

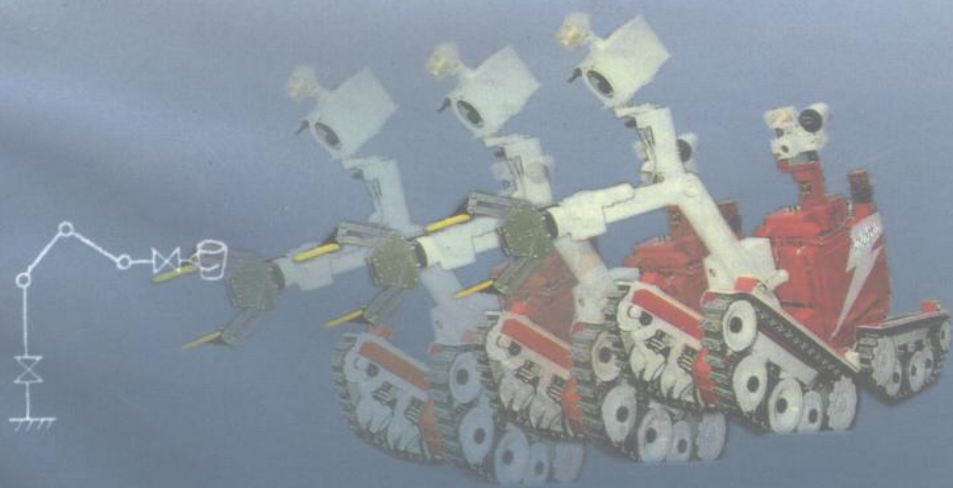
机构设计丛书

# 空间机构设计

「机构设计丛书」编委会 编

谢存禧 郑时雄 林怡青 编著

上海科学技术出版社



x 45

机构设计丛书

# 空间机构设计

《机构设计丛书》编审委员会 编

谢存禧 郑时雄 林怡青 编著

上海科学技术出版社

责任编辑 钮国俊

机构设计丛书

空间机构设计

《机构设计丛书》编审委员会 编

谢存禧 郑时雄 林怡青 编著

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 11 插页 4 字数 284,000

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-5323-4122-4/TH·76

定价: 20.00 元

## 内 容 提 要

本书系“机构设计丛书”之一。全书分八章，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、型综合和尺寸综合以及设计的基本方法和实际应用。在分析和综合中，都举以设计实例。空间开链机构即机器人机构，列举了弧焊、点焊和喷涂机器人的设计。

本书供从事空间机构设计、自动化设计或技术改造的工程技术人员阅读，也适于大学机械专业的师生参考。

## 编审委员会名单

雷天觉 张启先 路甬祥

邹慧君 李华敏 徐振华 华大年

谢存禧 殷鸿梁 吕庸厚

## 丛 书 序

照传统说法，一切机器都可分为三部分，动力源、传动和执行机构。一切机器的作用不外两点，一是利用能量来代替微弱的人力、畜力，另一则用机器的运动来代替人手的动作。虽然两者都是为了减轻劳动，可是它们发展的历史却很不一样。能源开发是近代的成就，应该说由水车开始，而且从历史眼光看其发展并不能说很快，一般是量变。用机器运动来代替手工动作则历史长得多，而且进步也比较大。只要比较一下上古制陶器的陶车和近代在人的大脑中进行外科手术的机器人便清楚了。这可能是因为能源开发虽然艰巨，其目标却是单一的。用机器运动代替人工劳动，目的是多种多样的，随着人类生活的发展而不断变化。因此形成很多复杂的行业。

