

JIDIAN CHANPIN KAIFA SHEJI
& ZHIZAO JISHU BIAOZHUN
SHIYONG SHOUC

机电产品开设计 与制造技术标准

实用手册

◎主编：刘 力◎

世图音像电子出版社

《机电产品开发设计 与制造技术标准实用手册》

(第三卷)

世图音像出版社

第三卷

第五篇

工业自动化

第一章 工业机器人

第一节 工业机器人及其分类

一、工业机器人的发展现状

(一) 工业机器人

“机器人”在英语中称 Robot。第一次提出“Robota”这一专用名词。现代英语中“Robot”一词就是从“Robota”衍生而来。

20 世纪中期,随着计算机、自动化技术和原子能技术的发展,现代机器人开始得到研究和发展。工业机器人是工业生产中使用的机器人。

在工业机器人出现之前,一种具有和人手臂相似的动作功能,可在空间抓放物体或进行其他操作的机械装置——操作机,已广泛用于工业生产中。

工业机器人是一种能自动控制、可重复编程、多功能、多自由度的操作机。能搬运材料、工件或操作工具,用以完成各种作业。

工业机器人与其他专用自动机的主要区别在于,专用自动机是适应于大量生产的专用自动化设备,而工业机器人是一种能适应产品种类变更,具有多自由度动作功能的柔性自动化设备。

(二) 工业机器人技术的进展

早在 1954 年美国乔治·德沃尔首次设计出第一台电子程序可编的工业机器人,并于 1961 年发表了该项专利。1962 年美国万能自动化(Unimation)公司的第一台 Unimate 机器人在美国通用汽车公司投入使用,标志着第一代机器人的诞生。从此,机器人开始成为人类生活中的现实。1967 年日本从美国引进第一台工业机器人之后,工业机器人在日本得到迅速的发展。目前在日本使用的工业机器人约占欧美各国使用机器人总台数的 1/6 强,已成为世界上工业机器人产量和拥有量最多的国家。

80 年代开始,世界上生产技术已从大量生产自动化时代进入小批量多品种生产自动化时代,即 FMS 时代,FA (Flexible Automation) 时代。工业机器人在这个新时代中,

起着十分重要的作用。此外，机器人在各种危险、恶劣作业中，也有广阔的应用前景。

第一代机器人一般是指目前工业上大量应用的可编程机器人，它在世界工业发达国家中已被广泛应用于各行业中。随着机器人技术的发展，1982年美国通用汽车公司在装配线上为机器人装备了视觉系统，从而宣告了新一代感知机器人的问世。第三代机器人不仅具有感知功能，而且还具有一定决策及规划能力，即所谓的自治式机器人，这灯机器人目前尚处在实验室研制阶段。

我国机器人研究工作起步较晚，从“七五”开始国家重大科技攻关计划和高技术发展计划中均列有机器人的研制及技术攻关项目，现在我国机器人技术正在兴起，工业机器人产业正在逐渐形成。

二、工业机器人的构成

（一）机器人的构成

一个较完善的机器人，大致可划分为下面几个组成部分：操作机、控制装置和传感器系统等，如图 1-1 所示。操作机：通常由是安装在机体上的若干个回转（或移动）关节与杆件相互联接构成的多自由度主动机构组成，人们力图把它设计成具有拟人的手臂或动物肢体动作功能的一种固定式或移动式的机器。它可由操作者、电子式可编程控制装置进行控制。控制装置包括：人-机接口装置（键盘、示教盒、操纵杆等），具有存贮记忆功能的电子控制装置（计算机、PLC 或其他可编程逻辑控制装置），各种传感器的信息放大、传输及信息处理装置，速度、位置伺服驱动系统（交、直流 PWM、电-液伺服系统或其他继电驱动系统等）与外部设备、传感器、离线编程设备等通信的输入/输出接口以及各种电源装置等。传感器：用于测量机器人自身运动速度、位姿及加速度的传感器，称内部传感器；用于感受和测量外部环境信息和作业对象工况的传感器，称外部传感器。

