



中华人民共和国国家标准

GB/T 39360—2020

工业机器人控制系统性能评估与测试

Evaluation and testing of performance of industrial robot control system

2020-11-19 发布

2021-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 工业机器人控制系统性能模型 3

 4.1 概述 3

 4.2 工业机器人控制系统性能模型 3

5 特性说明 4

 5.1 易用性 4

 5.2 维护性 4

 5.3 功能性 4

 5.4 实时性 5

 5.5 扩展性及开放性 6

 5.6 可靠性 7

 5.7 安全性 7

6 测试评价方法 7

 6.1 概述 7

 6.2 易用性测试评价 8

 6.3 维护性测试评价 8

 6.4 功能性测试评价 8

 6.5 实时性测试评价 10

 6.6 扩展性与开放性测试评价 12

 6.7 可靠性测试评价 12

 6.8 安全性测试评价 13

7 测试文档集要求 14

8 符合性评价细则 14

附录 A（资料性附录） 机器人操作系统 15

参考文献 18



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国自动化系统与集成标准化技术委员会(SAC/TC 159)归口。

本标准起草单位:上海电器科学研究院、固高科技(深圳)有限公司、安徽配天机器人技术有限公司、哈工大机器人(合肥)国际创新研究院、广州智能装备研究院有限公司、上海电器科学研究所(集团)有限公司、山东鲁能智能技术有限公司、青岛钢铁侠科技有限公司、湖南省产品质量监督检验研究院、上海添唯认证技术有限公司、上海新时达机器人有限公司、北京航空航天大学、成都卡诺普自动化控制技术有限公司、中国电子科技集团公司第三十二研究所、上海电器设备检测所有限公司、上海机器人产业技术研究院。

本标准主要起草人:王爱国、刘越、王泽涵、于振中、曾钰、刘健、李建祥、张锐、钟声、郑海峰、李大新、刘斌、李良军、吴振宇、朱晓鹏、沈文婷、郑军奇、刘继志、郑凯宇、陈灏。

工业机器人控制系统性能评估与测试

1 范围

本标准规定了工业机器人控制系统性能模型、性能指标、测试评价方法、测试文档集要求和符合性评价细则。

本标准适用于工业机器人控制系统,可供工业机器人控制系统设计开发人员、测试人员以及评价人员等使用。

注:本标准不指定达到评定等级或依从性等级的测度值域,因为每个性能指标的值取决于使用环境和用户需要。一些属性可能有理想值范围,这些值取决于如人类认知因素的一般因素,而不是特定用户需要。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 7826—2012 系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析(FMEA)程序
- GB/T 7829—1987 故障树分析程序
- GB 11291.1—2011 工业环境用机器人 安全要求 第1部分:机器人
- GB/T 12642—2013 工业机器人 性能规范及其试验方法
- IEC 61025:2006 故障树分析(FTA)[Fault tree analysis(FTA)]

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

工业机器人 industrial robot

自动控制的、可重复编程多用途的操作机,可对三个或三个以上轴进行编程,它可以是固定式或移动式。在工业自动化中使用。

注1:工业机器人包括:

- 操作机,含制动器;
- 控制器,含示教器和某些通信接口。

注2:包括某些集成的附加轴。

[GB/T 12643—2013,定义2.9]。

3.2

插补 interpolation

对特定曲线进行数据密化的过程。

3.3

通信 communication

机器人控制柜内部、机器人控制柜与本体以及机器人与外部设备之间的信息数据交互。

注:机器人的通信协议包括 Profibus、Ethernet 等。

3.4

质量 quality

实体特性的总和,表示实体满足明确或隐含要求的能力。

3.5

质量模型 quality model

定义的特征集以及它们之间的关系集,为规约质量需求以及评价质量提供了一个框架。

[GB/T 25000.10—2016,定义 3.18]

3.6

评价 evaluation

决定某产品、项目、活动或服务是否符合它的规定的准则的过程。

3.7

属性 attribute

实体的固有性质或特性,可由人工或自动化手段进行定量或定性地辨别。

[GB/T 25000.10—2016,定义 3.2]

3.8

实体 entity

具有属性特征的对象。

示例:一个对象可能是过程、产品、项目或资源等。

3.9

测量 measurement

使用一种度量,把标准值(可以是数或类别)赋予实体的某个属性。

[GB/T 11457—2006,定义 2.924]

3.10

指标 indicator

衡量目标的单位或方法。

3.11

目标 goal

想要达到的目的或想获得的结果。

3.12

任务 task



在多道程序或多进程环境中,由计算机完成的基本工作元,是由控制系统处理的一个或多个指令序列;或由操作员完成的一种基本工作单位。

3.13

故障 fault

计算机程序中的不正确的步骤、过程或数据定义。

[GB/T 25000.51—2016,定义 4.1.8]

3.14

失效 failure

系统或部件不能按规定的性能要求执行所要求的功能。

[GB/T 11457—2006,定义 2.601]

