

ICS 25.040.30

CCS J 28



团体标准

T/CEATEC XXX—2026

机器人关节用高性能微控制器技术规范

Technical specification of high-performance microcontroller for robot joint

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 技术要求 4

 4.1 通用要求 4

 4.2 电气性能要求 5

 4.3 功能与实时控制性能要求 5

 4.4 环境适应性要求 6

 4.5 电磁兼容性（EMC）要求 6

 4.6 可靠性与安全性要求 7

 4.7 通信与接口要求 7

5 试验方法 7

 5.1 试验环境与预处理 7

 5.2 通用试验 8

 5.3 电气性能试验 8

 5.4 功能与实时控制性能试验 8

 5.5 环境适应性试验 10

 5.6 电磁兼容性（EMC）试验 11

 5.7 可靠性与安全性试验 11

 5.8 通信与接口试验 11

6 检验规则 12

 6.1 检验分类 12

 6.2 出厂检验 12

 6.3 型式检验 12

 6.4 合格判定规则 12

7 标志、包装、运输和贮存 12

 7.1 标志 12

 7.2 包装 13

 7.3 运输 13

 7.4 贮存 13

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

机器人关节用高性能微控制器技术规范

1 范围

本文件规定了机器人关节用高性能微控制器的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于工业机器人、协作机器人、服务机器人、人形机器人关节驱动与伺服控制用高性能微控制器（以下简称“微控制器”）的设计、制造、检验、验收与应用。其他机器人运动控制单元可参照执行。

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 191 包装储运图示标志
- GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.5 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ea和导则：冲击
- GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化
- GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 4365 电工术语 电磁兼容
- GB/T 4588.1 无金属化孔单双面印制板分规范
- GB/T 4588.4 刚性多层印制板分规范
- GB/T 5080.7 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案
- GB/T 6587 电子测量仪器通用规范
- GB/T 12642 工业机器人 性能规范及其试验方法
- GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
- GB/T 17626.3 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
- GB/T 17626.5 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验
- GB/T 17626.6 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验
- GB/T 18268.1 测量、控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第1部分：通用要求
- GB/T 37283 服务机器人 电磁兼容 通用标准 抗扰度要求和限值

3 术语和定义

GB/T 4208、GB/T 4365、GB/T 5080.7界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

机器人关节用高性能微控制器 high-performance microcontroller for robot joints

集成硬件浮点运算单元、实时伺服控制加速器、多协议编码器接口、高分辨率驱动输出、功能安全保护及工业实时总线通信功能，专用于工业机器人、协作机器人、服务机器人、人形机器人关节力矩-速度-位置三环闭环控制的嵌入式专用计算单元。

3.2

实时控制周期 real-time control period

微控制器完成编码器数据采集→控制算法解算→驱动指令输出全闭环流程的最小时间间隔，是表征关节控制实时性的核心指标。

注：本文件中，实时控制周期即指力矩环更新周期，是三环控制中的最内环周期。

3.3

三环控制周期 three-loop control period

机器人关节控制中，力矩环、速度环、位置环三个嵌套闭环控制回路的时间间隔参数体系，满足速度环周期= N_1 ×力矩环周期、位置环周期= N_2 ×力矩环周期（ N_1 、 N_2 为正整数）。

