

(第2版)

机电

一体化 技术手册

第 1 卷

机电一体化技术手册编委会 编

下册

机械工业出版社

第 8 篇 工业机器人

主 编 蔡鹤皋

副 主 编 谢存禧

主 审 周国斌

编写人员

第 1 章 彭商贤

第 2 章 彭商贤

第 3 章 侯琳祺 陶 谦

第 4 章 钱文瀚

第 5 章 谢存禧

第 6 章 蔡鹤皋

A5



下

第1章 工业机器人及其分类

1.1 工业机器人的发展现状

1.1.1 工业机器人

“机器人”在英语中称 Robot。早在 1920 年捷克剧作家卡雷尔·查培克(Karel Capek)在他的幻想剧本《罗莎姆万能机器人》中,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,有一种操作机,其机构通常是由一系列相互铰接或相对滑动的构件所组成,具有多自由度,用来抓取或移动物体,这种机械装置,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、多关节的操作机。它可以是固定式或移动式的,用于工业自动化作业中。

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。

1.1.2 工业机器人技术的进展

早在 1954 年美国乔治·德沃尔(G. Devel)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世界各国使用机器人总台数的 60%,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 (Flexible Manufacturing System)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,这类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,从第七个五年计划开始,国家在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步形成。

1.2 工业机器人的构成

1.2.1 机器人的构成

一个较完善的机器人是由操作机(包括驱动器)和控制系统(硬件和软件)构成的,如图 8.1-1 所示。操作机如前所述,它是安装在机体上,由若干个回转(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。

工业机器人在实际应用中常与其他装置构成一个机器人系统,这个系统主要包括:机器人;末端执行器;为机器人完成规定作业所需的周边设备或传感器;为操作和监控机器人、设备、传感器乃至受机器人控制系统控制的周边设备的通信接口。

1.2.2 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。固定式的操作机由机体、手臂和手腕组成。

末端执行器是机器人为完成其作业,而专门设计的一种装置,它通过机械接口与手腕联接。如手爪就是专供用来抓取和握持工件用的末端执行器。

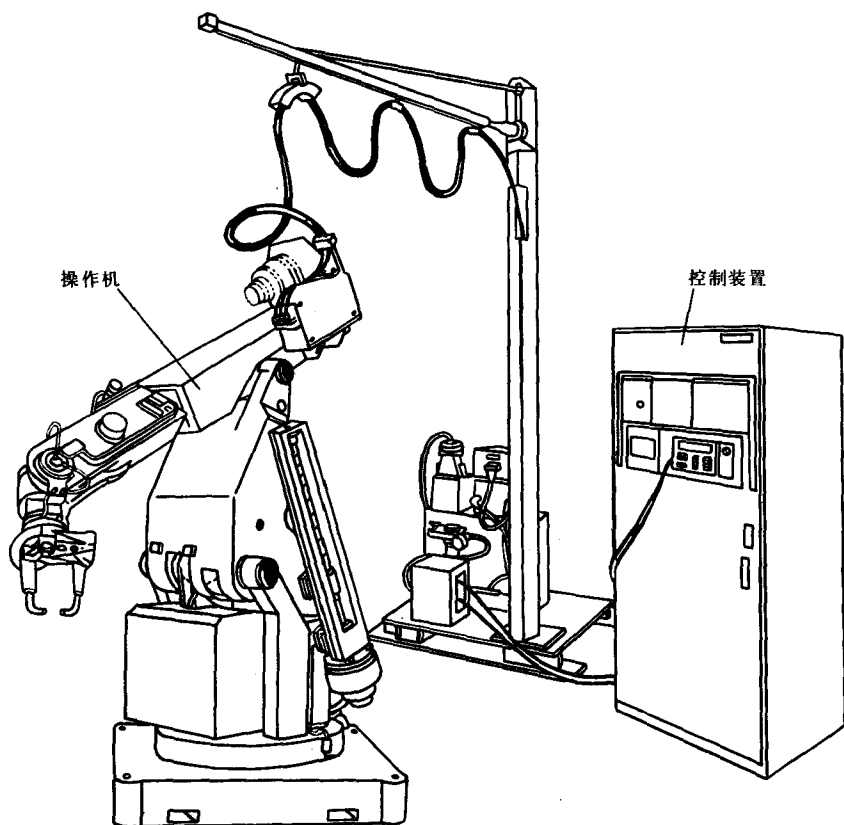


图 8.1-1 机器人的组成

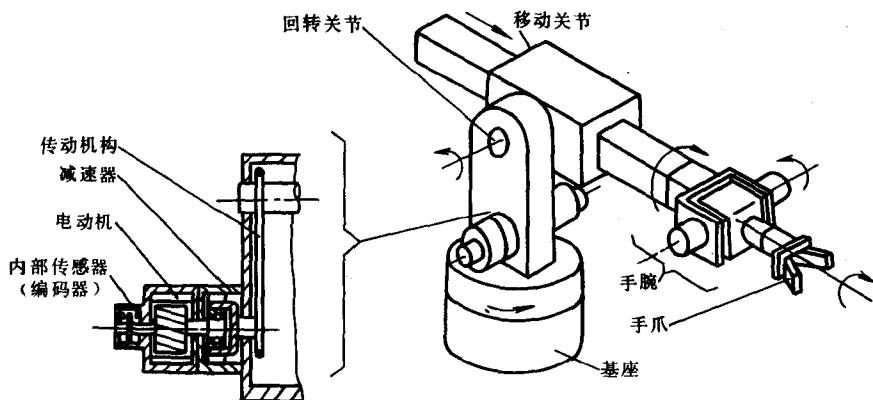


图 8.1-2 操作机的组成

手臂又称主关节组，它是由一组主动关节（由驱动器驱动的关节称主动关节）和连杆组成，用来支承和定位手腕。手臂的第一构件的原点附在机座上，机座是一个平台或构架。

手腕又称副关节组，它位于手臂和末端执行器之间，是由一组主动关节和连杆组成，用来支承末端执行器并确定其位姿。图 8.1-2 示出了固定式操作机的示意图。图中表明，前三个主关节组分布在手臂上，后三

个副关节组分布在手腕上。图中各关节运动是用伺服电动机来驱动的。由于电动机驱动力矩小，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（也可不具备）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、履带式和步行式等几类。

1.3 工业机器人的分类

工业机器人可按技术发展进程、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 8.1-1。

表 8.1-1 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。能在传感系统支持下,具有不同程度感知环境并自行修正程序的功能
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,即按任务编程