3.15

异常 exception

引起正常程序执行挂起的事件。

注：类型包括：寻址异常、数据异常、操作异常、溢出异常、保护异常和下溢异常。
[GB/T 11457—2006, 定义 2.575]

3.16

危险 hazard

对设备、操作人员或环境具有产生伤害的潜能。

3.17

硬件在环仿真 hardware in the loop simulation

半实物仿真 hardware in the loop simulation

以实时处理器运行仿真模型来模拟受控对象的运行状态,通过 I/O 接口与被测对象相连接。

3.18

工作空间 workspace

允许机器人工具或法兰工作的空间,机器人一旦移出会出现报警停止。

3.19

障碍物空间 obstacle space

不允许机器人工具或法兰进入的空间,机器人一旦进入就会报警停止。

3.20

受监控空间 monitored space

处于监控状态下的机器人工具或法兰所达空间,机器人进入该空间会输出信号。

3.21

用户文档 user documentation

提供用户安装和设置控制系统的软件的指导手册。

3.22

测试文档 test documentation

用于验证软件或用户文档的完整性、正确性、一致性、易理解性和易浏览性的文档。

4 工业机器人控制系统性能模型

4.1 概述

根据工业机器人控制系统的特点,在软件质量模型的基础上建立控制系统性能模型,工业机器人控制系统性能模型是进行性能评估与测试的依据。工业机器人控制系统性能模型由一些特性构成,每个特性可进一步被分解为子特性。在实际评测中,应根据具体检测对象选择相应的特性以及每个特性对应的属性组合。要对某个特性/子特性进行测评,除非可直接测评,否则应标识那些覆盖该特性/子特性的一组属性,获得每个属性的测评结果,并通过计算把它们组合起来,以形成对该特性/子特性的总体评价结果。

4.2 工业机器人控制系统性能模型

控制系统性能模型由 7 个特性组成:易用性、维护性、功能性、实时性、扩展及开放性、可靠性、安全性。每个特性可进一步分解为多个子特性,如易用性包含可辨识性、易学性、易操作性、用户差错防御性、用户界面舒适性、易访问性、易用性的依从性 7 个子特性。如图 1 所示。本标准第 5 章对性能模型中的每个特性给出了说明。

