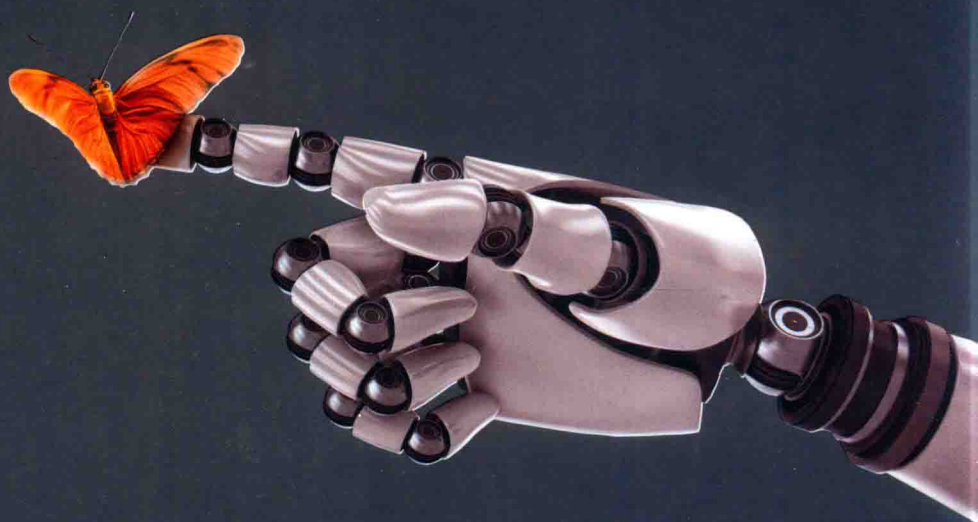


HZ BOOKS
华章IT

机器人学译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group



[伊朗] 哈米德 D. 塔吉拉德 (Hamid D. Taghirad) 著

刘山 译

并联机器人

机构学与控制

PARALLEL
ROBOTS

MECHANICS AND
CONTROL



机械工业出版社
China Machine Press

机器人学译丛

[伊朗] 哈米德 D. 塔吉拉德 (Hamid D. Taghirad) 著

刘山 译

并联机器人

机构学与控制

PARALLEL
ROBOTS

MECHANICS AND
CONTROL



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

并联机器人: 机构学与控制 / (伊朗) 哈米德 D. 塔吉拉德 (Hamid D. Taghirad) 著; 刘山译. —北京: 机械工业出版社, 2017.11

(机器人学译丛)

书名原文: Parallel Robots: Mechanics and Control

ISBN 978-7-111-58859-7

I. 并… II. ①哈… ②刘… III. ①机器人机构 ②机器人控制 IV. TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 000949 号

本书版权登记号: 图字 01-2013-7170

Parallel Robots: Mechanics and Control by Hamid D. Taghirad (978-1-4665-5576-1)

Copyright © 2013 by Taylor & Francis Group, LLC

Authorized translation from the English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版, 并授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

本书中文简体字翻译版授权由机械工业出版社独家出版并仅限在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何内容。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书系统阐述并联机器人的运动学、动力学和控制方面的原理、基础和研究进展, 内容涵盖机器人学中机构学和控制分支的方方面面, 且均配有丰富的例子, 以详细分析各设计方法的相关问题。本书可为机器人学领域研究者和技术人员提供分析和技术方法, 也可作为机械电子和自动控制专业高年级本科生、硕士生和博士生的教学参考书使用。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张锡鹏

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 22

书号: ISBN 978-7-111-58859-7

定价: 99.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

在工业自动化应用场合，机器人采用并联结构比传统的串行结构更有效，因为并联机器人具有结构紧凑、刚度大、承载能力强、误差小、精度高、荷载自重比高、动力性能好、控制容易等优点。

本书是作者在并联机器人领域多年研究工作的积累，理论水平高深。有别于以往并联机器人书籍大多从机构和运动学角度进行介绍与分析，本书的一大特点是，主要从动力学和控制角度讨论并联机器人，具有重要的理论意义和应用价值。

本书采用系统方法详细讨论了并联机器人的运动学、雅可比分析、奇异性分析、静力分析、刚度分析、动力学、运动控制和力控制，内容涵盖机器人学中机构学和控制分支的所有方面，并均以丰富的例子给出各问题的详细分析设计方法。

本书主要分三部分：第1、2章介绍机器人学的基础以及并联机器人重点需要的相关知识；第3~5章介绍并联机器人的机构学理论，包括运动学和动力学；第6、7章介绍并联机器人的控制，主要是运动控制和力控制。附录将书中需要的预备知识进行了简要介绍。这种叙述安排是介绍特定机器人理论的标准方法，内容全面，层次结构合理，具有很强的可读性，几乎所有章后都配备了适量的习题，对于读者深入理解书中的内容可提供很大的帮助。本书内容自成一体，适合机器人学知识较少的相关人员阅读。

本书将理论与实际装置紧密结合，内容深入浅出，具有较强的实用性。当然，本书没有介绍并联机器人的机械设计和底层控制电路设计，因此，本书主要针对底层机电装置和设备已完备的并联机器人应用。由本书的内容和作者的控制学科背景可知，本书有助于读者理解并联机器人的控制方案设计。

本书可为相关领域的研究者和技术人员分析和应用并联机器人提供丰富的分析与设计方法，也可作为机械电子专业和自动控制专业高年级本科生以及硕士生、博士生的教学参考书。

限于译者的经验和水平，译文中可能存在不当和错误之处，恳请读者批评指正。

译者

于浙江大学求是园

进入 21 世纪后, 机器人使人类的生活发生了很大的变化。在工业自动化中使用机器人增加生产线的灵活性是保证产品数量和质量的关键。工业机器人通常由一系列通过关节相互连接的连杆组成, 具有大的工作空间。每个连杆通过独立的执行器操纵, 以实现机器人的运动控制。这种串联结构使得机器人具有大的工作空间和灵活性的特点, 但也使操作端的精度难以保证。