到底机器的哪部分是用来产生代替人手的动作呢？事实上这和传统的原则性的说法略有不同。倘机器要执行的动作非常简单，则动力源—传动—执行这划分还是对的。但近代机器常极复杂，对它要求的动作也非常精细而且复杂（且不说人工智能问题）。这种精细复杂的运动常常要从传动中获得。这就使机器的传动部分和执行部分的界限模糊了，同时也使传动成为更复杂的技术。表面上好像很简单的问题，做起来可能会很困难。我常常喜欢提一个历史上的例，这里再说一次：当瓦特设计他的蒸汽机时，他需要一个直线运动来带动阀门。从表面看这是一个很简单的问题，在今天用一个导轨便成了。但在那时的加工设备和润滑技术，还不能制出导轨，而须用连杆。但瓦特想不出这样一种连杆，便要求格拉斯哥大学的数学家们帮忙，但数学家们也想不出。后来事情传开了，竟发现全世界的数学家都解决不了这问题。瓦特只得用了一个近似的直线机构。这问题直到瓦特死后几十年，

才由一位法国数学家解决了。这一事说明了在机器上对传动机构要求之高和问题解决之难。只要机器还在使用，传动机构也必然要继续发展。

传动机构的类型很多，而且还在不断增加。特别是近年来在高精技术领域，各种类型传动（齿轮、凸轮、连杆、液压、气动、电动）常联合使用。最近趋势是在使用液压气动时，传动介质和轴承润滑和压力常联为一体，这就使技术更加复杂。在这种情况下，我们迫切需要一部包括各种传动（最好还包括摩擦学）的专著。目前对每种类型传动的论著并不少，有的也很深入。但却没见过将各种传动（机构）汇为一书的。上海科学技术出版社出版的“机构设计丛书”是这种类型专著的第一次出现，很希望它能满足读者的上述需求。当然，将各种传动融会贯通、形成一体是需要时间的，但这套书总是一个很好开端。丛书计七题，依次是《机构系统设计》、《齿轮机构设计》、《凸轮机构设计》、《连杆机构设计》、《空间机构设计》、《间歇运动机构设计》及《组合机构设计》。由于它包括了各种传动，而且篇幅很大、内容比较详尽、阅读方便；又由于它是由一个统一的编审委员会领导下完成的，易于作到理论协调、体例一致。估计本书将成为前沿设计和生产工作者很欢迎的书。

笔者希冀本书在我国机械工业中起良好作用！

高子元

九四年十月十九日

## 前 言

《空间机构设计》是“机构设计丛书”之一。题名空间机构，实际仅述及空间连杆机构，因为诸如空间齿轮、空间凸轮等其他空间机构，丛书已另有专述。

空间机构学的研究虽起始于本世纪20年代后期，但时至50年代末仍进展缓慢。相对于平面机构而言，其研究深度及应用广度均遑相论及。这实为空间机构的结构和运动的复杂性，计算手段的局限性，以及加工、装配和检测的低水平等原因所使然。空间机构中的开链机构，其应用较之闭链机构又更为鲜见。这除了上述原因外，驱动、控制及传感技术等方面尚未臻善，是导致其无法深入发展的主要原因。

由于近期电子计算机的普及应用，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的商品化生产。使空间机构复杂运动的实现成为可能。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，更为人们所赏识。因此在短短的不足40年的时间内，空间机构学的研究以及所取得的成果远超于以往年月。并且使空间机构学的研究由纯机械学引伸为机械电子学范畴的研究，出现了许多与自动控制理论、信息科学等相交叉的空间机构学研究课题。新兴的机器人机构学，本质上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，其他方法读者可觅山寻宝。

本书共八章，分为三个部分：第一部分主要阐述基本概念和数学方法（第一、二章），第二部分是空间机构的运动和受力分析（第三、四章），第三部分着重于空间机构的综合方法和设计应用（第五至八章）。为了贯彻实用性，各部分都举以设计实例，并尽量在理论分析之后给出计算机程序，在数学方法之后给出计算机算法。同时尽量做到计算程序通用，使一些简单空间机构的分析和综合问题能引用这些程序算得结果。列举的机器人机型，大多与我国目前开发的机型相一致，期望借以增进读者对我国机器人机型现状的了解。