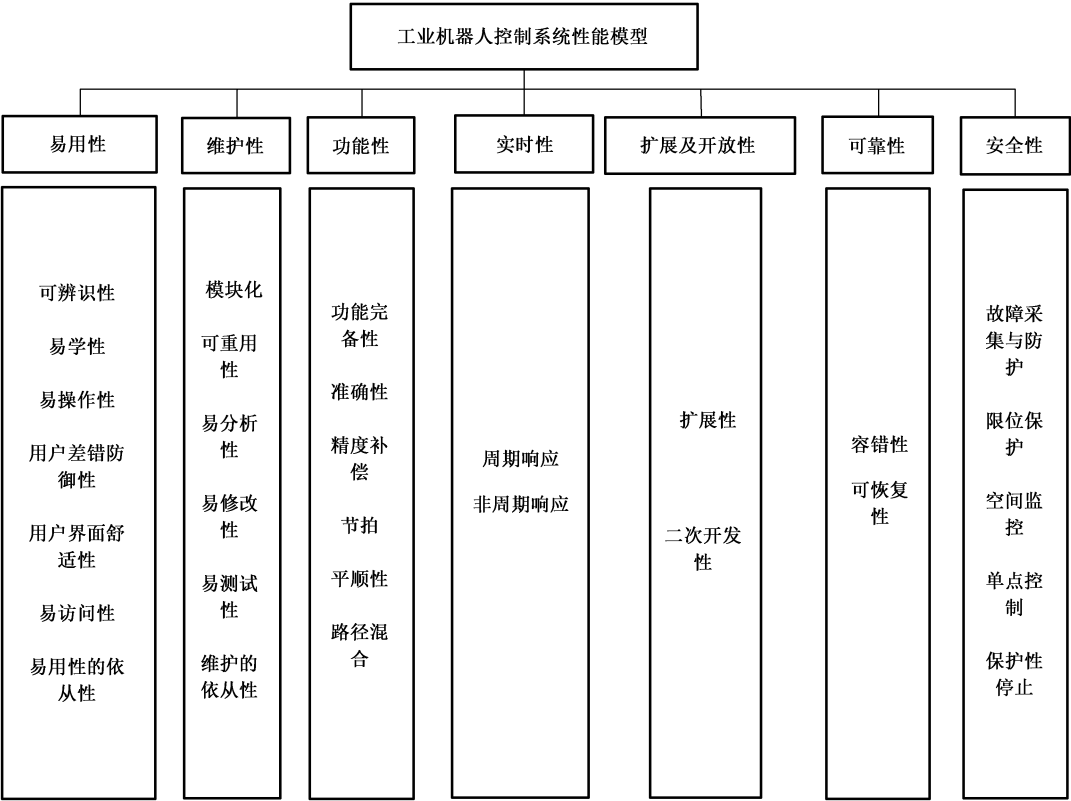


图 1 工业机器人控制系统性能模型

5 特性说明



5.1 易用性

易用性的说明参见 GB/T 25000.10—2016 中 4.3.2.4。

5.2 维护性

维护性的说明参见 GB/T 25000.10—2016 中 4.3.2.7。

5.3 功能性

5.3.1 概述

功能性为指定条件下使用时，控制系统提供满足明确和隐含要求功能的程度。

5.3.2 功能完备性

功能完备性为指定的任务和用户目标的覆盖程度。

5.3.3 准确性

工业机器人控制系统的准确性指标包括轨迹准确度、位姿准确度、速度准确度。

5.3.4 精度补偿

补偿精度为工业机器人控制系统对机器人本体模型、减速比、工具设定值、初始零位等误差的补偿能力,通常以位姿准确度、轨迹准确度、TCP 绕点精度来衡量补偿精度。其中 TCP 绕点精度表示机器人分别绕 TCP 坐标系 x 、 y 、 z 轴旋转时,TCP 原始位置与实到位置集群重心之差。

5.3.5 节拍

节拍为机器人完成指定轨迹运动的最短时间,表示机器人控制系统在确保上述准确性的情况下,具有可以发挥电机及机械最大效率,使机器人保持高速运动节拍的功能。

5.3.6 平顺性

平顺性表示机器人控制系统所具有规划机器人在连续多段轨迹运动的过程中,降低速度波动、轨迹抖动的能力。

平顺性要求机器人的规划轨迹函数应连续且平滑,需考虑运动学约束及动力学约束。运动学约束包括位置、速度、加速度的约束,动力学约束包括关节力矩、惯性等动力学因素,因此机器人的动作平顺性包括轨迹、速度、加速度的平顺性,平顺性通过轨迹准确度和轨迹重复性指标来表示。

5.3.7 路径混合

机器人按程序设定的恒定轨迹速度无延时的从一条轨迹转到另一条轨迹的行为。路径混合特性采用拐角偏差来表示。

5.4 实时性

5.4.1 总则

机器人控制系统的实时性表示当外界事件或数据产生时,能够接受并以足够快的速度予以处理,其处理的结果又能在规定的时间之内做出快速响应,并控制所有实时任务协调一致运行的能力。机器人系统任务分实时性任务和非实时性任务,实时性任务又分实时周期性任务如系统运行监控任务、伺服接口任务、I/O 接口任务等,实时非周期性任务包括机器人插补运算器任务等,非实时性任务如设备接口管理任务等。实时性的评价指标包括但不限于图 2 所示性能指标。

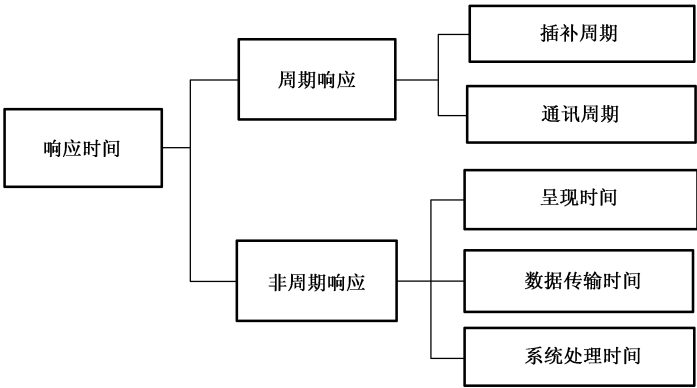


图 2 实时性指标

注：工业机器人运行的嵌入式实时操作系统参见附录 A。

5.4.2 周期性响应

周期性响应通过测量信号抖动反映软件性能,包括插补周期、通讯周期。

注:抖动是对信号时域变化的测量结果,它从本质上描述信号周期距离其理想值的偏差,时间抖动被定义为高速信号边沿到来时刻与理想时刻的偏差。

5.4.3 非周期性响应

5.4.3.1 概述

非周期性实时性的测试从整体出发,其响应时间包含系统处理时间、数据传输时间和呈现时间。非周期性响应事件包括控制稳定性、制动控制装置意外操作防护响应时间、急停响应时间、保护性停止响应时间、开机自检时间、故障检测时间。

5.4.3.2 控制稳定性

被控制对象从某一速度加速或减速到另一速度所用时间的不一致程度。

5.4.3.3 制动控制装置意外操作防护响应时间

按 GB 11291.1—2011 中 5.3.2 的要求,从防止意外操作的致动控制装置触发到系统控制逻辑完成控制指令响应的的时间。

5.4.3.4 急停响应时间

从急停功能被触发到系统控制逻辑切断机器人驱动器的驱动源、中止所有的危险的操作的时间。

5.4.3.5 保护性停止响应时间

从保护性停止条件满足到系统控制逻辑成保护停止操作的时间。

5.4.3.6 开机自检时间

按 GB 11291.1—2011 中 5.3.3 的要求,正常或异常上电后,软件应能在规定的时间内完成开机初始化和上电自检或复位自检,可适用于控制器(含伺服系统)、示教器、致动控制装置中单个或多个对象,即为开机自检时间。

