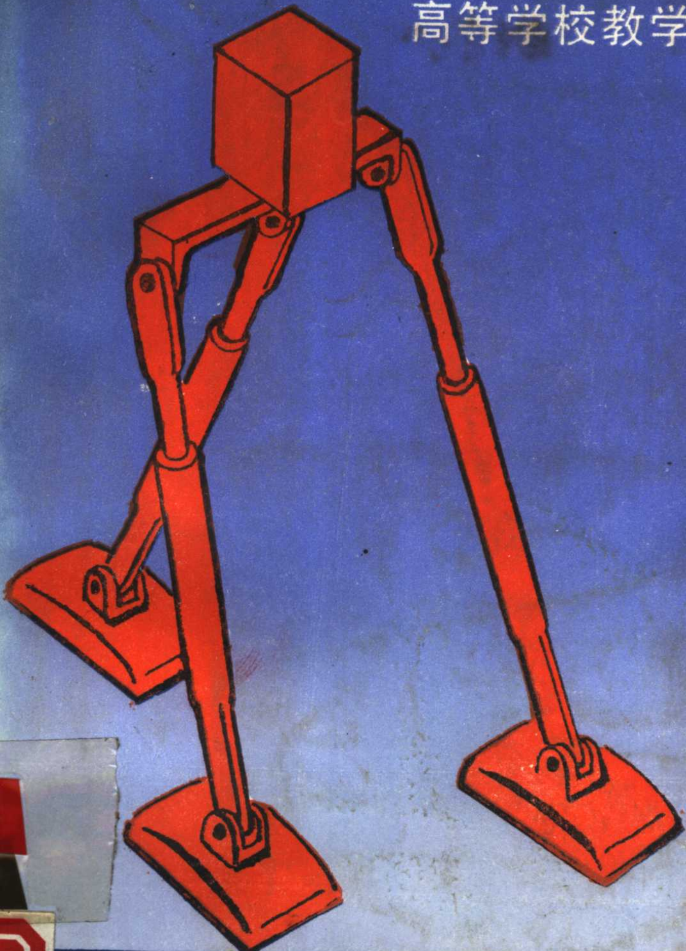
高等学校教学参考书



机器人控制基础

● 上海铁道学院 吴芳美 主编

● 中国铁道出版社

高等学校教学参考

机器人控制基础

上海铁道学院　吴芳美　主编

西南[illegible]学　姚先启　主审

中国铁道出版社

1992年·北京

（京）新登字063号

内 容 简 介

本书重点介绍了机器人的位置控制、运动学控制和动力学控制的原理，较详细地讲解了数学模型和各种控制方式，并根据控制技术的需要介绍了有关机器人机械结构的几何模型、驱动系统、执行器、感觉系统、人机通信及程序设计等内容。

全书共分十一章。第一章是为读者阅读后面各章节提供方便的机械和数学方面的知识；第二章为基本概念；第三章为机器人的机械系统结构及模型化。本书的重点内容分别列于第四、五、六、七、八章中，余下第九、十、十一章介绍驱动系统、执行器、感觉系统等内容。

本书可作高等院校机械、电气、自控、计算机等专业选修课教材，也可供从事机器人研究、开发的科技人员学习参考。

高等学校教学参考书
机器人控制基础
上海铁道学院 吴芳美 主编

中国铁道出版社出版 发行
（北京市东单三条14号）
责任编辑 倪嘉寒 封面设计 翟 达
各 地 新 华 书 店 经 售
中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米1/32 印张：7.125 字数：161 千
1992年4 月第1版 第1次印刷
印数：1—8000册

ISBN7-113-01178-0/TP·119 定价：4.10元

前　言

机器人学是近年来迅速发展起来的一门综合学科和边缘学科。它涉及机构学、电子学、仿生学、控制论、计算机及人工智能等多门学科，是当代十分活跃和越来越被广泛应用的技术之一。因此，各国高等工科院校已日趋普遍地将机器人学作为一门必修课或选修课列入大学的教学计划。

铁路是应用机器人的一个广阔的潜在部门。在铁路工业部门引进机器人可以大大提高产品的数量和质量。机器人可以在铁路工程中从事危险的工作。在调车作业中，用机器人去提钩、摘接风管等也引起人们的极大兴趣。今后可能有更多的工程技术人员参与工业机器人的机构、控制的设计、运用和维护。本书就是作为介绍机器人控制基础知识而编写的高等学校教学参考书，全书共十一章。第一章为预备知识；二、三、四章为机器人的控制基础，包括机器人系统结构，机械系统模型的描述和运动元素的确定及系统的可解性；五、六、七章介绍位置、速度及动力学控制；第八章较详细地阐述了控制系统的作用、运转方式等内容；九、十章概要地介绍了机器人的驱动系统和感觉系统；最后一章，即第十一章论及人机通信和程序设计，并以列表方式简介了机器人使用的程序设计语言。

