

多关节机器人 原理与维修

DUOGUANJIIE JIQIREN
YUANLI YU WEIXIU

■ 孙汉卿 吴海波 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

013032520

TP242
146

内容简介

多关节机器人原理与维修

孙汉卿 吴海波 编著



国防工业出版社

·北京·

TP242

146



北航

C1640119

013038250

内 容 简 介

本书从应用角度,系统地介绍了工业机器人的重要概念,剖析了多关节工业机器人的机械结构及RV减速器的结构和原理,结合多关节机器人,着重对机器人的交流伺服系统和控制器进行了分析,从运动学和动力学角度解析了机器人软件的编制原理,最后结合作者多年从事机器人应用方面的经验,阐明了工业机器人重要部件维修的基本方法和原理。在总体设计和内容编排上,既突出了理论分析又从工厂实际应用角度剖析了工业机器人的本质。

本书内容全面、实用性强,可作为工科院校机器人(机电一体化)专业高年级本科生、研究生的教学用书,也可供有关从事工厂自动化、设备维修等高级工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多关节机器人原理与维修/孙汉卿,吴海波编著. —北京:
国防工业出版社,2013.1

ISBN 978-7-118-08608-9

I. ①多… II. ①孙… ②吴… III. ①多关节机器人—
理论②多关节机器人—维修 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 016943 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16½ 字数 411 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

我国工厂引进的国外机器人陆续已经进入到后期管理阶段了,我们应该做好必要的心理准备和物质准备,更合理地处理好设备后期的管理问题,尽可能地使设备发挥最大的效能。今后的故障性质会发生变化,所谓心理准备,就是充分认识到这些问题的统计规律,认真地做好各项准备工作。国外的产品,尤其是电气产品保证寿命就是 10 年,到时间大多数会出现问题。当然产品也不是一到时间就全坏,这是不可能的。但是很多电子产品确实是这样,举一个简单的例子:索尼的电视机里面一个晶振芯片工作 10 万小时就出问题,机械类的器件也是这样。

这本书所涉及的知识面很广泛,而且有一定的深度。若想从头到尾看一遍而且能够看懂是不容易的。但由于每一章之间无任何联系,只要看懂一章就可以。因此,本书的读者群包括管理人员、工艺人员、操作人员、机械维修工、电气维修工、各类的技术人员等。

机器人可以说是集中了人类近 20 多年来的各项科技成果,它是未来人类最好的帮手,为人类服务最好的劳动力,是改善人类生活质量的最佳途径。

下面就介绍这本书与其他同类书的不同之处。

一般有关机器人的书,首先就讲坐标变换,而本书首先讲概述。在第 1 章中,对机器人的一些重要的参数(自由度、作业空间、承载能力、运动速度与位置精度等)做了详细地描述,并使这些参数达到可实用的阶段。

第 2 章是多关节机器人的结构,这一章应该首先要感谢日本安川公司提供的三维图,本书通过这些不十分完整的三维图,来分析结构、装配关系、受力情况等。第 2 章内容是其他书上所没有的。当然,其他书没有这一部分内容,是因为那些书主要是面对研究机器人的学生、老师的。而本书是要踏实地了解机器人的具体结构,甚至对装配关系、配合尺寸都希望弄清楚,为此,这一章可以说是针对工厂技术人员而写的。希望通过这一章能够把机器人的内部结构和工作原理,例如齿轮的啮合,轴的旋转,轴承的旋转,各种手爪与手臂的运动等弄清楚。

第 3 章主要介绍机器人中广泛应用的减速器,特别是 RV 减速器,目前国内研究的相对不足。

第 4 章是交流伺服系统,以前是液压伺服系统,然后发展为直流伺服系统,而目前工厂引进的机器人无一例外,均是交流永磁伺服系统。对这一系统只有几本新书有介绍,但对于三环系统,交流永磁电动机等内容很少涉及,而这正是非常重要的部分。在第 4 章中重新组织了一个结构,详尽地分析了三环系统和交流永磁电动机的结构与工作原理。这种电动机的驱动特点,颠覆了原来的电动机理论,特别是有关旋转磁场的理论。它之所以能够做到这一点是因为过去的理论是建立在一个不变的交流电源上(电压不变,频率不变),而现在的交流永磁电动机的电源是建立在一个可变的可编程的电源上,这是最重要的区别。因此说颠覆了电机学的经典原理。本章以交流永磁电动机数学模型为基础,以矢量变换方法来控制电动机的运行,这是一种非常重要、最为可贵的控制方法,是人类在驱动控制方面的一个重大进步。本章交流永磁电动机的数学模型可能难度较大,可以结合实践反复参阅。

第5章是控制器及软件的剖析。这一章既包括硬件,又包括软件。虽然没有拿出一个具体的软件进行分析,但是对很多软件均进行了必要的分析。根据厂家的资料,全面地分析了控制器的硬件结构、电源类型,然后在此基础上全面描述了控制器的功能。

第6章主要介绍机器人的运动学与动力学,这一章是机器人的核心技术,所有的软件均来自于这一章。本章主要对位置与姿态描述和空间变换、机器人运动学、雅可比矩阵、机器人动力学作了介绍,并校对和补充了部分内容,希望尽量做到明白易懂,同时对某些命题进行了论证。