对于要求高精度和低适应性的应用或者必须具有相对高的荷载自重比的场合, 机器人的并联结构是必需的替代方案。并联机器人具有固有的闭环运动学结构, 其运动平台通过几个独立的运动链连接到基座。许多工业应用中机器人的设计都采用并联结构, 但目前介绍并联机器人的运动学、动力学和控制方面的教材极少。本书的目的是给工业界越来越多的对并联机器人感兴趣的工程师和研究人员提供一些这类机器人的分析和设计方法。本书将介绍分析并联机器人的运动学、动力学和控制的系统方法。

为确定这种机器人的运动特性, 需要表示机器人运动平台相对于固定坐标系的三维运动。这依赖于物体在空间的位置、姿态和定位的系统表示方法。第 2 章介绍了这些方法, 重点是螺旋坐标, 这种坐标使机器人的一般运动更容易表示。值得注意的是, 构造位置和姿态的表示思路是构造线速度和角速度以及线加速度和角加速度表示的基础, 并且也是构造作用在机器人操作臂上的力和力矩表示的基础。

运动学分析是研究机器人运动的几何形式, 没有考虑引起运动的力和力矩。其中, 导出和分析了机械臂几何参数与运动平台的最终运动之间的关系。第 3 章给出了运动学分析的完整过程, 并提供了三个并联机器人的详细案例研究, 其中一个是缆线驱动的平面并联机器人。由于缆线驱动的并联机器人的并联结构提供了一个非常大的工作空间, 是新一代大有前途的机器人, 本书重点讨论这类机器人的分析。

第 4 章进一步考察扩展到静态定位以外的机械臂运动学分析。微分运动学分析在机械臂的无奇异性设计方面起了至关重要的作用。雅可比分析不但揭示了关节变量的速度与运动平台线速度和角速度之间的关系, 而且构建了用于计算从任务空间中作用于运动平台的力和力矩到执行器驱动力的变换。第 4 章给出了并联机器人雅可比分析的系统方法, 并通过第 3 章的相同案例研究进行了研究。

由于闭环结构和运动学约束, 并联机器人的动力学分析具有固有的复杂性。然而, 因为并联机器人主要应用于需精确定位的场合, 且在高负载的情况下具有合适的动态性能是并联机器人的基本要求, 所以动力学建模对于并联机器人的控制非常重要。尽管关于并联机器人运动学已有大量的研究, 但对于并联机器人的动力学和控制的研究工作相对较少, 且几乎没有专著详细讨论这些问题。本书第 5 章通过三种方法进行了并联机器人的动力学分析, 即牛顿-欧拉法、虚功法和拉格朗日法。进一步, 第 5 章介绍了一种方法来构建闭环形式的并联机器人动态方程, 使动态矩阵更容易处理, 并能够进行动力学模型的验证。

本书最后两章阐述了并联机器人的控制, 包括运动控制和力控制方案。第 6 章介绍了不同的无模型控制器和基于模型的控制器, 以及鲁棒和自适应的控制策略。这些控制方案

应用到了两个案例研究，即缆线驱动的冗余并联机械臂和全并联机械臂。最后，第7章详细介绍了并联机器人的力控制。阐述了刚度控制、直接力控制和阻抗控制方案，并将这些方案在同一个案例上进行了实施研究。

计算机仿真是验证控制器性能和分析的关键方法之一。本书所有章节的案例研究均有计算机仿真。仿真一般在商业软件包(如 MATLAB)上进行，这种软件包为模拟机器人的运动学和动力学特性以及验证控制系统的性能提供了方便。

我要感谢在这本书的写作过程中在技术上和精神上支持我的人。由于本书涉及很多学科的知识，很多人本书做出了贡献，在此一并感谢。我将这本书献给已故的 G. Zames 教授和 P. R. B elanger 教授，他们不但教给我很多控制理论方面的知识，而且深刻地影响了我的思想和行为。我还要感谢 J. Angeles 教授和 C. Gosselin 教授，他们鼓励我完成了这项工作。本书中的很多结果都来自 J. Angeles、C. Gosselin、J.-P. Merlet、L-W. Tsai 和本领域许多其他著名学者的贡献。我很高兴能够组织并进一步阐述这些贡献。

我感谢与 M. Nallon 和 I. Bonev 教授的愉快合作，他们在两个关键的时间段给我提供了访问机会并允许我暂时避开紧张的日程安排以便重点完成本书，对此深表感谢。在 McGill 大学和 K. N. Toosi 技术大学学习相关研究生课程的许多同学检查了本书的内容，他们的意见和建议提高了本书的质量。其中，感谢 H. Sadjadian 博士花了大量的时间修正书稿的错误，R. Oftadeh 审校了并联机械臂的动力学公式。当然，本书的当前版本难免存在错误，感谢所有读者的任何意见和建议。感谢为本书提供图形素材和插图的所有个人和机构。

