

 机构设计与应用创新丛书

空间机构设计与 应用创新

谢存禧 李琳 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



机构设计与应用创新丛书

空间机构设计与应用创新

谢存禧 李 琳 主编
张 铁 翟敬梅 邹焱飙 参编



机械工业出版社

本书是“机构设计与应用创新丛书”之一。全书分两篇共8章。第1篇为空间机构设计的基本知识。在扼要阐明空间机构的组成原理和数学基础后,详细阐述空间闭链机构和空间开链机构的运动分析和力分析方法,并介绍了空间闭链机构设计的基本问题和基本方法。第2篇为空间机构在工程设计中的应用。主要介绍了空间闭链机构、空间开链机构中应用较多的机器人机构的设计基本知识,并列举了焊接机器人、喷涂机器人、装配机器人等的设计与应用。

本书适于从事机构设计的专业技术人员使用,也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间机构设计与应用创新/谢存禧,李琳主编. —北京:
机械工业出版社, 2007. 10
(机构设计与应用创新丛书)
ISBN 978 - 7 - 111 - 22239 - 2

I. 空… II. ①谢…②李… III. 空间机构 - 机械设计
IV. TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第134215号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:黄丽梅 责任校对:魏俊云
封面设计:陈沛 责任印制:邓博
北京京丰印刷厂印刷
2008年1月第1版·第1次印刷
169mm×239mm·7.25印张·277千字
0 001—4 000册
标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 22239 - 2
定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 68351729
封面无防伪标均为盗版

前言

随着科学技术的发展,机构的创新不断涌现,原有的知识需要不断的修正与更新,本书就是根据近几年的研究成果和当前的新技术、新方法以及空间机构的研究需要而编写的。

空间机构学的研究虽起始于20世纪20年代后期,但相对于平面机构而言,其研究深度与应用广度均颇复杂,这实为空间机构的结构与运动的复杂性,计算手段的局限性,以及加工、装配和检测的水平等原因所使然。随着计算机技术的发展与普及,化解了空间机构计算的繁复性,同时也出现了随之发展的现代控制理论、新型的驱动器件、传感元件及集成电路等;使空间机构复杂运动的控制与实现成为可能。数控精密加工机床和精密量具的出现,也解决了复杂形状结构的制造和检测问题。生产力的快速发展,也为空间机构的纵深研究和普遍应用创造了外部条件。

空间机构灵活多样、结构紧凑、占用空间小及可用少量杆件实现复杂运动等突出优点,更为人们赏识。因此,近几十年时间内,空间机构学的研究以及所取得的成果远超过以往,并且使空间机构学的研究由纯机械学引申为机械电子学的范畴,出现了许多与自动化理论、信息科学等相交叉的空间机构学研究课题。其中机器人机构学最为瞩目,其本质上就是空间机构学的一个重要分支。在机、电、光、气、液各相关学科的共同促动下,除了保留一些传统的机构学分析方法之外,已经出现了许多与之适应的新理论和新方法,成为多学科渗透交叉的典型。

在空间机构研究迅猛发展、成果多如繁星的今天,作为“机构设计与应用创新丛书”之一,要能概括这些进展且又要突出其应用性,作者确感力不从心。我们只能在继承前人研究的基础上,辅以自身研究经历的片鳞只爪来草就这一拙著。这样不可避免地有以偏概全之虞。空间机构分析和综合的方法相当多,限于精力和时间,我们无法亲自去全部涉历。因此,例如对运动分析和动力分析,书中仅分别介绍矩阵法和拉格朗日方法;在综合方面仅介绍常用的几种方法。示例也限于作者所做所见。幸好目前有关著作甚多,其他方法读者可自行觅山寻宝。

