



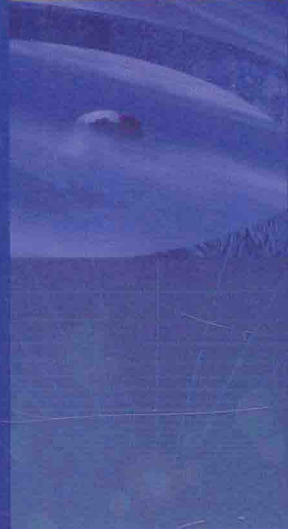
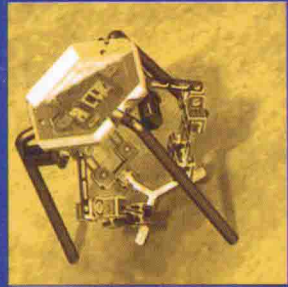
国际机械工程先进技术译丛

 Springer

并联机器人

Paralled Robots
(Second Edition)

(原书第2版)



[法] J.-P. 梅莱 著
黄远灿 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

并联机器人

(原书第2版)

[法] J. -P. 梅莱 著
黄远灿 译



机械工业出版社

本书综合呈现了有关并联机器人的可能的机械构型、分析与综合及可能应用的最新进展,是2000年《并联机器人(第1版)》的再版。本书内容包括:绪论,机构综合与构型,逆运动学,正运动学,速度、精度和加速度分析,奇异位形,工作空间,静力学分析,动力学,标定,设计,系统求解方法,区间分析法和结论。

本书的读者对象是机械、机电和计算机及控制专业领域的研究者和工程师及相关专业的本科生和研究生。本书为学生提供了超过140个练习和问题;给工程师展示了许多实际结果和应用[书中介绍的实验大多数来源于作者自己开发原型机(或获得的原型机设计合同)的体会,以及源于与其他从事并联机器人开发的研究人员和工业伙伴进行的无数次讨论];为研究人员全面地列出了研究项目清单及重要的参考文献(约45%的参考文献是在第1版后发表的)。

Translation from English Language edition.

Parallel Robots By J. -P. Merlet.

Copyright © 2006 Springer Netherlands.

Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved

本书中文简体字版由Springer授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2012-0580号。

图书在版编目(CIP)数据

并联机器人/(法)梅莱著,黄远灿译. —北京:机械工业出版社, 2014.3

(国际机械工程先进技术译丛)

书名原文:Parallel robots

ISBN 978-7-111-45689-6

I. ①并… II. ①梅… ②黄… III. ①机器人技术 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第023202号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:舒雯 责任编辑:舒雯 版式设计:霍永明

责任校对:丁丽丽 封面设计:陈沛 责任印制:刘岚

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·418千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-45689-6

定价:69.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

网络服务

策划编辑电话:(010) 88379733

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

电话服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创造，在实践中继承和改造，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己

的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序

与成熟的串联机器人相比，并联机器人是一种全新的机器人，具有刚度大、结构稳定、承载能力强、精度高、运动惯性小、控制容易等优点，在应用上与串联机器人相互补充，扩大了机器人的应用领域。

并联机器人的历史最早可以追溯到 20 世纪 30 年代。1938 年，Pollard 提出采用并联机构作为汽车喷漆装置。而现代意义上的第一个并联机构，是在 1948 年由 Gough 在英国伯明翰的邓禄普橡胶公司研制出的一种用于轮胎检测的六自由度并联机构。1965 年，Stewart 对 Gough 研制的并联机构进行改进，并将其应用于飞行模拟器的运动产生装置上，同时把这种机构命名为 Stewart 机构。Stewart 机构是应用最早和较广泛的并联机器人之一。随着国内外学者对并联机构的不断深入研究，并联机器人的优点和特性得到了深入的发掘，在众多领域也被越来越多地应用。