原稿承北京航空航天大学张启先教授和张玉茹副教授悉心审阅，谨此表示衷心的感谢。我们还感谢日本山梨大学教授牧野洋先生，因为书中引用了他的一些基本分析方法。书稿最后经丛书编审委员会核阅。

由于本书的撰写局限于作者在国家“七五”攻关项目、国家自然科学基金项目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，敬希读者、专家批评指正。

作者

1994年11月于穗

# 目 录

## 前言

<b>第一章 空间机构的组成原理</b> .....	1
§ 1-1 基本概念 .....	1
一、构件 .....	1
二、运动副及其分类 .....	2
三、运动链与机构 .....	2
§ 1-2 广义坐标与自由度 .....	7
一、广义坐标 .....	7
二、虚位移 .....	9
三、广义坐标与笛卡儿坐标 .....	9
四、机构的自由度 .....	10
§ 1-3 空间机构的自由度 .....	11
一、空间开链机构的自由度 .....	11
二、空间单闭链机构的自由度 .....	12
三、空间多闭链机构的自由度 .....	16
§ 1-4 空间机构的组成 .....	20
一、空间单闭链机构的组成 .....	20
二、空间多闭链机构的组成 .....	23
三、空间开链机构的组成 .....	25
<b>第二章 数学基础</b> .....	31
§ 2-1 回转变换矩阵 .....	31
一、点的位置在坐标系中的表示 .....	31
二、绕坐标轴回转变换矩阵 .....	32
三、绕任意轴回转变换矩阵 .....	36
四、绕定点的转动回转变换矩阵 .....	40
五、不共原点的坐标变换 .....	42
六、齐次变换 .....	44
§ 2-2 回转变换矩阵的性质及运算法则 .....	46

一、回转变换矩阵的性质 .....	46
二、回转变换矩阵的运算法则 .....	47
三、回转变换矩阵的分量 .....	48
四、回转变换矩阵的微分 .....	50
§ 2-3 多项式方程解法 .....	51
一、对分区间法 .....	51
二、迭代法 .....	54
三、牛顿法 .....	55
§ 2-4 非线性方程组解法 .....	57
<b>第三章 空间机构运动分析</b> .....	<b>61</b>
§ 3-1 空间机构运动分析的基础 .....	61
一、概述 .....	61
二、D—H 坐标系 .....	62
三、相邻坐标系的变换 .....	63
§ 3-2 空间闭链机构的运动分析 .....	65
一、空间闭链机构的位姿方程 .....	65
二、空间闭链机构的位移分析 .....	67
三、空间闭链机构的速度、加速度分析 .....	83
§ 3-3 空间开链机构的运动分析 .....	90
一、开链机构的位姿方程 .....	90
二、机器人机构的结构特点 .....	91
三、机器人机构的位姿方程和位移分析 .....	93
四、机器人机构的速度和加速度分析 .....	96
五、机器人机构的运动学逆解 .....	99
六、机器人机构的工作空间 .....	110
<b>第四章 空间机构受力分析</b> .....	<b>126</b>
§ 4-1 空间闭链机构受力分析 .....	126
一、空间闭链机构的静力分析 .....	126
二、空间闭链机构的动力分析 .....	133
§ 4-2 空间开链机构受力分析 .....	148
一、空间开链机构的静力分析 .....	148
二、空间开链机构的动力学 .....	151
<b>第五章 空间闭链机构设计的基本方法</b> .....	<b>171</b>

