

# 空间机构学与 机器人设计方法

◎ 主编 张 龙

◎ 编著 张 庆 祖 莉 闫兴坤

Space Mechanism  
and Robot  
Design Method



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

南京理工大学研究生教育优秀工程项目

# 空间机构学与机器人设计方法

主编 张 龙

编著 张 庆 祖 莉 闫兴坤

东南大学出版社

· 南京 ·

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了空间机构的基本组成原理、数学基础和机器人设计方法。全书共分9章;第1章介绍空间机构组成原理和自由度计算;第2章介绍图论和坐标变换数学方法;第3章介绍空间机构运动学和数学方程求解;第4章介绍空间机构的微分运动;第5章介绍空间机构动力学与静力学;第6章论述机器人机构与结构设计方法;第7章介绍机器人运动路径设计原理和轨迹规划方法;第8章介绍机器人相关的机械结构设计、驱动器、传感器和机器视觉的基本原理;第9章介绍机器人控制原理、模糊控制方法及在机器人中的应用。

本书可作为机械工程专业研究生教材,也可作为从事机器人及智能装备研究的科技人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

空间机构学与机器人设计方法 / 张龙主编. — 南京:东南大学出版社, 2018.12  
ISBN 978-7-5641-8044-7

I. ①空… II. ①张… III. ①空间机构②机器人—程序设计 IV. ①TH112②TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 236325 号

### 空间机构学与机器人设计方法

---

出版发行:东南大学出版社  
社 址:南京市四牌楼2号 邮编:210096  
出 版 人:江建中  
责任编辑:张万莹  
网 址:<http://www.seupress.com>  
电子邮件:[press@seupress.com](mailto:press@seupress.com)  
经 销:全国各地新华书店  
印 刷:虎彩印艺股份有限公司  
开 本:787 mm×1092 mm 1/16  
印 张:19.75  
字 数:481千字  
版 次:2018年12月第1版  
印 次:2018年12月第1次印刷  
书 号:ISBN 978-7-5641-8044-7  
定 价:59.00元



---

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830

# 出版前言

随着机器人和智能机械技术的发展,空间机构学得到了越来越广泛的研究和应用。相对于平面机构而言,空间机构具有结构和运动的复杂性以及数学计算的实时性等特点;机器人机构学作为传统空间机构学的重要分支,推动了空间机构学与自动控制技术、计算机技术和先进制造技术的高度融合,形成了多学科渗透和交叉的新学科。机构的创新是机器人和智能机械系统自主创新的源泉,空间机构学则是机器人和智能机械系统发展的理论基础。本书的出版希望能对研究生的机器人课程教学有所帮助,让研究生能比较系统地学习空间机构学和机器人设计的基本理论和方法,在机器人和智能机械系统的研究和应用中面临机遇,迎接挑战。

根据工信部研究生教材征集计划的要求,作为南京理工大学研究生教育优秀工程项目,在多届研究生课程教学的基础上,编者总结了空间机构学与机器人学方面的研究成果,编写了本书。本书分为空间机构学与机器人设计方法两篇,共九章内容。第一篇为空间机构学,侧重于机构学的数学基础,主要编写内容包括空间机构运动学、微分运动、动力学与静力学等。第二篇为机器人设计方法,主要编写内容涵盖了机器人机构的结构设计,机器人轨迹规划、运动驱动与传感器设计原理、智能控制原理等。

参加本书编写的有张龙博士、张庆博士、祖莉博士和闫兴坤硕士。

本书包含了由沈守范教授编写的《机构学的教学工具》中的“图论”章节的内容,在此深表谢意。

本书可作为高等院校机械工程或机器人专业的研究生教材,或机械类本科生高年级选修课程教材。由于编者的水平和时间有限,难免存在误漏疏虞之处,竭诚欢迎读者和专家批评指正。

编者  
于南京理工大学  
2018年6月

# 目 录

## 第一篇 空间机构学

<b>1 空间机构组成原理</b> .....	3
1.1 概述 .....	3
1.2 机构自由度 .....	7
1.2.1 空间开链机构自由度计算 .....	8
1.2.2 空间单闭链机构自由度计算 .....	8
1.2.3 空间多闭链机构自由度计算 .....	11
1.3 空间机构组成原理 .....	12
1.3.1 空间单闭链机构的组成 .....	13
1.3.2 空间多闭链机构的组成 .....	15
1.3.3 空间开链机构的组成 .....	18
习题 .....	20
<b>2 空间机构的数学基础</b> .....	21
2.1 概述 .....	21
2.2 图论 .....	21
2.2.1 图与子图 .....	21
2.2.2 通路的集合和最短通路 .....	27
2.2.3 树理论 .....	31
2.2.4 割集和断集 .....	37
2.2.5 图的矩阵表示 .....	39
2.2.6 平面图 .....	47
2.3 坐标变换矩阵 .....	50
2.3.1 构件的位置和姿态表示方法 .....	51