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 8.1-2。

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。

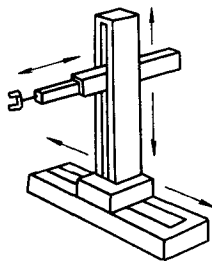
4. 按控制方式分类

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。

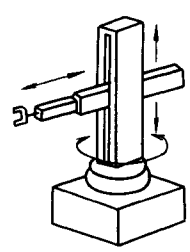
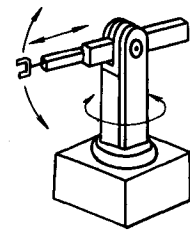
5. 按用途分类

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 8.1-2 按机械结构形式分类

名 称	说 明	图 例
直角坐标型机器人	操作机的手臂具有三个移动关节,其关节轴线按直角坐标配置	

(续)

名 称	说 明	图 例
圆柱坐标型机器人	操作机的手臂至少有一个移动关节和一个回转关节,其关节轴线按圆柱坐标系配置	
球坐标型机器人	操作机的手臂具有两个回转关节和一个移动关节,其轴线按极坐标系配置	
关节型机器人	操作机的手臂类似人的上肢关节动作,具有三个回转关节	

1.4 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 8.1-3 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	根据需要,机器人的自由度有少于6个的,也有多于6个的
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性能范围内,在手腕机械接口处所能承受的许用负载值
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

1.5 工业机器人的标准

随着科学技术的不断进步,工业机器人产品品种日益增多,应用领域不断扩大。新发布的工业机器人标准也在日益增加。自1983年国际标准化组织决定成立

《工业自动化系统和集成》标准化技术委员会《工业机器人》分技术委员会以来,相继发布了有关工业机器人的国际标准九项,技术报告四项,其它尚在制订中。这些已发布的国际标准和技术的编号及名称见表8.1-4。

表 8.1-4 ISO 工业机器人标准编号及名称

编 号	名 称	备 注
ISO 8373: 1994 附件 1: 1996	工业机器人—词汇 附录 B—多语种	
ISO 9283: 1990 附件 1: 1991	工业机器人——性能规范及其试验方法 附录 B——典型用途的性能规范选择指南	现已上报 ISO 中央秘书处, 正式版本于 1998 年出版
ISO 9409-1: 1996 ISO 9409-2: 1996	工业机器人—机械接口—第 1 部分: 板(A 型) 工业机器人—机械接口—第 2 部分: 轴(A 型)	
ISO/IEC 9506-3: 1991	制造报文规范—第 3 部分: 机器人伴同标准	
ISO 9787: 1990	工业机器人—坐标系和运动命名原则	现正修订, 于 1998 年完成工作
ISO 9946: 1991	工业机器人—特性表示	现正修订, 于 1998 年完成工作
ISO 10218: 1992	工业机器人—安全	
ISO 11593: 1996	工业机器人—末端执行器自动更换系统 —词汇和特性表示	
ISO/TR 11032: 1994	工业机器人—面向应用的试验 —点焊	
ISO/TR 11062: 1994	工业机器人—EMC 试验方法和性能评价导则	
ISO/TR 10562: 1995	工业机器人—ICR—机器人中间编码	
ISO/TR 13309: 1995	工业机器人—按 ISO 9283 评价机器人性能的试验设备和计量方法信息指南	

自 1985 年以来,我国参照 ISO 及其它国家有关标准,开始制订工业机器人标准。由国家技术监督局发布

的国家标准和由机械工业部发布的行业标准见表 8.1-5 和表 8.1-6。

表 8.1-5 工业机器人国家标准

编 号	名 称	备 注
GB 11291—89	工业机器人 安全规范	
GB/T 12642—90	工业机器人 性能规范	已经复审, 上报国家技术监督局。将于 1998~1999 年按 ISO 新版进行修订
GB/T 12643—90	工业机器人 术语	已修订即将发行, 其编号中“90”改为“1997”
GB/T 12644—90	工业机器人 特性表示	已经复审, 上报国家技术监督局。于 1998~1999 年按 ISO 新版修订
GB/T 12645—90	工业机器人 性能测试方法	

(续)

编 号	名 称	备 注
GB/T 14283—93	点焊机器人 通用技术条件	
GB/T 14284—93	工业机器人 通用技术条件	
GB/T 14468.1—93	工业机器人 圆形机械接口	
GB/T 16720.3—1996	制造报文规范 第3部分: 机器人伴同标准	
GB/T 16977—1997	工业机器人 坐标系和运动命名原则	

表 8.1-6 工业机器人行业标准

编 号	名 称	备 注
ZB J28001—90	工业机器人 验收规则	
ZB J28002—90	喷漆机器人 通用技术条件	
JB/T 5036—91	搬运机器人 通用技术条件	
JB/T 5064—91	装配机器人 通用技术条件	
JB/T 5065—91	弧焊机器人 通用技术条件	
JB/T 8430—1996	工业机器人 型号编制方法	

由于标准项目较多,本文仅就性能规范及其试验方法、特性表示和通用技术条件的有关部分简介如下。

1.5.1 工业机器人性能规范及其试验方法(GB/T 12642、GB/T 12645、eqv ISO 9283)^①

1. 工业机器人的位姿特性

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空间位置和姿态的合称。

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、多方向位姿准确度波动、距离准确度和重复性、位置稳定时间、位置超调、位姿特性漂移和可互换性来说明,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。

将任务程序通过示教编程、人工数据输入或离线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到位姿(图 8.1-3)。

(1) 位姿准确度(Pose accuracy) 位姿准确度表示指令位姿和从同一方向趋近指令位姿时实到到位姿均值间的偏差。位姿准确度分位置准确度和姿态准确度。

1) 位置准确度(Positioning accuracy) 位置准确度是指指令位姿的位置和实到位置的集心之间的差值,用 AP_x 表示(图 8.1-4)。

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (8.1-1)$$

$$\text{式中 } AP_x = (\bar{x} - x_c) \quad AP_y = (\bar{y} - y_c) \quad AP_z = (\bar{z} - z_c)$$

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

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

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

$\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 是重复响应同一指令位姿 n 次后,所得各点集心 G 的坐标。

x_c 、 y_c 、 z_c 是指令位姿的位置坐标。

x_j 、 y_j 、 z_j 是第 j 次实到到位姿的位置坐标。

2) 姿态准确度(Orientation accuracy) 姿态准确度是指指令位姿的姿态和实到姿态的均值间差值,用 AP_a 、 AP_b 、 AP_c 表示(图 8.1-5)。

$$\begin{cases} AP_a = (\bar{a} - a_c) \\ AP_b = (\bar{b} - b_c) \\ AP_c = (\bar{c} - c_c) \end{cases} \quad (8.1-2)$$

