

ICS 17. 040. 30
N 10

国 体 标 准

T/CAMETA XXX—2025

协作机器人性能及测试方法

Performance and Testing Methods of Collaborative Robots

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国机电一体化技术应用协会 发布

目 次

前 言	1
引言	3
1. 范围	4
2. 规范性引用文件	4
3. 术语和定义	4
4. 性能要求	4
5. 测试方法	6
6. 测试报告	8

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这些专利的责任。

本文件由中国机电一体化技术协会提出并归口。

本文件参编单位：

本文件主要起草人：

引言

协作机器人作为融合人工智能、精密机械与传感技术的关键自动化设备，正逐步重塑制造业、医疗健康、物流服务等领域的生产模式。与传统工业机器人相比，其核心优势在于能够在非结构化环境中与人类直接交互，通过力反馈控制、动态路径规划等技术实现安全高效的协同作业。据统计，2022 年全球协作机器人市场规模已突破 15 亿美元，年复合增长率超过 30%，中国市场占比达 40%以上，成为全球最大的应用市场。

行业快速扩张的同时，也暴露出一系列亟待解决的问题。协作机器人性能参数缺乏统一度量标准，不同厂商的测试方法差异显著，导致用户难以客观评估产品能力。在此背景下，制定《协作机器人性能及测试方法》国家标准具有重要意义。

协作机器人性能及测试方法

1 范围

本文件规定了协作机器人的性能要求、测试方法及测试报告格式。

本文件适用于工业及服务领域的协作机器人，其他类型机器人可参照使用。

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 11291.1 工业环境用机器人 安全要求

ISO/TS 15066 协作机器人安全要求

ISO 9283 工业机器人性能规范及其试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 协作机器人 collaborative robot

能够在共享工作空间中与人类直接交互，并具备实时力控制及动态安全策略的机器人系统。

3.2 协作空间 collaborative workspace

由机器人可达范围和安全传感器探测范围共同定义的物理区域，允许人机同步作业且满足 ISO/TS 15066 安全要求。

3.3 功率和力限制 power and force limiting (PFL)

通过实时监控关节力矩和末端作用力，将人机接触能量控制在生物力学安全阈值内的技术措施。

3.4 执行精度 execution accuracy

机器人末端执行器实际到达位置与指令目标位置之间的欧氏距离偏差，在静态无负载条件下测量。

3.5 重复定位精度 repeat positioning accuracy

连续重复执行相同路径指令时，末端位置点集的统计离散度，以位置坐标的 6 倍标准差 (6σ) 表征。

3.6 轨迹跟踪精度 path tracking accuracy

机器人沿复杂空间路径（如样条曲线）运动时，实际轨迹与理论轨迹的最大瞬时偏差。

3.7 动态避障 dynamic obstacle avoidance

基于实时环境感知（如 3D 视觉/激光雷达），在 100ms 内完成障碍物轨迹预测和路径重规划的能力。

3.8 触觉反馈灵敏度 haptic feedback sensitivity

机器人对外部施加的最小可检测力阈值，反映其力控交互性能。

3.9 预测算法性能 prediction algorithm performance

从检测到人体动作特征到生成避让轨迹的端到端延迟，涵盖传感器采集、数据处理及控制响应全链路。

3.10 自学习能力 self-learning capability

通过演示编程或自然语言指令，自主生成新任务工作程序的时间效率。

3.11 制动距离 braking distance

从触发急停信号至机器人完全静止过程中，末端执行器在基坐标系内的直线位移量。

3.12 生物力学阈值 biomechanical threshold

人体各解剖部位可承受的最大机械冲击力，其数值依据 ISO/TS 15066 附录 A 的实验数据确定。4 性能要求。

4.1 基本性能参数

执行精度：末端执行器实际位置与目标位置的偏差 $\leq \pm 0.1 \text{ mm}$ （静态）；

重复定位精度：连续 50 次重复运动的位置标准差 $\leq \pm 0.05 \text{ mm}$ ；

最大负载能力：额定负载 $\geq 5 \text{ kg}$ ，过载能力 $\geq 120\%$ （持续 10 秒）；

运动速度：线性运动速度 $\geq 1 \text{ m/s}$ ，角速度 $\geq 18090^\circ/\text{s}$ ；

动态响应特性：加速度 $\leq 2 \text{ m/s}^2$ （平滑模式），急停减速速度 $\geq 5 \text{ m/s}^2$ ；

轨迹跟踪精度：复杂路径（如 S 形曲线）的轨迹偏差 $\leq \pm 0.3 \text{ mm}$ 。

4.2 安全性要求

碰撞检测：响应时间 $\leq 50 \text{ ms}$ ，接触力限值符合 ISO/TS 15066 中人体各部位生物力学阈值（如手臂接触力 $\leq 150 \text{ N}$ ）；