本书是法国国家信息与自动化研究所 (INRIA) 的高级科研人员 J. -P. Merlet 所著。J. -P. Merlet 从事并联机器人的研究工作多年。他将理论和实际应用紧密结合，并综合并联机器人的最新进展，对并联机器人的分类、机构综合方法、运动学和动力学、标定及设计等基本问题进行了严谨而详实的阐述，语言精练，深入浅出，体现了 J. -P. Merlet 在并联机器人研究领域的高深造诣和作为领军人物的风范。书中包含超过 140 道的练习及许多并联机器人在实际中应用的介绍，非常适合学生和工程技术人员阅读，是一本并联机器人研究领域的经典书籍。

目前，国内对于并联机器人的研究尚处于起步阶段。因此，将优秀的国外图书引入国内，让更多的研究者可以系统全面地掌握并联机器人的理论及应用成果，提升国内对于并联机器人研究的整体水平，就显得尤为重要。

本书可供从事并联机器人和自动化装备等应用开发工作的技术人员参考，也可作为机械电子工程专业、自动控制专业高年级本科生、硕士生或博士生的教学参考书。

限于译者的经验和水平，书中可能存在疏漏和错误，欢迎读者批评指正。

译者

2013 年 11 月于北京

前 言

并联机器人是在精度、刚性和操作大负载能力方面具有良好性能的闭链机械，有时也称为“六足机构”或并联运动机器（PKM）。它们广泛应用于从天文学到飞行器模拟器的众多领域，同时在车床工业中越来越受到重视。本书综合呈现了有关并联机器人的可能机械构型、分析与综合，以及应用的最新进展。它是2000年《并联机器人》第1版之后的再版。

对于快速发展的领域，专著可以包括该领域的基础知识，但不能自诩涵盖所有最新的参考资料和应用。有两个网站可以跟踪并联机器人最新的研究进展：

1) www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet/merlet_eng.html：网站提供了广泛、随时更新目录的数据库及公开问题和并联机器人可能的机械构型。本书称其为参考网页。

2) www.parallemic.org：网站由我的朋友 Ilian Bonev 维护，能提供并联机器人有趣的综述、网页链接和最新信息。

本书的撰写目的是为了让学生、研究人员和工程师学习和参考。

1) 为学生提供了超过140个练习和问题^①。

2) 给工程师展示了许多实际结果和实际应用。在本书中介绍的实验经验大多数源于我们自己开发原型机（或者是我们获得的原型机设计合同）的体会，以及与其他从事并联机器人开发的研究人员和工业伙伴进行的无数次讨论。

3) 为研究人员全面列出了研究项目清单及重要的参考文献（约45%的参考文献是在本书第1版出版后发表的）。

就参考文献而言，我们进行了艰难的筛选：在并联机器人领域，存在大量的参考文献（在本书发表时，Web网页中可以找到近2000篇参考文献），显然在书中不可能提及所有的参考文献。我们更多地参考了期刊文章，因为期刊文章比会议文章更容易找到；对于在同一题目上做出了很多贡献的作者，通常仅参考他们最新的相关工作；用*表示关于同一题目的其他文献可以在参考网页中找到。而且我们尽量涵盖对同一问题提供不同观点的所有可能的文献。由于专利能通过常规方法获得，故本书一般不引用专利。尽管通过上述措施作了大量割舍，但参考文献的数量仍然远远超出了一本书的合理需要。在本书第1版中，大多数作者被索引，供读者参考，由于书籍容量的考虑，本书将不再这么做，但在参考网页中可以找到相关内容。

尽管公司和实验室的网页地址经常变化，大多数网页在本书中还是以下列方式给出，如用□^{HS}表示，标记HS的相应网页链接可以在www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet/Web中找到。

通过访问匿名ftp可以获得书中一些算法的代码^②。希望每一章结尾给出的未解决问题能够成为开展研究的灵感源泉。

① 在网站 www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet/Solutions/exo.html 可以找到练习答案。