本书分两篇共8章。第1篇包括5章,主要阐述了空间机构设计的基本知识。第1章介绍了空间机构的组成原理和一些基本概念;第2章阐述了空间机构的数学基础知识;第3章和第4章分别阐述了空间机构的运动分析和受力分析,第5章介绍了空间闭链机构设计的基本方法。第2篇包括3章,主要阐述了空间

IV

机构在工程设计中的应用。第6章介绍了空间闭链机构的设计应用,第7章介绍了空间开链机构即机器人机构设计的基本知识,第8章对机器人机构设计应用进行了分析。为了便于读者应用,各部分都列举了设计实例,并在理论分析的基础上,给出了解决的数学方法和计算方法,便于使用计算机得到计算结果。列举了焊接机器人、喷涂机器人、装配机器人等应用比较广泛的机器人机型,便于读者对现有机器人的设计与应用有深刻了解。

本书由谢存禧、李琳主编。具体编写情况为:谢存禧、李琳编写第4、5章,张铁编写第6、8章,翟敬梅编写第1、7章,邹焱飙编写第2、3章。

由于本书的撰写局限于作者在国家攻关项目、“863”项目、国家自然科学基金项目以及研究生研究课题中的经历,又限于水平,可能存在片面、疏漏甚或误讹之处,恳请读者、专家批评指正。

编 者

机械工业出版社机械行业标准出版信息

我社出版自 2002 年开始发布的现行机械行业标准 (JB), 其中包括机械、电工、仪表三大行业, 涉及设备、产品、工艺等几大类。为保证用户查询、购买方便, 特提供以下信息:

查询标准出版信息、网上订购

<http://www.cmpbook.com/standardbook/bzl.asp>

<http://www.golden-book.com>——机械工业出版社旗下大型科技图书网站

标准出版咨询

机械工业出版社机械分社电话: 010-88379778

010-88379779

电话订购

电话: 010-68993821 010-88379639

010-88379641 010-88379643

010-88379693 010-88379170

传真: 010-68990188 (可写明购书信息及联系方式)

地址: 北京市西城区百万庄大街 22 号

邮政编码: 100037

户名: 北京百万庄图书大厦有限公司

账号: 8085 1609 1908 0910 01

开户行: 中国银行北京百万庄支行

目 录

前言

第1篇 空间机构设计的基本知识

第1章 空间机构的组成

原理 1

- 1.1 基本概念 1
- 1.2 机构的自由度 7
- 1.3 空间机构的组成 12

第2章 空间机构的数学

基础 20

- 2.1 回转变换矩阵 20
 - 2.1.1 点的位置在坐标系中的表示 20
 - 2.1.2 绕坐标轴回转的变换矩阵 21
 - 2.1.3 绕任意轴回转的变换矩阵 23
 - 2.1.4 绕定点转动的回转变换矩阵 24
 - 2.1.5 不共原点的坐标变换 26
 - 2.1.6 齐次变换 26
- 2.2 回转变换矩阵的性质及其运算法则 27
 - 2.2.1 回转变换矩阵的性质 27
 - 2.2.2 回转变换矩阵的运算法则 28
 - 2.2.3 回转变换矩阵的分量 29
 - 2.2.4 回转变换矩阵的微分 31
- 2.3 多项式方程解法 31
 - 2.3.1 对分区间法 32
 - 2.3.2 迭代法 32
 - 2.3.3 牛顿法 32

2.4 非线性方程组解法 33

第3章 空间机构运动分析 35

- 3.1 运动分析的基础 35
 - 3.1.1 概述 35
 - 3.1.2 D-H 坐标系 35
 - 3.1.3 相邻坐标系的变换 36
- 3.2 空间机构的位姿方程 38
 - 3.2.1 空间闭链机构 38
 - 3.2.2 空间开链机构及机器人机构 39
- 3.3 空间机构的位移分析 42
 - 3.3.1 空间闭链机构 42
 - 3.3.2 空间开链机构运动学逆解 49
 - 3.3.3 空间开链机构的工作空间 54
- 3.4 空间机构的速度、加速度分析 61
 - 3.4.1 空间闭链机构 61
 - 3.4.2 空间开链机构 63