没有我妻子 Azam 和我女儿 Matineh 的支持和鼓励，我不能完成这个工作。在此我对她们的无限支持和耐心表示真挚的感谢。

Hamid D. Taghirad

目 录

Parallel Robots: Mechanics and Control

译者序

前言

第 1 章 引言 1

1.1 什么是机器人 1

1.2 机器人部件 2

1.3 机器人的自由度 4

1.4 机器人分类 7

1.4.1 串联机器人 7

1.4.2 并联机器人 10

1.4.3 缆线驱动并联机器人 13

1.5 本书的目标和范围 16

第 2 章 运动表示 17

2.1 空间运动表示 17

2.1.1 点的位置 17

2.1.2 刚体的姿态 18

2.2 刚体的运动 30

2.3 齐次变换 31

2.3.1 齐次坐标 31

2.3.2 齐次变换矩阵 32

2.3.3 螺旋位移 33

2.3.4 变换运算 34

习题 38

第 3 章 运动学 42

3.1 简介 42

3.2 封闭环方法 43

3.3 并联机器人的运动学分析 44

3.3.1 机械机构描述 44

3.3.2 机械臂的几何结构 44

3.3.3 逆向运动学 45

3.3.4 正向运动学 45

3.3.5 仿真 47

3.4 肩部机械臂的运动学分析 48

3.4.1 机械机构描述 48

3.4.2 机械臂的几何结构 49

3.4.3 逆向运动学 50

3.4.4 正向运动学 51

3.4.5 仿真 52

3.5 SGP 的运动学分析 53

3.5.1 机械描述 53

3.5.2 机械臂的几何结构 54

3.5.3 逆向运动学 54

3.5.4 正向运动学 55

3.5.5 仿真 61

习题 65

第 4 章 雅可比矩阵：速度和静力 74

4.1 简介 74

4.2 角速度与线速度 74

4.2.1 刚体的角速度 74

4.2.2 点的线速度 76

4.2.3 螺旋坐标系 77

4.3 并联机械臂雅可比矩阵 78

4.4 速度回路 79

4.5 并联机械臂的奇异性分析 80

4.5.1 逆运动学奇异性 80

4.5.2 正运动学奇异性 80

4.5.3 混合奇异性 81

4.6 平面机械臂雅可比矩阵分析 81

4.6.1 速度回路 81

4.6.2 奇异性分析 83

4.6.3 灵敏度分析 84

4.7 肩部机械臂雅可比矩阵分析 85

4.7.1 速度回路 85

4.7.2 奇异性分析	87	5.4.3 平面机械臂的动力学方程: 质量恒定处理方式	150
4.8 SGP 雅可比矩阵分析	88	5.4.4 公式验证	151
4.8.1 速度回路	88	5.4.5 平面机械臂的动力学方程: 变质量处理方式	152
4.8.2 奇异性分析	89	5.4.6 SGP 动力学方程	153
4.9 并联机械臂的静态力	93	5.5 拉格朗日公式	155
4.9.1 自由体图解法	93	5.5.1 广义坐标	155
4.9.2 虚功法	94	5.5.2 拉格朗日等式第二种 形式	156
4.9.3 平面机械臂的静态力	95	5.5.3 拉格朗日等式第一种 形式	157
4.9.4 肩部机械臂的静态力	96	5.5.4 动力学方程性质	158
4.9.5 SGP 的静态力	97	5.5.5 平面机械臂的动力学 方程	163
4.10 并联机械臂的刚度分析	98	5.5.6 SGP 的动力学分析	169
4.10.1 刚度和柔度矩阵	98	习题	174
4.10.2 变换椭球体	99	第 6 章 运动控制	179
4.10.3 平面机械臂的刚度 分析	101	6.1 简介	179
4.10.4 肩部机械臂的刚度 分析	102	6.2 控制器架构	179
4.10.5 SGP 的刚度分析	103	6.3 工作空间运动控制	182
习题	105	6.3.1 分散 PD 控制	182
第 5 章 动力学	111	6.3.2 前馈控制	183
5.1 简介	111	6.3.3 逆动力学模型控制	184
5.2 刚体的动力学综述	112	6.3.4 部分线性化 IDC	186
5.2.1 刚体加速度	112	6.4 鲁棒和自适应控制	188
5.2.2 质量特性	114	6.4.1 鲁棒的逆动力学模型 控制	188
5.2.3 动量和动能	115	6.4.2 自适应逆动力学模型 控制	192
5.2.4 牛顿-欧拉法则	116	6.5 关节空间运动控制	194
5.2.5 变质量系统	117	6.5.1 关节空间动力学方程	194
5.3 牛顿-欧拉方程	119	6.5.2 分散 PD 控制	195
5.3.1 平面机械臂的动力学方程: 质量恒定处理方式	119	6.5.3 前馈控制	196
5.3.2 平面机械臂的动力学方程: 变质量处理方式	127	6.5.4 逆动力学模型控制	197
5.3.3 SGP 的动力学方程	131	6.6 运动控制方法总结	198
5.3.4 封闭式动力学	137	6.6.1 动力学模型	199
5.4 虚功方程	147		
5.4.1 D'Alembert 原理	147		
5.4.2 虚功原理	148		

6.6.2	分散 PD 控制	199
6.6.3	前馈控制	199
6.6.4	逆动力学模型控制	199
6.6.5	部分线性化 IDC	200
6.6.6	鲁棒的逆动力学控制	200
6.6.7	自适应逆动力学控制	200
6.7	冗余分解	201
6.7.1	简介	201
6.7.2	问题的提出	202
6.7.3	拉格朗日和 Karush-Kuhn-Tucker 乘子	204
6.7.4	迭代求解	206
6.8	平面机械臂的运动控制	209
6.8.1	分散 PD 控制	210
6.8.2	前馈控制	215
6.8.3	逆动力学控制	218
6.8.4	部分线性化 IDC	222
6.8.5	鲁棒 IDC 控制	223
6.8.6	自适应 IDC 控制	225
6.8.7	关节空间运动控制	228
6.9	SGP 运动控制	229
6.9.1	分散 PD 控制	230
6.9.2	前馈控制	234
6.9.3	逆动力学控制	236
6.9.4	部分线性化 IDC	240
6.9.5	鲁棒 IDC	241
6.9.6	关节空间中的运动控制	243
	习题	255

