

T/CRSS

重庆市机器人学会团体标准

T/CRSS XXXX—XXXX

工业机器人 动态稳定性 试验方法

Industrial Robot- Dynamic stability-Testing Methods

(征求意见稿)

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。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

重庆市机器人学会 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 试验条件及方法	4
4.1 试验条件及设备	4
4.2 试验方法	5
附录 A（资料性） 试验报告实例	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。

本文件由重庆市机器人学会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

工业机器人 动态稳定性 试验方法

1 范围

本文件规定了工业机器人动态稳定性的术语和定义，技术要求、试验条件、试验方法（试验结果计算规则）。

本文件适用于串联型工业机器人，通用六轴、SCARA、码垛、六轴协作、七轴等各类工业机器人。

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 1182-2018 产品几何技术规范(GPS) 几何公差 形状、方向、位置和跳动公差标注

GB/T 12642-2013 工业机器人 性能规范及其试验方法

GB/T 12643-2013 机器人与机器人装备 词汇

GB/T 12644-2001 工业机器人 特性表示

GB/T 16977-2019 机器人与机器人装备 坐标系和运动命名原则

GB/T 20868-2007 工业机器人 性能试验实施规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

动态稳定性 dynamic stability

动态稳定是指电力系统受到小的或大的扰动后，在自动调节和控制装置的作用下，保持较长过程的运行稳定性的能力。本标准中指的是工业机器人运动过程中，受到自身的振动影响，在自动调节和控制装置的作用下，保持较长过程的运行稳定性的能力。

3.2

抖动频率 jitter frequency

信号的某特定时刻相对于其理想时间位置上的短期偏离为抖动，抖动产生的主要频率点，即为抖动频率。

3.3

抖动位移 Jitter displacement

信号的某特定时刻相对于其理想时间位置上的短期偏离为抖动，由抖动产生的工业机器人位置变化，即为抖动位移。

3.4

额定负载 rated load

正常条件下，作用于机械接口且不会使RA设备性能降低的最大负载。

[GB/T 12643-2013, 6.2.2]

3.5

额定速度 rated velocity

正常工作时，允许工业机器人达到的最大速度。

3.6

位置稳定时间 position stabilization time

位置稳定时间是从机器人第一次进入门限带的瞬间到不再超出门限带的瞬间所经历的时间，门限带可定义为位姿重复性或由制造商制定。

[GB/T 12642-2013, 7.4]

3.7

位置超调量 position overshoot

位置超调量是机器人第一次进入门限带再超出门限带后瞬时位置与实到稳定位置的最大距离。

[GB/T 12642-2013, 7.5]

3.8

拐角偏差 corner deviation

拐角点与实到路径间的最小距离。

[GB/T 12642-2013, 8.5]

3.9

拐角超调 corner overshoot

机器人不减速地以设定恒定路径速度进入第二条路径后偏离指令路径的最大值。

[GB/T 12642-2013, 8.5.2]

3.10

路径抖动频率 path jitter frequency

工业机器人从静态开始执行全关节参与运动的路径后，机器人末端抖动的最大位移时的频率。

3.11

路径抖动位移 path jitter displacement

工业机器人从静态开始执行全关节参与运动的路径后，机器人末端抖动的最大位移，用峰-峰值表示。

3.12

单轴抖动频率 uniaxial jitter frequency

工业机器人从静态开始执行单一关节参与运动的路径后，机器人末端及此关节抖动的最大位移时的频率。

3.13

单轴抖动位移 uniaxial jitter displacement

工业机器人从静态开始执行单一关节参与运动的路径后，机器人末端及此关节抖动的最大位移，用峰-峰值表示。

3.14

固有频率 natural frequency

工业机器人整机系统的固有频率（固有频率也叫共振频率），记录前4阶（如有）固有频率值。

3.15

路径直线度 path straightness

路径直线度即直线度公差带，为直径等于公差值 ϕI 的圆柱面所界定的区域。

[GB/T 1182-2018, 17.2]

3.16

路径圆度 path roundness

路径圆度即圆度公差带，为在给定横截面内，沿表面距离为 t 的两个圆锥面上的圆所限定区域。

[GB/T 1182-2018, 17.4]