第4章 空间机构受力分析 67

- 4.1 空间闭链机构受力分析 67
 - 4.1.1 空间闭链机构的静力分析 67
 - 4.1.2 空间闭链机构的动力分析 76
- 4.2 空间开链机构受力分析 85
 - 4.2.1 空间开链机构的静力分析 85

- 4.2.2 空间开链机构的动力
分析 88

第5章 空间闭链机构设计

的基本方法 103

- 5.1 空间闭链机构设计的
基本问题 103
- 5.1.1 设计空间与约束条件 103
- 5.1.2 设计要求与可行方案
的数目 104
- 5.1.3 型综合与尺寸综合 105
- 5.2 按位移要求设计空间闭链
机构 105
- 5.2.1 函数综合 105
- 5.2.2 轨迹综合 109

- 5.2.3 刚体导引 110
- 5.3 按速度、加速度和动力特性
设计空间闭链机构 113
- 5.3.1 按速度、加速度要求
设计空间闭链机构 114
- 5.3.2 按动力特性要求设计
空间闭链机构 116
- 5.3.3 空间闭链机构的特殊
位置和压力角 116
- 5.4 空间闭链机构的优化综合 117
- 5.4.1 优化设计 117
- 5.4.2 直接处理约束条件的
优化方法 120
- 5.4.3 间接处理约束条件的
优化方法 122

第2篇 空间机构在工程设计中的应用

第6章 空间闭链机构的设

计及其应用 128

- 6.1 按主、从动件摆角要求设计
空间闭链机构 128
- 6.1.1 单闭链机构 128
- 6.1.2 多闭链机构 131
- 6.2 按运动轨迹设计空间闭链
机构 134
- 6.2.1 单自由度机构 135
- 6.2.2 多自由度机构 137
- 6.3 按工作性能要求设计空间
闭链机构 140
- 6.3.1 按工作行程和动力性
能设计活塞机构 141
- 6.3.2 按工作行程和静力要
求设计农机耕作器
起落机构 143
- 6.3.3 按工作速度要求设计
筛驱动机构 145
- 6.4 空间机构在工程中的应用 149
- 6.4.1 空间机构在轻工机械

中的应用 149

- 6.4.2 空间机构在农业机械
中的应用 152
- 6.4.3 空间机构在飞机和汽
车上的应用 153

第7章 机器人机构设计的

基本方法 156

- 7.1 机器人机构的结构设计 156
- 7.1.1 手臂的结构形式 156
- 7.1.2 手腕的结构形式 157
- 7.1.3 手臂和手腕的相关性 158
- 7.1.4 物体姿态的实现 159
- 7.1.5 机器人机构的结构设
计方法 160
- 7.2 机器人机构的尺寸设计 161
- 7.2.1 基于末杆位姿要求的
尺寸设计 161
- 7.2.2 基于末杆活动空间要
求的尺寸设计 167
- 7.3 机器人轨迹规划 171
- 7.3.1 多项式插补方法 171

7.3.2 用抛物线过渡的线性插值	172	8.1 焊接机器人	177
7.3.3 圆弧插补	173	8.2 点焊机器人	190
第8章 机器人机构的分析与应用	177	8.3 喷涂机器人	202
		8.4 装配机器人	212
		参考文献	219

第 1 篇 空间机构设计的基本知识

第 1 章 空间机构的组成原理

机构研究是机构学中一个最基本的问题，它不仅有助于对现有的机构进行分析和综合，而且对新机构的设计、创新和发明起着指导性的作用。

本章主要介绍空间机构结构组成的一些基本概念、空间机构的自由度分析以及根据自由度或运动形式对空间机构进行综合。

1.1 基本概念

1. 构件

构件是组成机构的基本运动单元。它可以是一个零件，也可以由若干刚性地连接在一起的零件组成。

图 1-1 所示为一内燃机机构，连杆为机构中的一个构件，连杆的结构如图 1-2 所示，连杆是由连杆体、连杆头、螺栓、螺母、垫圈等若干个零件刚性地连接在一起，作为一个整体而运动的。