2.3.2	坐标轴变换矩阵 .....	53
2.3.3	齐次坐标变换 .....	54
2.3.4	齐次坐标变换的逆变换 .....	59
2.3.5	绕任意轴旋转的变换矩阵 .....	61
2.3.6	等效转轴与等效转角 .....	63
2.4	旋转变换矩阵性质与运算法则 .....	64
2.4.1	旋转变换矩阵的性质 .....	64
2.4.2	旋转变换矩阵的运算法则 .....	65
2.5	多项式方程解法 .....	66
2.5.1	对分区间法 .....	67
2.5.2	迭代法 .....	67
2.5.3	牛顿法 .....	67
2.6	非线性方程组解法 .....	68
	习题 .....	69
<b>3</b>	<b>空间机构运动学</b> .....	<b>71</b>
3.1	概述 .....	71
3.2	构件位置和姿态的矩阵表示方法 .....	71
3.2.1	构件的位置和姿态 .....	72
3.2.2	用欧拉角表示的构件姿态 .....	72
3.2.3	用横滚角、俯仰角和偏转角表示的构件姿态 .....	73
3.2.4	用柱面坐标表示构件的位置 .....	74
3.2.5	用球面坐标表示构件的位置 .....	75
3.3	坐标变换解 .....	76
3.3.1	欧拉变换解 .....	76
3.3.2	RPY 变换解 .....	79
3.3.3	柱面坐标变换解 .....	80
3.3.4	球面坐标变换解 .....	81
3.3.5	位移方程解 .....	82
3.4	D-H 坐标与运动分析 .....	83
3.4.1	D-H 坐标表示的位置和姿态矩阵 .....	83
3.4.2	空间闭链机构位姿方程 .....	86



3.4.3	空间闭链机构位移分析 .....	88
3.4.4	空间闭链机构速度与加速度分析 .....	91
3.5	典型空间机构运动学方程及解 .....	93
3.5.1	运动学方程 .....	93
3.5.2	运动学方程逆解 .....	97
3.6	运动学方程编程方法 .....	100
3.7	空间机构的退化与灵巧特性 .....	101
	习题 .....	101
<b>4</b>	<b>空间机构的微分运动 .....</b>	<b>107</b>
4.1	概述 .....	107
4.2	微分关系 .....	107
4.3	雅可比矩阵 .....	108
4.4	直角坐标系的微分运动 .....	110
4.4.1	微分平移 .....	111
4.4.2	微分旋转 .....	111
4.4.3	绕任意轴的微分旋转 .....	112
4.4.4	坐标系的微分变换 .....	112
4.5	不同坐标系之间的微分运动 .....	114
4.5.1	微分运动的等价变换 .....	114
4.5.2	坐标系之间的微分关系 .....	117
4.6	雅可比矩阵的计算 .....	120
4.6.1	矢量积法 .....	120
4.6.2	微分变换法 .....	121
4.7	雅可比矩阵的逆 .....	124
	习题 .....	126
<b>5</b>	<b>空间机构动力学与静力学 .....</b>	<b>128</b>
5.1	概述 .....	128
5.2	平面机构动力学方程 .....	129
5.2.1	质点系的拉格朗日动力学方程 .....	131
5.2.2	质点系的牛顿-欧拉动力学方程 .....	133
5.2.3	构件系统的拉格朗日动力学方程 .....	135

5.3 空间机构动力学方程 .....	136
5.3.1 构件的速度和加速度 .....	137
5.3.2 构件的动能和势能 .....	138
5.3.3 动力学方程的推导 .....	141
5.3.4 动力学方程的简化 .....	143
5.3.5 二连杆机构动力学方程 .....	146
5.4 机器人机构的动态特性 .....	148
5.4.1 机构动态特性概述 .....	148
5.4.2 机构稳定性 .....	149
5.4.3 空间分辨率 .....	149
5.4.4 机构精度分析 .....	150
5.4.5 重复定位问题 .....	152
5.5 空间机构静力学 .....	153
5.5.1 力和力矩的表示方法 .....	153
5.5.2 不同坐标系间的静力变换 .....	154
5.5.3 关节力矩计算 .....	156
5.5.4 有效载荷计算 .....	157
习题 .....	158