3.4

速度环更新周期 velocity loop update period

微控制器对机器人关节输出速度进行闭环调节的时间间隔。

注：速度环更新周期宜为力矩环更新周期的整数倍，本文件规定速度环更新周期 $\leq 250\ \mu\text{s}$ 。

3.5

位置环更新周期 position loop update period

微控制器对机器人关节输出位置进行闭环调节的时间间隔。

注：位置环更新周期宜为力矩环更新周期的整数倍，本文件规定位置环更新周期 $\leq 500\ \mu\text{s}$ 。

3.6

控制周期抖动 control period jitter

实际测得的控制周期相对于标称控制周期的波动程度，表征控制时序的稳定性。

3.7

多轴同步控制精度 multi-axis synchronization control accuracy

多关节微控制器之间接收同步指令并执行输出动作的最大时间偏差，表征机器人多关节协同运动的一致性。

3.8

关节安全停机时间 safe stop time of the joint

微控制器接收到急停、故障等安全触发信号后，完成驱动输出关断、力矩闭锁的最长时间。

3.9

掉电安全保持 power-off safety retention

微控制器在供电中断后，关键运行参数、故障日志、安全状态数据不丢失、不篡改的持续保持能力。

4 技术要求

4.1 通用要求

4.1.1 外观

产品表面应光洁平整，无涂层剥落等缺陷；文字、标识清晰完整。

4.1.2 装配

连接器、固定螺钉、安装支架等结构件应装配牢固，无松动、退针、断针、歪斜、缺失等问题；内部组件布局合理，布线规整，无干涉、受压、磨损隐患。

4.1.3 尺寸与安装

尺寸偏差满足装配精度要求，产品重量应满足机器人关节轻量化设计要求。

4.1.4 防护等级

户内型外壳防护等级应不低于IP40，户外型应不低于IP54，应符合GB/T 4208规定。

4.1.5 硬件结构

硬件应采用高集成度、小型化、抗振加固设计，适配机器人关节狭小安装空间与连续运动工况。

4.1.6 软件功能

软件应搭载硬实时操作系统：

a) 中断响应时间 $\leq 1\mu\text{s}$ ；

b) 支持力矩环、速度环、位置环三环嵌套控制，具备参数自整定、在线监控、故障诊断与安全保护功能；

c) 支持固件双分区备份与升级失败自动回滚；

4.1.7 元器件

核心元器件（处理器、存储器、通信芯片）应选用工业级及以上等级，工作温度范围覆盖 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ；禁止使用翻新、拆机或无资质供应商提供的元器件。

4.1.8 印制板

印制板设计与制造应满足 GB/T 4588.1、GB/T 4588.4 的要求，保证电气性能与机械可靠性。

4.1.9 可维护性要求

产品应支持远程诊断、在线调试、参数备份与恢复功能；预留调试接口，便于现场维护与故障排查。

4.2 电气性能要求

4.2.1 供电特性

具体要求如下：

a) 额定供电电压为DC 24V，允许工作电压范围 18V $\sim$ 32V；

b) 启动冲击电流不大于2倍额定工作电流；

c) 空载功耗 $\leq 5\text{W}$ ，满载功耗 $\leq 20\text{W}$ ；

d) 供电电压降至18V（额定值的75%）时，安全保护功能应正常；降至20.4V（额定值的85%）时，全部控制功能应正常；

e) 电压跌落：供电电压跌落至 0V，持续时间 $\leq 10\text{ms}$ 时，产品功能正常；

f) 浪涌电压：电源端口应能承受 $\pm 2\text{kV}$ 浪涌电压（线-地），符合GB/T 17626.5规定。

4.2.2 绝缘耐压

具体要求如下：

a) 接线端子与外壳之间的绝缘电阻 $\geq 1000\text{M}\Omega$ （DC 500V 兆欧表测量）；

b) 工频耐压 AC 1500V/50Hz，持续 1min，无击穿、闪络、漏电现象；

c) 冲击电压：各电气回路对地及回路之间应能承受1.2/50 μs 标准雷电冲击电压，峰值5kV（电源回路）、2kV（信号回路），正负极性各3次，无绝缘损坏。

4.2.3 时钟稳定性

具体要求如下：

a) 系统时钟精度 $\leq \pm 50\text{ppm}$ ；

b) 全工作温度范围（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ）内，时钟温漂 $\leq \pm 20\text{ppm}$ 。