① ISO 9283 从 1993 年始已进行修订,其报批稿已上报 ISO 中央秘书处,并于 1998 年发行实施。我国国家标准和行业标准凡是 90 年版本,均在 1997 年进行了复审,GB/T 12642—90 及 GB/T 12645—90 也已经过复审,决定于 1998 年至 1999 年间接 ISO 新版本进行修订,并于 1999 年上报审批。故本文中的图例和公式以及符号或缩略语均采用 ISO 9283 的新版本,以便我国工业机器人研制开发、使用单位在应用标准计算时,与国际一致。

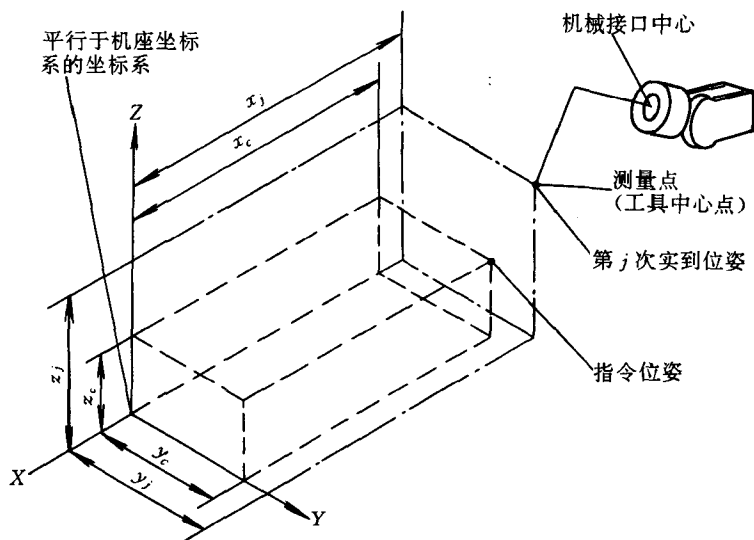


图 8.1-3 指令位姿和实到位姿间关系

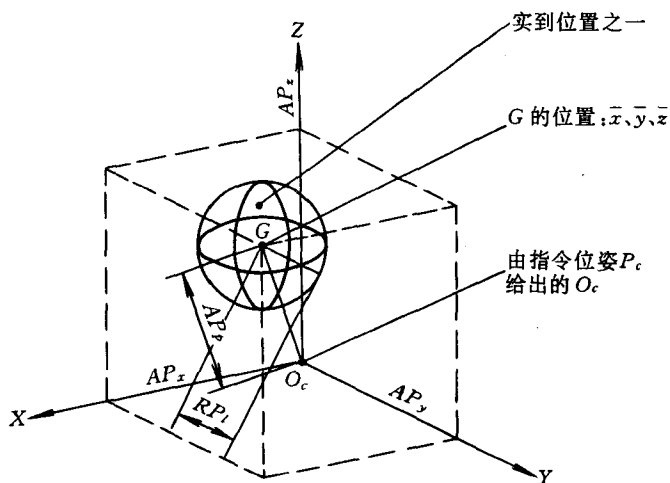


图 8.1-4 位置准确度和重复性

式中

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j;$$

$$\overline{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j;$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j.$$

这些均值是对同一指令位姿重复 n 次取得的角度平均值。

a_c 、 b_c 、 c_c 是指令位姿的姿态角。

a_j 、 b_j 、 c_j 是第 j 次实到位姿的姿态角。

在计算姿态偏差时，所采用的转动顺序必须能使姿态在值上是连续的，若绕动轴(导航角

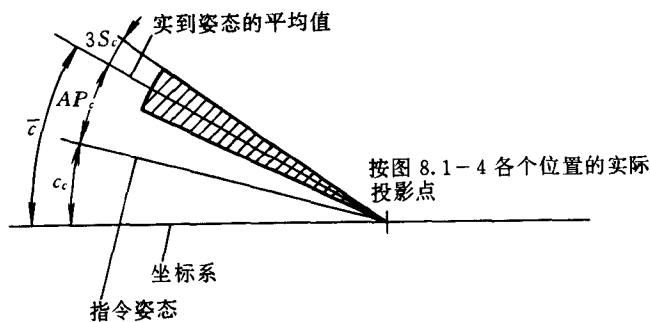


图 8.1-5 姿态准确度和重复性

注: $\overline{b}$ 和 $\overline{a}$ 可用同样的图来表示

或欧拉角)转动或绕定轴转动,则是独立的。

(2) 位姿重复性(Pose repeatability) 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,实到位姿间散布的不一致程度。

对于一给定的位姿,位姿重复性用中心为位置集中心的球的半径 RP_i (见图 8.1-4)和对于姿态角平均值 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 、 $\bar{c}$ 的角度散布 $\pm 3S_a$ 、 $\pm 3S_b$ 、 $\pm 3S_c$ 即 RP_a 、 RP_b 、 RP_c 来表示。

$$RP_i = \bar{l} + 3S_i \quad (8.1-3)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{l} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \\ l_j &= \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \\ S_i &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} RP_a = \pm 3S_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \\ RP_b = \pm 3S_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \\ RP_c = \pm 3S_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}} \end{cases} \quad (8.1-4)$$

$\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$; 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) 多方向位姿准确度变动(Multi-directional pose accuracy variation) 多方向位姿准确度变动表示当从三个相互垂直的方向朝同一指令位姿运动 n 次时,所达到的各平均实到位姿间的偏差(见图 8.1-6)。

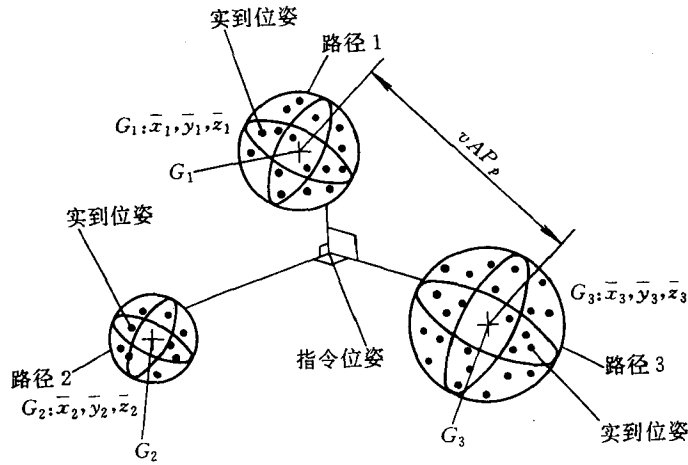


图 8.1-6 多方向位姿准确度变动

多方向位姿准确度变动用位置位姿准确度变动 vAP_p 和姿态位姿准确度变动 vAP_a 、 vAP_b 、 vAP_c 来表示。

1) 位置位姿准确度变动 位置位姿准确度变动是各路径的末端所到达的各点集心间的最大距离。

$$\begin{aligned} vAP_p &= \max \\ &(\sqrt{(\bar{x}_h - \bar{x}_k)^2 + (\bar{y}_h - \bar{y}_k)^2 + (\bar{z}_h - \bar{z}_k)^2}) \quad (8.1-5) \end{aligned}$$