第7章主要对工业机器人的维修方法和相关内容进行了论述,希望对交流永磁电动机、伺服驱动器、控制器、本体与电缆、减速机等部件的维修工作有所帮助。

总之,本书主要是结合工厂的需求而撰写的,书中难免存在错误和不足,欢迎大家批评指正。

作者

2012年11月

目 录

第 1 章 工业机器人概述	1
1.1 简介	1
1.2 机器人的基本原理	3
1.3 机器人中几个重要的概念	4
第 2 章 多关节机器人的结构	23
2.1 概述	23
2.2 腕部的结构	27
2.3 手腕部的关节结构	33
2.4 手臂的结构	40
2.5 旋转轴 S 的结构	48
2.6 底座	50
第 3 章 谐波减速器与 RV 减速器	53
3.1 概述	53
3.2 渐开线圆柱齿轮行星轮系	54
3.3 谐波减速器	60
3.4 摆线针轮行星传动	63
3.5 RV 减速器	73
第 4 章 交流伺服系统	82
4.1 概述	82
4.2 三环系统	84
4.3 三相交流永磁电动机	94
4.4 交流永磁伺服电动机数学模型	98
4.5 交流永磁伺服电动机的矢量控制	104
4.6 交流永磁电动机数学模型及矢量控制的总结	109
4.7 交流永磁电动机的驱动系统	112
4.8 交流永磁电动机在工业机器人上的应用	128
第 5 章 工业机器人中控制器及软件剖析	142
5.1 概述	142

5.2 控制器的硬件结构·····	146
5.3 控制器的信号系统及电源·····	158
5.4 控制器中的控制软件·····	165
5.5 本章总结·····	189
第6章 机器人的运动学与动力学 ·····	192
6.1 概述·····	192
6.2 位置与姿态描述和空间变换·····	192
6.3 机器人运动学·····	200
6.4 机器人的雅可比矩阵·····	212
6.5 机器人动力学·····	220
第7章 工业机器人的维修 ·····	239
7.1 概述·····	239
7.2 交流永磁电动机的维修·····	240
7.3 伺服驱动器的维修·····	242
7.4 控制器的维修·····	244
7.5 机器人的本体及电缆的维修·····	246
7.6 减速机的维修方法·····	248
7.7 本章总结·····	251
参考文献 ·····	256
后记 ·····	257

第 1 章 工业机器人概述

1.1 简 介

本章介绍工业机器人的基础知识,其目的是通过这一章了解工业机器人的基本工作原理以及相关参数的物理意义,为以后各章作铺垫。本章也可以看作是以后各章的联系表,通过这个联系表,知道这些内容是在什么地方发生的。

首先要解决的问题是:什么是工业机器人?这个问题很容易解决,到车间去看一下就知道了!那么冲压车间工位间的快速传递棒(Speed Bar)、涂装车间的穿梭机、总装车间的 AGV 小车算不算机器人呢?它们也应该算作机器人,因此在此给工业机器人下一个定义。机器人英文为 Robot,实际是由捷克文 Robota(意为苦力,劳仆)而来,1920 年由捷克的一个科幻内容的话剧而得名。机器人是可编程的,具有人的某些功能,可以代替人进行某些工作。在工厂中,不要求有什么严格的定义,只要它可以替人做多种工作,而且这些工作是可编程的即可。此外还有一个隐含意义,就是机器人可以进行位置控制,这个内容也是非常重要的,如果机器人不能达到所要求的位置精度就无法工作。

1954 年,第一台机器人在美国诞生,当时美国的 Unimation 公司以 Unimate 命名了这台机器人,这台机器人是由 5 个关节串联,液压驱动的机器人。20 世纪 60 年代,日本政府非常重视机器人的发展,在政府资金的支持下,川崎公司购买了美国 Unimation 公司机器人的专利,生产出了“川崎——Unimate 2000”工业机器人,一跃在生产机器人方面走在了世界的前列。

机器人在工业中广泛应用的主要原因是提高了生产率。例如,用电弧焊焊接的直线焊缝,机器人的平均焊接速度是人工平均速度的 3 倍。另一原因是提高了产品质量。在点焊中,用机器人进行焊接,焊接位置非常准确,重复定位精度高,焊接质量好。此外,有些工件板材很薄,要求焊接速度非常快,一般技工很难做到,而机器人可以做到,焊接的质量也比人工焊接的质量好。

机器人应用的另一个特点就是柔性化。机器人的动作是可编程的,具有高度柔性化。工业生产为了应付迅速变化的市场需求,产品的批量越来越小,个性化要求越来越强,产品要不断更新换代。所以希望生产线尽可能快速地适应这些变化,这就要求可编程性或者柔性化。

工业机器人在 20 世纪 80 年代起,为了满足汽车工业发展的需要,得到了巨大的发展。主要是点焊机器人、弧焊机器人、喷涂机器人以及搬运机器人等四大类型的工业机器人,形成了系列产品,并且已达到成熟阶段,形成了产业化的规模,有力地推动了制造业的大发展。工业机器人、数控(NC)和可编程控制器(PLC)一起成为工业自动化的三大技术支柱和基本手段。

机器人将会向智能机器人发展,所谓智能机器人就是有判断能力的机器人,这当然要有输

人。这个输入就是人具有的感官包括视觉、触觉,还可以给它更多的感官,让它具备有分析判断能力。大量的传感器安装在机器人身上,综合对环境的分析,来作出决策。

在世界范围内,机器人的占有量,常常用来评估一个国家的制造业的实力,目前日本机器人的数量占世界第一。从技术进步的角度,机器人可分为不同类型,到现在为止,人们把机器人研究的最高目标定为智能机器人。因此可将机器人分为3代:

第一代机器人是“示教再现”型。所谓示教,就是由人“教会”机器人运动轨迹、停留点位、停留时间等,然后机器人依照教给的行为、顺序和速度重复运动,即所谓的“再现”。示教可以由操作员“手把手”地进行,例如,操作员抓住机器人上的喷枪,把喷漆时要走的位置走一遍,机器人就记住这些运动,然后自动重复这些运动。这种是手把手示教,这种示教现在已不多见了。另一种示教方式是通过示教盒,让机器人一步一步地走,然后机器人自动记录下这些路程与节点,然后重复。但是,有的喷涂车间中所用的 Eisenmann 喷涂机器人采用了离线编程,也就是不再采用“示教再现”这种方式。这种离线编程首先要把被喷涂的对象数字化。例如, Mazda 轿车,首先给出这个车身的数字化模型,然后借助 Catia 或者 Autocad 等软件,进行数字化离线编程,在类似仿真的软件上不断来修改这些运行路径及各停留点,然后通过总线把这些编程结果送给 Eisenmann 机器人控制器,通过定标就可以进行工作。虽然这一编程方式还须在现场实际的运行中做一些修改,但是会大大地减少在现场编程的工作量。

第二代机器人带有一定量的对环境感知的传感器装置,使机器人能够了解环境,对环境的变化得以适应。最典型的莫过于对焊缝的跟踪技术。采用两个传感器就可以保证感知到焊缝的位置,并对运动进行反馈,这样机器人可以自动来跟踪焊缝,使焊接的工件一致性很好。由于对示教位置可以进行修正(这与前一代不同,第一代机器人示教什么就是什么样),就使得即使工件的原始位置有变化,机器人仍然能够很好地完成焊接任务。

第三代机器人是指具有判断和决策能力的机器人,也称为智能机器人,或是自治机器人。这些机器人有多种传感器,对环境的信息及时反馈到主控制器中。机器人可以判断自身所处的环境与状态,例如,发现前面有障碍,它能够通过各方面的信息做出决策,怎样来避障。有一个例子非常形象地表明了智能机器人的故事:在空荡的房间中,天花板上挂有一串香蕉,在墙边有一个凳子,智能机器人(猴)走进来,指令是要把香蕉拿到手。它伸一伸手,拿不到香蕉,它四边环视一下(收集外界信息),把凳子拿到挂香蕉的下面(决策),然后上了凳子拿下了香蕉。这个过程有很多输入,有很多决策,都是靠机器人自行完成的。

人工智能技术现在已有了很大的发展。21 世纪肯定会生产出众多智能机器人。它们用人的经验(知识工程中的专家系统)、人的智慧(人工智能技术)来代替人在各种复杂环境中完成各种任务。

工业机器人是应用于工业生产中的机器人。一般来说,这种机器人是比较大,比较结实,对恶劣环境也有一定的适应能力。除了工业机器人外还有很多其他种类的机器人。

(1) 服务机器人:一般是以自主或半自主方式运行,能为人类生活康复提供服务和安全保障的工作,如清洁、护理、娱乐和执勤等。

(2) 水下机器人:沈阳自动化所生产了水下机器人,主要是用来开发水下矿产,探寻大海的奥秘。

(3) 空间机器人:是指在大气层内和大气层外,从事各种各样作业的机器人。

1.2 机器人的基本原理

机器人有两个部分:控制部分和执行部分。例如应用比较广泛的点焊机器人中有机器人本体和机器人的控制箱。当然点焊机器人还应附带有焊钳和焊接控制器。机器人的机械手臂上拿着焊钳进行焊接,机器人要完成一系列的动作。这些动作就是由示教编程或者是离线编程所决定的。机器人按照人的意志进行动作、运动,完成焊接任务。

通过上面的介绍,可以看出机器人有一套机械结构,这套结构能承起负载(如焊钳),并按编好的程序运动,达到规定的各点(对位置有一定精度要求)。机器人能够实现这一原理是因为,机器人是一个能有多个自由度运动的机械结构,每个自由度都由电动机驱动,这些电动机按规定好的角度运动,最后,合成为执行器的运动。不仅要求运动轨迹,而且各个轴的运动速度也要严格要求。

这个机械结构是非常重要的,在第2章中将会详细地介绍。除此之外,还需要控制系统,控制系统能够接收人的意志,并把它转换成各个自由度的运动。这个控制系统就是一台计算机,这台计算机不仅控制着各个自由度的运动,而且还负责许多其他事情。例如,人告诉了计算机执行器要到哪几个点上,那么计算机就需要计算出从现在所处的位置到要求的点,各个轴应该怎么运动,各个轴运动速度与最终转角应该多大等问题。

计算机经常带着很大的负载运动,主要的一个问题就是如何保证安全。例如,两台机器人在一起工作,怎么保证不碰撞;进入到安全区的人,怎么不出危险。机器人的控制系统对安全承担着主要任务。

机器人要在运动过程中完成很多任务,例如,点焊、弧焊、喷涂等任务,这些任务必然要有很多的外围设备与机器人配合着工作。这些工作就要求在系统中有输入输出的接口,而且还要进行逻辑判断、逻辑运算。这就要求计算机开辟出一块 PLC 阵地,也就是内置 PLC,专门做这部分配合工作。

机器人还要对轴进行监视与控制,对各个轴的运动及负载转矩进行控制。

机器人的控制系统如图 1-1 所示,这个控制器就是一台计算机。对机器人各轴的驱动,单独设立了一套伺服系统,这套伺服系统是由一个三环系统组成的,有关这方面的情况将在后面章节中予以说明。这一套伺服系统就是保证计算机指令的准确执行。控制器内存有大量子程序,给机器人增添了许多功能,使机器人更加灵活,更加好用,有关控制器的情况也会在后面章节中予以说明。

通过上述介绍,可知机器人系统包括两大部分:机器人的本体和控制系统(图 1-2)。而机器人的控制系统中还包括伺服系统,有几个自由度就有几个伺服系统。曾经有过各种各样的伺服系统,例如,电气、液压、气动等动力源的伺服系统,但从目前趋势来看,比较多的是电气伺服系统。在一些特殊场合中也有应用液压与气动的伺服系统的。