4.3 功能与实时控制性能要求

4.3.1 核心计算性能

具体要求如下：

a) 处理器主频 $\geq 600\text{MHz}$ ，内置硬件FPU和DSP指令集，单精度浮点运算能力 $\geq 800\text{MFLOPS}$ ；

b) 片内RAM $\geq 512\text{KB}$ ，片内Flash $\geq 2\text{MB}$ ，支持外部Flash扩展（最大32MB）。

4.3.2 实时控制精度

实时控制性能指标应符合表1的规定。

表1 实时控制性能要求

项目	技术指标	说明
力矩环更新周期	$\leq 125\ \mu\text{s}$	三环控制最内环周期
速度环更新周期	$\leq 250\ \mu\text{s}$	宜为力矩环周期的2倍
位置环更新周期	$\leq 500\ \mu\text{s}$	宜为力矩环周期的4倍
控制周期抖动	$\leq \pm 5\ \mu\text{s}$	连续10000个周期的最大波动
多轴同步控制精度	$\leq \pm 10\ \mu\text{s}$	多轴间输出动作的最大时间偏差
关节安全停机时间	$\leq 1\text{ms}$	安全触发至驱动完全关断
注：三环控制周期必须满足整数倍关系，禁止非整数倍配置。		

4.3.3 编码器接口性能

具体要求如下：

- a) 支持增量式（ABZ）及BiSS-C、Endat 2.2、Hiperface DSL主流绝对式编码器协议；
- b) 最高信号输入频率 $\geq 5\text{MHz}$ ，位置分辨率 $\leq 1\ \mu\text{rad}$ ；
- c) 编码器数据采集延迟 $\leq 5\ \mu\text{s}$ 。

4.3.4 驱动输出性能

具体要求如下：

- a) 支持 PWM、脉冲方向、模拟量输出模式，支持互补PWM输出，死区时间 $0\sim 10\ \mu\text{s}$ 可调；
- b) PWM 输出频率 $\geq 20\text{kHz}$ ，输出精度 $\geq 12\text{bit}$ ；
- c) 驱动输出相位误差 $\leq \pm 1^\circ$ 。

4.3.5 控制功能要求

具体要求如下：

- a) 支持力矩/速度/位置三环闭环控制，控制性能应符合 GB/T 12642 的通用要求，支持前馈补偿、扰动观测、摩擦补偿算法；
- b) 具备限位保护、原点复位、急停闭锁、安全扭矩关断（STO）功能；
- c) 支持控制参数在线整定、运行数据在线监控、固件在线升级；
- d) 故障诊断功能：应能实时监测过流、过压、欠压、过温、编码器异常等故障，生成标准故障代码并存储，故障记录存储容量 ≥ 1000 条，保存时间 ≥ 10 年；
- e) STO功能：安全响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，残余电压 $\leq 24\text{V}$ 。

4.4 环境适应性要求

4.4.1 温度

具体要求如下：

- a) 工作温度为 $-40\sim 85^\circ\text{C}$ ，存储温度为 $-55\sim 125^\circ\text{C}$ ；
- b) 温度变化速率 $\leq 10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

4.4.2 湿度

具体要求如下：

- a) 工作湿度为 $5\sim 95\%\text{RH}$ ，无凝露；
- b) 恒定湿热 $85^\circ\text{C}/85\%\ \text{RH}$ ，持续 500h。

4.4.3 振动与冲击

具体要求如下：

- a) 正弦振动： $10\text{Hz}\sim 2000\text{Hz}$ ，加速度 10g ，扫频速率 $1\text{oct}/\text{min}$ ，三轴六向无结构失效、功能正常；
- b) 冲击：半正弦波 50g ， 11ms ，每方向6次，无松动损坏；
- c) 随机振动： $10\text{Hz}\sim 2000\text{Hz}$ ，加速度谱密度 $0.1\text{g}^2/\text{Hz}$ ，三轴六向，每轴持续 1h，无结构失效、功能正常。