② ftp地址：[ftp-sop.inria.fr](ftp://ftp-sop.inria.fr)，目录 coprin。

本书在每一章的开始设有摘要，阐明本章所需要解决的问题。

关于机器人学的论著涉及众多科学领域，如运动学、动力学、控制理论等。仅用理论方法建立优美的定理是绝对必要的，但我们也需要数值结果。由于机器人学计算的复杂性，必须使用计算机。计算机可以在设计早期阶段进行符号计算，使不得不进行的复杂表达式运算变得简单，或在最后阶段利用附录中给出的方法求出数值结果。然而，在许多情形中，基于计算机的机器人设计并不完善（甚至有时完全错误！参见附录区间分析）这一点常被忽视，可能会导致严重的后果（如在医疗应用中）。在本书中，我们提供计算结果可信任的算法，即算法还需给出表明结果置信度的误差界。这同时说明了附录中区间分析法的重要性。区间分析法不是一种大家熟知的方法，但能生成计算结果可信的算法。

致 谢

我要感谢很多人在写该书的过程中给予的技术支持。由于书中涉及机构理论、几何、符号计算、计算机科学、控制理论等知识，在 INRIA（法国国家信息与自动化研究所）和其他实验室的很多人对于该书的完成均做出了贡献。尽管不能将他们所有人的名字在这里一一列出，但是我仍深深地感谢他们的帮助。在此还要特别提到，最近去世的 INRIA 同事和朋友 Manuel Bronstein 和在斯里南卡 2004 年 12 月的悲剧中两个儿子失踪的 Isabelle Attali。

我还准备将该书献给已辞世的并联机器人研究先驱 Claude Reboulet。Claude Reboulet 是我和我所有同事的楷模，我们永远怀念他。

我们还应当记住已辞世的 J. Duffy、K. Hunt 和 L-W. Tsai：他们不仅是杰出的运动学分析专家，同时都是和蔼可亲的人，在计算运动学学会中扮演了主要角色。

特别感谢与我合写了许多文章的合作者魁北克 Laval 大学的 C. Gosselin 教授。同时，我还得到了 Jorge Angeles 教授的帮助，他很早就鼓励我从事并联机器人研究工作。书中给出的许多结论源自 C. Reboulet、C. Gosselin 和 J. Angeles 的工作。如果出现错误，则是由于我引用时的疏漏。E. Rivière 帮助我将法文第 1 版翻译为英文初稿，而 G. Gladwell 教授对这个翻译初稿提出了大量改进和提高的建议。

深深感谢所有提供图片资料的个人和研究机构。

最后，不能忘记我的妻子 Sylvie 和女儿 Laurane 与 Solène 无限的耐心，以及对我很晚回家的理解。

Sophia-Antipolis, 2005 年 10 月 7 日

符号说明

在本书中，向量用黑体表示，矩阵用大写的正体表示，其他数学变量用斜体表示。例如， $\mathbf{AX} = \lambda \mathbf{b}$ 表示向量 \mathbf{X} 乘矩阵 A 等于向量 \mathbf{b} 乘标量 λ 。为便于阅读，当没有歧义时，尽量避免在方程中使用转置。例如，两个向量 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 的标量积表示为 $\mathbf{U} \cdot \mathbf{V}$ ，而不是通常的 $\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{V}$ 。