5.4.3.7 故障检测时间

按 GB 11291.1—2011 中 5.3.3 的要求,特别关注的故障出现后,故障检测时间为故障引起危害前,软件能检测出故障并执行相应的故障处理逻辑的最短的时间。产生故障的对象包括控制器(含伺服系统)、示教器、致动控制装置中单个或多个对象。

5.5 扩展性及开放性

5.5.1 扩展性

机器人控制系统的扩展性为扩展新功能的容易程度,系统具有功能扩展能力。

5.5.2 开放性

机器人控制系统的开放性为具有二次开发接口,在接口函数内完成机器人路径规划、速度规划、坐标系转换、运动学正逆解模块等。

5.6 可靠性

5.6.1 容错性

机器人控制系统可以对输入信息进行检查,具有使其不超出限定范围的功能,具备对误操作或异常输入的识别、定位、记录与防范的能力,确保工业机器人系统在存在单一硬件或软件故障的情况下仍能正常或降级工作。包括对外部输入指令、输入参数进行有效性检查,对外部输入 I/O 信号进行滤波处理和抗干扰功能。

5.6.2 可恢复性

机器人控制系统可恢复性为在发生中断或失效的情况时,能够恢复直接受影响的数据并重建期望的系统状态的功能。

工业机器人控制系统软件应具有在掉电重启后恢复对机器人本体的控制能力,根据使用场景保持在掉电时刻位置并发出报警或恢复至安全工况。

5.7 安全性

5.7.1 故障采集与防护

机器人控制系统在采集到控制过程中的故障或在异常情况下,能做出故障处理响应,同时能够对故障信息进行记录和报告。

示例:机器人控制系统能检测到报告本体位姿的传感器故障,并及时停止本体运动。

5.7.2 限位保护

机器人控制系统应具备的限位保护能力,确保机械臂或运动部件达到异常位置或超出特定运行空间时能够及时停止或做出危险规避动作。

示例:软件检测到限位传感器信号有效时,机器人控制系统能够执行保护措施,避免在限位方向继续运动。

5.7.3 空间监控

机器人控制系统应具备空间监控能力,所监控的空间类型有工作空间、障碍物空间、受监控空间等。

5.7.4 单点控制

按 GB 11291.1—2011 中 5.3.5 的要求,应确保本机示教器盒或其他示教盒装置控制下的机器人不能被任何别的控制源启动其运动或改变本机控制方式。

5.7.5 保护性停止

机器人控制系统应具备启动保护性停止电路的功能,能够在检测到危险状况(逼近安全距离或超出降速速度门限等)、通信链路故障等情况下停止机器人本体的运动。

6 测试评价方法

6.1 概述

工业机器人控制系统功能性特性的测试方法有如下几种:

- a) A:视觉检查;
- b) B:实际试验;



- c) C:测量;
- d) D:分析相关设计图纸[结构化分析或大致浏览电路图设计(包括电气、气动、水动等)和相关说明];
- e) E:仿真测试;
- f) F:硬件在环仿真。

在进行硬件在环仿真测试前,应搭建硬件在环仿真测试平台,平台硬件主要包括实时硬件系统、外围硬件(含伺服、电机以及可变惯量负载盘)、综合信号管理系统等,平台软件搭载嵌入式实时操作系统,运行机器人动力学模型等仿真模型;同时,应确保硬件在环仿真测试平台满足工业机器人多轴同步控制周期、关节伺服解算周期、总线通信速率等参数满足控制系统设计需求。

6.2 易用性测试评价

易用性测试评价方法参见 ISO/IEC 25023:2016 中 8.5。工业机器人控制系统易用性测试评价应考虑机器人使用中实用性功能,如离线编程功能、应用程序导入导出功能、坐标系转换及选择等。

6.3 维护性测试评价

维护性测试评价方法参见 ISO/IEC 25023:2016 中 8.8。工业机器人控制系统维护性测评应考虑连杆参数(DH)修正、关节轴校准、减速比修正等。

6.4 功能性测试评价

6.4.1 功能完备性

工业机器人控制系统功能完备性测试评价方法如表 1 所示。

表 1 工业机器人控制系统功能完备性测试评价表

序号	功能类型	功能描述	测试方法 ^b	测试结果
1	多机器人类型	支持多种机器人类型,并具备模型扩展性 ^a	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
2	运动模式	关节空间点位,笛卡尔空间点位,笛卡尔空间直线,圆弧及其他自定义模式	B	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
3	运动规划	使运动具有位置与时间的相关函数连续多阶可导的特性	B、C、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
4	坐标系计算	支持机座坐标系、绝对坐标系,工具坐标系,机械接口坐标系	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
5	路径混合	实现机器人在多样条曲线之间的不停顿圆滑过渡	B、C	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
6	多个扩展轴支持	机器人控制系统应具有规划多个外部扩展轴的功能	A、B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
7	插补	机器人控制系统支持直线插补、圆弧插补、样条曲线插补	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
^a 支持多种机器人类型包括一套控制系统可支持不同规格的机器人本体。 ^b 参见 6.1。				