4 试验条件及方法

4.1 试验条件及设备

4.1.1 工作环境条件

除非制造商另有规定, 工业机器人的工作环境条件应满足:

- a) 环境温度: $5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$;
- b) 相对湿度: $45\% \sim 75\%$;

c) 大气压力:86kPa~106kPa;

4.1.2 场地要求

测量设备不应放在靠近热源, 空调出风口、窗口、门口、地板接缝处及阳光能够直射到的地方。工作地周围不应有大型机械及车辆工作, 不应有明显振动, 周围无强电磁场、无腐蚀性液体。

4.1.3 测量设备

测量设备应满足以下:

- 1) 激光跟踪仪或坐标测量机或光学相机或直线位移法测量系统;
- 2) 动态信号分析仪: 分析带宽为 (DC~20) kHz, 准确度等级为 A 级;
- 3) 三轴向或单轴向加速度计: 频率范围为 (DC~400) Hz, 测量不确定度 $U_{rel}=2\%$ ($k=2$);
- 4) 电荷放大器: 准确度等级为二级。

4.1.4 测试路径选择

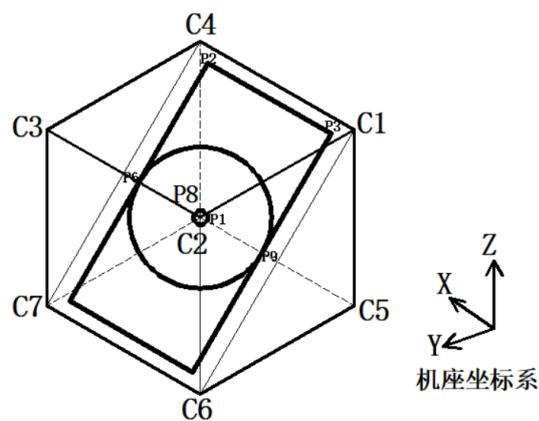


图1 测试路径选择

测量路径的选择应满足以下推荐:

- 1) 试验轨迹应位于图 1 所示的平面, 或由制造商指定选用哪个测量面。
- 2) 在动态稳定性测量时, 机械接口的中心位置应位于选用平面上, 且姿态相对于该平面应保持不变。
- 3) 图 1 给出了在试验平面上的一条直线轨迹和两条圆形轨迹的位置示例。
- 4) 在立方体对角线上的直线轨迹, 轨迹长度应是所选平面相对于顶点间距离的 80%, 如图 1 中 P2 到 P4 的距离是一实例。
- 5) 对于圆形轨迹试验, 需测试两个不同的圆, 见图 1, 大圆的直径应为立方体边长的 80%, 圆心为 P1; 小圆的直径应为同一平面中大圆直径的 10%, 圆心为 P1。

4.2 试验方法

4.2.1 位置稳定时间

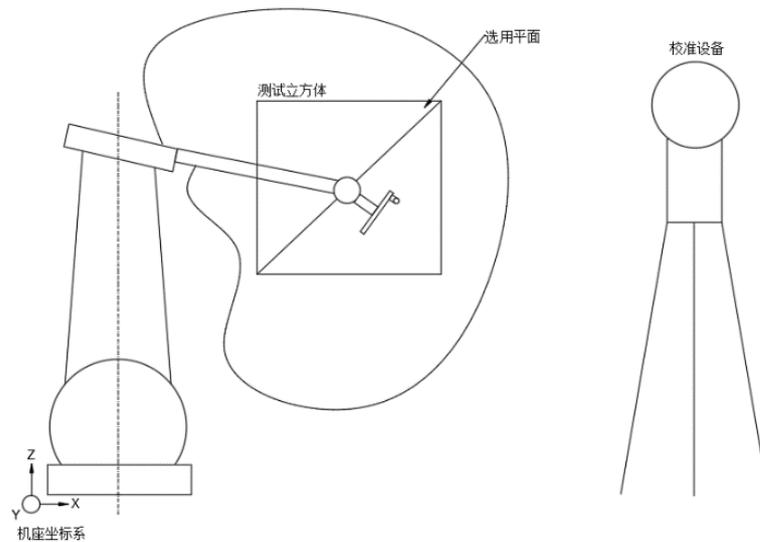


图2 位置稳定时间

本项目测试步骤如下：

- 1) 工业机器人与测量设备布局参考图 2 位置摆放，工业机器人和测量设备之间应没有障碍物。
- 2) 按 4.1.4 方法选择机器人测试平面，并选择 P1 点进行位置稳定时间的测量。
- 3) 机器人按表 5.2.1 的试验条件进行测试。