其中 $h, k=1, 2, 3$

式中 h, k 为方向指示符,表示三个实到位姿集中心间其中距离最大的两个位置集。

2) 姿态位姿准确度变动 姿态位姿准确度变动是各路径的末端所达到的姿态角均值间的最大偏差。

$$\begin{cases} vAP_a = \max |(\bar{a}_h - \bar{a}_k)| & h, k=1, 2, 3 \\ vAP_b = \max |(\bar{b}_h - \bar{b}_k)| & h, k=1, 2, 3 \\ vAP_c = \max |(\bar{c}_h - \bar{c}_k)| & h, k=1, 2, 3 \end{cases} \quad (8.1-6)$$

(4) 距离准确度和重复性 距离准确度和重复性特性用两个指令位姿和两组实到位姿间在距离上的偏差及对两个指令位姿一系列重复运动在距离上的波动来表示。

此特性仅用于具有离线编程或人工数据输入设备的机器人。

1) 距离准确度(Distance accuracy) 距离准确度表示指令距离和平均实到距离间在位置和姿态上的偏差(见图 8.1-7)

距离准确度由距离位置准确度和距离姿态准确度

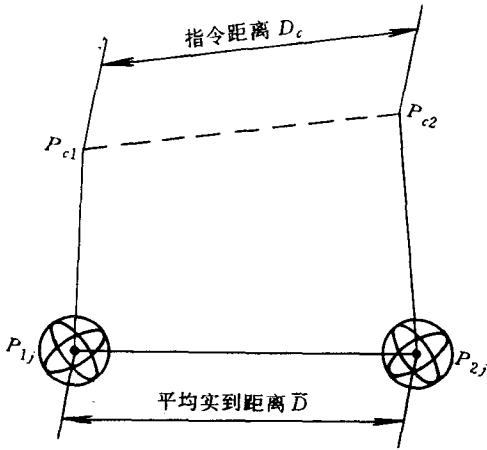


图 8.1-7 距离准确度

组成。

已知指令位姿 P_{c1} 、 P_{c2} 和实到位姿 P_{1j} 和 P_{2j} ，则距离位置准确度由下式计算：

$$AD_p = D_c - \bar{D} \quad (8.1-7)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{D} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |P_{1j} - P_{2j}| \\ &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2} \\ D_c &= |P_{c1} - P_{c2}| \\ &= \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2} \end{aligned}$$

x_{c1} 、 y_{c1} 、 z_{c1} 是指令位姿 P_{c1} 的坐标；

x_{c2} 、 y_{c2} 、 z_{c2} 是指令位姿 P_{c2} 的坐标；

x_{1j} 、 y_{1j} 、 z_{1j} 是 P_{1j} 的坐标；

x_{2j} 、 y_{2j} 、 z_{2j} 是 P_{2j} 的坐标；

n 是重复次数。

距离位置准确度亦可用机座坐标系各轴的分量来表示

$$\begin{cases} AD_x = D_{cx} - \bar{D}_x \\ AD_y = D_{cy} - \bar{D}_y \\ AD_z = D_{cz} - \bar{D}_z \end{cases} \quad (8.1-8)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{D}_x &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{xj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_{1j} - x_{2j}| \\ \bar{D}_y &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{yj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_{1j} - y_{2j}| \\ \bar{D}_z &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{zj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{1j} - z_{2j}| \\ D_{cx} &= |x_{c1} - x_{c2}| \\ D_{cy} &= |y_{c1} - y_{c2}| \\ D_{cz} &= |z_{c1} - z_{c2}| \end{aligned}$$

距离姿态准确度可用单轴距离准确度来计算：

$$\begin{cases} AD_a = D_{ca} - \bar{D}_a \\ AD_b = D_{cb} - \bar{D}_b \\ AD_c = D_{cc} - \bar{D}_c \end{cases} \quad (8.1-9)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{D}_a &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{aj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |a_{1j} - a_{2j}| \\ \bar{D}_b &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{bj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |b_{1j} - b_{2j}| \\ \bar{D}_c &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{cj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |c_{1j} - c_{2j}| \\ D_{ca} &= |a_{c1} - a_{c2}| \\ D_{cb} &= |b_{c1} - b_{c2}| \\ D_{cc} &= |c_{c1} - c_{c2}| \end{aligned}$$

a_{c1} 、 b_{c1} 、 c_{c1} 是 P_{c1} 的姿态；

a_{c2} 、 b_{c2} 、 c_{c2} 是 P_{c2} 的姿态；

a_{1j} 、 b_{1j} 、 c_{1j} 是 P_{1j} 的姿态；

a_{2j} 、 b_{2j} 、 c_{2j} 是 P_{2j} 的姿态；

n 是重复次数。

2) 距离重复性 (Distance repeatability) 距离重复性表示在同一方向对同一指令距离重复运动 n 次，几个实到距离间的不一致程度。

距离重复性包括位置重复性和姿态重复性。

对一已知的指令距离，距离重复性可计算如下：

$$RD = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (8.1-10)$$

或

$$\begin{cases} RD_x = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{xj} - \bar{D}_x)^2}{n-1}} \\ RD_y = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{yj} - \bar{D}_y)^2}{n-1}} \\ RD_z = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{zj} - \bar{D}_z)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (8.1-11)$$

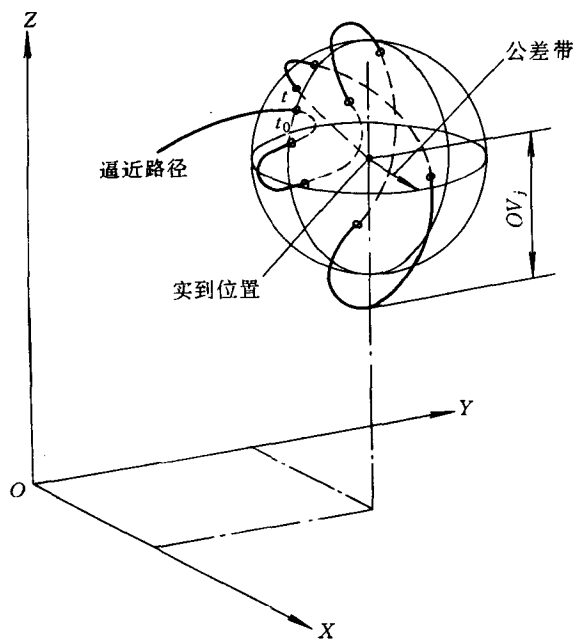
距离姿态重复性可用下式计算：

$$\begin{cases} RD_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{aj} - \bar{D}_a)^2}{n-1}} \\ RD_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{bj} - \bar{D}_b)^2}{n-1}} \\ RD_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{cj} - \bar{D}_c)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (8.1-12)$$