第 7 章	力控制	261
7.1	简介	261
7.2	控制器方案	262
7.2.1	串级控制	263
7.2.2	外环力反馈	264
7.2.3	内环力反馈	265
7.3	刚度控制	267
7.3.1	单自由度刚度控制	268
7.3.2	通用刚度控制	270
7.3.3	平面机械臂的刚度控制	273
7.3.4	SGP 的刚度控制	277
7.4	直接力控制	283
7.4.1	平面机械臂的力控制	286
7.4.2	SGP 的力控制	289
7.5	阻抗控制	296
7.5.1	阻抗	296
7.5.2	阻抗控制的概念	298
7.5.3	阻抗控制结构	300
7.5.4	平面机械臂的阻抗控制	302
7.5.5	SGP 的阻抗控制	306
	习题	311
附录 A	线性代数	319
附录 B	轨迹规划	326
附录 C	非线性控制	331
	参考文献	335

引 言

当今工业界，机器人是非常重要的生产工具。当工业生产线需要增加灵活性时，工业自动化中机器人的使用对于保证产品的数量和质量至关重要。面对不断增加的引入新产品样式、提高产品质量和降低制造成本的要求，各行业更多地采用机器人设备。汽车生产企业最先在生产线上使用机器人。而家电、食品和医药等其他工业企业近年来在其生产线也普遍使用机器人系统。使用工业机器人后，生产成本显著下降是机器人在不同的生产线上使用数量不断增长的一个重要原因。近年来，人类的劳动力成本在不断增加，而机器人的价格却在显著下降。此外，机器人正变得更加有效、快速、智能、精准和灵活。

工业机器人通常具有链式关节结构。这类机器人通常称为机械臂，由一系列的连杆连接而成，能够提供一个大的工作空间。每个连杆的运动由独立的驱动器操纵，从而完成机器人的运动控制。这种串联结构可以很好地实现较大的工作空间和较好的灵活性等设计目标，但机器人末端执行器的精确度难以保证。对于高精度和高刚度的应用，或者是需要相对高荷载自重比的场合，机器人的并联结构是很好的替代方案。许多机器人专著都重点介绍了串联机器人的理论和技术进展^[5,31,163,168]。然而，介绍并联机器人的分析、设计和控制方面的专著很少^[105,133]。本书的目的是为工业界越来越多的对并联机器人的设计与应用感兴趣的工程师和研究人员提供一些分析和设计工具。

1.1 什么是机器人

机器人是一种能通过其外表或动作表达自身意图的模拟人的特点的机械的或虚拟的人工机构，通常是一个机电系统。尽管哪些机器能称为机器人仍存在争议，但一个典型的机器人一般具有以下几个属性，虽然不是所有的属性都是必需的。

- 不是自然的而是由人工制作的
- 能够感知周围的环境
- 能够进行作业
- 有一定程度的智能
- 可编程
- 能进行一个或多个轴运动
- 能表示自身的意图和模拟人的特点

最后一个属性中模拟人的特点在人们考虑某个机器是否应该称为机器人时显得比较重要。一般来说，一个机器越具有像人的特点，越容易被认为是机器人。没有一个能够使所有人都满意的机器人定义，很多人都有自己的观点。例如，国际标准化组织在 ISO 8373 中定义一个机器人为：

一种应用于工业自动化场合的固定的或能够移动的、自动可控的、可重复编程的多功能操作机，其可通过编程操作三个或更多的轴。

工业机器人学的先驱 Joseph Engelberger^[44]曾经说过：

我无法定义什么是机器人，但能判断一个机器是否是机器人。

Cambridge Advanced Learner's Dictionary 将机器人定义为:

一台被计算机控制的用于自动完成工作的机器。

美国机器人协会定义一个机器人如下:

一种用于移动各种材料、零部件、工具或专用装置的,通过程序化的动作来执行各种任务,并具有编程能力的多功能操作机。

这个定义包括机械臂、数控(NC)机床、步行机和科幻小说中的人形机器人。制造能做人所做一切的人形机器人是人类的一个古老的梦想,在机器人研究领域,制作模仿人类操作的机械装置技术一直在发展。因此,机器人技术属于多学科工程研究领域,而在工业界,机械臂通常被认为是模仿人类手臂的机器人。

Robot 最早在 1923 年成为英语词汇。这个词最初出现在 Karel Čapek 的书《Rossum's Universal Robots》^[183]中。Čapek 想象有一种生物过程能产生类似人类的无情感和灵魂的机器,它们非常强壮,服从命令,可以迅速而廉价地被制造出来。不久,所有的国家都想用成千上万的这种奴隶机器人士兵装备自己的军队,这些士兵能够全力战斗且损失后不会给人带来痛苦。最后,机器人决定凌驾于人类并试图接管世界。在这个故事中,单词 robota 出现了。

然而,直到 20 世纪 40 年代才出现了工业机器人。1946 年,George Devol 发明利用磁记录控制机器重复运行的设备,获得了专利,并在 1954 年设计了第一台可编程的机器人并创造了术语“通用自动化”,这一术语也是他未来公司——Unimation 公司名字的来源。在 20 世纪 80 年代早期,出现了几个机器人生产企业,在行业中使用的工业机器人数量显著增加。2000 年以来,机器人的研究多集中在制造人形机器人和机器宠物的技术上。

1.2 机器人部件

一个机械装置或机械臂通常连接到地面或运动平台,由多个不同类型关节相互连接的一些连杆组成。机器人自由度数目依赖于连杆的数目和构造机器人的关节类型。本节给出连杆、关节、运动链、机构和机器的定义,并描述自由度的概念。

装配机器人的单个刚体称为连杆。对于工业机器人,连杆的刚性对机器人的精度和性能有显著影响,因此通常刚性是连杆设计的一个重要要求。然而,在空间机器人或缆线驱动机械臂等应用场合,由于应用条件限制,连杆需要由柔性材料构成。这种机器人通常称为柔性机器人。由于大多数机械臂的连杆都是刚性的,因此,除非另有说明,本书各章中分析的连杆都是刚性的。刚体的假设使机器人的分析更容易理解。针对缆线驱动并联机械臂,连杆的刚体假设仅适用于机械臂在高刚度情况下的操作,此时缆线内部的张力比较高。在这种情况下,缆线垂度的影响可以忽略不计,连杆的刚体假设有利于我们针对这种机械臂进行动力学分析和控制。从运动学的角度来看,连杆是机构中相互连接的基础构件,连杆内部没有相对运动。例如,由刚性轴连接的两个齿轮可看成一个单一连杆。