（二）操作机的构成

操作机是机器人的机械本体机构，视其应用目的和条件各异，其结构形式也是多种多样的，一般可分为固定式的和移动式的两类。固定式的操作机由机体、手臂、手腕和末端执行器组成。末端执行器是直接执行作业的装置（如夹持器、作业工具、传感器等）。末端执行器通过机械接口与手腕联接。手腕用于支承和调整末端执行器的姿态。手臂与手腕的末端连接，手臂由主动关节（由驱动器驱动的关节称主动关节）和连杆组成，用来支承手腕和末端执行器并调整其位置。手臂安装在机体上，作为固定式的操作机的机体和机座成为一个整体。

图 1-2 示出了固定式操作机的示意图。图中表明，前三个主动关节分布在手臂上，后三个主动关节分布在水腕上。如图中所示各关节运动是用电机来驱动。一般电机驱动力很小，转速快，应采用减速装置。这种驱动方式称为间接驱动方式。采用大力矩电机

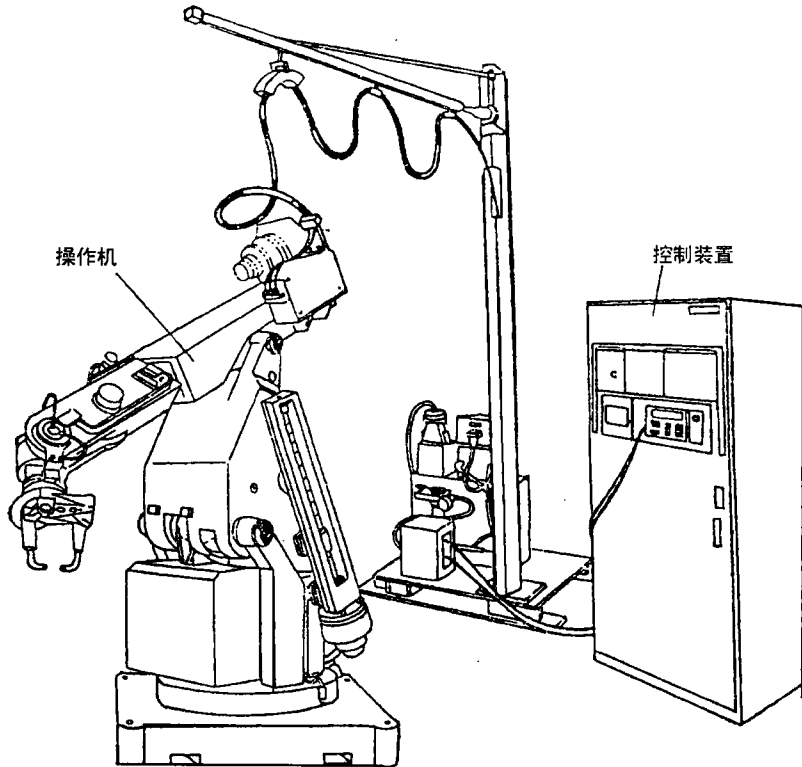


图 1-1 机器人系统的组成

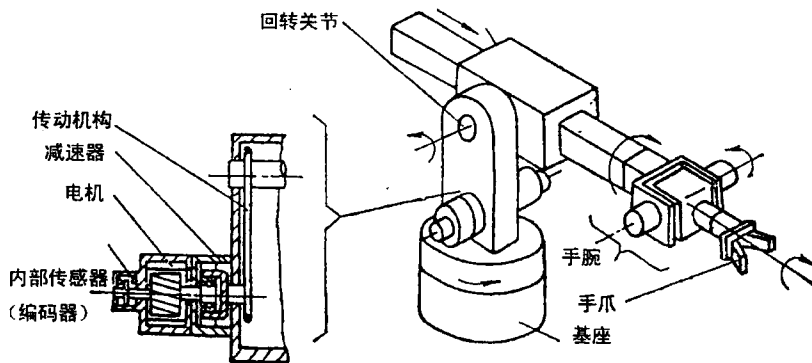


图 1-2 操作机的组成

直接驱动各关节运动的称为直接驱动机器人。

移动式的操作机，除具有（也可有具备）固定式操作机所包含的机构外，必须具有移动机构（或称为行走机构）。制造业用的工业机器人的移动机构，多为在固定导轨上移动的轮式机构。电磁式或光电式导引自动导引车（AGV）也多为轮式移动机构。具有特种用途的移动机器人，其移动机构有轮式、履带式 and 步行式几类。