(5) 位置稳定时间和位置超调

1) 位置稳定时间(Position stabilization time) 位置稳定时间是确定机器人能用多快的时间停止在实到位置上的性能。是机器人运行时,开始与规定的位置公差带相交叉至机器人的实到位置保持在规定的公差带内止所经历的时间(见图 8.1-8)。

2) 位置超调(Position overshoot) 位置超调是说明机器人能平滑和准确地停止在实到位置上的能力的参量。是指机器人运行时,开始与规定的公差带相交叉后,从实到位置到机器人再次脱离规定的公差带时的最大距离(见图 8.1-8)。



稳定时间和位置超调的三维表示

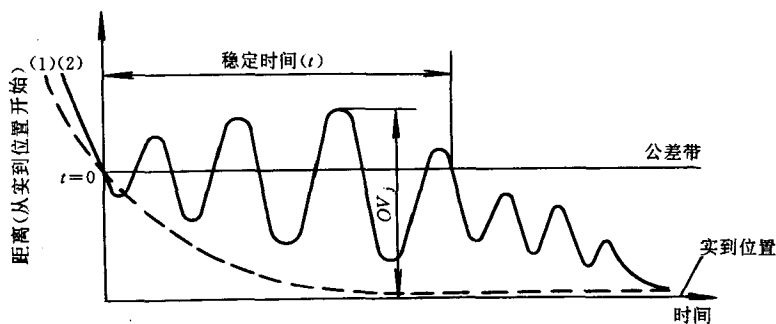


图 8.1-8 稳定时间和位置超调

(6) 位姿特性漂移(Drift of pose characteristics)

位姿特性漂移是指超过一规定时间 T 后,位姿准确度和重复性的变动(见图 8.1-9)。

位置准确度漂移(dAP)计算如下:

$$\begin{cases} dAP_p = |AP_{(t=1)} - AP_{(t=T)}| \\ dAP_a = |AP_{a(t=1)} - AP_{a(t=T)}| \\ dAP_b = |AP_{b(t=1)} - AP_{b(t=T)}| \\ dAP_c = |AP_{c(t=1)} - AP_{c(t=T)}| \end{cases} \quad (8.1-13)$$

式中 AP 是在对指令位姿冷态示教时的位姿准确度。 T 一般为连续运行 8h。

姿态准确度漂移(dRP)计算如下:

$$\begin{cases} dRP_p = |RP_{(t=1)} - RP_{(t=T)}| \\ dRP_a = |RP_{a(t=1)} - RP_{a(t=T)}| \\ dRP_b = |RP_{b(t=1)} - RP_{b(t=T)}| \\ dRP_c = |RP_{c(t=1)} - RP_{c(t=T)}| \end{cases} \quad (8.1-14)$$

(7) 可互换性(Exchangeability) 可互换性表示

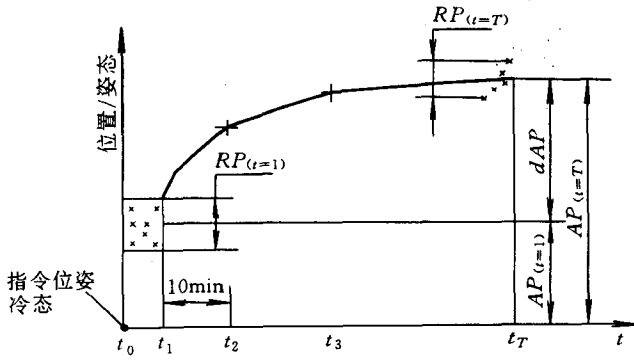


图 8.1-9 位姿特性漂移

在环境条件相同、机械安装相同、使用的任务程序相同时更换同品种的机器人，各台机器人位姿集心间的偏差如图 8.1-10 所示。

可互换性 E 为各点集心间的最大距离。

2. 工业机器人的路径特性

当工业机器人用于连续作业时, 必须将机器人的路径特性参数标出。这些特性包括: 路径准确度和重复性; 重定姿态的路径准确度; 拐角偏差; 路径速度特性。

(1) 路径准确度和重复性 路径准确度和重复性的定义与指令路径的形状无关。图 8.1-11 给出了路径准确度和重复性的一个图例。

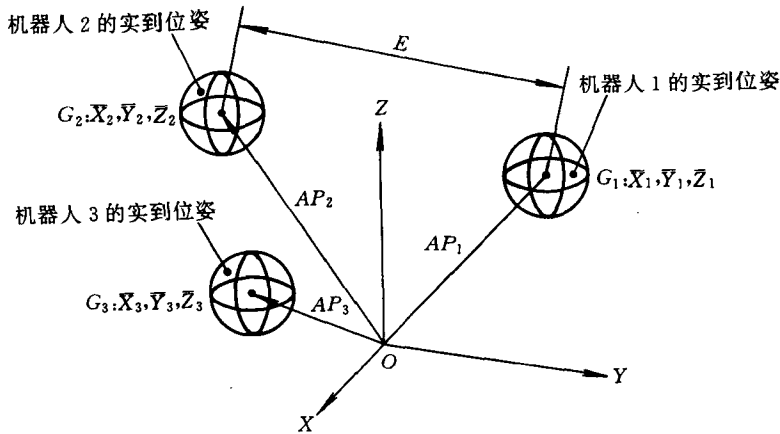


图 8.1-10 可互换性

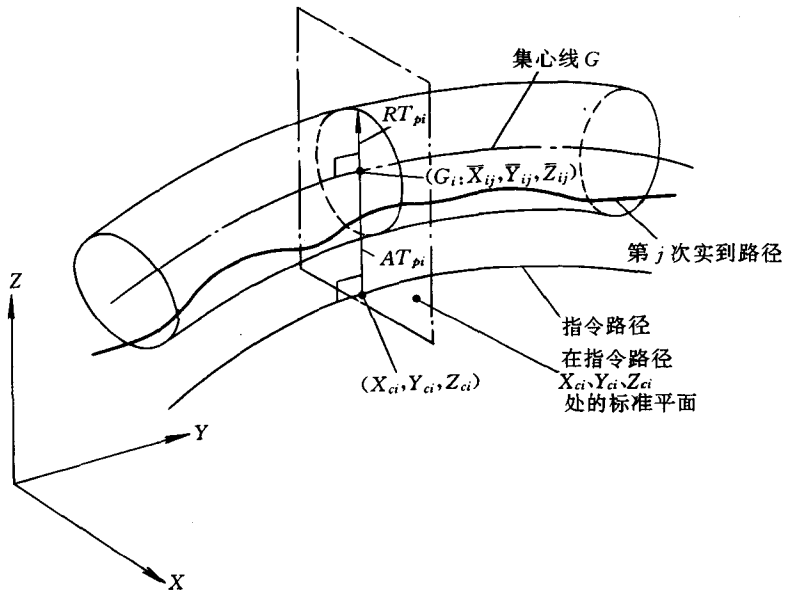


图 8.1-11 某一指令路径的路径准确度和路径重复性

1) 路径准确度(Path accuracy) 路径准确度是表征工业机器人其机械接口以同一方向沿指令路径运行 n 次的能力的特性,它由两个方面确定:指令路径的位置和实到路径位置集的集心线之间的差值(见图 8.1-11 中的 AT_p); 指令姿态和实到姿态平均值间的差值。路径准确度(AT)是在位置和姿态沿路径所得到的最大偏差。