表1 位置稳定时间

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	3
额定负载降至 10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

d) 从位姿点P2开始，将机械接口以额定速度（或其50%、10%）移至P1，再回到P2，为一个运动循环。运动时采用连续轨迹控制即可。

e) 使用测量设备记录数据路径并生成位置稳定时间结果。

注：注：门限带由制造商制定，可参考工业机器人位置重复性。

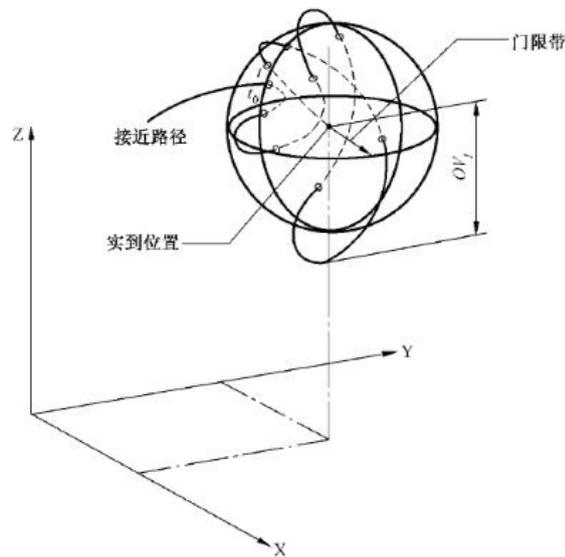


图3 位置稳定时间

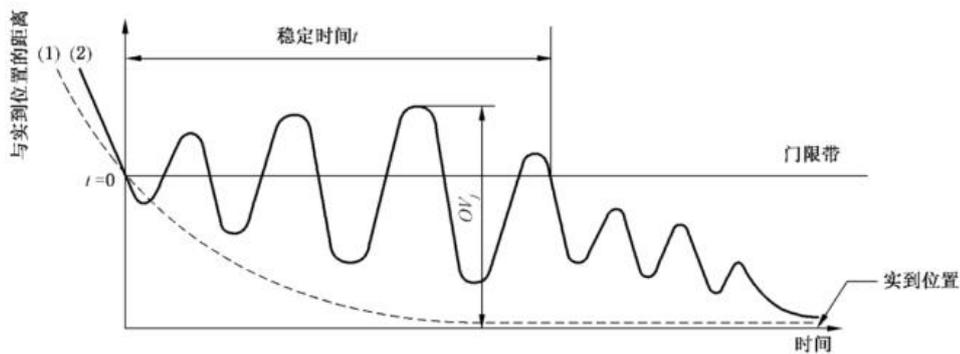


图4 位置稳定时间

4.2.2 位置超调量

如不另外说明，此项测试可与4.2.1同步进行，按公式 (1) ~ (2) 计算位置超调量。

$$OV = \max OV_j \dots\dots\dots (1)$$

$$OV_j = \max D_{ij} \text{当 } \max D_{ij} > \text{门限带}$$

$$OV_j = 0 \text{当 } \max D_{ij} \leq \text{门限带}$$

$$\max D_{ij} = \max \sqrt{(x_{ij} - x_j)^2 + (y_{ij} - y_j)^2 + (z_{ij} - z_j)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \dots\dots\dots (2)$$