本书中将使用下列符号和定义：

- 1) \times ：两个向量的叉乘号。
- 2) \cdot ：两个向量的点乘号。
- 3) \dot{a} ： a 的时间导数。
- 4) \mathbf{X} ：机器人广义坐标向量。
- 5) Θ ：机器人关节坐标向量。
- 6) Θ_a ：机器人驱动关节坐标向量。
- 7) Θ_p ：机器人被动关节坐标向量。
- 8) ρ_i, Θ_i ：连杆 i 的驱动关节坐标。
- 9) ρ_{\min}, ρ_{\max} ：关节坐标的最小值和最大值。
- 10) A_i ：连杆 i 连接到基座的关节的中心。
- 11) $x_{a_i}, y_{a_i}, z_{a_i}$ ：在参考坐标系中 A_i 的坐标分量。
- 12) B_i ：连杆 i 连接到末端执行器的关节的中心。
- 13) $x_{b_i}, y_{b_i}, z_{b_i}$ ：在移动坐标系中 B_i 的坐标分量。
- 14) O ：参考坐标系原点。
- 15) (O, x, y, z) ：参考坐标系。
- 16) C ：移动坐标系原点，将作为末端执行器的位姿参数。
- 17) x_c, y_c, z_c ：在参考坐标系中 C 的坐标。
- 18) (C, x_r, y_r, z_r) ：移动坐标系。
- 19) ψ, θ, ϕ ：定义末端执行器方位的欧拉 (Euler) 角。这些角定义如下：从参考坐标系开始，先绕 z 轴旋转角度 ψ ，接着绕新 x 轴旋转角度 θ ，最后绕新 z 轴旋转角度 ϕ ，从而获得移动坐标系。
- 20) R ：从移动坐标系到参考坐标系的旋转矩阵。
- 21) J ：机器人的雅可比 (Jacobian) 矩阵。
- 22) J^T ：雅可比 (Jacobian) 矩阵的转置。
- 23) Ω ：末端执行器的角速度向量。
- 24) \mathbf{V} ：末端执行器的线速度向量。
- 25) \mathbf{W} ：末端执行器的速度向量，由 \mathbf{V} 和 Ω 组成，也称为速度旋量。
- 26) τ ：驱动关节的力/力矩向量。
- 27) \mathbf{F} ：施加于末端执行器的力/力矩向量。除非特别指出，否则力矩相对于 C 计算。

-
- 28) 环形区域：由两个同心圆界定的区域，定义为位于大圆内但不在小圆内的点集。
 - 29) C ：圆柱关节。
 - 30) H ：螺旋关节。
 - 31) P ：直线关节。
 - 32) P_a ：平行四边形机构。
 - 33) R ：旋转关节。
 - 34) S ：球关节。
 - 35) U ：万向关节。
 - 36) d. o. f.：自由度。

目 录

译丛序言	
译者序	
前言	
致谢	
符号说明	
第1章 绪论	1
1.1 典型机器人的特性	1
1.2 机器人的其他构型	3
1.3 机器人技术的必要性	8
1.4 并联机器人的定义	8
1.4.1 广义并联机械臂的定义	8
1.4.2 并联机械臂	8
1.4.3 全并联机械臂	9
1.4.4 全并联机械臂分析	9
1.4.4.1 平面机器人	9
1.4.4.2 一般情形	10
1.5 本书内容	11
1.6 练习	12
第2章 机构综合与构型	13
2.1 引言	13
2.2 机构综合方法	14
2.2.1 图论法	14
2.2.2 群论法	14
2.2.2.1 李 (Lie) 群和位移子群	14
2.2.2.2 子群运动生成器	15
2.2.2.3 基于群论的型综合	15
2.2.3 螺旋法	16
2.2.3.1 螺旋理论基础	16
2.2.3.2 基于螺旋理论的型综合	16
2.2.4 机构综合与其他运动学性能	17
2.2.5 机构综合与不确定性	17
2.2.6 并联机器人的符号	18
2.3 平面机器人	18
2.4 空间运动机器人	19
2.4.1 关节和驱动器	19
2.4.2 并联机器人的分类	20
2.4.3 3 自由度机械臂	21
2.4.3.1 平移机械臂	21
2.4.3.2 定向机械臂	24
2.4.3.3 混合自由度机械臂	26
2.4.4 4 自由度机械臂	29
2.4.5 5 自由度机械臂	31
2.4.6 6 自由度机械臂	33
2.4.6.1 <i>UPS</i> 链机器人	33
2.4.6.2 <i>PUS</i> 链机器人	34
2.4.6.3 <i>RUS</i> 链机器人	35
2.4.6.4 混合支链机器人	36
2.4.6.5 3 腿机器人	37
2.4.6.6 解耦机器人	41
2.5 冗余机器人	42
2.6 组合式桁架和二元驱动	43
2.7 MEMS 和微定位机器人	45
2.8 线机器人	47
2.9 应用实例	49
2.9.1 空间应用	49
2.9.2 振动	50
2.9.3 医疗应用	52
2.9.4 模拟器	54
2.9.5 工业应用	55
2.9.5.1 机床	56
2.9.5.2 定位设备	60
2.9.5.3 其他工业应用	61
2.9.6 其他应用	64
2.10 本书中研究的机器人	65
2.11 练习	65
第3章 逆运动学	67
3.1 逆运动学	67
3.1.1 通用方法	67
3.1.1.1 解析方法	67
3.1.1.2 几何方法	68
3.1.2 实例	68
3.1.2.1 平面机械臂	68
3.1.2.2 3- <i>UPU</i> 机械臂	69
3.1.2.3 6- <i>UPS</i> 机械臂	69