全书由上海铁道学院吴芳美主编，西南交通大学姚先启教授主审，西南交通大学陈锦雄参加了第八、十、十一章的编写工作。

编　者

一九九〇年六月

目　录

第一章 预备知识

机器人学是一门综合学科。它涉及许多学科领域的知识。就一个机器人的本体或称它的机械系统而言，它是由一些机械零部件组成的，涉及到一些机械知识；对机器人的控制是建立在一些控制用的数学模型基础上的，涉及一些数学知识。为此，安排了这一章，作为学习全书的准备。

第一节 机械知识

一个机器人是由一些基本的机械构件组成的。我们在讨论机器人控制问题的过程中，需要用到一些机械方面的名词术语及机械结构方面的知识，例如，机械结构参数及其几何模型等。由于本书主要讨论机器人控制的基本理论及方法，故只将与机器人控制有关的机械知识收入本节中。

机器人本体是一种机械。任何机械都由若干个机械零件组合而成。一些零件在机械的运动中为独立的元件；另一些是由几个零件刚性联接成一个整体，这个整体中的各零件之间没有相对运动。在机械中每一个独立的运动单元体称构件。当几个构件之间具有确定的相对运动则组成一个机构，即机构是具有确定相对运动的构件组合体。两个构件按一定的方式联接在一起，使它们之间具有确定的相对运动。两构件之间的相对运动可以是平面运动亦可以是空间运动。联接方式可以有多种，但不可能是刚性的。用引进约束的方法以保证“确定的相对运动”。通常把两构件直接接触且能作一定相对运动的联接称“运动副”。这种直接接触可以有点、

线、面三种接触方式。构件上能使构件间直接接触而构成运动副的部分称“运动副元素”。按运动副元素几何形状的不同可将运动副分为移动运动副和转动运动副两大类。前者的两构件之间能作相对移动，后者能作相对旋转运动。

在研究机器人各构件之间的运动时，为简化问题常把构件视为刚体。研究刚体的运动我们必须具备以下几方面的基本知识：

1. 自由度

物体在空间的独立的基本运动或独立的单位运动组合称之为自由度。

物体在三维空间中的独立运动共有六个，如图 1—1 所示。在笛卡尔坐标中，六个独立运动分别是沿X、Y、Z坐标轴的三个移动P_1、P_2、P_3和分别绕X、Y、Z轴的三个转动R_1、R_2、R_3。这六个独立的基本运动通常用六个独立的参数来描述，它们是l_x、l_y、l_z和θ_x、θ_y、θ_z。换言之，用这六个参数可以给任何一个物体在一个空间直角坐标系中定位和定向。

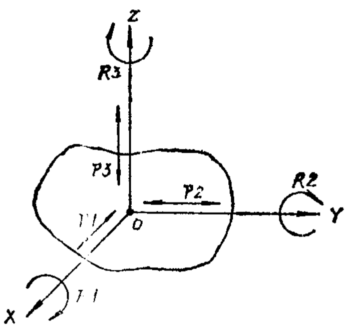


图 1—1

一个运动副包括两个构件（亦称杆件）。两杆件间容许

的相对运动称运动副的自由度。移动运动副的自由度称移动自由度一般用 P（或 T）表示；转动运动副的自由度称转动自由度，一般用 R 表示。图 1—2 中给出两种运动副的例子。图中（a）为杆件间作相对移动的运动副，它具有一个移动自由度 P；图（b）为杆件间作相对旋转的转动运动副，它具有一个转动自由度 R。运动副由力发生器 $F1$ 和 $F2$ 带动机械臂运动。

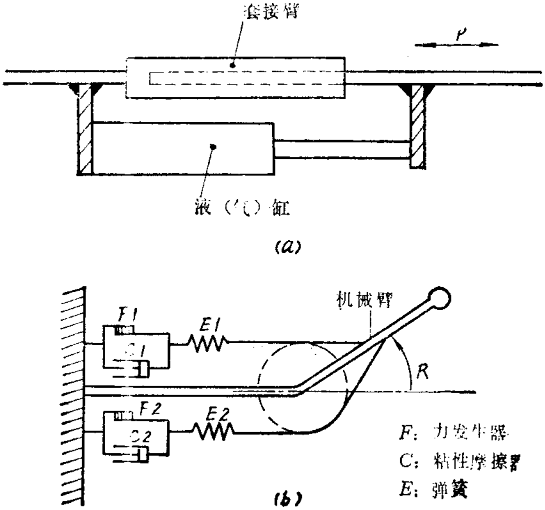


图 1—2

不言而喻，空间的一个自由刚体具有 6 个自由度，即 3 个移动自由度 PPP 和 3 个转动自由度 RRR。

当两个自由刚件（例如杆件）联接成运动副时，则将运动的约束引入，使自由度减少。运动副可根据其引入的约束数目或自由度数来分类。一个自由构件，在未形成运动副前具有 6 个独立的运动，即有 6 个自由度。两构件构成运动副