自由构件在空间坐标系中有 6 个基本运动，如图 1-3 所示，即沿 3 个坐标轴 x 、 y 、 z 的独立自由移动和绕 x 、 y 、 z 轴的独立自由转动。因此自由构件要用 6 个独立的自由参数 s_x 、 s_y 、 s_z 、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 来描述这些运动，所以空间自由构件具有 6 个自由度。

2. 运动副

当由构件组成机构时，需要以一定的方式把各个构件彼此连接起来，而且每个构件至少必须与另一构件相连接。这种连接不是刚性的，应保证彼此连接的两构件之间能产生某些相对运动。

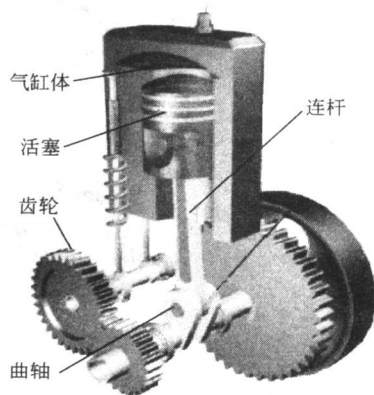


图 1-1 内燃机机构

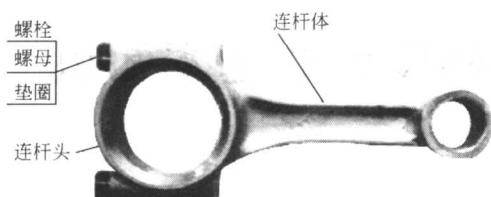


图 1-2 连杆结构

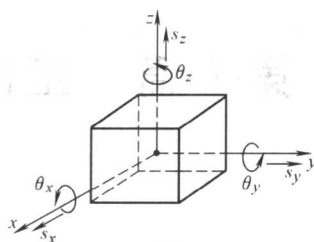


图 1-3 自由构件的自由度

这种由两个构件组成的可动的连接称为运动副。两构件上参加接触而构成运动副的表面称为运动副元素。每个运动副由两个运动副元素组成，它们分别位于不同的构件上。

运动副所允许的独立的相对运动数目，称为该运动副的自由度。具有一个相对运动的运动副称为Ⅰ类运动副，具有两个相对运动的运动副称为Ⅱ类运动副，依此类推，有Ⅲ类运动副、Ⅳ类运动副和Ⅴ类运动副。第 i 类运动副允许有 i 个相对运动，并且同时具有 $6 - i$ 个约束。