4.5 电磁兼容性（EMC）要求

4.5.1 静电放电抗扰度

接触放电 $\pm 6\text{kV}$ ，空气放电 $\pm 8\text{kV}$ 。

4.5.2 射频辐射抗扰度

$80\text{MHz}\sim 2.7\text{GHz}$ 频段内，场强 $10\text{V}/\text{m}$ 。

4.5.3 电快速瞬变脉冲群抗扰度

电源端口 $\pm 2\text{kV}$ ，信号端口 $\pm 1\text{kV}$ 。

4.5.4 浪涌抗扰度

线-地 $\pm 2\text{kV}$ ，线-线 $\pm 1\text{kV}$ 。

4.5.5 传导骚扰抗扰度

应符合GB/T 17626.6规定的3级要求，试验期间控制精度波动 $\leq \pm 0.1\%$ ，无误动作。

4.6 可靠性与安全性要求

4.6.1 可靠性指标

具体要求如下：

- a) 平均无故障工作时间 (MTBF) $\geq 50000\text{h}$ (置信度 90%，额定负载、常温环境下)；
- b) 设计工作寿命 ≥ 10 年。

4.6.2 安全保护功能

具体要求如下：

- a) 具备过流、过压、欠压、过温、过载、编码器异常故障保护功能；
- b) 故障响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，故障触发后自动导向安全状态；
- c) 掉电后关键数据保持时间 $\geq 72\text{h}$ ，采用超级电容或备用电池供电，无需外部电源。

4.6.3 失效模式

产品出现故障时，应优先进入安全闭锁状态，不得出现失控、过流、飞车等危险失效模式，禁止出现非预期力矩输出。

4.6.4 数据安全要求

具体如下：

- a) 固件应采用 AES-256 加密，升级时需进行完整性校验；
- b) 用户权限实行三级管理（管理员、运维、普通用户），不同级别用户不得越权操作；
- c) 关键数据（故障记录、参数设置）应采用哈希校验，防止篡改。

4.7 通信与接口要求

4.7.1 总线通信接口要求

4.7.1.1 支持 EtherCAT、CANopen、Profinet 中至少两种工业实时总线，支持分布式时钟同步；同时支持RS 485 MODBUS-RTU/ASCII协议。

4.7.1.2 工业实时总线通信周期 $\leq 1\text{ms}$ ，同步精度 $\leq \pm 1\mu\text{s}$ ，误码率 $\leq 10^{-9}$ 。

4.7.1.3 RS 485 接口技术参数

具体如下：

- a) 通信速率：默认9600bps；
- b) 最大节点数：单总线支持 ≥ 32 个从站节点；
- c) 响应时间：主站模式下指令响应时间 $\leq 10\text{ms}$ ，从站模式下指令响应时间 $\leq 5\text{ms}$ ；
- d) 传输距离：9600bps 速率下传输距离 $\geq 1200\text{m}$ ；
- e) 电气特性：具备15kV ESD静电保护。

4.7.2 通用外设接口要求

具体要求如下：

- a) 数字IO接口输入 ≥ 4 路，输出 ≥ 4 路，兼容5V/24V电平，输出驱动能力 $\geq 100\text{mA}$ ；
- b) 配置USB 调试接口，用于固件升级、日志读取、参数调试；
- c) 模拟量接口输入 ≥ 2 路，分辨率 $\geq 12\text{bit}$ ；
- d) 预留1 路 RS 232接口，用于外接调试终端或第三方传感器。

