要求 第1部分：总则
 - [13] 20253221-T-604 人形机器人数据集 第2部分：上肢操作
 - [14] 20253226-T-604 人形机器人数据集 第1部分：总则
-