机器人的连杆相互连接,两个连杆之间的连接元件称为关节。关节物理上约束了两个相连的构件的相对运动。针对运动副相对运动的需要,可以采用不同类型的关节。

- 转动关节, R, 如图 1-1 所示,允许两个配对的构件绕一个轴相对转动。因此,一个转动关节对于相连的连杆施加了五个约束,具有一个自由度。
- 移动关节, P, 如图 1-1 所示,允许两个配对的构件沿一个轴相对滑动。因此,一个移动关节对于相连的连杆施加了五个约束,具有一个自由度。
- 圆柱关节, C, 如图 1-2 所示,同时允许两构件绕轴线独立转动和沿轴线独立移动。因此,一个圆柱关节对于相连的连杆施加了四个约束,具有两个自由度。

- 万向关节，U，如图 1-2 所示，允许两构件分别绕两个独立的轴转动。因此，一个万向关节对于相连的连杆施加了四个约束，具有两个自由度。一个万向关节可以由两个连续的转动关节构成。
- 球形关节，S，如图 1-3 所示，允许两构件间在所有三个独立的方向上相对于一个球体的中心自由转动。两构件间不允许有移动。因此，一个球形关节对于相连的连杆施加了三个约束，具有三个自由度。如图 1-3 所说明的，由球和承窝组成的关节具有球形关节的运动结构。
- 平面关节，E，如图 1-4 所示，允许构件沿接触平面进行两自由度的平移和绕接触平面法向旋转。因此，它施加三个约束，具有三个自由度。

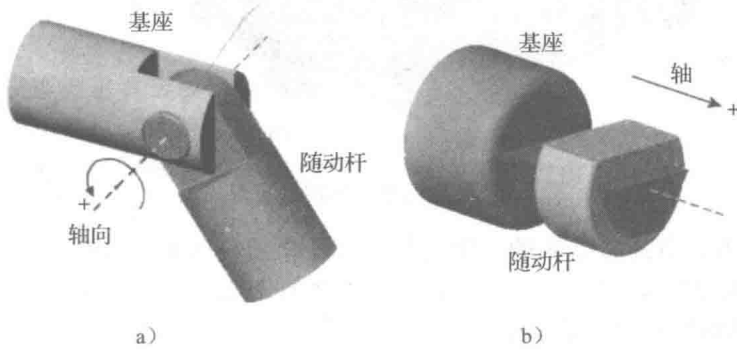


图 1-1 结构图 a)转动关节 b)移动关节
(经 Mathworks 公司许可)

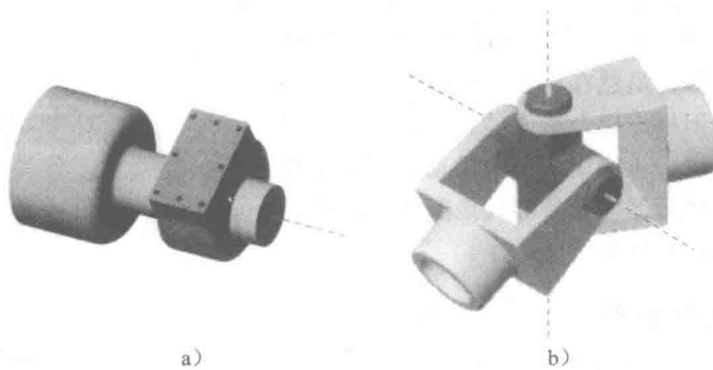


图 1-2 结构图 a)圆柱关节 b)万向关节
(经 Mathworks 公司许可)

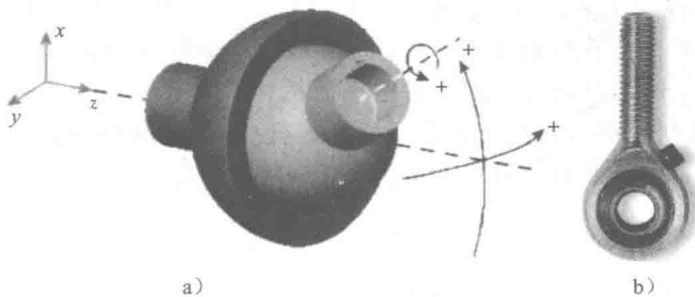


图 1-3 结构图 a)球形关节 b)球和承窝组成的关节
(经 Mathworks 公司许可)

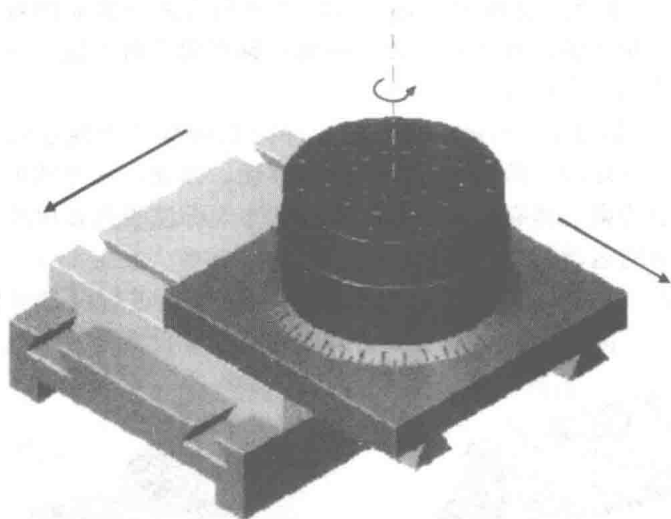


图 1-4 平面关节结构图：三自由度

运动链是指由关节连接起来的一组连杆。每一个连杆与其他连杆至少要有两条不同的路径连接的运动链称为闭环链。另一方面，每一个连杆与其他连杆只有一条路径连接的运动链称为开环链。同时具有闭环链和开环链的机构称为混合链。