6.4.2 准确性

评估与测试方法可以采用如下方法：

- a) 仿真测试(E)。按 GB/T 12642—2013 确定的测试轨迹的规划数据取出,位姿准确度、轨迹准确度、速度准确度的计算方式见 GB/T 12642—2013 中 7.2.1、8.2、8.6.2。
- b) 硬件在环仿真(F)。通过将被测件接入半实物仿真平台的方式,其余条件同 a) 仿真测试。

6.4.3 补偿精度

评估与测试方法可以采用如下方法：

- a) 仿真测试(E):
 - 1) 轨迹准确度、轨迹重复性:按 GB/T 12642—2013 中 8.2、8.3 分别对样机进行测试。
 - 2) TCP 绕点精度:设置机器人工作坐标系为工具坐标系,控制机器人绕 x 、 y 、 z 轴旋转,应尽可能使机器人沿各轴旋转到达正负极限,在进行旋转轴切换时,机器人应返回到初始位姿,每轴旋转过程中通过符合 GB/T 12642—2013 中测量设备均匀采样 30 个点。计算方法按 GB/T 12642—2013 中 7.2.1 中位置准确度的计算公式。试验条件汇总见表 2。

表 2 TCP 绕点精度试验条件

负 载	速 度	位 姿	循环次数
100％额定负载	100％额定速度 50％额定速度 10％额定速度	P ₁ ^a	30
10％额定负载(选用)	100％额定速度 50％额定速度 10％额定速度		
^a 按 GB/T 12642—2013 中图 6。			

- 3) 结果记录:应记录样机及负载的相关配置,应按 GB/T 12642—2013 中附录 C 进行结果记录。
- b) 硬件在环仿真(F)。通过将被测件接入半实物仿真平台的方式,其余条件同 a)。

6.4.4 节拍

评估与测试方法可以采用如下方法：

- a) 仿真测试(E)。在仿真模式下通过对典型运动轨迹见表 3 进行规划运动,在确保运动有效的前提下,尽量提高运动节拍,计算所有循环次数的平均时间为节拍。
- b) 硬件在环仿真(F)。通过将被测件接入半实物仿真平台的方式,其余条件同 a)。



表 3 节拍试验条件

负 载	速 度	位 姿 ^a	循环时间
100％额定负载	100％额定速度 50％额定速度 10％额定速度	节拍最优的位姿或 E ₁ —E ₄ —E ₃ —E ₂ 〔与 GB/T 12642—2013 要求过原点的平面 E ₁ 、E ₂ 、E ₃ 、E ₄ 距离平面各顶点的距离为该平面对角线长度的(10±2)％不同,在臂展可达的情况下应覆盖典型的长度为 25 mm(E ₁ E ₂)—300 mm(E ₁ E ₃)—25 mm(E ₃ E ₂)、100 mm(E ₁ E ₂)—800 mm(E ₄ E ₃)—100 mm(E ₃ E ₂)〕	连续运行 120 h
10％额定负载(选用)	100％额定速度 50％额定速度 10％额定速度		连续运行 120 h
^a E ₁ 、E ₂ 、E ₃ 、E ₄ 按 GB/T 12642—2013 图 6。			

6.4.5 平顺性

评估与测试方法可以采用如下方法:

- 仿真测试(E)。获取机器人控制系统规划数据,按 GB/T 12642—2013 中 8.2、8.3 分别测试轨迹准确度和轨迹重复性,按照 8.6 测试轨迹速度特性。
- 硬件在环仿真(F)。通过将被测件接入半实物仿真平台的方式,其余条件同 a)。

6.4.6 路径混合

评估与测试方法可以采用如下方法:

- 仿真测试(E)。获取机器人控制系统规划数据,仿真测试按 GB/T 12642—2013 中 8.5 的试验条件和计算方法来测试拐角偏差。
- 硬件在环仿真(F)。通过将被测件接入半实物仿真平台的方式,其余条件同 a)。

6.5 实时性测试评价

6.5.1 周期性响应

6.5.1.1 准备工作

周期性响应测试的准备工作如下:

- 测量工具:
 - 示波器:要求具有足够的带宽、信噪比、分辨率、时间准确度、信号保真度;
 - 误码率测试仪:时间抖动(Jitter)会导致接收误码,反过来,测得误码率可以推出 Jitter 的特性。
- 数据采集:
 - 使用示波器的采集方法:示波器内部往往采用软件的时钟恢复手段得到理想的边沿时刻,当然也可以采用外部高品质时钟源触发作为理想边沿时刻,此时示波器可以通过叠加生成眼图。通过对眼图的分析,从而得到 Jitter 的各种参数。
 - 使用误码率测试仪的采集方法:通常采用两个通道,将其中一个通道保持在眼图的中心位置,使用另一个通道完成误码率测试。通过误码率分析仪可以对眼图各个方向上进行扫描,得到眼图的清晰轮廓,对于分析 Jitter 可以提供很多有价值的参数。
- 处理方法
 - 统计特性和统计直方图:如前述的平均值、标准差等参数;