位置路径准确度 AT_p 是指令路径的位置和沿路径对 m 个计算点中的每个点进行 n 次测量循环所得的集心线 G_i 之间的最大距离。

$$AT_p = \max \sqrt{(\overline{x_i} - x_{ci})^2 + (\overline{y_i} - y_{ci})^2 + (\overline{z_i} - z_{ci})^2} \quad (8.1-15)$$

$$i = 1 \sim m$$

式中

$$\overline{x_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

$$\overline{y_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}$$

$$\overline{z_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij}$$

x_{ci} 、 y_{ci} 、 z_{ci} 是指令路径上第 i 个点的坐标。

x_{ij} 、 y_{ij} 、 z_{ij} 是第 i 个标准平面和第 j 次实到路径相交的坐标。

姿态路径准确度 AT_a 、 AT_b 、 AT_c 是沿路径指令姿态和实到姿态平均值之间的最大偏差来确定。

$$\begin{cases} AT_a = \max |\overline{a_i} - a_{ci}| & i = 1 \sim m \\ AT_b = \max |\overline{b_i} - b_{ci}| & i = 1 \sim m \\ AT_c = \max |\overline{c_i} - c_{ci}| & i = 1 \sim m \end{cases} \quad (8.1-16)$$

$$\text{式中 } \overline{a_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}$$

$$\overline{b_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij}$$

$$\overline{c_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$$

a_{ci} 、 b_{ci} 、 c_{ci} 是在点 (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}) 上的指令姿态。

a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 是在点 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 上第 j 次重复时的实际姿态。

2) 路径重复性(Path repeatability) 路径重复性表征对同一指令路径重复运行 n 次,各实到路径间的不一致程度。

对一已给的路径,从同一方向运行 n 次,路径重复性可表示为 RT_p 中的最大值 RT_p ——它等于标准平面中圆的半径,其圆心在集心线上(见图 8.1-11)——和在不同计算点上围绕平均值的角度的最大散布。

$$RT_p = \max RT_p = \max [\overline{l_i} + 3S_{li}] \quad (8.1-17)$$

$$i = 1 \sim m$$

$$\text{式中 } \overline{l_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij}$$

$$S_{li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \overline{l_i})^2}{n-1}}$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \overline{x_i})^2 + (y_{ij} - \overline{y_i})^2 + (z_{ij} - \overline{z_i})^2}$$

式中 $\overline{x_i}$ 、 $\overline{y_i}$ 、 $\overline{z_i}$ 、 x_{ij} 、 y_{ij} 、 z_{ij} 见路径准确度。

$$\begin{cases} RT_a = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \overline{a_i})^2}{n-1}} & i = 1 \sim m \\ RT_b = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - \overline{b_i})^2}{n-1}} & i = 1 \sim m \\ RT_c = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - \overline{c_i})^2}{n-1}} & i = 1 \sim m \end{cases} \quad (8.1-18)$$

$\overline{a_i}$ 、 $\overline{b_i}$ 、 $\overline{c_i}$ 和 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 见路径准确度。

在某些用途中,路径重复性 RT 也可由其分量 RT_x 、 RT_y 、 RT_z 来表示。

(2) 重定姿态的路径准确度(Path accuracy on re-orientation) 当在路径上改变姿态时,对位置路径准确度会产生影响。为了记录在一直线路径上测量位置路径准确度(AT_p)时三个方向上姿态变换的影响,应采用图 8.1-12 的图例进行测试。

图中 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 是制造厂规定的测试平面的顶角。 P_6 到 P_9 是直线路径。 $P_6 \sim P_1 = P_1 \sim P_9$; $P_6 \sim P_7 = P_7 \sim P_1 = P_1 \sim P_8 = P_8 \sim P_9$ 。 x_n 、 y_n 、 z_n 是设置的本地坐标系,其 x_n — y_n 平面应平行于测试平面 $E_1 \sim E_4$ 。直线路径 $P_6 \sim P_9$ 平行于 y_n 轴。

重定姿态的路径准确度的计算方法与路径准确度相同。

(3) 拐角偏差(Cornering deviations) 当指令路径由两条相互垂直的路径组成时,在拐角处指令路径和实到路径间的偏差称拐角偏差。它用拐角圆角误差(CR)和拐角超调(CO)来表示(见图 8.1-13)。

1) 拐角圆角误差(Cornering round-offerror) 拐角圆角误差(CR)由指令路径的拐角点 (x_e, y_e, z_e) 和三次测量循环的实到路径之间最小距离中的最大值来确定。