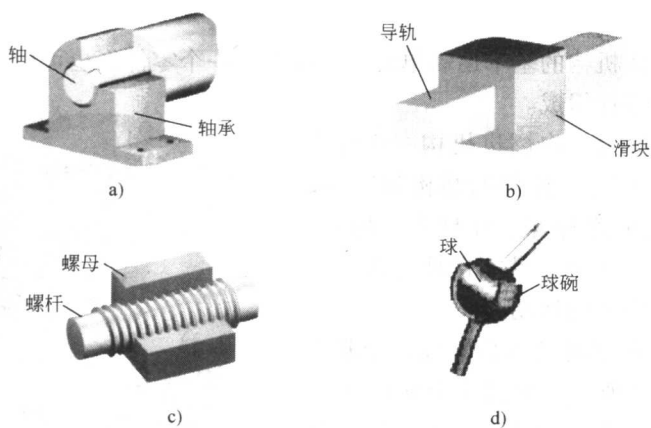


图 1-4 运动副类型

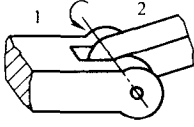
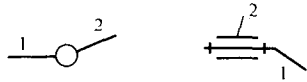
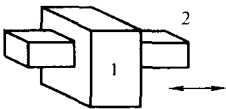
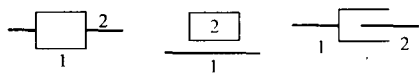
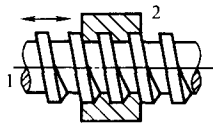
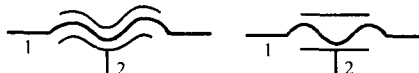
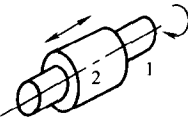
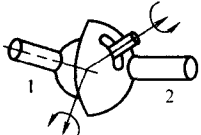
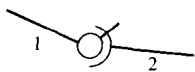
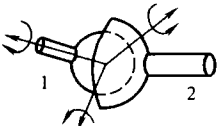
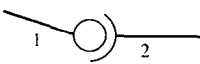
a) 转动副 b) 移动副 c) 螺旋副 d) 球面副

除了根据相对运动数目进行分类外，运动副还可根据构成运动副的两构件的接触情况进行分类。两构件通过点或线的接触而构成的运动副称为高副，两构件通过面接触而构成的运动副称为低副。运动副还常根据构成运动副的两构件之间的相对运动的不同来分类。把两构件之间的相对运动为转动的运动副称为转动副或回转副，如图 1-4a 所示；相对运动为移动的运动副称为移动副，如图 1-4b 所

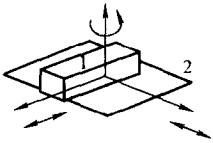
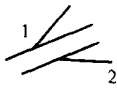
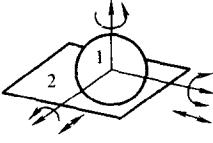
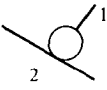
示；相对运动为螺旋运动的运动副称为螺旋副，如图 1-4c 所示；相对运动为球面运动的运动副称为球面副，如图 1-4d 所示。此外，还可把构成运动副的两构件之间的相对运动为平面的运动副称为平面运动副，两构件之间的相对运动为空间运动的运动副称为空间运动副。

为了书写和作图方便，用代号和简图代表运动副，见表 1-1。通常，转动副用 R 表示，移动副用 P 表示，螺旋副用 H 表示，圆柱副用 C 表示。

表 1-1 常见运动副的简图及代号

类别	名称	代号	图 形	简 图
I	转动副	R		
	移动副	P		
	螺旋副	H		
II	圆柱副	C		
	球销副	S'		
III	球面副	S		

(续)

类别	名称	代号	图 形	简 图
III	平面副	E		
IV	曲面副			
V	点接触 高副			

空间机构常以它所含的全部运动副的代号来命名。例如，由 1 个转动副、3 个圆柱副连接而成的机构称为 RCCC 机构。

3. 运动链

两个以上的构件通过运动副的连接而构成的系统称为运动链。如果运动链的构件未构成首末封闭的系统，如图 1-5a、b 所示，则称其为开式运动链，简称开链。如果运动链的各构件构成首尾封闭的结构，如图 1-5c、d、e 所示，则称为闭式运动链，简称闭链；闭链中有单环闭链和多环闭链，图 1-5d、e 中构件 1—2—3—4 构成平面单环闭链，1-5c 中，构件 0—1—2—3 和构件 0—2—3—4 构成两个闭链，因此为双环闭链。在运动链中，如果每一个构件都在同一平面或相互平行的平面内运动，则称为平面运动链；否则称为空间运动链。本书着重阐述空间运动链。

4. 机构

在运动链中，如果以某一构件为参考系，当某些构件按给定的运动规律运动时，其余所有构件都有确定的相对运动，那么，这个运动链便成为一个机构。机构中作为参考系的构件称为机架，按给定运动规律运动的构件称为原动件，其余活动构件称为从动件。从动件的运动规律取决于原动件的运动规律和机构的结构。