- 2) 时间曲线和频率谱;
- 3) 眼图。

6.5.1.2 插补周期响应

产品或系统执行其功能时,所使用资源数和类型满足需求的程度。机器人控制系统规划周期以最小精确定时精度为基本单位的整数倍,且运动规划任务不能被中断。保持较低的 CPU 占用率。

在被测件执行功能时,将其接入半实物仿真测试平台,验证其满足需求的程度。

6.5.1.3 通讯周期响应

机器人运动控制系统软件跟硬件之间的通讯遵循插补周期的准确性,包括运行规划软件的 CPU 和运动控制器 MCU 之间通讯周期、运动控制器 MCU 和伺服驱动器 MCU 之间的通讯周期、或者运行规划软件的 CPU 和伺服驱动器 MCU 之间的通讯周期都应保持稳定的通讯周期。

通过将其接入半实物仿真测试平台的方式,验证其遵循插补周期的准确性。

6.5.2 非周期性响应

6.5.2.1 概述

非周期响应测试通过硬件在环仿真的方式进行,测试项目包括控制稳定性、制动控制装置意外操作防护响应时间、急停响应时间、保护性停止响应时间、开机自检时间和故障检测时间。

6.5.2.2 控制稳定性

通过上位机设置伺服电机以最大转速运行,用示波器观察电机电流波形,记录从 0 加速到稳定的时间或从某一速度减至另一速度时间。

6.5.2.3 制动控制装置意外操作防护响应时间

在高资源占用的条件下,基于意外防护功能测试,在程序中预置监控点,通过示波器或者其他测量设备,对输入、输出监控点进行测量,获取并判断其响应时间是否满足规定。

6.5.2.4 急停响应时间

在高资源占用的条件下,基于急停功能测试,在程序中预置监控点,通过示波器或者其他测量设备,对输入、输出监控点进行测量,获取并判断其响应时间是否满足规定。

6.5.2.5 保护性停止响应时间

在高资源占用的条件下,基于保护性停止功能测试,在程序中预置监控点,通过示波器或者其他测量设备,对输入、输出监控点进行测量,获取并判断其响应时间是否满足规定。

6.5.2.6 开机自检时间

针对上电初始化过程,在程序中预置监控点,通过示波器或者其他测量设备,对输入、输出监控点进行测量,在不同初始化情况下,包括正常上电、复位重启、设备故障上电等,获取并判断其上电初始化时间是否满足规定。

6.5.2.7 故障检测时间

基于故障采集与防护功能测试,在程序中预置监控点,通过示波器或者其他测量设备,对输入、输出

监控点进行测量,获取并判断其故障出现到触发相关故障逻辑的时间是否满足规定。

6.6 扩展性与开放性测试评价

6.6.1 扩展性

工业机器人控制系统扩展性测试评价方法如表 4 所示。

表 4 扩展性测试评价表

序号	属 性	属性描述	测试方法 ^a	测试结果
1	现场总线支持	检查是否支持所声称的总线协议	B	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
2	工艺模块	检查是否支持工艺模块扩展功能	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
3	外部附加轴	检查是否支持外部附加轴以及所支持扩展的轴的数量	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
4	外部执行设备	检查是否支持外部执行设备接入	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
^a 参见 6.1。				

6.6.2 二次开放性

工业机器人控制系统二次开放性的测试评价方法如表 5 所示。

表 5 二次开放性测试评价表

序号	属 性	属性描述	测试方法 ^a	测试结果
1	二次开发接口	检查是否具有二次开发接口,在接口函数内完成机器人路径规划、速度规划、坐标系转换、运动学正逆解模块等	D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
2	数据输入输出接口	检查是否对用户开放不同运动模式下的数据输入输出接口	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
3	不同机器人模型计算	检查是否允许用户针对不同机器人模型进行计算	D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
4	工业标准接口	检查是否支持工业标准接口	B、D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
5	驱动程序	检查是否具备二次开发所用的驱动程序	D	是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>
^a 参见 6.1。				

6.7 可靠性测试评价

6.7.1 容错性

容错性的测试步骤如下:

a) 测试前准备:

- 1) 识别出机器人控制系统需要处理的外部输入种类,包括通信总线、离散量、模拟量、共享内存、全局变量、消息队列、数据库、配置文件以及人机交互等;

2) 分析外部输入中可能存在的异常情况以及机器人控制系统的处理逻辑;