$$CR = \max CR_j \quad j = 1, 2, 3 \quad (8.1-19)$$

式中

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

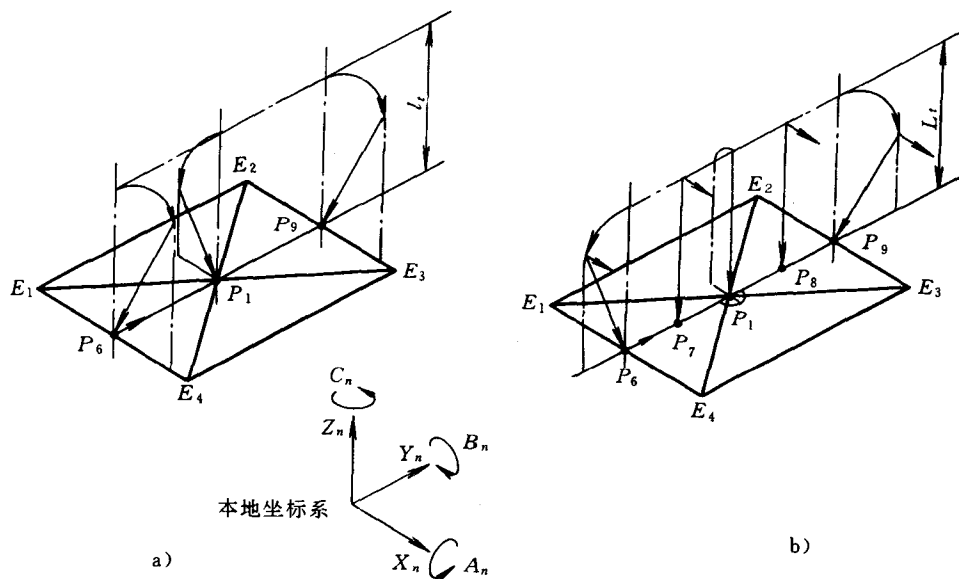


图 8.1-12 姿态变换的确定

a) 绕 y_n 轴 b) 绕 x_n 和 z_n 轴a) 绕 y_n 轴姿态变换的确定 B_n 角 P_6 (起始点) $+30^\circ$ B_n 角 由 P_6 到 P_1 -30° B_n 角 由 P_1 到 P_9 $+30^\circ$ b) 绕 x_n 和 z_n 轴姿态变换的确定 A_n 角 P_6 (起始点) $+30^\circ$ A_n 角 由 P_6 到 P_7 0° C_n 角 由 P_7 到 P_1 -30° C_n 角 由 P_1 到 P_8 0° A_n 角 由 P_8 到 P_9 -30° x_e 、 y_e 和 z_e 是指令拐角点的坐标; x_i 、 y_i 和 z_i 是对应于测量点 i 的实到路径上点的坐标。

2) 拐角超调(Cornering overshoot) 拐角超调是当机器人以恒定的编程路径速度运行时,从第一条路径至第二条路径开始处无延时后进行三次连续测量所取得的指令路径和各实到路径之间最大偏差中的最大值。

当第一条路径是 y 轴的负方向,第二条指令路径位于 z 轴上时,拐角超调可由下式计算:

$$CO = \max CO_j \quad j=1, 2, 3 \quad (8.1-20)$$

式中 $CO_j = \max \sqrt{(x_i - x_{ei})^2 + (y_i - y_{ei})^2}$
 $i=1 \dots m$

x_{ei} 、 y_{ei} 是对应于测量点 z_{ei} 的指令路径上点的坐标;

x_i 和 y_i 是对应于测量点 z_i 的实到路径上点的坐标。

当 $(y_i - y_{ei})$ 是正值时,等式有真值。若 $(y_i - y_{ei})$ 是负值,则不存在拐角超调。

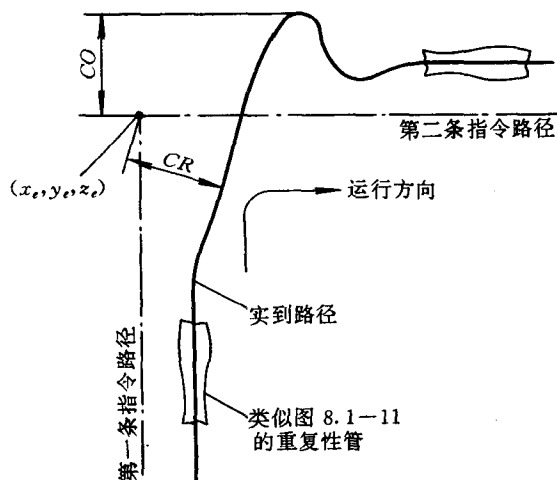


图 8.1-13 尖角拐角的拐角超调和拐角圆角误差

(4) 路径速度特性 机器人的路径速度方面的性能特性有: 路径速度准确度(AV); 路径速度重复性(RV); 路径速度波动(FV)。图 8.1-14 表示了此三个规范的理想化的图形。

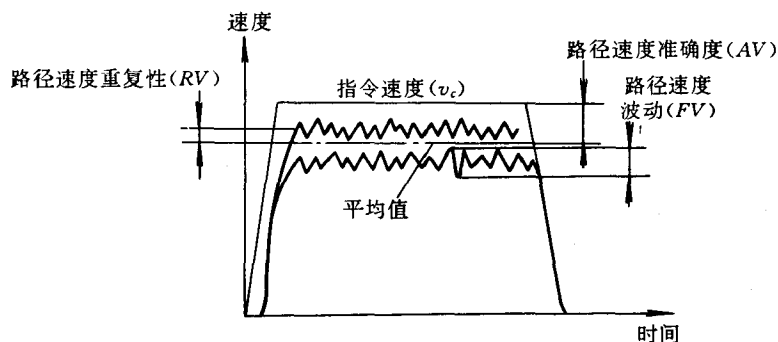


图 8.1-14 路径速度特性

1) 路径速度准确度(Path Velocity accuracy) 路径速度准确度(AV)是指令速度和沿路径重复运行 n 次所达到的实到速度平均值之间的误差。用指令速度的百分比来表示。

$$AV = \frac{\bar{v} - v_c}{v_c} \times 100\% \quad (8.1-21)$$

式中

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{v}_j; \quad \bar{v}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{v}_{ji}$$

v_c 是指令速度;

v_{ji} 是第 i 个测量点和 j 次重复时的实际速度;

m 是沿路径的测量点数。

2) 路径速度重复性(Path velocity repeatability)

路径速度重复性(RV)是对同一指令速度测量 n 次实到速度的不一致程度。用指令速度的百分比来表示。

$$RV = \pm \left[\frac{3S_v}{v_c} \times 100\% \right] \quad (8.1-22)$$

式中

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{v}_j - \bar{v})^2}{n-1}}$$

v_c 和 v_j 的含义见路径速度准确度。

3) 路径速度波动 路径速度波动(FV)是对应于一个指令速度在一次运行中速度的最大值和最小值之差。由 n 次重复运行中最大的速度波动来确定。

$$FV = \max_{j=1}^n \left[\max_{i=1}^m (V_{ij}) - \min_{i=1}^m (V_{ij}) \right] \quad (8.1-23)$$

式中 V_{ij} 见路径速度准确度。

3. 最小定位姿时间和静态柔顺性

(1) 最小定位姿时间(Minimum posing time) 定位姿时间是机器人在点位控制下运行一预定距离和(或)掠过一预定角度, 从出发到静止所经历的时间。

(2) 静态柔顺性(Static compliance)

静态柔顺性是机器人机械接口在单位负载作用下的最大位移量。

4. 横摆运动偏差

横摆运动是叠加在路径上一种或多种运动的组合, 其性能特性分成摆动幅度误差和摆动频率误差。

(1) 摆动幅度误差(Weaving stroke error) 摆动幅度误差(WS)是指令摆动幅度 S_c 和实到摆动幅度 S_a 平均值之间的差值(见图 8.1-15)。以指令摆动幅度的百分比来表示。

$$WS = \frac{S_a - S_c}{S_c} \times 100\% \quad (8.1-24)$$

(2) 摆动频率误差(Weaving frequency error)