式中

i——表示机器人进入门限带后测量的采样点号；

对于某些特殊应用，OV也可用其分量OV_x、OV_y、OV_z来表示。

注：曲线(1)：过阻尼接近示例，超调量为0；

注：曲线(2)：振荡接近示例，有OV_j存在。

4.2.3 拐角偏差

本项目测试步骤如下：

a) 工业机器人与测量设备布局参考图2位置摆放，工业机器人和测量设备之间应没有障碍物。

- b) 按4.1.4方法选择机器人测试平面，并选择拐角点（P2-P3-P4-P5）进行拐角偏差的测量。
c) 机器人按表2的试验条件进行测试。

表2 拐角偏差

负载	速度	拐角	循环次数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	E1-E2-E3-E4	3

d) 通过连续路径编程，使机器人运行一条矩形指令路径，以P2和P5的中点作为起点，将机械接口以额定速度（或其50%、10%）直线地移向E1，再移至E3、E4、E5然后回到P2和P5的中点，完成一个循环。

e) 若不另外说明，姿态是垂直于矩形轨迹平面的。

f) 四个拐角均应测量，按公式 (3)~(6) 计算拐角偏差。

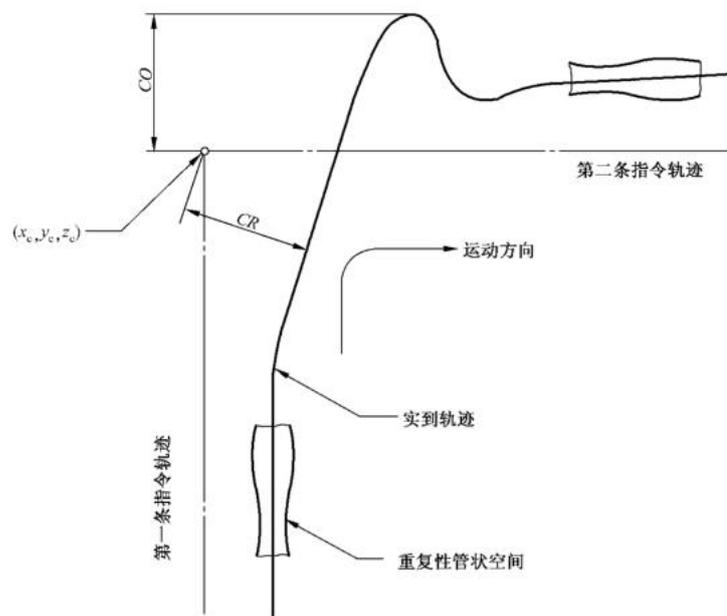


图5 拐角偏差

拐角误差(CR)计算公式如下:

$$CR = \max CR_{j=1, 2, 3, \dots} \quad (3)$$

$$CR_j = \min \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2 + (z_e - z_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中:

x_e, y_e, z_e ——指令拐角点的坐标;

x_i, y_i, z_i ——实到路径上的指令拐角附近第*i*个点的坐标。

4.2.4 拐角超调

如不另外说明，此项测试可与4.2.3同步进行，按公式 (5) ~ (6) 计算位置超调量。

拐角超调(CO)由下式计算:

$$CO = \max CO_{j=1, 2, 3, \dots} \quad (5)$$

$$CO_j = \min \sqrt{(x_{ci} - x_i)^2 + (y_{ci} - y_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中:

x_{ci} 、 y_{ci} ——指令路径上对一个与 Z_{ci} 的点的坐标；

x_i 、 y_i ——实到路径上对一个与 Z_i 的点的坐标。

此公式仅当 $(y_{ci} - y_i)$ 为负时才是正确的，若 $(y_{ci} - y_i)$ 为正，则不存在拐角超调。

4.2.5 路径抖动频率

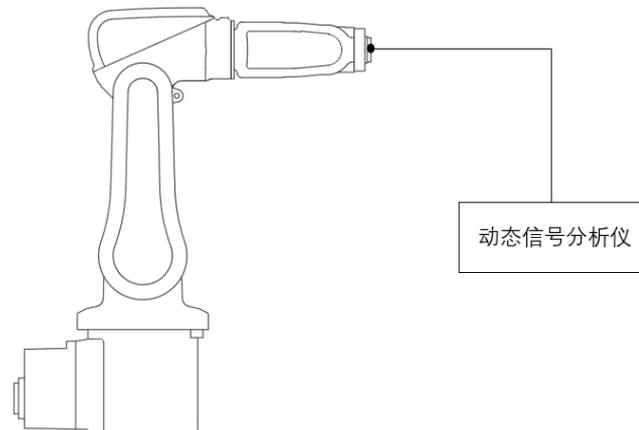


图6 路径抖动频率

本项目测试步骤如下：

- 在机器人回零状态下，将三轴向加速度计刚性连接在机器人的末端中心（见图6的测点位置），使三轴向加速度计的X、Y、Z方向与机座坐标系重合。
- 加速度计通过连接至多通道动态信号分析仪。
- 按表3的试验条件进行校准。