三、工业机器人的分类

工业机器人可按技术进程、坐标型式、驱动方式、控制方式、用途等进行分类。

1. 按机器人技术发展进程分类

按机器人技术发展进程分类见表 1-1

表 1-1 按技术发展进程分类

名称	说 明
第一代机器人（可编程机器人及遥控操作机）	可编程机器人可根据操作人员所编程序完成一些简单重复性作业。遥控操作机的每一步动作都要靠操作人员发出
第二代机器人（感知机器人）	它带有外部传感器，可进行离线编程。能在传感系统文件下，具有不同程度感知环境并自行修正程序功能
第三代机器人（自治式机器人）	它不仅具有感知功能，还具有一定决策和规划的能力。能根据人的命令或按照所处环境，自行作出决策、规划动作，即接任 J 编程

2. 按手臂机械结构形式分类

机器人手臂机械结构形式（即坐标型式）主要有如下几种，见表 1-2。

3. 按驱动方式分类

工业机器人按驱动方式可分为：液压式工业机器人；气动式工业机器人；电动式工业机器人。

4. 按控制方式分类

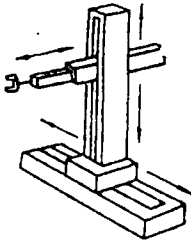
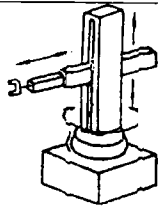
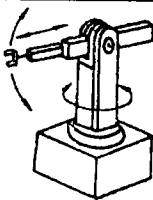
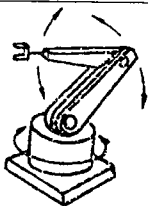
工业机器人可分为：点位控制工业机器人；连续轨迹控制工业机器人。

5. 按用途分类

工业机器人可分为喷涂机器人；焊接机器人；装配机器人等。

表 1-2

按机械结构形式分类

名 称	说 明	图 例
直角坐标型机器人	操作机的手臂按直角坐标形式动作	
圆柱坐标型机器人	操作机的手臂按圆柱系统形式动作	
球坐标型机器人	操作机的手臂按球坐标形式动作	
关节型机器人	操作机的手臂类似人的上肢关节动作	

四、工业机器人主要特性参数

工业机器人具体特性参数可参考有关标准。下面仅就一些主要特性参数列表说明如下:

表 1-3

工业机器人主要特性参数

项目名称	说 明
坐标型式	如直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型、关节坐标型机器人
运动自由度 度数	根据需要,机器人的自由度有少于6个的,也有多于6个的
项目名称	说 明
各自由度的动作范围及速度	自由度的动作范围是指各关节的活动范围。各关节的基本动作范围。决定了机器人操作机的工作空间形状和大小。各自由度速度是指各关节的极限速度
额定负载	额定负载是指在规定的性能范围内,在手腕机械接口处所承受的许用负载值
精 度	精度主要包括位姿精确度、位姿重复性、轨迹精度、轨迹重复性等

五、工业机器人的标准

早在 70 年代末,一些工业发达国家已开始制订各自的工业机器人标准。1983 年国际标准化机构 (ISO) 工业自动化 (TC184) 第 11 次会议上,决定建立 SC2 (工业机器人——Industrial Robot) 分会。

1984 年第 1 次 ISO/TC184/SC2 会议上,SC2 正式命名为工业机器人,推行用于制造中的机器人标准化。

自 1985 年以来,我国参考 ISO 有关标准开始制订工业机器人国标。目前由国家技术监督局发布的国家标准已有《工业机器人术语和图形符号》、《工业机器人性能规范》、《工业机器人特性表示》和《工业机器人安全规范》。由机械电子工业部发布的行业标准