3.1.2.4	6- <u>PUS</u> 机械臂	70	方法	90	
3.1.2.5	6- <u>RUS</u> 机械臂	70	4.4.1	9 腿机械臂	90
3.1.2.6	结论	71	4.4.2	7 腿和 8 腿机械臂	91
3.1.3	关节坐标的极限值	71	4.5	结论	92
3.2	练习	71	4.6	快速数值算法	92
第 4 章	正运动学	73	4.6.1	牛顿 (Newton) 法	93
4.1	平面机器人	73	4.6.1.1	原理	93
4.1.1	4 杆机构	73	4.6.1.2	正运动学的实现	93
4.1.2	耦合器曲线和循环数	74	4.6.1.3	牛顿 (Newton) 法的缺点和 实时性问题	95
4.1.3	3- <u>RPR</u> 机器人的正运动学	74	4.6.1.4	牛顿 (Newton) 法的 收敛性	95
4.1.3.1	配置模式	75	4.6.1.5	扩展唯一性区域: 膨胀 方法	96
4.1.3.2	多项式正运动学	75	4.6.2	区间分析法	96
4.1.3.3	特例	76	4.6.3	算法效率和计算时间	97
4.1.4	其他平面机器人	77	4.6.4	路径跟踪	98
4.2	3 平移自由度机器人	77	4.7	具有附加传感器的正运动学	98
4.3	6 自由度机器人	78	4.7.1	附加传感器的类型和安装位置	98
4.3.1	实例分析: TSSM	78	4.7.2	传感器的最大数量	99
4.3.1.1	配置模式数的上界	78	4.7.2.1	增加角度传感器	99
4.3.1.2	多项式公式	79	4.7.2.2	增加位移传感器	99
4.3.1.3	具有 16 种配置模式的 TSSM 例子	80	4.7.2.3	同时增加角度和位移 传感器	100
4.3.2	其他空间机构的分析	82	4.7.3	传感器精度和位姿精度的关系	100
4.3.2.1	3 自由度腕	82	4.8	练习	101
4.3.2.2	MSSM	83	第 5 章	速度、精度和加速度分析	103
4.3.2.3	6- <u>PUS</u> 机器人和 Stewart 平台	83	5.1	运动学关系	103
4.3.2.4	PPP-3S、PRR-3S、PPR-3S 机械臂	83	5.2	逆雅可比 (Jacobian) 矩阵	103
4.3.3	6- <u>UPS</u> 机器人的特例	84	5.2.1	欧拉 (Euler) 角逆雅可比 (Jacobian) 矩阵	104
4.3.3.1	6-5 机械臂	84	5.2.2	逆运动学雅可比 (Jacobian) 矩阵	105
4.3.3.2	6-4 机械臂	84	5.2.2.1	例: 平面 3- <u>RPR</u> 机械臂	105
4.3.3.3	6-3 机械臂	85	5.2.2.2	例: 3- <u>UPU</u> 机械臂	106
4.3.3.4	5-5 机械臂	85	5.2.2.3	例: 3- <u>PUS</u> 旋转腕关节	107
4.3.3.5	5-4 机械臂	85	5.2.2.4	例: 6- <u>UPS</u> 机械臂	107
4.3.3.6	4-4 机械臂	86	5.2.2.5	例: 6- <u>PUS</u> 机械臂	108
4.3.3.7	5 点对准机械臂	87	5.2.3	逆雅可比 (Jacobian) 矩阵与 普吕克 (Plücker) 线坐标	108
4.3.4	SSM 机构	87	5.3	雅可比 (Jacobian) 矩阵	109
4.3.5	一般 6- <u>UPS</u> 机器人	88	5.4	运动静力学性能指标	109
4.3.5.1	最大配置模式数	88	5.4.1	可操作性与运动学多面体	109
4.3.5.2	求解方法	88			
4.3.5.3	具有 40 个实解的例子	89			
4.3.6	小结	89			
4.4	求解 <u>UPS</u> 机器人正运动学的系统				