表面特性：机器人外壳无锐边，接触表面硬度 ≤ 75 Shore A；

紧急停止功能：触发后制动距离 ≤ 50 mm（全速运动时）；

电磁兼容性：符合 GB/T 17799.1 工业环境抗干扰要求。

4.3 协作能力要求

人机交互接口：支持语音指令响应（延迟 ≤ 200 ms）、触觉反馈灵敏度 ≥ 0.1 N；

动态避障：检测到人体进入协作空间后，路径调整时间 ≤ 100 ms；

协作任务效率：人机协同装配任务完成时间误差 $\leq 5\%$ ；

软件功能：支持拖拽示教、力控打磨等协作模式，API 接口开放度 $\geq 90\%$ 。

4.4 环境适应性要求

温度稳定性：-10°C~50°C 环境下定位精度衰减 $\leq 20\%$ ；

抗电磁干扰：30V/m 场强下轨迹偏差 $\leq \pm 0.5$ mm；

防尘防水：IP67（工业场景）；

抗冲击振动：5~1000Hz 随机振动后功能正常。

4.5 智能化水平要求

动态目标识别率：移动障碍物识别准确率 $\geq 90\%$ ；

预测算法性能：人体动作预判延迟 ≤ 100 ms；

自学习能力：新任务编程时间 ≤ 15 分钟。

5 测试方法

5.1 执行精度测试

使用精度 ≤ 0.001 mm 的激光跟踪仪，在温度 20 ± 0.5 °C、湿度 $50 \pm 5\%$ RH 的恒温环境内进行测试。机器人末端安装反射靶球，沿预设空间路径（包含 5 个工作空间边界及中心目标点）以最大速度最大负载（含反射靶球）运动。到达每个目标点后稳定 3 秒以上，以 100 Hz 采样频率采集 5 个实际位置数据，计算各点三维空间偏差的最大值。重复测试 30 次，取平均偏差作为执行精度结果。

设备：激光跟踪仪（精度 ≤ 0.001 mm，校准证书有效期 ≤ 1 年）；

环境：温度 20 ± 2 °C，湿度 $50 \pm 10\%$ RH；

步骤：

a. 机器人沿预设路径（含 5 个空间点）运动；

b. 记录各点实际坐标，计算与理论值的最大偏差；

c. 重复测试 30 次，取平均值作为执行精度。

5.2 重复定位精度测试

通过三坐标测量机（符合 ISO 10360-2 标准）进行测量。将测量靶球固定在机器人末端法兰中心，编程机器人重复执行 500 mm 直线路径运动（含 $\pm 180^\circ$ 姿态变化），连续循环 50 次。每次抵达终点时触发坐标记录，计算 50 个位置数据的 3 倍标准差（ 3σ ）作为重复定位精度。

设备：三坐标测量机（符合 ISO 10360-2 标准）；

步骤：

- a. 固定末端执行器至测量靶球；
- b. 执行 50 次相同路径运动，记录每次终点坐标；
- c. 计算 3σ 值作为重复定位精度。

5.3 负载能力测试

在机器人末端安装六维力传感器，施加额定负载执行半径 ≥ 0.5 m 的高速圆周运动。实时监测关节扭矩波动（要求 \leq 额定值 15%）及电机电流。过载测试阶段加载 120% 额定负载，执行 10 次急起急停动作（加速度 ≥ 3 m/s²），检查机械结构是否出现永久变形。

设备：六维力传感器（量程 ≥ 100 N，采样率 ≥ 1 kHz）、动态砝码组；

步骤：

- a. 末端加载额定负载，执行高速圆周运动；
- b. 监测关节扭矩、电机电流是否超限；
- c. 过载测试：加载 120% 负载，持续 10 秒，检查结构变形。

5.4 运动速度测试

在机器人末端设置光学标记点，采用 2000 帧/秒高速摄像系统与 1000 Hz 编码器同步采集数据。记录全速直线运动过程，通过图像位移分析计算平均速度与加速度曲线。急停测试时测量从最大速度到完全静止的制动距离，验证减速度 ≥ 5 m/s²。