## 第二篇 机器人设计方法

6 机器人机构设计方法 .....	165
6.1 概述 .....	165
6.2 机器人机构的结构设计 .....	165
6.2.1 手臂的结构形式 .....	165
6.2.2 手腕的结构形式 .....	166
6.2.3 手臂和手腕的机构学关系 .....	167
6.2.4 构件的姿态 .....	167
6.2.5 机器人机构的结构设计方法 .....	168
6.3 机器人机构的尺寸设计 .....	170
6.3.1 基于末杆位姿的构件参数设计 .....	170



6.3.2 基于末杆活动空间的构件参数设计 .....	175
习题 .....	178
<b>7 轨迹规划方法 .....</b>	<b>179</b>
7.1 概述 .....	179
7.2 路径与轨迹 .....	179
7.3 关节空间与直角坐标空间 .....	180
7.4 轨迹规划的基本原理 .....	181
7.5 关节空间轨迹规划 .....	183
7.5.1 三次多项式轨迹规划 .....	184
7.5.2 五次多项式轨迹规划 .....	186
7.5.3 抛物线过渡的线性运动轨迹 .....	187
7.5.4 具有中间点及用抛物线过渡的线性运动轨迹 .....	190
7.5.5 高次多项式运动轨迹 .....	190
7.5.6 其他轨迹 .....	193
7.6 直角坐标空间轨迹规划 .....	194
7.7 连续轨迹设计 .....	197
习题 .....	197
<b>8 机器人驱动与传感器设计原理 .....</b>	<b>199</b>
8.1 概述 .....	199
8.2 驱动器原理和减速器设计 .....	199
8.2.1 液压驱动器 .....	199
8.2.2 气动驱动器 .....	203
8.2.3 电动机 .....	203
8.2.4 磁致伸缩驱动器和位移传感器 .....	219
8.2.5 形状记忆金属驱动器 .....	221
8.2.6 精密减速器 .....	224
8.3 传感器设计 .....	226
8.3.1 机器人传感器分类与特性 .....	226
8.3.2 位移传感器 .....	227
8.3.3 力和力矩传感器 .....	231
8.3.4 触觉传感器 .....	233

8.3.5 接近觉传感器 .....	237
8.4 机器视觉基本原理 .....	239
8.4.1 图像与图像信号 .....	239
8.4.2 图像处理基础 .....	248
8.4.3 图像分析概述 .....	262
习题 .....	268
<b>9 机器人智能控制原理 .....</b>	<b>269</b>
9.1 概述 .....	269
9.2 智能控制的概念 .....	269
9.2.1 自动控制发展趋势 .....	269
9.2.2 智能控制发展历程 .....	270
9.2.3 智能控制概念 .....	272
9.2.4 智能控制的结构理论 .....	273
9.3 智能控制系统的分类 .....	275
9.3.1 递阶控制系统 .....	275
9.3.2 专家控制系统 .....	276
9.3.3 模糊控制系统 .....	277
9.3.4 学习控制系统 .....	278
9.3.5 神经控制系统 .....	279
9.3.6 进化控制系统 .....	280
9.4 模糊数学逻辑 .....	282
9.4.1 模糊集合与隶属度函数 .....	282
9.4.2 模糊集合的表示方法 .....	283
9.4.3 模糊集合的基本运算及其法则 .....	284
9.4.4 模糊集合与普通集合的关系 .....	285
9.4.5 模糊集合的隶属函数 .....	285
9.5 模糊逻辑控制 .....	288
9.5.1 模糊化方法 .....	288
9.5.2 模糊推理规则库 .....	290
9.5.3 解模糊化方法 .....	291
9.5.4 模糊逻辑控制器 .....	293

9.5.5 模糊逻辑在机器人控制中的应用 .....	296
9.6 工业机器人控制系统简介 .....	299
9.6.1 工业机器人控制系统的特点 .....	299
9.6.2 工业机器人控制系统的基本功能 .....	300
9.6.3 工业机器人的控制方式 .....	301
9.6.4 工业机器人控制系统的基本组成 .....	302
习题 .....	303