§ 5-1 空间闭链机构设计的基本问题 .....	171
一、设计空间与约束条件 .....	171
二、设计要求与可行方案的数目 .....	172
三、型综合与尺寸综合 .....	173
§ 5-2 按位移要求设计空间闭链机构 .....	174
一、函数综合 .....	174
二、轨迹综合 .....	178
三、刚体导引 .....	180
§ 5-3 按速度、加速度和动力特性设计空间闭链机构 .....	184
一、按速度、加速度要求设计空间闭链机构 .....	184
二、按动力特性要求设计空间闭链机构 .....	183
三、空间闭链机构的特殊位置和压力角 .....	187
§ 5-4 空间闭链机构的优化综合 .....	189
一、优化设计 .....	189
二、直接处理约束条件的优化方法 .....	191
三、间接处理约束条件的优化方法 .....	199
<b>第六章 空间闭链机构的设计应用 .....</b>	<b>212</b>
§ 6-1 按主、从动件摆角要求设计空间闭链机构 .....	212
一、单闭链机构 .....	212
二、多闭链机构 .....	219
§ 6-2 按运动轨迹设计空间闭链机构 .....	225
一、单自由度机构 .....	226
二、多自由度机构 .....	230
§ 6-3 按工作性能要求设计空间闭链机构 .....	239
一、按工作行程和动力性能设计活塞机构 .....	239
二、按工作行程和静力要求设计农机耕作器起落机构 .....	244
三、按工作速度要求设计筛驱动机构 .....	247
<b>第七章 机器人机构设计的基本方法 .....</b>	<b>253</b>
§ 7-1 机器人机构的型综合 .....	253
一、机器人机构的广义位姿 .....	253
二、物体姿态的实现及相应的手腕型式 .....	255
三、实现位置与实现姿态的相关性 .....	257
四、机器人机构的型综合关系式 .....	259
§ 7-2 机器人机构的尺寸综合 .....	263

一、用解析法进行尺寸综合 .....	264
二、用优化方法进行尺寸综合 .....	266
§ 7-3 机器人机构综合的图谱方法 .....	271
一、特殊结构的机器人机构 .....	271
二、一般结构的机器人机构 .....	275
§ 7-4 机器人轨迹规划 .....	275
一、多项式插补方法 .....	275
二、关节空间中的轨迹规划 .....	278
三、笛卡儿空间中的轨迹规划 .....	280
四、圆弧插补 .....	280
§ 7-5 机器人机构几何尺寸的校正 .....	285
一、用有限个已知点示教校正 .....	285
二、用位置测量机示教校正 .....	287
<b>第八章 机器人机构的设计应用 .....</b>	<b>289</b>
§ 8-1 弧焊机器人 .....	289
一、概述 .....	289
二、位姿方程 .....	291
三、逆运动学求解 .....	292
四、轨迹插补 .....	293
五、焊枪织动轨迹规划 .....	303
§ 8-2 点焊机器人 .....	305
一、概述 .....	305
二、位姿方程 .....	306
三、速度和加速度分析 .....	307
四、逆运动学求解的数值方法 .....	313
五、工作空间分析 .....	315
六、工作空间综合 .....	318
§ 8-3 喷涂机器人 .....	319
一、概述 .....	319
二、位姿方程 .....	320
三、逆运动学求解 .....	321
四、集中驱动的传动耦合与解耦运算 .....	322
五、机器人机构的静力平衡 .....	325
<b>参考文献 .....</b>	<b>333</b>

# 第一章 空间机构的组成原理

本章叙述空间机构的结构组成,包括空间机构的自由度分析,以及根据自由度或运动型式对空间机构的结构进行综合。结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与综合,而且对新机构的发明和设计起指导作用。

近年来,电子计算机广泛进入各研究领域,在机构的结构研究方面也相应引入了一些适于计算机处理的新方法,如图论、矩阵方法等等。这里除介绍空间机构的组成原理外,还详细介绍利用虚位移矩阵求解空间机构自由度的方法。在分析机构自由度的基础上,对空间闭链机构按自由度进行结构综合,对空间开链机构按运动型式进行结构综合。

## §1-1 基本概念

### 一、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结在一起的零件组成。例如,电风扇的扇叶由螺钉固连在电机转子上,构成一个运动单元。构件又称杆,在机构学中视为刚体。

自由构件在空间坐标系中有6个基本运动。用  $s_x$ 、 $s_y$ 、 $s_z$  分别表示沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的移动,用  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  分别表示绕这三轴的转动,见图 1-1。