在控制箱中还有机器人内置可编程控制器(也称内置 PLC),它主要负责与周边设备进行协调工作的逻辑控制。

在这里还必须提到总线控制,因为机器人仅仅是执行人的意志,而人的意志常常是通过总线进行传达,各个机器人也通过总线与人交流信息或与其他机器人交流信息。机器人中最常用的总线网络是 CAN。但目前在这方面的应用还远远满足不了工业生产的要求,有进一步开发的必要。

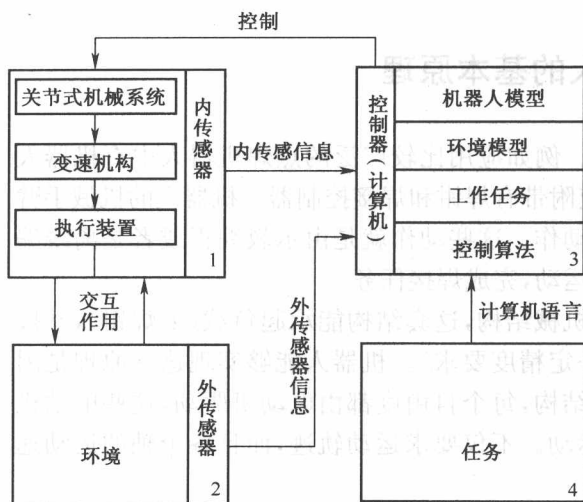


图 1-1 机器人控制系统基本结构

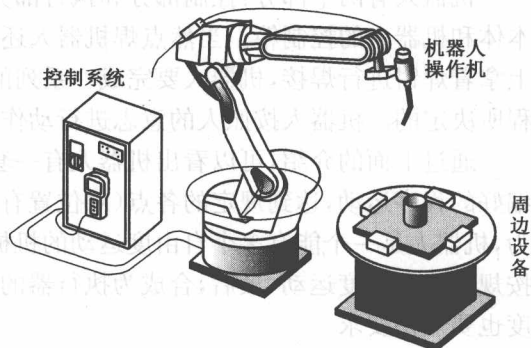


图 1-2 工业机器人系统结构图

机器人的机械结构到目前为止,仅仅实现了人类的胳膊和手的某些功能,而机器人这些手臂也都是由件(Link)和运动副(Pair)相互连接而构成的运动链(或称为开式运动链(Open Loop Kinematic Chain)。连杆(件)可称为手臂(Arm),运动副称为关节(Joint),关节又可分为平移关节和转动关节。机器人的末端称为手腕(Wrist)。在机器人中,手臂决定机器人所能到达的位置(Position),而手腕则决定机器人的姿态(Pose)。机器人在工作过程中不仅需要达到所规定的位置,而且还必须要求机器人在这个位置上能做所需的姿态。没有正确的姿态,机器人就不能正常的工作。这正如机器人握了一支笔,没有一个合适的姿态就不可能在一张纸上写出字来。

1.3 机器人中几个重要的概念

1. 自由度

机器人是由一些件连接而成,目前在工业上使用的最广泛的是多关节机器人。多关节机器人就是由件和与之相连的关节(运动副)所组成,也称为运动链。这个运动链的自由度就是这些件的独立运动或者确定件位置的独立参量数目。更通俗地讲,就是有几个运动,为了弄清楚自由度(Degree of Freedom)概念的涵义,先来看下面图形中的几个例子。

图 1-3 是一个自由件 AB 的运动,为简单起见,让它只在 xOy 平面内运动。很显然它可以有 3 个运动:沿 x 轴、沿 y 轴的移动,绕垂直于 xOy 平面的 z 轴转动。

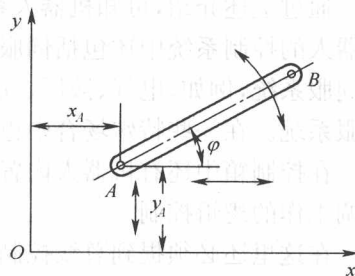


图 1-3 自由件的运动

图 1-4 是受约束件的运动。

图 1-4(a)表示件 1 受约束,是一个转动轴(转动副),只能是绕 O 轴转动,3 个自由度受到约束后,只有了 1 个自由度 φ 。

图 1-4(b)是一个移动副,这个约束也是限制了件 1 只可以沿 x 轴移动,把 1 个件的 3 个自由度限制为 1 个自由度。

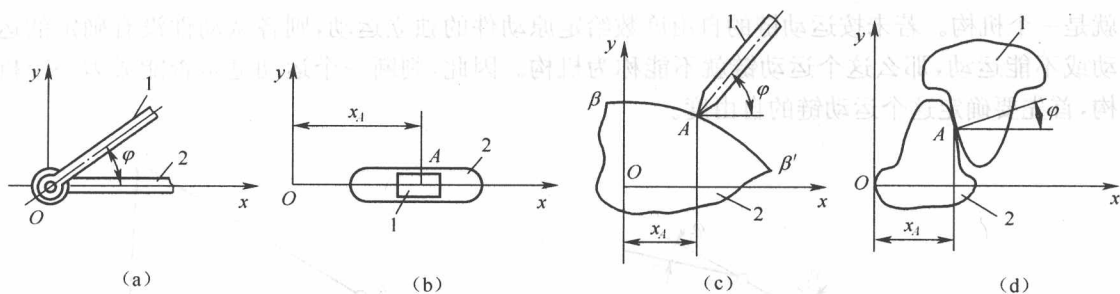


图 1-4 约束件的运动

以上这两种约束均称为低副,低副的特点就是面接触的运动副,这种约束可以使自由度减少两个。

图 1-4(c)与(d)的约束:图 1-4(c)是一个点接触,图 1-4(d)的运动副是线接触,这种运动副是高副。

如图 1-4(c)所示:件 1 只沿着曲线 $\beta\beta'$ 运动,实际上每移动一点均对 x 轴和 y 轴做了运动。但是, x 轴与 y 轴的运动是相互依存的,也就是通过 $\beta\beta'$ 曲线方程 $y=f(x)$,就可知 x 是自变量,而 y 是 x 的函数。实际上独立的运动只有一个而已。不过还有一个件对水平轴线的倾角 φ ,这是一个独立的运动。在这种高副的约束下,件 1 失去了 1 个自由度,剩下两个自由度。