后，按引入约束数目可分为五类，即引入1、2、3、4、5个约束。与这5个约束相对应的自由度数为5、4、3，2，1。例如，有两个刚性杆件A和B。它们各自独立时，各有6个自由度。如果把杆件B固定在X轴上，A与B用一销钉联接形成一个运动副，如图1—3（a）所示。杆件A仅能作绕Z轴的一个旋转运动，即引入了5个约束，形成一个转动自由度的转动运动副。图1—3（b）的运动副是由在杆件B开一个孔将杆件A插入，当B固定时，A能作沿Y轴的移动和绕Y轴的转动两个运动。即该运动副为引入4个约束的具有2个自由度的运动副。图1—3（c）为引入3个约束的3转动自由度的运动副。

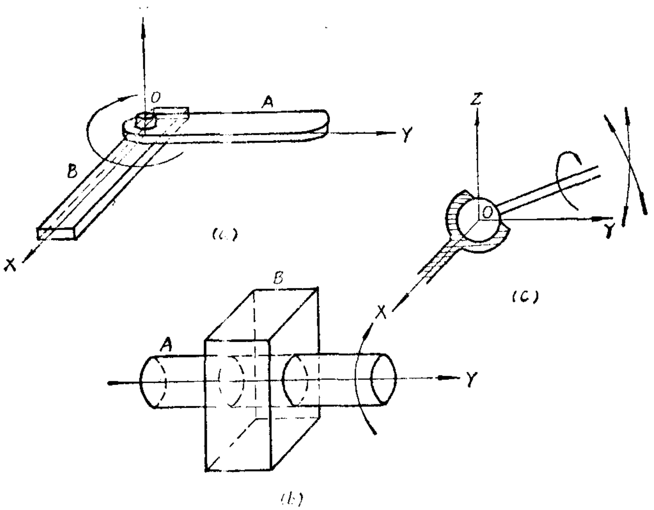


图 1—3

2. 运动链

由两个以上杆件和运动副组成的系统称“运动链”。运

动链分为开式链和闭式链两大类。运动链上每一个构件仅含有一个运动副元素的，称开式运动链。运动链上某些构件包含有两个或两个以上运动副元素的，称为闭式运动链。目前机器人的机械系统多为开式链结构。

机械运动链中能够作独立的相对运动的个数，称运动链的自由度数。由这些自由度来确定链中各杆件的相对位置及其变化。在机器人的机械系统中，由链的自由度参数来确定机器人的构形。

一个运动链上的运动主要取决于运动副的类型、机械尺寸等因素。为了研究有关的运动，通常用一些简单的线条和符号构成机构运动简图来表示机构运动的主要因素，图上忽略了那些与运动无关的因素，如杆件外形、断面尺寸、具体构造等。

在运动简图中，要表示出各杆件间的相对运动关系、运动副的位置及必要的几何尺寸等。

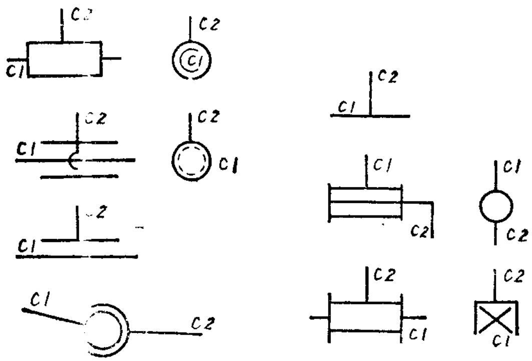
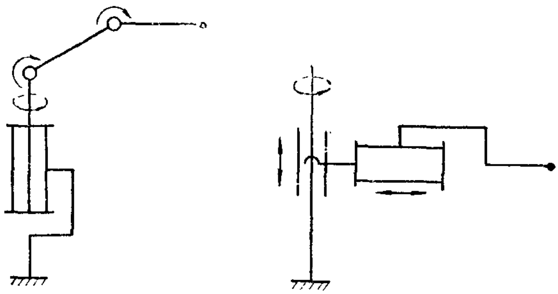