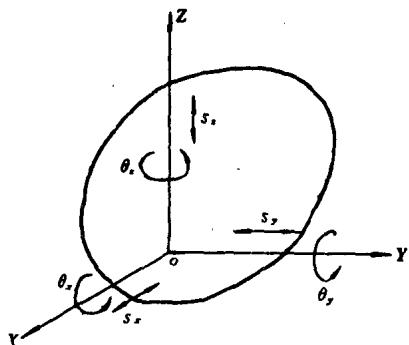


图 1-1 自由构件的 6 个基本运动

## 二、运动副及其分类

自由构件之间必须有某种活动连接才能组成机构，这种活动连接称为运动副。运动副既把相邻的构件连接起来，又允许它们之间有某种相对运动。两个构件用运动副连接起来，它们之间就有了某种约束。例如轴颈与轴承之间仅允许绕轴线的相对转动，其余的5个基本运动受到约束。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。用 $f$ 表示运动副的自由度。很显然， $0 < f < 6$ 。若 $f=0$ ，则表示这个连接不允许相对运动，因而也就不是运动副；若 $f=6$ ，则表示具有6个相对运动，因而不存在连接。 $f=1, 2, 3, 4, 5$ 的运动副，相应地称为I、II、III、IV、V类运动副。第 $i$ 类运动副允许有 $i$ 个相对运动，而同时具有 $6-i$ 个约束。

为书写和作图方便，用代号和简图代表运动副，见表1-1。例如I类副有转动副、移动副和螺旋副，所允许的相对运动分别为转动、移动和螺旋运动，分别用代号R、P、H表示。

运动副的连接作用是由两个构件上参加接触的部分互相配合而实现的。这些参加接触的部分称为运动副元素。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。例如转动副由两个圆柱面组成，分别是轴的外表面和孔的内表面。副元素为点、线接触的运动副称为高副，为面接触的称为低副。

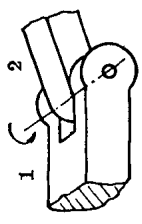


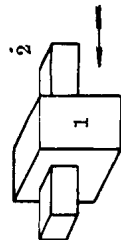
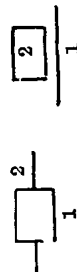
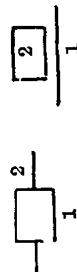
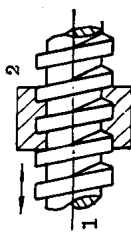
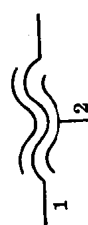
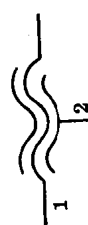
空间机构常以它所含的全部运动副的代号来命名。例如，由1个转动副、3个圆柱副连接而成的机构称为RCCC机构。

## 三、运动链与机构

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。如果运动链的各构件构成首尾封闭的结构，则称为闭式运动链，简称闭链；否则称为开式运动链，简称开链。在运动链中，如果每一个构件都在同一平面或互相平行的平面内运动，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。

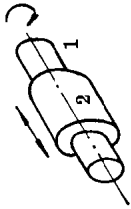

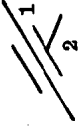
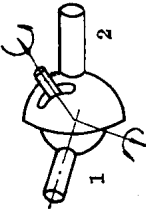


在运动链中，如果以某一构件为参考系，当某些构件按给定的运动规律运动时，其余所有构件都有确定的相对运动，那么，这个

表 1-1 常见运动副的简图及代号

类别	名称	代号	图 形	简 图	图
I	转动副	R			
	移动副	P			
	螺旋副	H			



(续表)

类别	名称	代号	图 形	简 图	图
II	圆柱副	C			
	球销副	S'			
III	球面副	S	