设备：高速摄像系统（帧率 ≥ 2000 fps）、编码器（分辨率 $\leq 0.01^\circ$ ）；

步骤：

- a. 标记末端特征点，记录全速直线运动影像；
- b. 通过图像分析计算平均速度及加速度曲线；
- c. 验证急停减速度是否 ≥ 5 m/s²。

5.5 安全性测试

碰撞力测试：

- a. 使用生物力学假人（符合 ISO/TS 15066 附录 A）；
- b. 机器人以最大速度撞击假人手臂，测量接触力峰值；
- c. 验证是否 $\leq 150 \text{ N}$ （阈值参考人体疼痛耐受力）。

紧急停止测试：

- a. 触发急停按钮，记录从信号发出到完全静止的时间与位移；
- b. 重复测试 10 次，取最差值作为制动性能。

5.6 协作能力测试

动态避障测试：

- a. 在协作空间内设置移动障碍物（速度 $\geq 0.5 \text{ m/s}$ ）；
- b. 验证机器人实时路径规划能力与避障响应时间。

人机交互测试：

- a. 操作员通过语音指令调整机器人作业模式；
- b. 测量指令识别准确率（ $\geq 95\%$ ）与执行延迟。

5.7 温湿度稳定性测试

在气候试验箱内执行三阶段测试：

低温阶段：-10°C 维持 4 小时后执行精度测试

高温高湿阶段：45°C/85% RH 运行 2 小时后测试

恢复阶段：返回 25°C 环境复测

计算高低温环境下精度衰减率（要求 $\leq 20\%$ ）。

5.8 抗电磁干扰测试

依据 GB/T 17626.3 标准，在电波暗室中施加 30 V/m 射频场强（80MHz-1GHz 频段）。

机器人执行 S 形轨迹运动，监测轨迹偏差（要求 $\leq \pm 0.5 \text{ mm}$ ）及通信丢包率（要求 EtherCAT 帧错误率 $\leq 10^{-6}$ ）。

5.9 动态目标识别测试

构建包含 1500 组样本的测试数据集：

目标类型：操作员（行走/弯腰/挥手）、AGV、动态工具

运动速度：0.1-2 m/s 梯度变化

通过机器人视觉系统识别移动目标，统计准确率（要求 $\geq 90\%$ ）。

5.10 预测算法性能测试

操作员穿戴惯性动作捕捉服执行预定义动作（如伸手取物）。同步记录动作捕捉系统的

时间戳 T_0 与机器人轨迹调整指令时间戳 T_1 ，计算延迟 $\Delta t = T_1 - T_0$ （要求 $\leq 100 \text{ ms}$ ）。

5.11 自学习能力测试

给定全新装配任务（如手机部件组装），记录从任务导入到机器人自主生成可执行程序的总时间（要求 ≤ 15 分钟），并验证首次运行成功率 $\geq 90\%$ 。

6 测试报告

数据记录规范：

原始数据需包含时间戳、传感器序列号、环境参数；

图像/视频证据应标注测试条件与关键帧。

结论分级：

A 级：所有指标优于要求值；

B 级：关键指标达标，次要指标偏差 $\leq 10\%$ ；

C 级：存在一项及以上不达标。

《协作机器人性能及测试方法》

编制说明

一 工作简况

(一) 任务来源

中国作为全球最大的协作机器人市场之一，需求高速增长。根据高工机器人产业研究所(GGII)数据，2024年中国协作机器人(含四轴)市场销量为4.0万台，同比增长27.39%。2025年一季度，中国协作机器人产量同比激增41.4%，远超传统多关节机器人和SCARA机器人。全球市场同样保持增长，据MIR睿工业数据，2023年全球协作机器人销售规模为5.46万台，同比增长23%，预计至2028年，销售规模将达20.3万台。国产协作机器人厂商正摆脱传统中低端市场局限，向高端市场突破。2024年国产六轴及以上协作机器人本体销量市场份额达90.25%，外资厂商市场份额不断缩小。AI技术融入协作机器人，使其更加智能。例如ABB发布的自适应协作机器人，通过搭载传感器和AI算法可实时感知并判断汽车生产线中的最优方案。协作机器人最初主要应用于工业领域，如焊接、上下料、搬运等。如今，其应用场景正不断延伸，在医疗、教育、商业服务等领域也逐渐得到应用。协作机器人通过其高性能和测试方法，极大地促进了制造企业的发展，同时为工业机器人的发展开启了新时代。