摆动频率误差是指令摆动频率 F_c 和实到摆动频率 F_a 之间的差值。用指令摆动频率的百分比来表示(见图 8.1-15)。

$$WF = \frac{F_a - F_c}{F_c} \times 100\% \quad (8.1-25)$$

式中

$$F_a = \frac{10WV_a}{WD_a};$$

$$F_c = \frac{10WV_c}{WD_c}.$$

WV_c 是指令摆动速度;

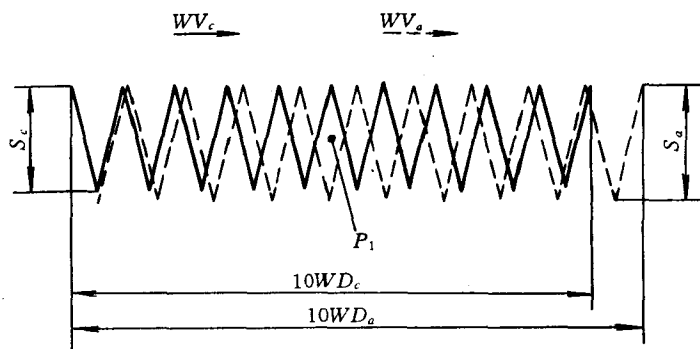


图 8.1-15 实到和指令摆动路径图例

WV_a 是实到摆动速度;

WD_c 是指令摆动距离;

WD_a 是平均实到摆动距离。

有关性能规范的其他内容,如:测试条件及方法;比较测试的性能规范项目的确定及测试条件和方法;典型用途性能规范项目的选择指南;测试结果报告格式等请参阅有关的标准。

1.5.2 工业机器人特性表示

工业机器人的特性(GB/T 12644, GB/T16977, eqv ISO 9946, ISO 9787)通常由制造厂以表格形式给出。它包含一般特性;控制特性和编程方法;性能规范三个部分。

1. 一般特性

(1) 坐标系 按照 ISO 9787 及国标的规定,工业机器人常用的坐标系有:绝对坐标系、机座坐标系、机械接口坐标系和工具坐标系。当制造厂使用其他坐标系时,必须在说明书中加以说明。全部坐标系均采用右手定则,其坐标轴分别用 X 、 Y 、 Z 来表示。

1) 绝对坐标系 $O_0-X_0-Y_0-Z_0$ 绝对坐标系是与机器人运动无关,参照大地的不变的坐标系。其原点 O_0 由用户按需要而定。 $+Z_0$ 轴的方向是与重力加速度矢量方向相反。 $+X_0$ 轴由用户确定。

2) 机座坐标系 $O_1-X_1-Y_1-Z_1$ 机座坐标系是参照机座安装平面的坐标系。原点 O_1 由制造厂确定。 $+Z_1$ 轴垂直于机座安装平面,指向机器人的机械结构方向。 $+X_1$ 轴是由原点开始,穿过机器人工作空间中心点 C_w 在机座安装平面上的投影(见图 8.1-18)。当由于机器人的构造不能实现此约定时, X_1 轴的方向可由制造厂规定。

3) 机械接口坐标系 $O_m-X_m-Y_m-Z_m$ 机械接口坐标系是参照机械接口的坐标系。原点 O_m 位于机械接口的中心。 $+Z_m$ 轴由机械接口开始,垂直于机械接口平面,指向末端执行器。 $+X_m$ 轴是由机械接口平面和机座坐标系的 X_1-Z_1 平面(或平行于 X_1-Z_1 的平面)的交线来定义的,机械接口坐标系的原点位于其交线上,同时机器人主关节轴(手臂)和副关节轴(手腕)是处于运动范围的中间位置。当机器人的构造不能实现此约定时,应由制造厂规定机器人主关节轴的位置, X_m 轴的正方向指离 Z_1 轴。当 Z_1 轴和 X_m 轴平行时,其正方向与 Z_1 轴相同(见图 8.1-16)。

图 8.1-16 给出了绝对坐标系、机座坐标系、机械接口坐标系的示例。

4) 工具坐标系 $O_t-X_t-Y_t-Z_t$ 工具坐标系是参照安装在机械接口的末端执行器或工具的坐标系。原点 O_t 是工具中心点(TCP)。 $+Z_t$ 轴与工具相关,通

常是工具的指向。在夹持型末端执行器的情况下, $+Y_t$ 轴是在两个手指运动的平面上,如图 8.1-17 所示。

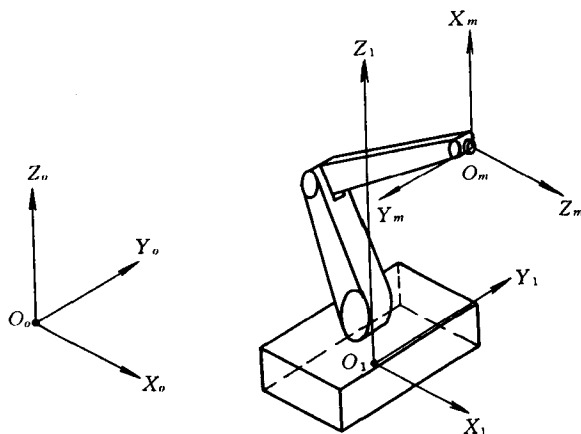


图 8.1-16 坐标系示例

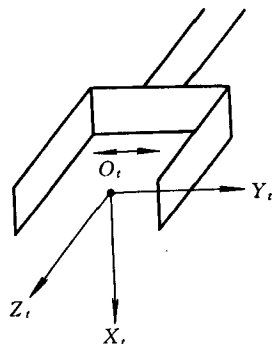


图 8.1-17 工具坐标系示例

(2) 工作空间 是指工业机器人运行时,机器人手腕参考点在空间所能达到的区域,用来衡量机器人工作范围的大小。

工作空间一般用两个视图和表格来表示,如图 8.1-18 及表 8.1-7 为一 6 轴机器人的工作空间示例。

绘制工作空间图时,首先以机座坐标系 X_1-Z_1 面作为投影面画出工作空间轴截面的截面图;以 X_1-Y_1 为另一投影面画出工作空间的投影图;同时画出副关节轴部分的外形图(轴侧投影),并用箭头标出运动方向;在各投影图中标出校准位姿和工作空间中心 C_w ;最后用表格给出两视图中各转折点在机座坐标系中的坐标值和副关节轴运动范围的大小。

(3) 其他特性 包括:动力源、机械结构、用途、外形尺寸和质量、机座安装表面、机械接口、负载、速度、分辨率和使用环境条件等。

工业机器人的机械结构类型一般以坐标型式和轴数来表示。