示例 1:屏蔽非法输入并保持当前状态、对输入信号进行中值滤波和毛刺去除等。

3) 分析可能由外部输入的异常变化触发的工作状态或控制逻辑的容错保护。

示例 2:不可中断的动作执行过程中的不响应与当前动作相冲突的控制命令、互锁控制逻辑不满足时的状态保持等。

- b) 测试方法。针对识别出单个或多个外部输入,按其可能的异常情况设置测试输入数据后,查看机器人本体运动轨迹、故障状态信息或者分析输出信号,判断机器人控制系统是否能够识别、定位、记录相应的异常情况并按规定的处理逻辑进行容错防护。

6.7.2 可恢复性

可恢复性的测试步骤如下:

a) 测试前准备:

1) 识别出可能导致机器人控制系统中断或失效的触发条件;

示例:设备掉电、看门狗异常、过流或过压保护、操作系统异常、关键传感器或通信故障等。

2) 分析中断或失效的触发条件满足时,机器人控制系统重启后应恢复的数据和状态信息以及采取的动作,包括当前执行的现场状态(文件名、行号、必要的变量等)。



- b) 测试方法。预置已识别出的且能造成机器人控制系统中断或失效的条件为满足状态,查看机器人控制系统复位后或故障恢复后,机器人本体运动轨迹、工作状态显示等信息,判断机器人控制系统是否能够恢复直接受影响的数据并重建期望的工作状态。

6.8 安全性测试评价

6.8.1 故障采集与防护

故障采集与防护的测试步骤如下:

a) 测试前准备:

1) 列举出全部已知的故障并明确每类故障的触发条件和处理逻辑;

2) 确定每类故障的优先级,确保在多个故障的触发条件同时满足时的处理逻辑;

3) 能够预置条件使得已知的故障被触发并明确其故障记录和报告方式;

4) 明确每类故障的优先级,进而预置多个故障同时触发的条件。

- b) 测试方法。在确保可模拟实现的故障均出现的前提下,通过故障模拟的方式预置故障单独出现或多个故障同时出现的情况,查看机器人控制系统对故障的诊断结果是否正确,是否能够在规定的时间内识别出全部故障并将故障准确输出,并监控其执行的防护是否满足要求。检查控制系统是否有日志文件的记录功能,用户是否能够根据显示的报警信息来判断故障类型及故障原因。

在需求阶段确定工业机器人控制系统可能面临的故障类型时,应按 FMEA(见 GB/T 7826—2012)、FTA(见 GB/T 7829—1987 或 IEC 61025:2006)等故障分析程序。

6.8.2 限位保护

限位保护的测试要点和方法如下:

a) 测试前准备。覆盖控制系统中所有的限位保护。

示例:笛卡尔位姿限位、关节限位等。

- b) 测试方法。针对每个限位保护点,设置限位条件满足的场景,查看机械臂或运动部件达到异常位置或超出特定运行空间时是否立即停止且不能响应继续运动的指令动作。

6.8.3 空间监控

空间监控的测试要点和方法如下：

- a) 测试前准备。覆盖控制系统中机器人工具或法兰所处空间位置的监控功能，如工作空间监控、障碍物空间监控等。
- b) 测试方法。针对每种空间监控功能，设置监控条件满足的场景，查看机械臂或运动部件达到或超出特定运行空间时是否立即停止且不能响应继续运动的指令，或输出相应信号。

6.8.4 单点控制

测试方法见 GB 11291.1—2011 中 5.3.5。机器人控制系统的设计和制造应使在本机示教盒或其他示教装置控制下的机器人不能被任何别的控制源启动其运动或改变本机控制方式。

6.8.5 保护性停止

保护性停止的测试要点和方法如下：

- a) 测试前准备。覆盖所有能够触发保护性停止的场景。
- b) 测试方法。根据保护性停止的触发条件，模拟不同条件（安全距离逼近或降速门限突破等）的情况，查看软件是否控制机器人本体停止运动。

7 测试文档集要求

测试文档集要求参见 GB/T 25000.51—2016 第 6 章。

8 符合性评价细则

符合性评价细则要求参见 GB/T 25000.51—2016 第 7 章。



附 录 A
(资料性附录)
机器人操作系统

A.1 概述

工业机器人运行的嵌入式实时操作系统,其功能、性能和开发环境见 A.2~A.4。

A.2 操作系统功能

A.2.1 内核

内核功能如下:

- a) 操作系统提供任务管理、中断管理、定时管理、任务间通信、内存管理等功能,支持操作系统组件的可裁剪配置;
- b) 支持多任务的统一调度,任务管理支持多种任务调度机制;
- c) 支持信号量、消息队列、事件和异步信号机制,满足任务间通信以及同步和互斥;
- d) 支持高精度时钟,用以提供纳秒级的计时手段。

A.2.2 文件系统

文件系统功能如下:

- a) 支持 RamDisk、硬盘、Flash、存储卡等存储介质;
- b) 支持多种文件系统,实现文件存取、管理等功能。

A.2.3 模块动态加/卸载

支持模块动态加/卸载功能,允许用户通过网络、串口或 USB 等通讯方式将功能扩展模块或系统升级模块加载到系统,实施动态链接与配置,提高系统的开发效率和升级维护能力。