总之,低副件具有一个相对自由度,受到了两个约束。高副件具有两个相对自由度,受到一个约束。

设两件组成平面运动副后,其相对自由度为 f ,约束为 s ,则必有 $f+s=3$ 。因运动副使两件失去一定的自由度,又不能使两个件固结在一起的条件是 $0 < f < 3$,而约束的条件是 $0 < s < 3$ 。因此平面机构中各运动副的约束数只能是 1 或 2,件的自由变数也只能是 2 或者是 1,运动副的约束数正是被连接的件所失去的自由度数。通过上述分析,可知约束的作用及自由度的涵义。

大多数机器人构成的件数目不是 1 个或 2 个,而是较多。两个以上的件通过运动副连接而成为一个机器人的系统称为运动链。这个运动链的自由度就是机器人的自由度。如果运动链中首末构成闭合,即组成了一个封闭形,则称为闭式运动链。闭式链可以是单闭环链或多闭环链。而机器人的运动链多为开式运动链。

在图 1-5 开式运动链中,如果假定也是平面运动,那么这 4 个件都只有一个自由度,也就是说,件 1 对固定支座(件 4)只有一个 φ_1 的转动,而件 2 对件 1 有一个 φ_2 的转动,件 3 对件 2 有一个 φ_3 的转动。因此这个开式运动链具有 3 个自由度。

在图 1-6 闭式运动链中,若 AD 件被固定,则 AD 件自由度为 0,有 4 个低副的运动副,那么约束 $s=2 \times 4=8$,3 个件(AB 、 BC 、 CD)的自由度为 $f=3 \times 3=9$,那么这个闭式传动链的自由度 $F=f-s=9-8=1$ 。如果这个闭式运动链是平面运动,显然只有一个自由度。通过几何学作图就可以了解这一点。如图 B 点绕 A 点转到该点, D 点为圆心,以 CD 为半径画一个圆,然后以 B 点为中心以 BC 长为半径与 CD 半径圆交于 C 点,这一点是唯一的解答。上述的意思是只要 B 点定下来, C 点就定下来了,而且是唯一的解答。换句话说,只要 φ_1 一定下来,这个机构的位置就一定了。

平面运动链自由度的计算:将运动链中一个件固定作为机架,再按运动链的自由度取几个件为原动件。通过原动件给定所需的独立运动。其余从动件就随着做确定运动,这个运动链

就是一个机构。若未按运动链的自由度数给定原动件的独立运动,则各从动件没有确定的运动或不能运动,那么这个运动链就不能称为机构。因此,判断一个运动链是否能成为一个机构,首先要确定这个运动链的自由度。

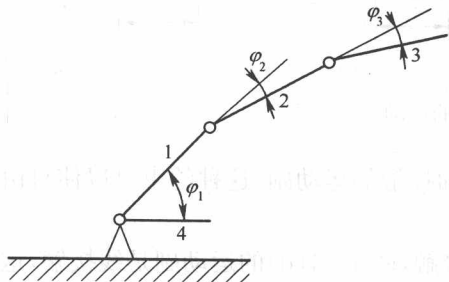


图 1-5 开式运动链

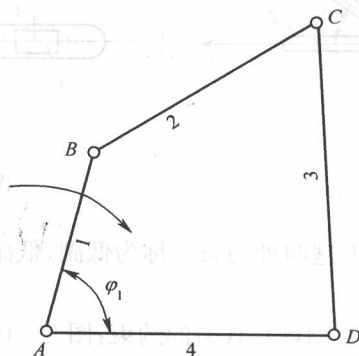


图 1-6 闭式运动链

设某平面闭式链只有 N 个件,选某一个件做为机架(相对固定件),则其余的件数为 $n = N - 1$ 个。在用运动副把这些件连接起来之前,这些件的自由度均为 3 个,那么自由度的总和为 $3n$ 。当用 P_L 个低副和 P_H 个高副连接成运动链之后,这些运动副所带来的约束数的总和为 $2P_L + P_H$ (每个低副引入两个约束,每个高副引入一个约束)。所以,整个运动链相对于机架(件)的自由度应为活动件自由度的总数与运动副引入的约束总数之差,如以 F 为运动链的自由度数,则得到式(1-1),即

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (1-1)$$

式(1-1)可用于闭式运动链,也可以用于开式运动链,当然也可以用到多关节式机器人上。

以开式运动链为例,如图 1-5 所示。

$$F = 3 \times n - 2P_L = 3 \times 3 - 2 \times 3 = 3$$

显然,这个开式运动链具有 3 个自由度。如果自由度 $F = 0$,则表明这个运动链不可能产生运动,这就是一个桁架。如图 1-7 所示,3 个件,其中件 1 为机架相对固定。

$$F = 3n - 2P_L = 3(3 - 1) - 2 \times 3 = 0$$

如果运动链的自由度大于零,则需进一步判断该运动链是否有确定运动。通常每一个原动件只有一个独立运动。若以电动机为原动机,那么这样的件就要装上一台电动机,它的转动带动着这个原动件做独立运动。结论:当运动链的自由度大于零时,原动件的数目应等于运动链的自由度数。