有《喷漆机器人通用技术条件》和《工业机器人性能测试方法》。本文仅就性能规范、特性表示及通用技术条件的有关部分简介如下。

(一) 工业机器人性能规范 (GB/T12642—90)

1. 工业机器人的位姿特简

工业机器人的位姿是指工业机器人机械接口或末端执行器在指定坐标系中的位置和姿态。

工业机器人的位姿特性是工业机器人的重要特性，它用位姿准确度和重复性、多方向位姿准确度、距离准确度和重复性、位姿稳定时间、位姿超调量及位姿准确度漂移等来说明，特别是位姿准确度和重复性是工业机器人必不可少的性能参数。

机器人通过示教编程、人工数据输入或解析编程所设定的位姿称指令位姿。工业机器人响应指令位姿而到达的实际位姿称实到位置 (图 1-3)

(1) 位姿准确度 位姿准确度表示指令位姿和从同一方向接近该指令位姿时的实到位置及姿态集中心之间的偏差。位姿准确度分位置准确度和姿态准确度。

1) 位置准确度 位置准确度是指令位置和实到位置集中心之间的偏差，用 ΔL 表示 (图 1-4)。

$$\Delta L = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2 + (\bar{z} - z_0)^2}$$

式中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

$\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ 是重复响应同一指令位姿 n 次后，所各各点的位置集中心 G 的坐标。

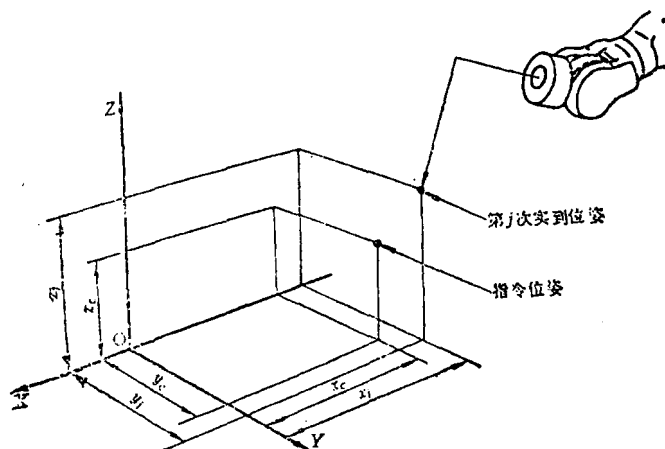


图 1-3 指令位姿和实到位置

x_c 、 y_c 、 z_c 是指令位姿的位置坐标。

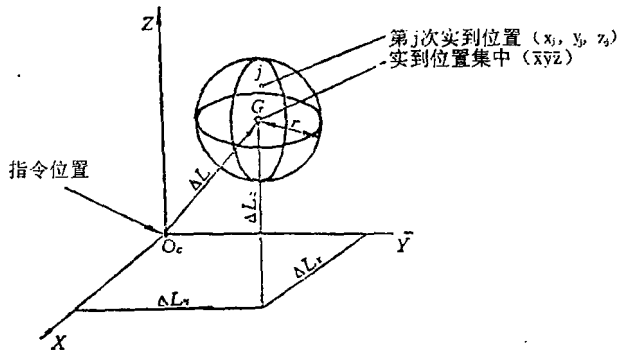


图 1-4 位置准确度和位置重复性

x_j 、 y_j 、 z_j 是第 j 次实到姿态的位置坐标。

2) 姿态准确度 姿态准确度是指令姿态和实际姿态集中心之间的偏差, 用 ΔL_a 、 ΔL_b 和 ΔL_c 表示 (见图 1-5)