如图 1-5 所示，某个连杆固定在基面上的运动链称为一个机构，该固定连杆称为基连杆。机器是由一个或多个机构构成的组件，由电力或液压部件提供能量，完成有用的工作。虽然在许多教材中，术语机构与机器是同义的，但根据以上给出的定义，它们有明确的区别。换句话说，机构用于传输运动，与数字控制器、仪表系统、执行器等设备和其他配件集成在一起，才能组成机器，完成有用的工作。

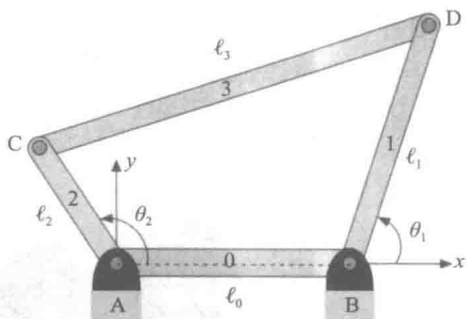


图 1-5 四杆机构的原理图

1.3 机器人的自由度

使一个机构能够完全确定运动所需的独立运动输入的数目称为该机构的自由度。在大多数情况下，可由组成机构的连杆的数目、关节的类型与数目推导出机构的自由度。为此，一个 n 自由度的关节可看成 n 个具有独立自由度的双杆连接关节的组合。例如，一个圆柱关节 C 可看成两个独立的双杆连接关节的组合，一个是转动关节，另一个是移动关节。同时，一个球形关节 S 可看成三个独立的旋转轴相交的转动型双杆连接关节的组合。

定义 λ 为运动空间的自由度，即，对于平面机构， $\lambda=3$ ，对于一般的空间机构， $\lambda=6$ 。直觉上一般认为机构的自由度应该等于所有连杆(除基连杆外)的相关自由度减去关节施加的约束。因此，由下面的关系式可以获得机构的自由度：

$$F = \lambda(n-1) - \sum_{i=1}^j c_i \quad (1.1)$$

其中 F ——机构的自由度

λ ——空间自由度

n ——机构中包括基连杆的连杆数目

j ——机构中等价的双杆连接关节数目

c_i ——关节 i 施加的约束数目

然而，一个关节施加的约束数目加上该关节具有的自由度正好等于 λ ：

$$\lambda = c_i + f_i \quad (1.2)$$

因此，所有关节施加的约束的总数目是：

$$\sum_{i=1}^j c_i = \sum_{i=1}^j (\lambda - f_i) = j\lambda - \sum_{i=1}^j f_i \quad (1.3)$$

将式(1.3)代入式(1.1)得到著名的 Chebyshev-Grübler-Kutzbach(1917)准则^[67]：

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (1.4)$$

如果机构中不存在被动自由度，Chebyshev-Grübler-Kutzbach 准则是有效的。两端均为球形关节的一段连杆就具有被动自由度。这两个关节决定的轴具有冗余自由度，因此该连杆可以自由转动。虽然该连杆能够被动传送力和力矩，从而能够绕一些轴运动，但它没有针对特定轴进行力矩传送的能力。这种自由度称为被动自由度，尽管它们可以算作运动的自由度，但不能用于主动的力和力矩传送。被动自由度通常不算作机构的自由度。如果用 f_p 表示所有的被动自由度，那么剩下的自由度由下式给定：

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i - f_p \quad (1.5)$$

其中 F ——机构的自由度

λ ——空间自由度

n ——机构中包括基连杆的连杆数目

j ——机构中等价的双杆连接关节数目

f_i ——关节 i 具有的自由度

f_p ——所有的被动自由度

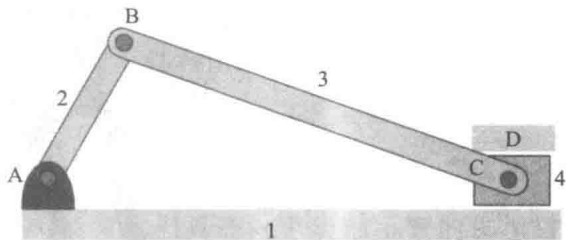


图 1-6 曲柄活塞机构原理图

例 1.1 曲柄活塞机构 图 1-6 表示一个平面的曲柄活塞机构，其中四个连杆构成一个单运动链。由于该机构在平面中运动，因此 $\lambda=3$ ，包括基连杆，连杆数为 4，即 $n=4$ ，该机构存在 4 个双杆连接关节数目， $j=j_1=4$ ，其中 3 个为转动型，一个为移动型，同时，该机构没有被动自由度， $f_p=0$ 。应用 Chebyshev-Grübler-Kutzbach 准则(式 1.5)得到