如果指定原动件数目小于运动链的自由度数,那么就会出现运动的不确定性。如果指定的原动件数目多于运动链的自由度数,那就会造成运动链的卡死,或件被破坏。

机器人是属于一个空间的运动链,如何分析空间运动链,这个问题显得稍微复杂一些。如图 1-8 所示,一个件 A 在 $O-xyz$ 的空间中,它可以沿 x 轴, y 轴, z 轴 3 个轴独立移动,也可以绕这 3 个轴转动。因此,一个件在空间中可以有 6 个自由度。

当两个独立件由运动副连接在一起以后,则其自由度就受到约束,自由度减少的大小应等于约束的数目。

若使两个件组成运动副后,仍可以运动,运动副的约束数目最多为 5 个,最少为 1 个,则有

如(1-2)的关系式表示,即

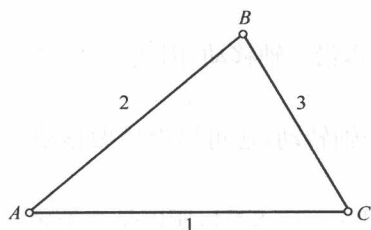


图 1-7 桁架(无自由度)

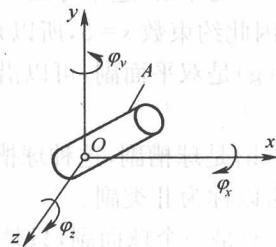


图 1-8 空间自由度

$$f+s=6 \text{ (其中 } 0 < f < 6, 0 < s < 6 \text{)} \quad (1-2)$$

各种约束数目不同,运动副的约束数目各不相同,运动副可分为 5 类:有一个约束的叫做 I 类运动副,有两个约束的运动副为 II 类运动副,直到有 5 个约束的运动副称为 V 类运动副。下面给出了各类运动副的类别(如图 1-9 所示)。

图 1-9(a)是转动副,很显然只有一个独立运动,因此约束数 $s=5$,所以是 V 类副。

图 1-9(b)是移动副,很显然只有一个移动,因此约束数 $s=5$,所以是 V 类副。

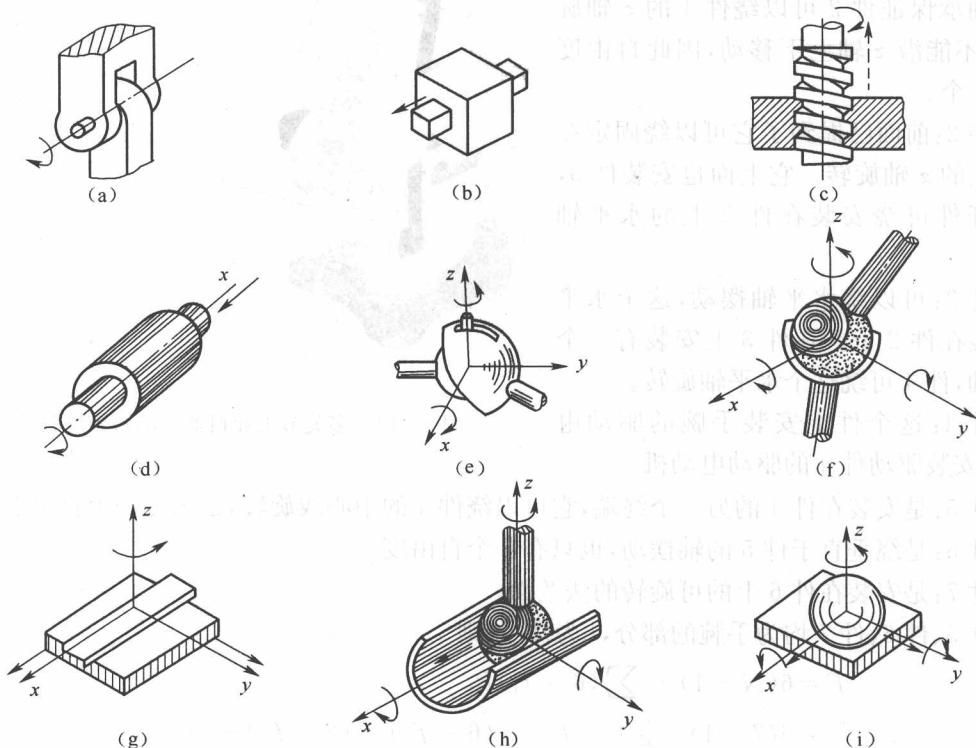


图 1-9 运动副的类别

(a) V 类副(转动副) (b) V 类副(移动副) (c) V 类副(螺旋副) (d) IV 类副(圆柱副) (e) IV 类副(球销副)
(f) III 类副(球副) (g) III 类副(双平面副) (h) II 类副(球槽副) (i) I 类副(面球副)