表3 路径抖动频率

负载	速度	轨迹形状	循环次数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	直线轨迹 P2—P4 圆形轨迹 大圆和小圆	3
额定负载降至10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

d) 机器人的编程使机器人运行一条轨迹，轨迹选择参考4.1.4，在轨迹起点和终点位置分别停顿数秒。

e) 开启机器人运行，动态信号分析仪实时记录运动过程中的数据。

f) 分别读取（或计算）机器人末端3个方向的路径抖动频率。循环运行3次，计算3次循环的平均值。

g) 如有需要，可自行截取部分路径进行分析，如启动/平稳运行/停止阶段。

4.2.6 路径抖动位移

如不另外说明，此项测试可与4.2.5同步进行，最后分别读取（或计算）机器人末端3个方向的路径抖动位移。循环运行3次，计算3次循环的平均值。

4.2.7 单轴抖动频率

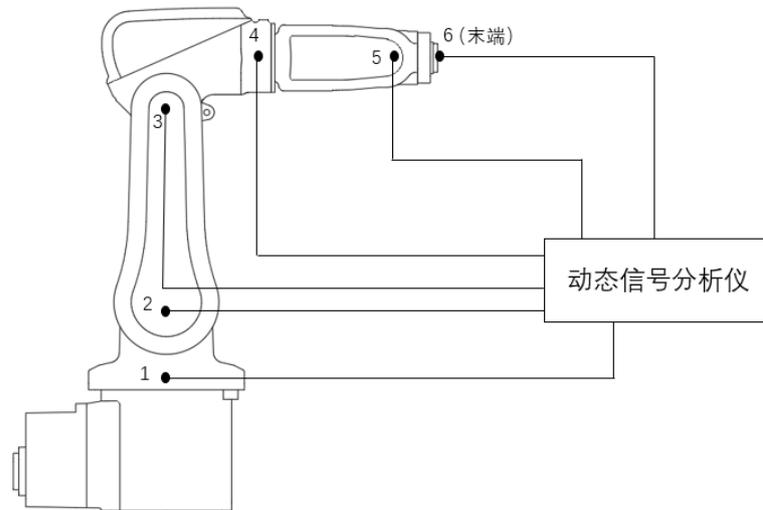


图7 单轴抖动频率

- a) 在机器人回零状态下，将三轴向加速度计刚性连接在机器人的各轴中心（见图7的测点位置），使三轴向加速度计的X、Y、Z方向与机座坐标系重合。
- b) 加速度计通过连接至多通道动态信号分析仪。
- c) 按表4的试验条件进行校准。

表4 路径抖动频率

负载	速度	轨迹形状	循环次数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	依据4.2.4轨迹进行各轴分解，单独运动每一轴所在的关节旋转角度	3
额定负载降至10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

- d) 机器人的编程使机器人运行一条轨迹，轨迹选择参考4.1.4，在轨迹起点和终点位置分别停顿数秒。
- e) 开启机器人运行，动态信号分析仪实时记录运动过程中的数据。
- f) 分别读取（或计算）机器人末端3个方向的路径抖动频率。循环运行3次，计算3次循环的平均值。
- g) 如有需要，可自行截取部分路径进行分析，如启动/平稳运行/停止阶段。