图 1—4

图1—4给出一种表示机械连结的AFNOR E04–E015

标准（法国标准化协会的标准）。图中C_1、C_2为杆件。利用该标准可以十分方便地表示任何一个机械运动链，如图1—5所示的两个例子。图中（a）为具有3个转动自由度RRR的机械运动链；图中（b）是具有2个移动自由度和1个转动自由度PRP的运动链。



(a) (b)

图 1—5

第二节 数学知识

机器人的控制要应用许多数学知识，限于篇幅，这里仅列入一些基本的必需的数学知识，诸如矩阵、坐标系、坐标变换、齐次坐标及其变换。

1. 矩 阵

由m行n列排成的表A叫做$m \times n$矩阵。表示为：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} \cdots & a_{2n} \\ a_{m1} & a_{m2} \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

其中，a_{ij}称矩阵A的元素。$i = 1, 2 \cdots, m$；$j = 1, 2, \cdots, n$。

$m=n$的矩阵称方阵。方阵的行数（列数）n称方阵的阶。方阵的所有元素构成的行列式$|A|=0$称奇异方阵；$|A|\neq 0$称非奇异方阵。

将矩阵A中的行和列上的矩阵元素依次对换得到转置矩阵，用A^T表示：

$$A^T=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21}\cdots a_{m1} \\ a_{12} & a_{22}\cdots a_{m2} \\ a_{1n} & a_{2n}\cdots a_{mn} \end{bmatrix}$$

仅有一行的矩阵，即$m=1$称行阵。如：

$$A=[a_1,\ a_2,\ \cdots\cdots a_n]$$

仅有一列的矩阵，即$n=1$称列阵。如：

$$A=\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}$$

列阵的转置矩阵为行阵，行阵的转置矩阵为列阵。

主对角线矩阵元素均为1，其他元素为0的方阵称单位矩阵，用I表示：

$$I=\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & \\ & \cdots & \cdots & \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

满足$A=A^T$的矩阵称对称矩阵，对称矩阵元素有：

$$a_{ij}=a_{ji}$$

（1）矩阵运算

矩阵的相等　若二矩阵A和B具有相同的行数和列数，

且二者所有对应的元素都相等，即$a_{ij}=b_{ij}$，则

$$A=B$$

矩阵的加、减 两个具有相同行数和列数的矩阵A和B相加、减得矩阵C。

$$C=A\pm B$$

$$c_{ij}=a_{ij}\pm b_{ij}$$

矩阵的积 具有$m\times l$的矩阵A和具有$l\times n$的矩阵B相乘得矩阵C。

$$C=A\cdot B$$

应用“行乘列法则”获得C元素。

$$c_{ij}=\sum_{k=1}^{l}a_{ik}\cdot b_{kj}\qquad \begin{matrix} i=1,2,\ \cdots m \\ j=1,2,\ \cdots n \end{matrix}$$

矩阵C是一个$m\times n$的矩阵。

矩阵A与单位矩阵I的积仍为A。

$$A\cdot I=A=I\cdot A$$

（2）逆矩阵

有一个n阶方阵A，若存在另一个n阶方阵B使

$$A\cdot B=B\cdot A=I$$

其中，I是n阶单位矩阵，则称B为A的逆矩阵。

$$B=A^{-1}$$

且有
$$AA^{-1}=I$$

$$(A\cdot B)^{-1}=A^{-1}\cdot B^{-1}$$

$$(A^{-1})^T=(A^T)^{-1}$$

矩阵A的逆矩阵为：

$$A^{-1}=\frac{1}{|A|}A^*$$

式中$|A|$是矩阵A所有元素组成的行列式之值；A^*是A的伴随矩阵，即

$$A^*=\begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ & & \cdots & \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix}$$

式中A_{ij}代表行列式$|A|$的代数余子式，即将$|A|$中去掉第i行和j列的行列式之值乘以$(-1)^{i+j}$。

（3）矩阵的导数

若矩阵A的元素$a_{ij}(t)$是t的可微函数，则A的导数是一个以$\mathrm{d}a_{ij}/\mathrm{d}t$为元素的矩阵。$A$的导数$\mathrm{d}A/\mathrm{d}t$一般记作$\dot{A}$。