(二) 国内关于协作机器人性能及测试方法的制定情况及最新要求

1、国外情况：

1) 国际标准现状

国际上，协作机器人标准主要由国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）主导制定。如ISO/TS 15066《机器人与机器人系统—协作机器人—安全规范》，其规定了协作机器人与人协作时的安全要求，涵盖风险评估、安全功能、安全相关部件等内容，为协作机器人的安全设计、集成和使用提供了全球通用的准则，像在人机协作场景下，对碰撞力的限制和安全防护机制的设定，都依据此标准，保障操作人员的安全。

2) 技术发展与标准适应性

随着人工智能、传感器技术飞速发展，协作机器人的智能化、自适应能力不断提升。例如，新型协作机器人能够根据环境变化实时调整动作，与人的协作更加自然流畅。但现有国际标准在性能测试方面，对协作机器人新具备的智能决策、复杂环境感知与应对能力的测试方法和指标界定不够完善，无法完全适应这些新技术带来的变革。比如，对于能自主规划路径以避开动态障碍物的协作机器人，国际标准中缺乏对应的路径规划效率、避障成功率等性能测试规范。

2、国内情况：

1) 现有标准情况

我国已发布了《GB/T 36008-2018 机器人与机器人装备 协作机器人》等国家标准，对协作机器人的术语和定义、安全要求、性能要求等做出规定。同时，团体标准也在不断推进，如中国国际经济技术合作促进会标准化工作委员会开展《协作机器人一体化关节性能规范及试验方法》团体标准研讨，聚焦协作机器人关键部件性能规范与测试。此外，一些行业协会也在制定适用于特定领域的协作机器人标准，推动协作机器人在细分行业的规范应用。

2) 产业需求与标准制定动力

我国协作机器人市场增长迅速，广泛应用于3C电子、汽车零部件加工、物流等行业。不同行业对协作机器人性能要求差异大，如3C电子行业注重高精度、高速度的装配能力；物流行业则强调搬运负载能力和移动稳定性。企业为满足市场需求，不断推出新的产品和技术，但缺乏统一、细化的性能及测试标准，导致产品质量参差不齐，市场竞争秩序混乱。因此，制定《协作机器人性能及测试方法》团体标准迫在眉睫，以规范市场，促进行业健康发展。

（三）标准编制的目的、意义

《协作机器人性能及测试方法》作为一项团体标准，旨在明确协作机器人绝对点位执行精度、重复定位精度、负载能力、运动速度、安全性、协作能力、温湿度稳定性、抗电磁干扰、动态目标识别、预测算法、自主学习能力等性能指标基本要求及测试方法，加快协作机器人安全性和可靠性等共性技术研究进程，完善协作机器人标准体系。规范试验方法，明确协作机器人性能测试的方法、测试流程、测试设备、数据处理方法等，为企业和检测机构提供统一的试验依据，确保测试结果的准确性和可比性。提升产品性能，通过标准化的试验方法，促使企业重视协作机器人的性能设计和优化，从而推动行业技术进步，提高协作机器人在实际应用场景中的稳定性、安全性和可靠性，更好地满足各行各业协作机器人各种复杂应用场景的需求，少因机器人安全性、稳定性不足而引发的安全事故和设备故障。促进市场规范，统一标准有利于规范协作机器人市场，引导企业按照标准进行产品设计、生产和检测，避免市场上产品质量的良莠不齐，促进市场的健康有序发展。推动行业发展，为协作机器人行业的发展提供技术支撑和规范引导，加速行业的技术创新和产品升级，提高整个行业的竞争力。

（四）标准特点

标准的先进性：该团体标准相较于国内外现有相关标准或实践，其先进性主要体现在：

1、高度针对性：这是首个专门聚焦于“协作机器人”，系统性整合协作机器人精度、安全性、智能化等方向性能指标和测试方法，填补了国内外针对协作机器人标准该领域的空白。

2、多模态评价指标：不仅仅涵盖传统工业机器人要求的精度和电磁兼容等性能测试项目，更引入了安全性、协作能力、动态目标识别、预测算法性能、自主学习能力等测试项目，并提出明确评价指标。

3、引领技术发展：该标准将反映当前协作机器人对高精度、智能化性能的最新需求，并设定了明确的测试基准，将引导和促进机器人厂商在运动控制、结构设计、算法融合等核心技术上的提升。