图 1-9(c)是螺旋副,看起来有一个转动还有一个上下移动,但是作为独立运动还是只有一个,因此约束数 $s=5$,所以是 V 类副。

图 1-9(d)是圆柱副,可以有转动,也可以有移动,因此 $s=6-2=4$,所以是 IV 类副。

图 1-9(e)是一个球销副,可以和 x 轴、 y 轴转动,因此约束数 $s=6-2=4$,所以是 IV 类副。

图 1-9(f)是球副,这个球副不会产生沿 x, y, z 轴的移动,只是可以同时或单独沿 x, y, z 轴的转动。因此约束数 $s=3$,所以是Ⅲ类副。

图 1-9(g)是双平面副,可以沿 x 轴、 y 轴移动,也可以沿 z 轴移动,因此 $s=6-3=3$,所以是Ⅳ类副。

图 1-9(h)是球槽副,这种球槽副可以绕 x, y, z 3 个轴转动,还可以沿槽做移动。因此约束数 $s=2$,所以称为Ⅱ类副。

图 1-9(i)是一个球面副,只是不能沿 z 轴移动,因此 $s=6-5=1$,所以是Ⅰ类副。

设可动部件个数为 n ,自由度为 f ,关节的个数为 P_i, i 为件号,则这个件机构(运动链)的自由度数 F 可由式(1-3)标出,即

$$F=6n-\sum(6-f_i)P_i \quad (1-3)$$

下面以不二越(Nachi)公司的多关节机器人(图 1-10)为例计算出它的自由度数。

件 1:在一个大底座上面安装轴承,这个轴承保证件 2 可以绕件 1 的 z 轴旋转,但不能沿 z 轴上下移动,因此自由度只有 1 个。

件 2:前面已提到了它可以绕固定在件 1 上的 z 轴旋转。它上面也安装件 3,这个杆件可绕安装在件 2 上的水平轴摆动。

件 3:可以绕水平轴摆动,这个水平轴安装在件 2 上。在件 3 上安装有一个水平轴,件 4 可绕这个水平轴旋转。

件 4:这个件上安装手腕的驱动电机,还安装驱动件 4 的驱动电动机。

件 5:是安装在件 4 的另一个终端,它可以绕件 4 的中心线旋转,也只有一个自由度。

件 6:是绕垂直于件 5 的轴摆动,也只有一个自由度。

件 7:是安装在件 6 上的可旋转的法兰面。

件 5、件 6、件 7 均为手腕的部分, i 为件号,则

$$\begin{aligned} F &= 6(N-1) - \sum(6-f_i)P_i \\ &= 6(7-1) - [(6-f_2) + (6-f_3) + (6-f_4) + (6-f_5) + \\ &\quad (6-f_6) + (6-f_7)] \\ &= 36 - 30 = 6 \end{aligned}$$

或者

$$F=6 \times 6 - (6-1) \times 6 = 6$$

在三维空间中的无约束的物体,它一定是具有 6 个自由度,否则不可能做到无约束,而工业机器人若想在三维空间内能任意操纵物体的位置与姿态,也必须至少有 6 个自由度。

人的手臂有 7 个自由度,其中肩关节为 3 个,肘关节为两个,手关节为两个(或从功能观点

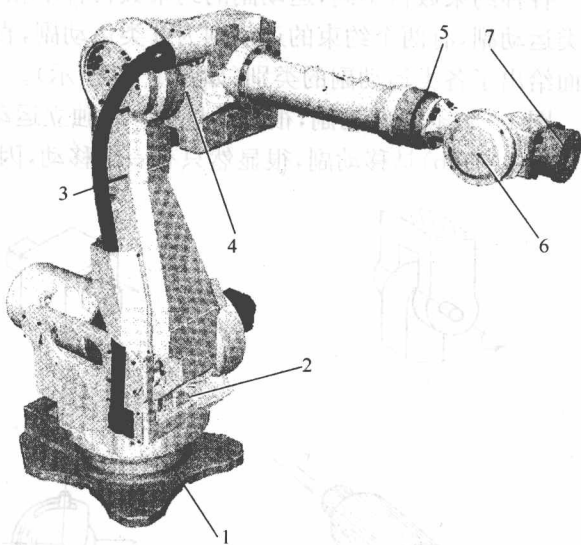


图 1-10 多关节工业机器人的自由度计算

来看,也可以认为肩关节为 3 个,肘关节为 1 个,手关节为 3 个),它比 6 个还多了一个,称为冗余自由度(Redundant Degree of Freedom)。这个冗余自由度对人也是有用的,它可以回避障碍物。

机器人的自由度的构成,与它的工作任务有关。例如,若在一个平面内进行动作,显然,只要有 3 个自由度也就够了。如果在一个空旷的空间内工作,有 6 个自由度也就可以随心所欲了。如果在这个空间中有许多障碍物,那么为了躲避这些障碍物,就势必要有多个冗余的自由度才行。如果用机器人进行一些人难以接近的维修工作。例如,核电站、化学品生产工厂,就要更多的冗余自由度。

在机器人中的 6 个自由度常常是这么分配的:第一、二、三轴是 3 个自由度,它可以在它的作业空间中到达所需的位置,第四、五、六轴也是 3 个自由度,它是到达了所需的位置后,用这 3 个自由度来对执行器取出规定的姿态。例如,点焊机器人用 U 、 L 、 S 轴把焊钳送到规定好的位置,然后由 R 、 B 、 T 轴把焊钳调整到可焊接工作的姿态。当然这是解释时把它们的动作分开来说,实际上是同时进行的。

工业机器人就是由件和运动副相互连接而构成的开式运动链。

2. 工业机器人的动作形态

工业机器人的手臂在三维空间的位置确定,必须有 3 个自由度。这 3 个自由度可以是平移、旋转、回转。这 3 种运动状态进行组合,可以组成 27 种: $3^3=3 \times 3 \times 3=27$ 。在这 27 种的组合中有代表性的自由度的构成有下列 5 种:①圆柱坐标型机器人(Cylindrical Coordinate Robot);②球坐标型机器人(Polar Coordinate Robot);③直角坐标型机器人(Cartesian Coordinate Robot);④关节型机器人(Articulated Robot);⑤并联型机器人(Parallel Robot)。