$F = 3 \times (4 - 4 - 1) + (4 \times 1) - 0 = 1$

曲柄活塞机构具有一个自由度，可用于将曲柄的转动转化为活塞的移动。在内燃机等应用中，活塞上产生的循环力可通过曲柄转换为曲柄轴的转矩。

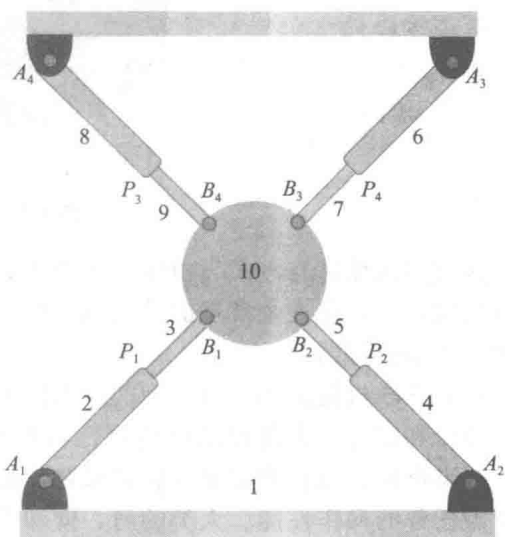


图 1-7 平面 4RPR 并联机构原理图

例 1.2 平面 4RPR 并联机构 图 1-7 表示一个平面 4RPR 并联机构，其中 4 个

相同的缸体活塞执行器使运动平台 10 运动。在该机构中, 肢体构成多个闭环运动链。由于机构在平面运动, 此时 $\lambda=3$, 如图 1-7 所标示的, 包括基连杆的连杆数为 10, $n=10$ 。该机构有 8 个转动型双杆连接关节 A_i 和 B_i , 4 个移动型双杆连接关节 P_i 。因此, $j=j_1=12$ 。同时, 没有被动自由度, $f_p=0$ 。应用 Chebyshev-Grübler-Kutzbach 准则(式 1.5)得到:

$$F = 3 \times (10 - 12 - 1) + (12 \times 1) - 0 = 3$$

这个平面机构有三个自由度。注意该机构的自由度为 λ , 因此, 它没有运动学冗余。然而, 该结构使用了 4 个执行器, 因此, 这个机构有一个自由度的冗余执行器。 ◀

例 1.3 SGP 图 1-8 所示的空间并联机械臂称作 Stewart-Gough 平台(简称 SGP)。6 个相同的缸体活塞执行器使该机械臂运动平台产生空间运动。由于该机构在空间中运动, 因此 $\lambda=6$, 包括基连杆的连杆数为 14, $n=6 \times 2 + 2 = 14$ 。该机构有 $6 \times 2 = 12$ 个球形关节 A_i 和 B_i 和 6 个移动型双杆连接关节 P_i ; 因此, $j_1=6$, $j_3=12$ 和 $j=18$ 。此外, 每一个 SPS 运动结构存在一个被动自由度, 故 $f_p=6$ 。应用 Chebyshev-Grübler-Kutzbach 准则(式 1.5)得到:

$$F = 6 \times (14 - 18 - 1) + (12 \times 3 + 6 \times 1) - 6 = 6$$

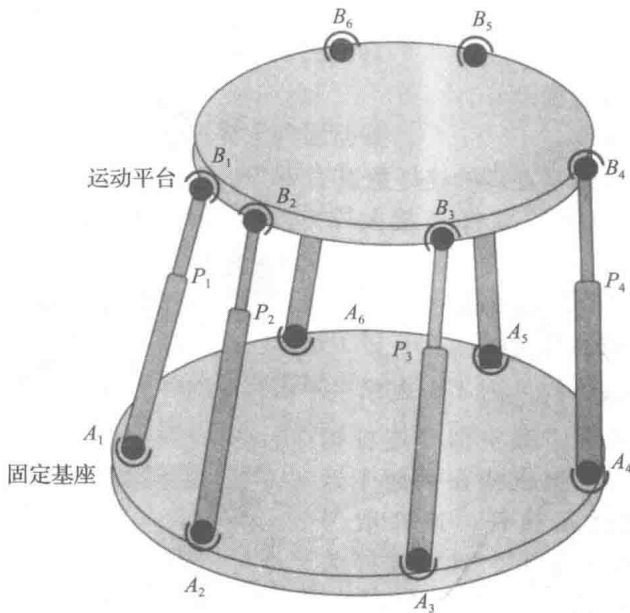


图 1-8 SGP 原理图

该空间机械臂有六个自由度, 能够生成一个包括三个位置自由度和三个姿态自由度的完备空间运动, 是一个常规的并联机械臂。该机械臂执行器的数目与自由度数目相等, 因此没有冗余执行器。 ◀

正如并联机构的例子所看到的, 为使机械臂的运动具有完备性, 必须仔细地选择执行器的数目和定位。大多数机械臂执行器的数目与完成它们的任务所需要的自由度数目相同, 这类机械臂被称为完整并联机械臂。虽然这种结构的成本效益高, 但限制了机械臂完成所需任务的操作性能。人类的肩、臂和手等生物体结构的冗余执行能力对其功能实现有很大帮助。一般而言, 冗余机械臂具有比所需自由度数目更多的执行器, 以便在完成任

之外能够满足一些使用者自定义的要求。为控制这类机械臂的运动,执行器的力分布要合适。如何最佳地选择冗余自由度通常可以转化为一个极小化自定义性能指标的优化问题,此处性能指标可以是最优力分布、无奇异性或其他性能指标。该优化问题及相应的求解方案将在本书 6.7 节详细介绍。

1.4 机器人分类

机器人可通过各种标准进行分类。显然,根据自由度分类是基本的选择之一。通用机器人应具有六个自由度以便在空间中自由操纵目标物。另一方面,在装配等一些特殊的应用场合,机器人只要四个自由度就足够了。从这一点来看,冗余机器人具有比机器人所需自由度数目更多的执行器,而欠驱动机器人的执行器数目比所需的自由度数目少。冗余机器人能够提供更多的自由度,可以在移动目标物的同时,避开障碍物或在工作空间内避免发生奇异性。

另一种广泛采用的机器人分类标准是依据运动学结构。串联机器人由一组开环运动链组成,而并联机器人由一些闭环运动链组成。此外,混合机器人则同时包含开环和闭环运动链,如人类的手臂和腕关节的结构。虽然这些结构具有相当复杂的肌肉分布,能提供合适的运动,但从机器人机械结构角度看,串联机器人采用了开环运动链和串联结构,每个自由度由单个执行器驱动。相反,并联机器人具有闭环运动链结构,采用执行器的组合完成多自由度的运动。作为一个对比,先考察人类的肩部和腕部结构,它们需要一些肌肉一起工作以完成三自由度的旋转运动。另一方面,上臂-肘部-前臂采用单个执行器直接完成手臂的弯曲和伸展。这表明生物的肢体是混合结构,串联结构用于扩大工作空间,并联结构用于准确而稳定的运动。本书将对并联结构进行彻底分析。