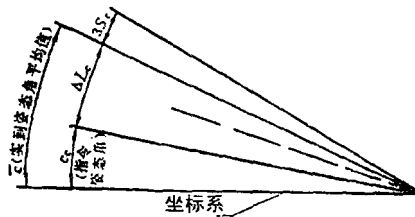


图 1-5 姿态准确度和重复性

(注: $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 可用同一图表示)

$$\begin{cases} \Delta L_a = \bar{a} - a_c \\ \Delta L_b = \bar{b} - b_c \\ \Delta L_c = \bar{c} - c_c \end{cases}$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j & \bar{b} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j \\ \bar{c} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j \end{aligned}$$

$\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 、 $\bar{c}$ 是重复响应同一指令位姿 n 次后, 所得姿态集中心的姿态角。

a_c 、 b_c 、 c_c 是指令位姿的姿态角。

a_j 、 b_j 、 c_j 是第 j 次实到姿态的姿态角。

在计算姿态偏差时, 所采用的转动顺序是绕动轴 z 、 y' 、 x'' 转动或绕定轴 x 、 y 、 z 转动。

(2) 位姿重复性 位姿重复性表示对同一指令位姿, 从同一方向重复响应 n 次后, 实到位置和姿态散布的不一致程度。

对于一给定位姿，位姿重复性用位置集中心为球的球半径 r (图 1-4) 和对姿态集中心 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 、 $\bar{c}$ 的角度偏差 r_a 、 r_b 、 r_c (见图 1-5 中 $3S_c$) 来表示。

$$r = \bar{D} + 2S_D$$

式中

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

D_j

$$= \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}$$

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}}$$

$$\begin{cases} r_a = \pm 3S_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \\ r_b = \pm 3S_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \\ r_c = \pm 3S_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}} \end{cases}$$

$\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ ； x_j 、 y_j 、 z_j ； $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 、 $\bar{c}$ 和 a_j 、 b_j 、 c_j 与位姿准确度中的含义相同。

(3) 多方向位姿准确度 多方向位姿准确度表示从三个互相垂直方向朝同一指令位姿运动 n 次，实到位置的位置和姿态集中心间的偏差 (图 1-6)。

多主向位姿准确度用距离偏差 ΔR 和角度偏差 ΔR_a 、 ΔR_b 、 ΔR_c 来表示。

ΔR 是表示在三个实到位置集中心间的最大距离。

$$\Delta R = \max_{i,k=1}^3 |\Delta L_i - \Delta L_k|$$

ΔR_a 、 ΔR_b 、 ΔR_c 表示在三个实到姿态集中心间的最大角度偏差。

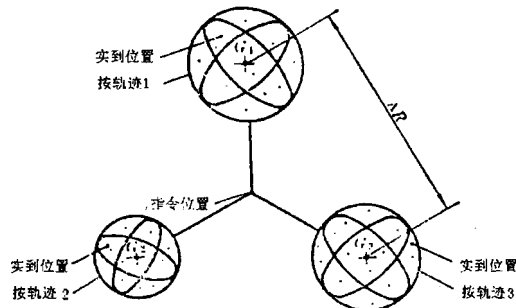


图 1-6 多方向位移准确度

$$\begin{cases} \Delta R_a = \max_{i,k=1}^3 |\bar{a}_i - \bar{a}_k| \\ \Delta R_b = \max_{i,k=1}^3 |\bar{b}_i - \bar{b}_k| \\ \Delta R_c = \max_{i,k=1}^3 |\bar{c}_i - \bar{c}_k| \end{cases}$$

式中

$$\Delta L = \Delta L_x i + \Delta L_y j + \Delta L_z k$$

3——表示沿三个方向到达指令位姿。

(4) 距离准确度和重复性 距离准确度表示在指令距离和实到距离平均值之间位置和姿态的偏差。

距离重复性表示在同一方向,对相同指令距离重复运动 n 次,几个实到距离间的不一致程度(本项目仅用于解析编程的工业机器人,此处计算从略)。

(5) 位姿稳定时间、位姿超调量和位姿准确度漂移。

1) 位姿稳定时间 稳定时间是指从工业机器人发出“位姿到达”信号的瞬间到实到到位姿达到规定偏差之内的瞬时为止所经历的时间(图 1-1)。

2) 位姿超调量 超调量是指工业机器人给出“位姿到达”信号以后,瞬间位姿和稳定位姿之间的最大偏差。在图 8-1-7 中,情况(1)为负偏差(负超调量),情况(2)为正偏差(正超调量)。