（4）矩阵的秩

矩阵的秩是选自矩阵A的行和列所能构成的具有最大阶数的非奇异方阵的阶数。矩阵A的秩一般用$R(A)$表示。

2. 向量的矩阵形式

直角坐标系的三个坐标轴X、Y、Z的单位向量通常用$\vec{i}$、$\vec{j}$、$\vec{k}$表示，它们的向量形式为：

$$\vec{i}=[1\ 0\ 0]^T$$
$$\vec{j}=[0\ 1\ 0]^T$$
$$\vec{k}=[0\ 0\ 1]^T$$

空间点A在直角坐标系中的向量表达式为：

$$\vec{a}=a_x\vec{i}+a_y\vec{j}+a_z\vec{k}$$

可以用一个列矩阵表示点的向量

$$\vec{a}=[a_xa_ya_z]^T$$

设有两向量，

$$\vec{a}=a_x\vec{i}+a_y\vec{j}+a_z\vec{k}$$
$$\vec{b}=b_x\vec{i}+b_y\vec{j}+b_z\vec{k}$$

两向量的点积是一标量：

$$\vec{a}\cdot\vec{b}=a_xb_x+a_yb_y+a_zb_z$$

两向量的叉积仍是一个向量：

$$\vec{a}\times\vec{b}=\begin{vmatrix}\vec{i} & \vec{j} & \vec{k}\\ a_x & a_y & a_z\\ b_x & b_y & b_z\end{vmatrix}$$

$$=(a_y b_z-a_z b_y)\vec{i}-(a_z b_x-a_x b_z)\vec{j}+(a_x b_y-a_y b_x)\vec{k}$$

$$=[(a_y b_z-a_z b_y)(a_z b_x-a_x b_z)(a_x b_y-a_y b_x)]^T$$

3. 相对坐标系统

对机器人进行控制的目的是使它在给定的环境中实现期望的运动。例如，机器人带它的终端执行机具到指定的地点执行任务并给终端机具一个定向，即控制机器人从起始构形运动到最终构形(这通常是指固定机座的机器人)。为了解决机器人各运动部分的定位定向问题需要选定相应的坐标系统。笛卡尔坐标系、极坐标系、球坐标系、圆柱坐标系均是机器人常用的坐标系。

（1）笛卡尔坐标系

笛卡尔坐标系如图1—6（a）所示。空间点P的位置由一组有序数（x、y、z）表示。x、y、z为P点在三个坐标轴X、Y、Z上的投影。相当于一点自坐标原点O先沿X轴移动距离x，再沿平行于Y轴的轴移动距离y，最后沿平行于Z轴的轴移动距离z。即以一个自坐标原点的三个移动确定任意空间点的位置。

（2）极坐标系

极坐标系是平面上点与有序实数组的又一对应关系，是常用的平面坐标系。这种坐标系利用方向和距离来确定平面上点的位置。由空间固定的点O，称作极点。自O引一条固定轴O_x，称极轴。在极轴上确定长度的单位和计算角度的正方向（通常为逆时针方向）建立了极坐标系，见图1—6

（b）。空间任一点P由二个极坐标参数ρ和θ确定其位置。ρ称极半径：

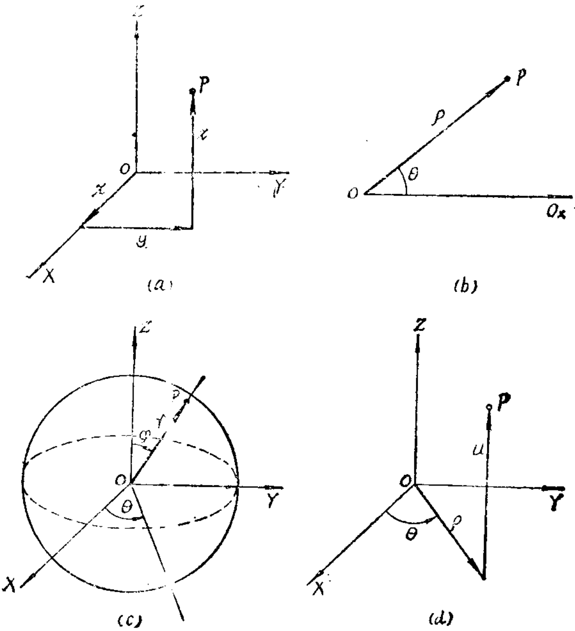


图 1—6

$$\rho = |OP|$$

θ称极角。极角是极轴O_x绕极点O转至OP的角度。

笛卡尔坐标与极坐标的关系为：

$$\begin{cases} x = \rho\cos\theta \\ y = \rho\sin\theta \end{cases}$$

（3）球坐标系

空间点P的位置由三个球坐标参数ρ、ω、φ表示。空间任意点可视为从坐标原点O（球心）出发沿Z轴的一个移