4.7.3 通信冗余要求

高可靠性应用场景下，应支持双总线冗余通信，主总线故障时自动切换至备用总线，切换时间 $\leq 10\text{ms}$ 。

5 试验方法

5.1 试验环境与预处理

5.1.1 标准试验环境

具体要求如下：

- a) 温度：23±2℃；
- b) 相对湿度：45～75% RH；
- c) 大气压力：86～106kPa。

5.1.2 试样预处理

试验前，试样应在标准环境中放置≥2h，达到温度平衡。

5.1.3 试验设备

试验设备应经校准合格，精度满足测试要求，符合GB/T 6587的规定。

5.2 通用试验

5.2.1 外观检查

采用目视法。

5.2.2 尺寸测量

使用卡尺、高度规、二次元测量仪检测外形、安装孔位、连接器尺寸。

5.2.3 防护等级

按 GB/T 4208 规定的方法进行 IP 等级测试。

5.3 电气性能试验

5.3.1 供电适应性

采用可调直流电源，调节电压至 18V、24V、32V，测试产品功能与功耗。

5.3.2 绝缘电阻

使用 DC 500V 绝缘电阻测试仪，测量端子与外壳间绝缘电阻。

5.3.3 工频耐压

采用耐压测试仪施加 AC 1500V/50Hz 电压，持续 1min，观察击穿、闪络情况。

5.3.4 时钟精度

使用频率计、高精度时钟测试仪测量时钟精度与温漂特性。

5.4 功能与实时控制性能试验

5.4.1 核心性能测试

通过调试软件读取处理器主频、运算能力、存储容量参数，验证Flash预留空间分配。

5.4.2 实时控制周期

5.4.2.1 测试设备

应配备以下测试设备：

- a) 高精度数字示波器（带宽≥100MHz，采样率≥1GSa/s）；
- b) 逻辑分析仪（通道数≥16，采样率≥100MHz）；
- c) 高精度时间戳模块（分辨率≤1ns）；
- d) 标准机器人关节负载（惯量、摩擦力矩可调）；
- e) 信号发生器（用于触发同步指令）。

5.4.2.2 实时控制周期（力矩环）测试

将微控制器配置为力矩控制模式，通过逻辑分析仪测量力矩指令更新信号的时间间隔，具体如下：

- a) 连续采集 10000 个控制周期，记录每个周期的实际时长 T_i （ $i=1, 2, \dots, 10000$ ）；
- b) 计算平均周期 $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$ ；
- c) 确定最大周期 $T_{\max} = \max(T_i)$ 和最小周期 $T_{\min} = \min(T_i)$ ；
- d) 验证 $\bar{T} \leq 125 \mu s$ ；
- e) 剔除因外部中断导致的异常值（偏离 $\bar{T}$ 超过±20%的周期），若剔除比例超过 1%，则判定为不合格；重新计算平均周期、最大周期和最小周期。

5.4.2.3 控制周期抖动测试

基于5.4.2.2的测试数据，按公式（1）计算控制周期抖动：，见公式（1）。

$$Jitter = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

T ——为控制周期；

$T_{\max}$ ——为连续采集 N 个周期（ $N \geq 10000$ ）中的最大实测周期值；

$T_{\min}$ ——为连续采集 N 个周期中的最小实测周期值；

$Jitter$ ——为控制周期抖动值，单位为微秒（ μs ），验证 $Jitter \leq \pm 5 \mu s$ 。

5.4.2.4 速度环更新周期测试

将微控制器配置为速度控制模式，通过示波器测量速度指令更新信号的时间间隔，试验具体步骤按5.4.2.2执行，验证速度环更新周期 $\leq 250 \mu s$ 且宜为实时控制周期的整数倍。

5.4.2.5 位置环更新周期测试

将微控制器配置为位置控制模式，通过逻辑分析仪测量位置指令更新信号的时间间隔，试验具体步骤按5.4.2.2执行，验证位置环更新周期 $\leq 500 \mu s$ 且宜为实时控制周期的整数倍。

5.4.2.6 多轴同步精度测试

具体如下：

- 搭建多轴测试平台，连接不少于3台同型号微控制器；
- 给多台微控制器发送同步指令；
- 使用逻辑分析仪采集各轴驱动输出信号的上升沿时间 $t_j (j = 1, 2, \dots, M, M \geq 3)$ ；
- 计算各输出信号上升沿与指令发出时刻 t_0 的时间偏差 $\Delta t_j = t_j - t_0$ ；
- 计算最大时间偏差 $\Delta t_{\max} = \max(\Delta t_j) - \min(\Delta t_j)$ ；
- 重复测试10次，取 $\Delta t_{\max}$ 的最大值作为多轴同步控制精度，验证 $\leq \pm 10 \mu s$ 。