4.2.8 单轴抖动位移

如不另外说明，此项测试可与5.2.7同步进行，最后分别读取（或计算）机器人各轴的抖动位移。循环运行3次，计算3次循环的平均值。

4.2.9 固有频率（共振频率）

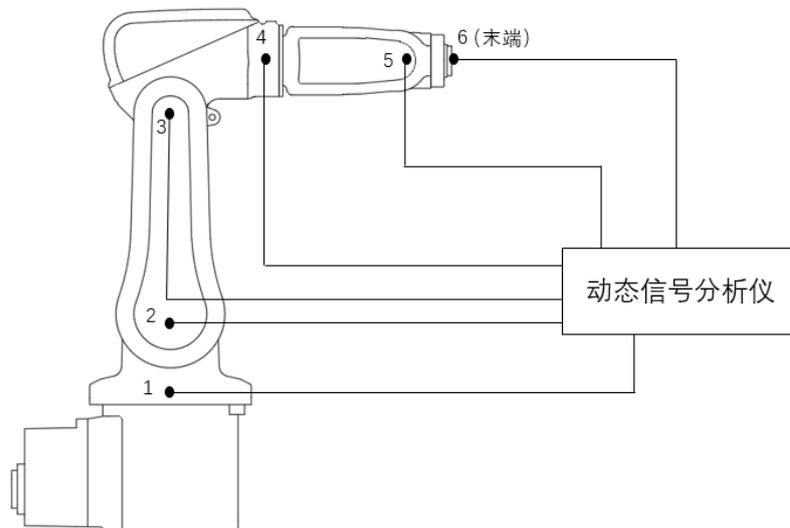


图8 固有频率

本项目测试步骤如下：

- a) 在机器人回零状态下，将三轴向加速度计刚性连接在机器人的末端中心（见图8测点位置），使三轴向加速度计的X、Y、Z方向与机座坐标系重合。
- b) 加速度计连接至多通道动态信号分析仪。
- c) 被测机器人的伺服系统通电、制动器脱开。按表5的试验条件进行测量。

表5 固有频率试验条件

负载	机器人形态
100%额定负载	1. 零位状态 2. 机器臂展开与水平成45° 的一条线的状态
额定负载降至10% (选用)	

d) 固有频率测试可采用激振器激励法和冲击激励法，本规范推荐冲击激励法。用力锤沿Y方向定点敲击工业机器人的末端，向工业机器人提供一个瞬态的冲击力，动态信号分析仪拾取三向加速度响应。

e) 进行3-5次频域平均，得到频率响应函数，按频率值从小到大依次读取前面4阶（如有）极大值点为固有频率值。

f) 将被校机器人的机器臂展开与水平成45° 的一条线的状态，重复上述步骤，记录固有频率值。

4.2.10 路径直线度

本项目测试步骤如下：

- a) 工业机器人与测量设备布局参考图2位置摆放，工业机器人和测量设备之间应没有障碍物。
- b) 按4.1.4方法选择机器人测试平面，并选择路径E1-E3进行路径直线度测试。
- c) 机器人按表6的试验条件进行测试。

表6 路径直线度

负载	速度	轨迹形状	循环次数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	直线轨迹 P2—P4	3
额定负载降至10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

d) 从路径点P2开始，将机械接口以额定速度（或其50%、10%）移至P4，再回到P2，为一个运动循环。运动时采用连续轨迹控制即可。

e) 测量设备记录数据路径并生成路径直线度结果。

f) 循环运行3次，计算3次循环的平均值。

4.2.11 路径圆度

本项目测试步骤如下：

a) 工业机器人与测量设备布局参考图2位置摆放，工业机器人和测量设备之间应没有障碍物。

b) 按4.1.4方法选择机器人测试平面，并选择路径P2-P4进行路径直线度测试。

c) 机器人按表7的试验条件进行测试。

表7 路径圆度

负载	速度	轨迹形状	循环次数
100%额定负载	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度	圆形轨迹 大圆和小圆	3
额定负载降至10% (选用)	100%额定速度 50%额定速度 10%额定速度		

d) 从路径圆起点开始，将机械接口以额定速度（或其50%、10%）回到起点，为一个运动循环。运动时采用连续轨迹控制即可。

e) 测量设备记录数据路径并生成路径圆度结果。

f) 循环运行3次，计算3次循环的平均值。

4.3 试验结果

试验报表填写要求参见附录A。

附录 A (资料性) 试验报告实例

机器人 控制系统

制造商:	类型:
型号:	系列号:
安装方向:	软件版本:
编程方法:	试验场所:

物理环境

环境温度:	
不正常状态:	
注:对超出预期范围状态的说明	
预热时间:	测量时间:
测量停顿时间:	

测量系统

类型:	型号:
系列号:	说明:

试验条件

额定负载条件:	
质量(kg)	重心位置(坐标 LX ,LY ,LZ)
惯性矩(kg/m ²)	测量点位置(坐标 XMP, YMP, ZMP)
按 CRIA/ XXXX-2022 所进行的试验	
<input type="checkbox"/> 位置稳定时间	<input type="checkbox"/> 位置超调量
<input type="checkbox"/> 拐角误差	<input type="checkbox"/> 拐角超调
<input type="checkbox"/> 路径抖动频率	<input type="checkbox"/> 路径抖动位移
<input type="checkbox"/> 单轴抖动频率	<input type="checkbox"/> 单轴抖动位移
<input type="checkbox"/> 固有频率(共振频率)	<input type="checkbox"/> 路径直线度
<input type="checkbox"/> 路径圆度	

试验者:	日期:
审核者:	日期:

试验结果表

表 A 1 位置稳定时间

负载	速度	门限带	稳定时间 (s)
100%额定负载, 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度		
10%额定负载, 或机器人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度		

表 A 2 位置超调量

负载	速度	门限带	超调量(mm)
100%额定负载, 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和 / 或 10%额定速度		
10%额定负载, 或机器人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和 / 或 10%额定速度		

表 A 3 拐角偏差

负载	速度	被测点位	拐角误差 (mm)
100%额定负载, 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度	E1	
		E2	
		E3	
		E4	

表 A 4 拐角偏差

负载	速度	被测点位	拐角误差 (mm)
100%额定负载, 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度	E1	
		E2	
		E3	
		E4	

表 A 5 路径抖动频率

负 载	速 度	路径形状	频 率 (Hz)
100%额定负载， 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和 /或 10%额定速度	直线	
		大圆	
		小圆	
10%额定负载， 或机器人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和 /或 10%额定速度	直线	
		大圆	
		小圆	

表 A 6 路径抖动位移

负 载	速 度	路径形状	位 移 (mm)
100%额定负载， 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和 /或 10%额定速度	直线	
		大圆	
		小圆	
10%额定负载， 或机器人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和 /或 10%额定速度	直线	
		大圆	
		小圆	

表 A 7 单轴抖动频率

负 载	速 度	路径形状	一轴	二轴	三轴	四轴	五轴
100%额定负载，或 机器人能承受的最大负载	100%和 50%和 / 或 10%额定速度	直线					
		大圆					
		小圆					
10%额定负载，或机 器人能承受的最大 负载的 10%	100%和 50%和 / 或 10%额定速度	直线					
		大圆					
		小圆					

表 A 8 单轴抖动位移

负 载	速 度	路径形状	一轴	二轴	三轴	四轴	五轴
100%额定负载，或 机器人能承受的最大负载	100%和 50%和 / 或 10%额定速度	直线					
		大圆					
		小圆					
10%额定负载，或机 器人能承受的最大 负载的 10%	100%和 50%和 / 或 10%额定速度	直线					
		大圆					
		小圆					

表 A 9 固有频率

负 载	机器人形态	固有频率/共振频率 (HZ)			
		一阶	二阶	三阶	四阶
100%额定负载, 或机器人能承受的最大负载	零位状态				
	机器臂展开与水平成45° 的一条线的状态				
10%额定负载, 或机器人能承受的最大负载的 10%	零位状态				
	机器臂展开与水平成45° 的一条线的状态				

表 A 10 路径直线度

负 载	速 度	直 线 度
100%额定负载, 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度	
10%额定负载, 或机器人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度	

表 A 11 路径圆度

负 载	速 度	圆 度
100%额定负载, 或机器人能承受的最大负载	100%和 50%和/或 10%额定速度	
10%额定负载, 或机器人能承受的最大负载的 10%	100%和 50%和/或 10%额定速度	