1.4.1 串联机器人

串联机器人是工业应用中最常用的机器人。通常它们具有一个类似手臂的机械结构,即由一系列刚性连杆通过关节(大部分是旋转关节)串联而成,构成肩部、肘部和腕部。它们主要的优势是相对于自身的体积和所占的地面范围,具有很大的工作空间。串联机器人主要的缺点是由其开环运动学结构所带来的低刚度。此外,每个杆的位置误差会累积在一起。由于串联机械臂必须让执行器跟随运动,它们具有较高的自重荷载比。故串联机械臂具有较低的有效载荷容量。众所周知,若要实现将被操纵的物体达到工作空间的任意位置和姿态,则机械臂至少需要六个自由度,因此,很多串联机器人具有六个关节。然而,在如今的工业中,串联机器人最广泛的应用是完成拾取和放置等装配任务,这只需要四个自由度,因此,也出现了专用的称为 SCARA[⊖]型(平面平行关节型)的装配机器人。

大部分串联机器人是由一些通过关节相连的刚性连杆组成的。观察制造自动化的机器人可看到,机器人转动关节和移动关节的轴可能互相垂直、平行或相交。根据机器人的几何模型,从关节变量推导出机器人末端执行器的位置和姿态称为机器人的运动学分析。对于串联机器人,获得关节变量到末端执行器位置和姿态的运动学模型比较容易,但得到相应的逆运动学模型就困难得多。因此,大多数工业机器人都采用特殊的设计,以便降低逆运动学模型的复杂性。Donald L. Pieper 第一个针对不同的串联结构推导出实用的逆运动

⊖ 服从选择的装配机械臂(Selective Compliance Assembly Robot Arm)。

模型结果^[152]，并指出对于有六个转动关节且三个连续的关节轴线相交于一点的串联机械臂，其逆运动学存在分析解。这一结果对工业机器人的设计产生了巨大的影响，现在大部分工业机器人采用三个连续关节轴线相交于一点的结构。

串联机器人可分为不同的类别。一个分类是基于机器人工作空间的形状。如图 1-9~图 1-12 所示，各种工作空间形状不同的机器人可用作拾放机器人。图 1-9 显示一个圆柱形机器人的原理。圆柱形状的工作空间适用于圆形排列的拾取和放置应用。如果工作空间和工具排列在不同的球面上，可用如图 1-10 所示的球形机器人。在许多应用中，要求工作空间中的工具按笛卡儿空间坐标放置，这种情况下，需要一个笛卡儿或直角坐标机器人。由三个相互垂直的移动关节组成的三自由度直角坐标机器人的原理如图 1-11 所示。

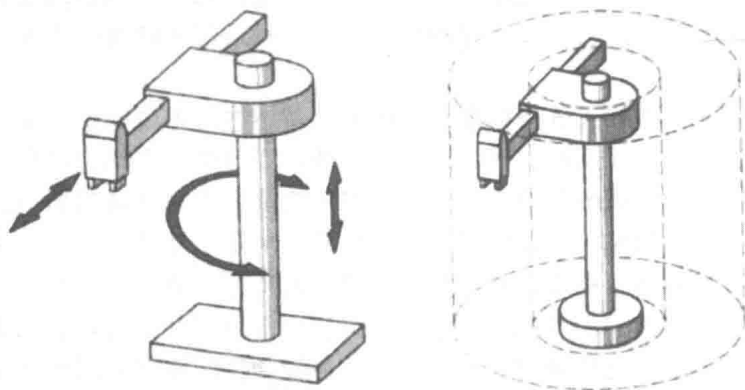


图 1-9 圆柱形机器人的原理和工作空间

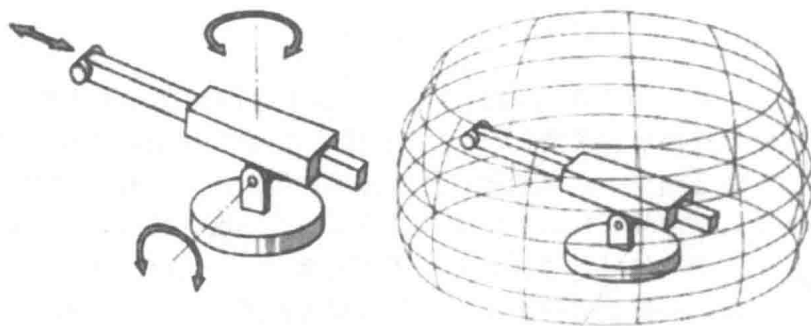


图 1-10 球形机器人的原理和工作空间

1981 年，针对装配机器人提出了一种新概念，称为平面平行关节型装配机械臂（也为 SCARA）。如图 1-12 所示，由于 SCARA 的平行轴关节布局设计，臂在 $x-y$ 方向较灵活，但在 z 方向有很高的刚度与精度，能够适应在 xy 平面进行插孔装配。这个特性对很多装配操作有利，如能够不受约束地将一根针插入圆孔。SCARA 机器人的第二个属性是采用类似人体臂关节的两个连杆相连接的布局。此特点使机械臂能够延伸到受限制的狭窄区域并能够从这种状态回收或折叠起来。对于在封闭的空间中将物体从一个单元运送到另一个单元或完成装载和卸载任务，这个特点是很有用的。

串联机器人的三个主要缺点是荷载自重比低、定位精度低和结构柔性高。一般的六自由度串联机械臂的荷载自重比小于 0.15，SCARA 型机器人的荷载自重比可以增加至最大 0.25^[133]。也就是说，为了拥有 100kg 的荷载能力，典型的串联机器人的质量要超过