5.4.2.7 安全停机时间测试

具体如下：

- 使用示波器同时监测急停信号上升沿和驱动输出关断信号的下降沿；
- 测量两者时间差为 Δt_{stop} ；
- 重复测试100次，取最大值作为关节安全停机时间，验证 $\leq 1ms$ 。

5.4.3 编码器与驱动输出测试

5.4.3.1 测试设备

具体如下：

- 标准信号发生器（频率范围0.1Hz~10MHz，分辨率 $\leq 0.1Hz$ ）；
- 高精度时间间隔测量仪（分辨率 $\leq 1ns$ ）；
- 标准编码器或编码器模拟器。

5.4.3.2 最高信号输入频率测试

输入标准方波信号，从1MHz逐步增加至5MHz，验证编码器信号采集功能正常，无丢脉冲、错计数现象。

5.4.3.3 位置分辨率测试

接入分辨率 $\leq 1 \mu rad$ 的高精度编码器，验证微控制器位置采集值与理论值偏差 $\leq \pm 1 \mu rad$ 。

5.4.3.4 编码器数据采集延迟测试

使用高精度时间间隔测量仪，测量编码器信号输入时刻与微控制器完成数据更新时刻的时间差，重复测试1000次，取平均值作为编码器数据采集延迟，验证 $\leq 5 \mu s$ 。

5.4.4 驱动输出性能测试

5.4.4.1 PWM输出频率测试

使用示波器测量PWM输出波形频率，验证 $\geq 20kHz$ 。

5.4.4.2 PWM输出精度测试

设置PWM占空比从0%至100%以1%步进变化，使用高精度电压表测量输出电压，计算实际值与理论值的最大偏差，验证等效精度 $\geq 12bit$ （偏差 $\leq 0.024\%$ ）。

5.4.4.3 驱动输出相位误差测试

接入标准三相电机负载，使用编码器测量实际转子位置与指令位置的相位差，在额定转速下重复测试10次，取最大相位误差，验证 $\leq \pm 1^\circ$ 。

5.4.5 控制功能要求测试

5.4.5.1 三环闭环控制功能测试

具体如下：

- a) 分别配置为力矩控制、速度控制、位置控制模式；
- b) 施加标准阶跃响应测试信号，验证各环控制稳定性；
- c) 验证三环切换时无冲击、无振荡。

5.4.5.2 高级控制算法测试

具体如下：

- a) 启用前馈补偿功能，验证跟踪误差减小；
- b) 启用扰动观测功能，验证抗扰动能力增强；
- c) 启用摩擦补偿功能，验证低速平稳性改善。

5.4.5.3 安全保护功能测试

具体如下：

- a) 限位保护：触发正/负限位开关，验证电机停止且保持力矩；
- b) 原点复位：执行原点复位指令，验证定位精度；
- c) 急停闭锁：触发急停信号，验证驱动输出关断且保持制动；
- d) STO功能：触发STO信号，使用示波器测量驱动输出电压，验证残余电压 $\leq 24V$ ；重复测试100次，

安全响应时间 $\leq 1ms$ 。

5.4.5.4 在线功能测试

具体如下：

- a) 参数在线整定：修改控制参数并实时生效，验证系统响应变化；
- b) 运行数据在线监控：通过总线读取实时运行数据，验证数据刷新周期 $\leq 1ms$ ；
- c) 固件在线升级：进行固件升级操作，验证升级过程可控、升级后功能正常。