1) 圆柱坐标型机器人

如图 1-11 所示,是由一个回转和两个平移所组成。整个立柱可以旋转,手臂可以沿立柱上升或下降,而且手臂可伸长或缩回。也就是使旋转半径随工作的要求而变化。图 1-11 是一个示意图,⊙表示可以旋转,=表示可以伸长缩小。它的整个活动空间是由两个圆柱体界定的空心圆柱体,缩回的最小半径是内圆柱的半径,伸出最长的半径是外圆的半径。上升最高度为圆柱的上底,下降最低点为圆柱的下底,在这个空间内,这台圆柱型机器人都可以达到。世界上最初实用化的工业机器人“Versatran”就是采用圆柱坐标系的机器人。这种机器人可把零件放入一个型腔,或从车座或铸模机上取下零件。

机器人工作的条件不只是可以达到就可以工作,还有一个姿态的问题,手上的执行器所采取的姿态要由另外 3 个自由度来选取姿态。因此,动作范围(Motion Range)之中还要考虑一个作业范围,这个作业范围不仅与执行器的大小有关,还与执行任务所需的姿态有关。当然,作业范围肯定要比动作范围要小一些。

2) 球坐标型机器人

如图 1-12 所示, C 点是这个臂的回转中心,这个臂可以伸长,也可以缩短,回转中心也可以回转。也就是臂的仰和俯可以做出一个与纸面相符的一个缺损圆,如果中心旋转轴再旋转,就可以出现一个球面了。正如符号简图所表示的那样,这个臂可以伸长与缩短,而且整个臂可以绕 C 点摆动,如图 1-12 所示:⊙表示可以摆动。这个动作范围应该是一个空心球,由于手臂并不能理想地扫出一个圆,因此,这个球是一个缺损的球。这种机器人的动作状态在机器人实用的初期很多,例如美国 Unimation 公司生产的 Unimate 机器人就是采用这种结构。这种结构较其他各种结构更容易伸入到上下倾斜孔的内部,当有这种需求时应优先考虑球坐标型机器人。

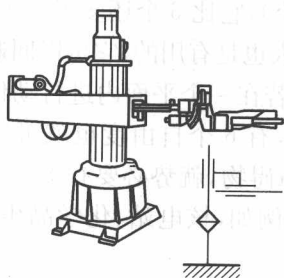


图 1-11 圆柱坐标型机器人

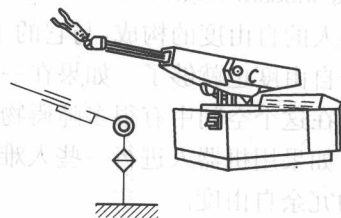


图 1-12 球坐标型机器人

3) 直角坐标型机器人

如图 1-13 所示,有两个相互垂直的导轨,在其上还有一个与两个垂直导轨相垂直的导轨,构成了一个直角坐标的三维体系,即 x, y, z 。这种机器人由于结构简单(在 x, y, z 三轴上没有旋转与摆动),因此制造的精度可以很高,而且在控制器内轨迹的计算方法也非常简单。这种机器人的工作范围较大,所以可以作为高空搬运车。它可以代替桁车。这种机器人能够对炉膛或其他空腔设备做直线送进运动。三坐标测量机也是一个直角坐标型机器人。

4) 关节型机器人

如图 1-14 所示,它主要是由回转和旋转自由度构成的,可以看成是仿人手臂的结构。英文单词 Articulate 就是一个铰链之意。它是具有肘关节的连杆关节结构。从肘(Elbow)到手臂根部(Shoulder,肩)的部分称为上臂(Upper Arm),从肘到手腕(Wrist)的部分称为前臂(Fore Arm)。这种结构对于确定的三维空间上任意位置和姿态是最有效的。它对于各种各样的作业都有良好的适应性,缺点是坐标计算和控制比较复杂,而且难以达到很高的精度。

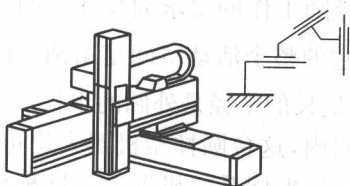


图 1-13 直角坐标型机器人

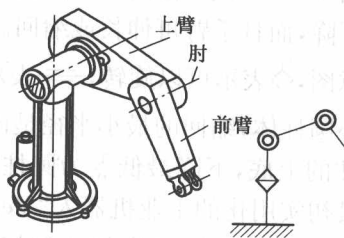


图 1-14 关节型机器人(普通型)

关节型机器人位置计算需要快速的计算机进行复杂的运算,因此,在机器人发展的初期,人们不能去选用这种结构,因为太贵。现在计算机的运算速度大大提高,而且价格也便宜下来,所以很多机器人的设计者选用了这种结构。有关这方面的问题在机器人的运动学与动力学中有详细的介绍。

这种结构的机器人最著名的有 DeVilbiss Trallfa、Cincinnati Milacron、Nordson 机器人,它们都是采用液压驱动系统。Unimation PUMA 和 ASEA 都是由电动机驱动的机器人。

5) 并联型机器人

如图 1-15 所示,是一种新型结构的机器人,它通过各件的复合运动,给出末端的运动轨迹,以完成不同类型的作业。该结构机器人的特点是刚性好,可用来完成数控机床的一些功能,因此也称为并联车床。目前已有样机,可以完成复杂曲面的加工,特别是精细的加工

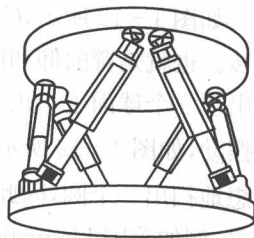


图 1-15 并联型机器人