# 第一篇

---

## 空间机构学

---





# 空间机构组成原理

## 1.1 概述

机构学研究的基本问题是机构的分析与综合,研究内容包括机构的结构学、运动学和动力学以及创新机构的设计与应用。

本章将重点介绍有关空间机构的结构组成原理和基本概念、空间机构的自由度分析与计算以及空间机构运动形式的分析与综合方法。

### 1) 构件

机构中的基本运动单元称为构件,构件是由单个或若干个机械零件刚性连接而成。

如图 1-1 所示为一内燃机中的基本机构,连杆为机构中的一个构件,结构如图 1-2 所示。该连杆构件是由连杆、盖板、螺栓、螺母等零件刚性地连接在一起,成为一个运动整体。

不受任何约束的构件称为自由构件,自由构件在空间坐标系中用 6 个基本运动来描述,如图 1-3 所示:即沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴的独立自由移动和绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴的独立自由转动。因此自由构件要用 6 个独立的参数  $s_x$ 、 $s_y$ 、 $s_z$ 、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  来描述这些运动特性,6 个独立的运动即为空间自由构件的 6 个自由度。

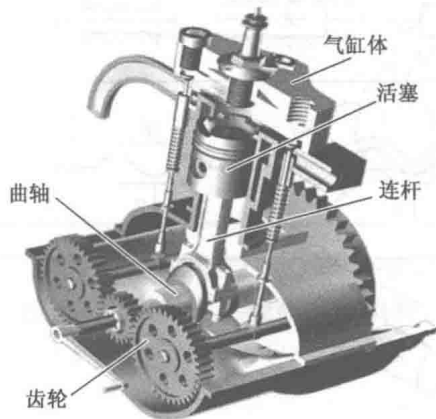


图 1-1 内燃机机构

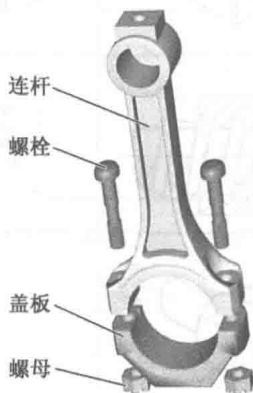


图 1-2 连杆构件

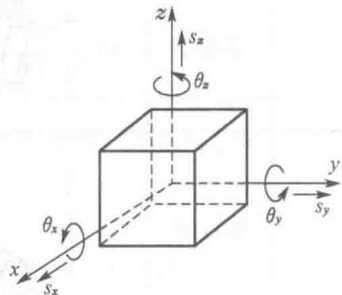


图 1-3 自由构件的自由度

### 2) 运动副

由两个构件组成的可动连接称为运动副,二者互相接触而构成的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,分别位于不同的构件上。可动连接指两个构件既彼此相连接又有某些确定的相对运动,因此运动副连接允许两构件间同时存在相互约束和相对运动。

运动副所允许的相对独立运动数目称为运动副的自由度。具有 1 个自由度的运动副称为 I 类运动副, 具有 2 个自由度的运动副称为 II 类运动副, 以此类推, 即 III、IV 和 V 类运动副。第  $i$  类运动副允许有  $i$  个相对运动, 其约束数为  $6 - i$ 。

运动副类型除了按照相对运动数目来分类外, 运动副还可以根据构成运动副的两构件接触情况进行分类。两构件通过点或线接触而构成的运动副称为高副, 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不同的相对运动来分类, 两构件之间的相对运动为转动的称为转动副或回转副, 相对运动为移动的称为移动副, 相对运动为螺旋运动的称为螺旋副, 相对运动为球面运动的称为球面副。除此以外, 还可把构成运动副的两构件之间的相对运动为平面运动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。

运动副用标准规定的简图或规定画法表示, 如表 1-1 所示。通常字母 R 代表转动副, P 代表移动副, H 代表螺旋副, C 则代表圆柱副, 其他常见运动副的代号参考表 1-1。

表 1-1 常见运动副的代号及规定画法

类别	名称	代号	示意图	规定画法
I 类	转动副	R		
	移动副	P		
	螺旋副	H		
II 类	圆柱副	C		
	球销副	Sp		



续表 1-1

类别	名称	代号	示意图	规定画法
II 类	通用副 (虎克铰)	U		
III 类	球面副	S		
	平面副	E		
IV 类	曲面副	Su		
V 类	点接触副	Pt		