5.4.6 固件升级功能验证

5.4.6.1 双分区备份机制验证

具体如下：

- a) 检查Flash空间分配，确认存在活动区和备份区；
- b) 读取当前运行固件版本，执行升级操作；
- c) 验证升级过程中断电，重新上电后系统可从备份区恢复。

5.4.6.2 升级失败回滚功能测试

具体如下：

- a) 模拟升级过程中通信中断；
- b) 验证系统自动回滚至上一版本，功能正常；
- c) 验证升级失败次数统计记录正确。

5.4.6.3 异常测试

具体如下：

- a) 模拟升级文件损坏，验证系统拒绝升级并提示错误；
- b) 模拟升级中途断电，重新上电后验证系统自动回滚至上一版本。

5.5 环境适应性试验

5.5.1 高低温试验

按 GB/T 2423.1、GB/T 2423.2 执行， $-40^{\circ}C$ 、 $85^{\circ}C$ 各保持2h，通电测试功能。

5.5.2 湿热试验

按 GB/T 2423.3、GB/T 2423.4 执行，恒定湿热与交变湿热试验后测试性能。

5.5.3 振动冲击试验

按 GB/T 2423.5、GB/T 2423.10 执行，完成振动与冲击测试后检查功能。

5.5.4 温度变化试验

按 GB/T 2423.22 执行， $-40^{\circ}C$ 到 $85^{\circ}C$ 循环 10 次后测试功能。

5.6 电磁兼容性（EMC）试验

按 GB/T 17626.2、GB/T 17626.3、GB/T 17626.4、GB/T 17626.5、GB/T 17626.6、GB/T 18268.1 及GB/T 37283 规定的方法依次进行，试验过程中产品通电运行，实时监控控制精度与功能状态。

注：工业机器人应用场景可按GB/T 37283执行。

5.7 可靠性与安全性试验

5.7.1 MTBF验证试验

按 GB/T 5080.7 规定的定时截尾试验方案进行，置信度 90%，累计试验时间 $\geq 150000\text{h}$ 。

5.7.2 安全保护试验

模拟以下故障条件，验证保护动作与响应时间：

- a) 过流：输出端接低阻负载，响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，进入安全状态；
- b) 过压：输入电压调至36V，响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，进入安全状态；
- c) 欠压：输入电压调至15V，响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，进入安全状态；
- d) 过温：加热传感器至阈值5℃，响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，进入安全状态；
- e) 编码器异常：断开编码器信号线，响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，进入安全状态；
- f) 急停：触发急停按钮，响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ，驱动关断。

5.7.3 耐久试验

进行温循和振动复合耐久试验，试验后实时控制性能衰减不超过10%，具体试验如下：

- a) 温度循环试验：-40℃保持 30min，上升到85℃保持 30min，循环 10 次；
- b) 振动耐久试验：10~2000Hz 正弦振动，加速度 10g，每轴持续 1h；
- c) 复合耐久试验：温度循环（-40℃/30min→85℃/30min，变化速率 10℃/min）+正弦振动（10~2000Hz，10g）+额定负载通电运行，总时长 $\geq 1000\text{h}$ 。

5.7.4 掉电保持试验

切断供电电源，72h 后恢复供电，检查关键运行参数、故障日志、安全状态数据的完整性。

5.7.5 加速寿命试验

采用温度加速寿命试验方法，试验温度85℃，通电运行，累计试验时间 $\geq 1000\text{h}$ 。

5.8 通信与接口试验

5.8.1 总线通信试验

使用工业总线测试仪，测试以下指标：

- a) 通信周期：测量实际通信周期，验证 $\leq 1\text{ms}$ ；
- b) 同步精度：测量分布式时钟（DC）同步偏差，验证 $\leq \pm 1\mu\text{s}$ ；
- c) 误码率：统计 10^9 bit传输中的错误比特数，验证 $\leq 10^{-9}$ 。