3) 位姿准确度漂移 位姿准确漂移是指在指定时间间隔内,实到到位姿的缓慢变化程度。

2. 工业机器人的轨迹特性

当工业机器人用于连续轨迹作业时,机器人必须将其轨迹特性参数标出。轨迹特性参数包括:轨迹准确度和重复性;拐角偏差及稳定轨迹长度;轨变速度特性等。

(1) 轨迹准确度 轨迹准确度是表征工业机器人机械接口在同一方向及相反方向沿指令轨迹运行 n 次的能力。它用下述两个方面指标来确定。

a. 轨迹位置准确度 它是由指令轨迹和实到轨迹上各点位置集中心之间距离的最大值来确定,各位置集中心是对轨迹上 m 个测量点中每点进行 n 次测量所得的平均值。轨迹位置准确度用 ΔLP 表示。如果以 z 轴作为指令轨迹(图 1-8),则轨迹位置准确度 ΔLP 为

$$\Delta LP = \max_{i=1}^m \sqrt{(x_{ci} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ci} - \bar{y}_i)^2}$$

式中

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}$$

x_{ci} 、 y_{ci} 是在指令轨迹上对应于测量点 z_i 的点坐标。

x_{ij} 、 y_{ij} 是实到轨迹对应于第 j 次重复试验时测量点 z_i 的点坐标。

b. 轨迹姿态准确度 它是由指令轨迹姿态与实际轨迹上各点姿态集中心的最大偏差来确定。各姿态集中心是对轨迹上 m 个测量点中每点进行 n 次测量得到的平均值。轨迹姿态准确度用 ΔLP_a 、 ΔLP_b 、 ΔLP_c 表示。如果 z 轴作为指令设定轨迹,则轨迹姿态

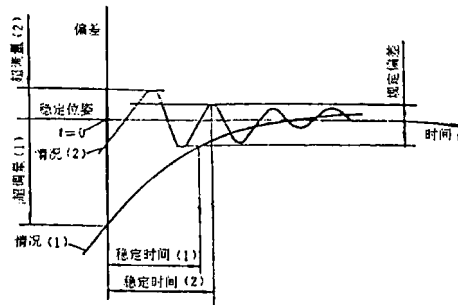


图 1-7 位姿稳定时间
和位姿超调量

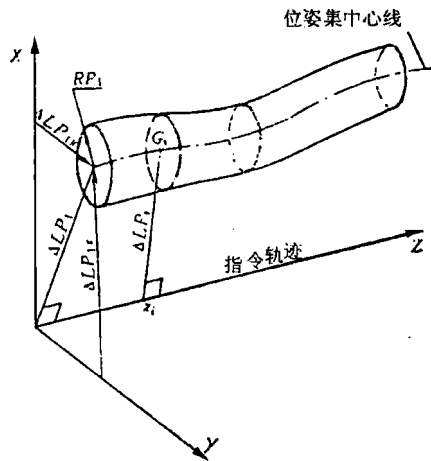


图 1-8 直线指令轨迹的轨迹
准确度和重复性

准确度的计算式是:

$$\begin{cases} \Delta LP_a = \max_{i=1}^m |a_{ci} - \bar{a}_i| \\ \Delta LP_b = \max_{i=1}^m |b_{ci} - \bar{b}_i| \\ \Delta LP_c = \max_{i=1}^m |c_{ci} - \bar{c}_i| \end{cases}$$

式中

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}$$

$$\bar{b}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad \bar{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$$

a_{ci} 、 b_{ci} 、 c_{ci} 是在测量点 z_i 处的指令姿态角。

a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 是第 j 次重复测试时, 在测量点 z_i 处的实到姿态角。

2) 轨迹重复性 它是表示工业机器人对同一指令轨迹运行 n 次后, 实到轨迹之间