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

### 3) 运动链

由若干个构件通过运动副连接组成的系统称为运动链,分为闭环和开环两种运动链,其中的闭环运动链又分为单闭链和多闭链。若运动链的各构件不构成首末封闭的构件系统,如图 1-4(a)、(b)所示,则为开式运动链,简称开链;若构成首尾封闭的构件系统,如图 1-4(c)、(d)、(e)所示,则为闭式运动链,简称闭链。图 1-4(d)、(e)中的构件系统 1-2-3-4 构成单环闭链,而图 1-4(c)中的构件系统 0-1-2-3 和 0-2-3-4 构成两个闭链,为双环闭链。在运动链中,如果每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。

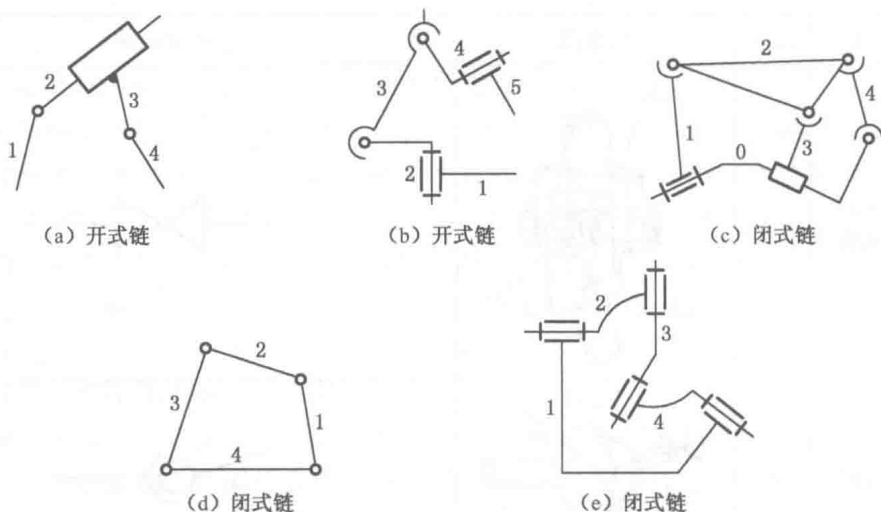


图 1-4 开、闭环运动链

4) 机构

在运动链中取其中一构件为机架,则该运动链就称为机构。当指定机构的一个或若干个构件为输入构件,并且以设定的规律运动时,其余所有构件都能得到确定的相对运动。机架是指相对静止的构件,作为机构运动的参考坐标系。按设定规律运动的构件称为原动件,其余活动构件称为从动件。从动件最终的运动规律取决于原动件的运动规律和机构的结构组成。

如图 1-5 所示为缝纫机主传动机构示意图,该机构由 4 个单闭链机构组成:平面凸轮机构 1-5-6-1、空间双摇杆机构 1-2-3-9-1、平面曲柄摇杆机构 1-2-4-5-1 和空间五杆机构 1-6-7-8-9-1。其工作过程为:主轴 5 为原动件且输入运动,同时输出两个分运动:即一方面经凸轮机构驱动水平轴 6 摆动,使得弯针 7 沿针脚方向做往复摆动;另一方面通过平面曲柄摇杆机构串接空间五杆机构和空间双摇杆机构,使弯针 7 围绕安装在水平轴 6 上的转动副做往复摆动。通过以上两个方向上的摆动,合成弯针所需的复杂空间运动。

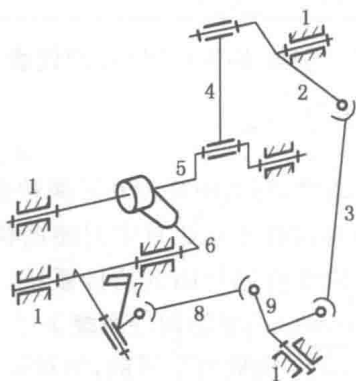


图 1-5 缝纫机主传动机构

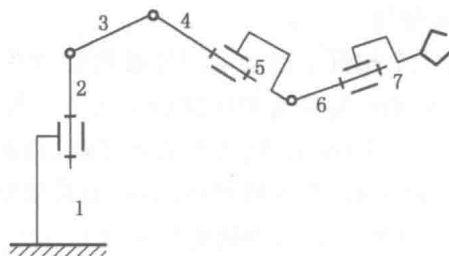


图 1-6 串联机器人机构

如图 1-6 所示为一串联机器人机构,是个开式的串联运动链,由 6 个转动副将机架与 6