5.8.2 RS 485 MODBUS协议

具体如下：

- a) 协议兼容性：连接标准MODBUS主站/从站设备，验证03H、06H、10H等核心功能码通信正常；
- b) 通信速率：分别设置1200bps、9600bps、115200bps速率，验证连续通信1h无丢包、无错码；
- c) 响应时间：发送1000次读寄存器指令，测量平均响应时间，验证主站 $\leq 10\text{ms}$ 、从站 $\leq 5\text{ms}$ ；
- d) 误码率：连续传输 10^9 bit 数据，统计错误比特数，验证误码率 $\leq 10^{-9}$ 。

5.8.3 外设接口试验

接入标准负载与信号源，测试以下指标：

- a) 数字IO：输入高低电平，验证识别正确；输出高低电平，验证驱动能力；

- b) 模拟量输入：输入0~10V标准电压，验证分辨率 $\geq 12\text{bit}$ ，线性度 $\leq \pm 0.1\%$ ；
- c) USB调试：验证USB接口的固件升级、日志读取、参数调试功能正常。

6 检验规则

6.1 检验分类

产品检验分为出厂检验和型式检验。

6.2 出厂检验

6.2.1 检验项目

外观与结构、绝缘电阻、电气功能、实时控制基本性能、通信接口、安全保护功能。

6.2.2 检验方法

检验方式为全检，所有项目合格判定为出厂检验合格。

6.3 型式检验

6.3.1 检验项目

本文件第4章全部技术要求。

6.3.2 检验时机

型式检验是对设备的全面检验，用于验证设备是否符合本标准的所有要求。型式检验应在以下情况下进行：

- a) 新产品定型或老产品转厂生产时；
- b) 正常生产后，如结构、材料、工艺有较大改变时；
- c) 正常生产时，每两年进行一次；
- d) 停产一年以上恢复生产时；
- e) 国家质量监督机构提出要求时。

6.3.3 抽样规则

从出厂检验合格批次中随机抽取3台作为试样，若有1台非关键项目不合格，加倍抽取至6台进行复检。

6.4 合格判定规则

6.4.1 出厂检验

所有检验项目合格，判定为出厂合格；任一项目不合格，判定为不合格，不得出厂。

6.4.2 型式检验

具体如下：

- a) 安全性能、绝缘耐压、EMC项目不合格，直接判定为不合格，不得复检；
- b) 非关键项目不合格，允许加倍抽样复检一次；复检后仍有不合格项，判定为不合格；
- c) 所有项目合格，判定为型式检验合格。

7 标志、包装、运输和贮存

7.1 标志

7.1.1 产品铭牌

产品应在醒目位置设置永久性铭牌，内容包括：产品名称、型号、额定电压、制造商名称、生产日期、出厂编号、本标准编号。

7.1.2 包装标志

包装标志应符合 GB/T 191 的规定，标注小心轻放、防潮、防静电、向上等图示标志。

7.1.3 标识质量

铭牌标识应清晰、牢固、耐磨损，符合产品长期使用要求。

7.2 包装

7.2.1 包装材料

产品应采用防静电、防震、防潮专用包装，连接器应加装保护帽。

7.2.2 包装箱

包装箱应坚固可靠，内部设置缓冲衬垫，防止运输过程中碰撞、振动损伤，箱内应随附产品合格证、使用说明书、出厂检验报告。

7.3 运输

7.3.1 运输方式

使用专用运输车辆或符合要求的运输工具，运输过程中应避免剧烈震动和碰撞。

7.3.2 运输注意事项

运输过程中应避免剧烈振动、冲击、暴晒、雨淋、重压，禁止与腐蚀性、易燃易爆物品混装运输。

7.4 贮存

7.4.1 贮存环境要求

产品应贮存在通风、干燥、清洁、无腐蚀性气体、无强电磁干扰的库房内，环境温度-10~40℃，相对湿度≤80% RH，无凝露。

7.4.2 贮存期限要求

正常贮存条件下，自生产之日起贮存期限不超过 2 年；超过贮存期限，应重新检验合格后方可使用。