标准的适用性：该团体标准的适用性是其核心价值之一，尤其符合中国国情和产业需求：

1、快速响应市场：团体标准制定周期相对较短，能够快速响应中国协作机器人产业爆发式增长和多样化应用对统一测试方法的迫切需求，解决了国家标准/行业标准制定流程长、跟不上技术发展的问题。

2、贴近本土应用：标准制定充分吸纳了国内主流应用场景（如汽车制造、3C电子、物流仓储、商业、医疗等）的实际工况和用户需求，测试方法和性能指标设置更符合国内常见环境特点。

3、覆盖主流机器人产品：标准考虑了中国市场上主流厂商的协作巡检机器人标称指标，其试验方法设计应能适用于这些主流厂商。

4、指导研发与测试：为国内机器人制造商提供了清晰的性能设计和验证目标，有助于提升国产协作机器人的整体性能和可靠性，减少因设计缺陷导致的现场故障。

5、规范采购与验收：为用户单位在招标采购和到货验收环节提供了客观、可量化、可操作的评价依据，避免模糊描述带来的纠纷，提升采购质量和效率。

6、支撑安全监管：为相关安全监管部门或用户单位内部的安全管理部门评估机器人运行风险提供了技术支撑。

7、促进公平竞争：统一的测试方法为不同厂商的产品提供了公平、透明的比较平台，有利于市场良性竞争和优胜劣汰。

8、灵活性与开放性：团体标准本身具有灵活性，可以根据技术发展和应用反馈进行及时修订和更新，保持其适用性。它也向所有相关方开放，鼓励广泛参与和采用。

《协作机器性能能及测试方法》团体标准的制定将是中国在协作机器人细分领域标准创新的重要成果。它填补了国内外专门标准的空白，以实际应用场景为驱动，采用多模态定量评价指标和先进测试技术，系统化地定义了协作机器人一系列性能指标的试验方法，具有高度的针对性和技术前瞻性，引领产业发展方向。它紧密结合中国广泛而多样的应用场景需求，响应速度快，为国内机器人研发、制造、检测、采购、验收和安全监管提供了统一、客观、可操作的依据，有效解决了行业痛点，促进了国产协作机器性能能提升和市场规范化，具有极强的本土实用价值和推广意义。

（四）主要工作过程

1. 编制准备阶段

2024年9月-2025年5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，起草工作组在广泛收集、分析国内外相关技术文献和资料，结合我国协作机器人行业发展现状及应用经验等进行归纳和总结，按照团体标准制修订程序编写完成标准大纲、标准初稿等。

2. 征求意见阶段

2025年6-7月份，开展广泛的征求意见，共收到5家单位回函，提出修改意见27条，起草工作组经过研究讨论，采纳19条，并对标准征求意见稿修改，形成送审稿。

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进行

矿山生态修复过程中能够按照该标准进行操作，实施可行。

（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实际操作性，确保项目参建单位能够对照标准的要求进行施工，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

（一）适用范围

明确本标准适用于各类协作机器人的性能试验。

（二）术语和定义

- 1、对协作机器人各种性能指标关键术语进行定义，确保标准的理解和使用一致性。
- 2、解释相关专业术语，如动态避障、触觉反馈灵敏度、预测算法性能、自主学习等。

（三）试验条件

1、环境条件。

- 1) 温度、湿度、气压等环境参数的要求。
- 2) 部分试验应在规定的温度范围内进行，以确保机器人的性能不受环境因素的影响。

（四）试验设备和仪器

- 1) 列出所需的试验设备和仪器，如激光跟踪仪、气候试验箱、电波暗室、力传感器、高帧摄像系统等。
- 2) 规定设备和仪器的精度、量程、分辨率等技术要求。

例如，高帧摄像系统的精度应满足一定的要求，以准确测量机器人的位置变化。

（五）试验方法

参照标准本身。

（六）试验结果的评定

参照标准本身。

（七）试验报告

- 1、规定试验报告应包含的内容，如试验目的、试验条件、试验设备、试验方法、试验结

果、评定结论等。

2、对试验报告的格式和要求进行说明。

四 采用国际标准和国外先进标准情况

在编制协作机器人性能及测试方法过程中，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，确保我国协作机器人性能和测试方法达到国际先进水平，为产业发展提供有力支撑。

五 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

在编制协作机器人性能及测试方法过程中，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，我们也充分考虑了机器人技术的发展趋势和应用需求。

六 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。

七 标准性质的说明

建议本标准为推荐性标准。

八 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。

九 废止现行有关标准的建议

无。