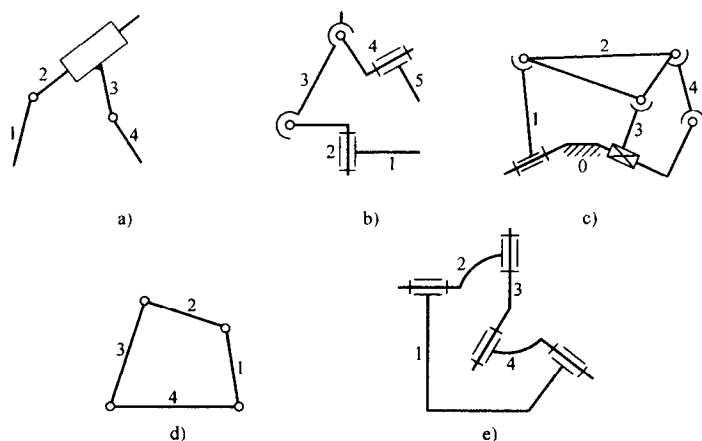


图 1-5 运动链

a)、b) 开链 c)、d)、e) 闭链

多于一个闭链的机构称为多闭链机构，或称多环机构；而只有一个闭链的机构称为单闭链机构。

图 1-6 所示为缝纫机主传动机构。该机构由 4 个单闭链机构组成：平面曲柄摇杆机构 1—2—4—5—1、平面凸轮机构 1—5—6—1、平间双摇杆机构 1—2—3—9—1 和空间五杆机构 1—6—7—8—9—1。在缝纫过程中，动力从主轴 5 传入，一方面经凸轮机构驱动水平轴 6 摆动，使弯针 7 获得沿针脚的往复摆动；另一方面通过平面曲柄摇杆机构串接空间双摇杆机构和空间五杆机构，使弯针围绕安装在水平轴 6 上的转动副作往复摆动。两种方向上的摆动，遂复合成弯针所需的复杂空间运动。

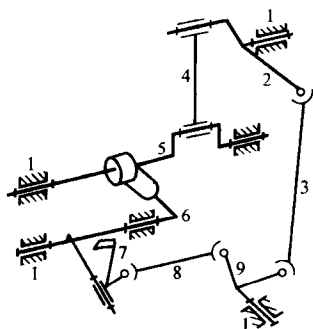


图 1-6 缝纫机主传动机构

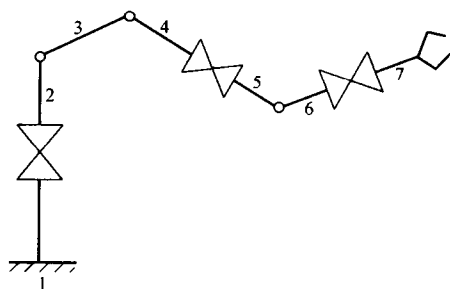


图 1-7 机器人机构

图 1-7 所示为机器人机构, 由 6 个转动副将机架与 6 个运动构件连接起来, 是开式运动链。通过各转动副各自按预期的运动规律转动, 便可确定末杆在空间的位置和方向。

设开链的构件数目为 N , 运动副的数目为 p , 由于两个构件才能构成一个运动副, 而当继续增加构件时, 每增加一个构件必然同时增加一个运动副, 所以对于开式运动链, 构件数和运动副数目有如下关系:

$$N = p + 1 \quad (1-1)$$

闭链机构可看作是将开链机构的末杆与机架固连而得, 因而在运动副相同的条件下, 单闭链机构比相应的开链机构的构件数目少 1。每增加一个封闭形 (闭链), 构件的数目将减少 1, 对于具有 L 个封闭形的机构, 构件数和运动副数目有如下关系:

$$N = p + 1 - L \quad (1-2)$$

5. 笛卡儿坐标和广义坐标

刚体的运动可用笛卡儿坐标来描述。图 1-8 所示的双摆动杆, 杆 1 的长度为 l_1 , 绕 z 轴的摆动角为 q_1 ; 杆 2 的长度为 l_2 , 相对杆 1 的摆动角为 q_2 。杆 2 绕 z 轴的摆动角 θ_z 与杆 2 上 P 点的位置矢量 $\mathbf{P} (x_p, y_p)$ 满足如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} \theta_z &= q_1 + q_2 \\ x_p &= l_1 \cos q_1 + l_2 \cos \theta_z \\ y_p &= l_1 \sin q_1 + l_2 \sin \theta_z \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

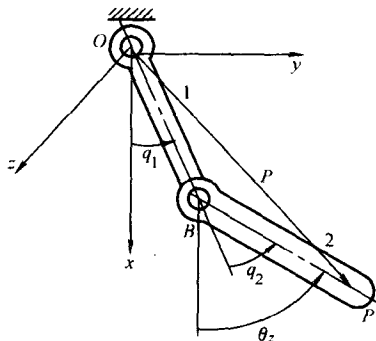


图 1-8 双摆动杆

以上各量中, q_1 、 q_2 是描述运动的独立参数。 q_1 、 q_2 确定后, θ_z 、 x_p 和 y_p 也随之确定。用来确定一个系统运动状况的独立变量称为广义坐标, 如上述的 q_1 和 q_2 ; 而系统运动时所应满足的数学关系式 [如式 (1-3)], 称为约束方程。一般来讲, 一个机构的运动可以由 n 个相互独立的广义坐标来描述, 系统的任意位形都可用这 n 个广义坐标表示出来。反之, 任意一组广义坐标数值也对应着满足约束的一个确定位形。这 n 个广义坐标构成了一个 n 维空间, 称为广义坐标位形空间, 简称广义坐标空间。

广义坐标必须是互相独立的。任何一组能够完全描述系统运动的独立变量, 都可选作广义坐标, 可以是笛卡儿坐标, 也可以是其他量, 如极坐标、球坐标、相对角位移或线位移等。

1.2 机构的自由度

1. 机构自由度的计算

机构中各构件有确定运动时, 所需给定的独立参数称为机构的自由度。很显然, 机构的自由度等于广义坐标数目。两个构件在尚未用运动副连接前, 在笛卡儿空间中共有 12 个自由度, 当它们用 1 个 k 类运动副连接起来后, 确定第 1 个构件的位置仍需要 6 个独立参数, 确定第 2 个构件相对第 1 个构件的位置, 需要 k 个独立参数。故连接后两个构件的自由度为 $k+6$ 。对于由 N 个构件组成, 含有 p_1 个 I 类运动副、 p_2 个 II 类运动副、 p_3 个 III 类运动副、 p_4 个 IV 类运动副和 p_5 个 V 类运动副的机构, 其自由度 F 的计算公式为

$$F = 6n - (6-1)p_1 - (6-2)p_2 - (6-3)p_3 - (6-4)p_4 - (6-5)p_5$$

$$= 6(n-p) + \sum_{i=1}^5 ip_i \quad (1-4)$$

式中 p ——运动副的总数, $p = \sum_{i=1}^5 p_i$;

n ——除去机架后的活动构件数目。

2. 空间开链机构的自由度

在开链机构中, 有 1 个构件为机架, 它的自由度为零。由式 (1-1), 除去机架后的活动构件数目与运动副数目相同, 即 $n-p=0$, 根据式 (1-4) 可知:

$$F = \sum_{i=1}^5 ip_i = \sum_{i=1}^p f_i \quad (1-5)$$

式中 f_i ——第 i 个运动副的自由度。

开链机构的自由度等于它所具有的各运动副自由度的总和。

【例 1-1】 计算图 1-9 所示机械手机构的自由度。

解: 该机械手为一个空间开链机构, 由 4 个转动副 (I 类运动副)、1 个移动副 (I 类运动副) 和 1 个圆柱副 (II 类运动副) 组成。所以该机构自由度为

$$F = \sum_{i=1}^6 f_i = 1 \times 4 + 1 + 2 = 7$$

3. 空间单闭链机构的自由度

(1) 基本公式

对于单闭链, 根据式 (1-2) 可知: $N=p$, 固定其中一个构件为机架, 则有

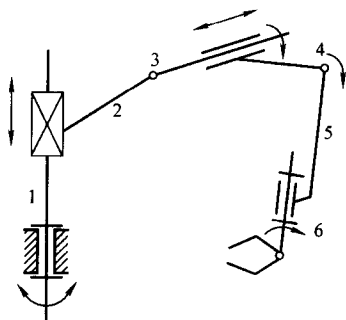


图 1-9 RPRC2R 机械手

$n = N - 1$ ，因此单闭链机构有 $p - n = 1$ 。将其代入式 (1-4)，可得到单闭链机构的自由度公式为

$$F = \sum_{i=1}^5 ip_i - 6 = \sum_{i=1}^p f_i - 6 \quad (1-6)$$

闭链机构的自由度计算公式也可由开链机构自由度计算公式获取。如图 1-10 所示，把闭链机构（见图 1-10a）中的末杆拆开后，就得到一个开链机构（见图 1-10b），当把开链机构变为闭链机构时，开链的末杆必将失去原有 6 个自由度，

故单闭链机构的自由度 $F = \sum_{i=1}^5 ip_i - 6 = \sum_{i=1}^p f_i - 6$ 。

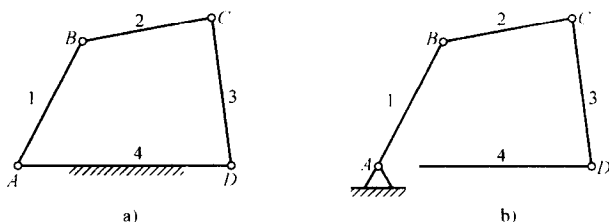


图 1-10 机构拆副示意图

a) 闭链机构 b) 开链机构

【例 1-2】 计算图 1-11 所示 SC2R 机构的自由度。

解：该机构有 1 个球面副（Ⅲ类运动副）、一个圆柱副（Ⅱ类运动副）和两个转动副（Ⅰ类运动副）。所以该机构自由度为

$$F = \sum_{i=1}^4 f_i - 6 = 3 + 2 + 1 \times 2 - 6 = 1$$

(2) 存在公共约束自由度的计算

在某些机构中，由于运动副或构件几何位置的特殊配置，使所有构件都失去了某些运动的可能性，这等于对机构中所有构件的运动加上某种公共约束。用 m 表示公共约束。

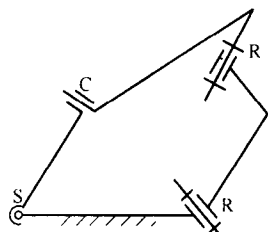


图 1-11 SC2R 机构

当机构受到公共约束 m 时，末杆也受到相同的公共约束数 m ，所以末杆真正的自由度为 $\lambda = 6 - m$ 。考虑到公共约束 m 后，机构自由度公式应为

$$F = \sum_{i=1}^5 ip_i - \lambda = \sum_{i=1}^p f_i - \lambda = \sum_{i=1}^p f_i - 6 + m \quad (1-7)$$

最常出现的公共约束场合有：

1) 作平面运动的机构，各构件都失去了沿 z 轴的移动、绕 x 轴和 y 轴转动的自由度，只保留绕 z 轴的转动、沿 x 轴和 y 轴的移动，故 $m = 3$ 。