A.2.4 网络协议栈

网络协议栈功能如下:

- a) 提供符合标准的 TCP/IP 网络协议栈,支持 TCP、UDP、IP、ICMP 和 ARP 等网络协议,提供标准 socket 编程接口;
- b) 可支持典型的 Internet 应用协议,如:HTTP、FTP、TFTP、Telnet、SNMP、SSH 等协议及相关服务;
- c) 支持 IPv4、IPv6 配置。

A.2.5 USB 协议栈

USB 协议栈功能如下:

- a) 支持 USB1.1/2.0 协议,支持 UHCI、OHCI 和 EHCI 多种控制器;
- b) 支持 U 盘存储设备以及鼠标、键盘等人机交互接口设备的即插即用,支持 USB 接口转串口的驱动。

A.2.6 图形系统

图形操作系统功能如下：

- a) 支持图形解决方案,提供窗口管理器,支持窗口的最大化、最小化、前后台切换以及移动等;
- b) 支持硬件图形加速,实现图形系统的高效绘制。

A.2.7 硬件抽象及板级支持

硬件抽象及板级支持如下：

- a) 支持处理器以及板级配置的抽象,支持硬件平台的扩展;
- b) 具备根据需求对 PCI/PCI-E、USB、SPI、I2C、eMMC、SRIO、CAN、485 等多种总线,以及各类工业实时以太网、通用以太网、存储以及图形显示设备予以扩展的能力。

A.3 操作系统的性能

在可能的情况下,操作系统的性能满足：

- a) 中断响应时间(1 GHz 以上主频) $<1\text{ }\mu\text{s}$;
- b) 任务上下文切换时间(1 GHz 以上主频) $<2\text{ }\mu\text{s}$;
- c) 消息队列收发时间(1 GHz 以上主频) $<2\text{ }\mu\text{s}$ 。

A.4 集成开发环境

A.4.1 工程管理

集成开发环境的工程管理如下：

- a) 支持工作空间内的多工程管理,支持工作空间的切换,工程的创建、导入/导出、打开/关闭等;
- b) 提供不同类型的工程支持操作系统配置与镜像生成、动态加载库生成、静态库生成以及用户自定义 Makefile 的编译;
- c) 工程内支持 C/C++ 源代码文件、二进制文件、各种文本格式类文件以及图片、配置文件等各类资源的展现及分类管理;
- d) 工程可支持多个目标平台的工具链切换,在同一工程下实现多个目标平台不同二进制目标文件的生成。

A.4.2 构建管理

集成开发环境的构建管理如下：

- a) 支持编译工具链的集成与扩展,提供可视化的编译配置界面,支持默认的编译配置;
- b) 支持项目以及单个源文件的编译,支持编译信息的呈现。

A.4.3 系统配置

集成开发环境的系统配置如下：

- a) 提供图形化的操作系统资源配置工具,支持操作系统硬件适配层、核心层、扩展组件以及应用程序的可视化裁剪和参数配置;
- b) 提供扩展手段,支持用户将扩展或自定义的资源,如定制驱动或第三方库,实现模块封装并导入至配置工具。

A.4.4 目标机管理

支持集成开发环境与目标机的互连,支持目标机参数配置以及连接启动和关闭等功能。

A.4.5 调试诊断

集成开发环境的调试诊断功能如下:

- a) 提供基本的软件调试工具,支持单步跳入、单步跳过、运行和停止等功能;
- b) 支持多种目标平台的调试,并可按需集成 JTAG 调试器;
- c) 提供各类调试视图,实时显示任务栈、变量、寄存器、内存、模块等信息,支持断点和表达式查看和设置。

A.4.6 辅助开发功能

集成开发环境的辅助开发功能如下:

- a) 支持控制台环境,控制台内可支持命令行编译开发以及 GDB 调试等,支持 Telnet 连接目标机;
- b) 支持内置的目标机仿真运行环境,支持应用仿真运行和调试。

A.4.7 帮助系统

集成开发环境的帮助系统如下:

- a) 提供应用开发编程指南、参考手册以及开发环境使用手册等技术资料,支持章节的索引和内容的关键字检索;
- b) 提供示例工程,支持用户选择相应的工程并直接导入。

参 考 文 献

- [1] GB/T 12643—2013 机器人与机器人装备 词汇
 - [2] GB/T 11457—2006 信息技术 软件工程术语
 - [3] GB/T 25000.10—2016 系统与软件工程 系统与软件质量要求和评价(SQaRE) 第10部分:系统与软件质量模型
 - [4] GB/T 25000.51—2016 系统与软件工程 系统与软件质量要求和评价(SQaRE) 第51部分:就绪可用软件产品(RUST)的质量要求和测试细则
 - [5] ISO/IEC 25023:2016 Systems and software engineering—Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQaRE)—Measurement of system and software product quality
-