5.4.2 条件数和其他指标	110	6.5.3.2 类型 5a 和 5b 的构型	136
5.4.2.1 可操作性指标和条件数	110	6.6 奇异性指标	137
5.4.2.2 条件数的有效性	112	6.7 奇异性测试	139
5.4.2.3 各向同性	113	6.8 永久奇异性的机构	140
5.4.2.4 全局性指标	113	6.9 无奇异路径规划和工作空间扩大	141
5.4.2.5 其他精度指标	114	6.10 奇异性与设计	141
5.5 关节速度和旋量计算	114	6.11 练习	142
5.5.1 关节速度计算	114	第 7 章 工作空间	144
5.5.2 旋量计算	114	7.1 工作空间极限、表示和类型	144
5.6 工作空间中速度极值	115	7.1.1 不同类型工作空间	144
5.6.1 旋量极值	115	7.1.2 方位表示	145
5.6.2 关节速度的极值	116	7.2 工作空间计算方法	145
5.7 加速度分析	116	7.2.1 几何方法	145
5.7.1 6- <u>UPS</u> 机器人	116	7.2.2 离散化方法	146
5.7.2 6- <u>PUS</u> 机器人	117	7.2.3 数值方法	146
5.8 精度分析	117	7.3 平面机械臂	147
5.8.1 几何误差	117	7.3.1 固定方位工作空间	148
5.8.2 热误差	118	7.3.1.1 关节坐标限制	148
5.8.3 重力引起的误差	118	7.3.1.2 被动关节上的机械限制	148
5.8.4 动态误差	118	7.3.1.3 腿的干涉	148
5.8.5 最差精度位姿	118	7.3.2 方位工作空间	149
5.9 练习	118	7.3.3 灵巧工作空间	149
第 6 章 奇异位形	121	7.3.4 最大工作空间	150
6.1 引言	121	7.3.5 蕴含方位工作空间	152
6.2 奇异性的影响和分类	121	7.3.6 全方位工作空间	153
6.2.1 奇异性和速度	121	7.4 3- <u>UPU</u> 机械臂	154
6.2.2 奇异性和静力学	122	7.5 6- <u>UPS</u> 机械臂	154
6.2.3 奇异性和运动学	123	7.5.1 固定方位工作空间的横截面	154
6.2.4 串联奇异性	123	7.5.2 3D 固定方位工作空间	156
6.3 并联奇异性	124	7.5.2.1 工作空间的面积和体积	156
6.3.1 奇异性的研究动机	124	7.5.2.2 关节的机械限制	157
6.3.2 奇异性分析	124	7.5.2.3 连杆之间的干涉	159
6.4 格拉斯曼 (Grassmann) 几何	125	7.5.3 方位工作空间	161
6.4.1 变体和几何形状	126	7.5.4 灵巧工作空间	162
6.4.2 几何分析实例	127	7.5.5 最大工作空间	163
6.4.2.1 平面 3- <u>RPR</u> 机械臂	127	7.5.6 机床的工作空间	163
6.4.2.2 3- <u>UPU</u> 机械臂	128	7.5.7 构型比较	164
6.4.2.3 MSSM	129	7.6 工作空间性能指标	165
6.5 与奇异性相关的运动	135	7.7 轨迹验证	165
6.5.1 奇异性运动计算	135	7.7.1 线段验证	165
6.5.2 瞬时旋转轴计算	136	7.7.1.1 连杆长度约束	166
6.5.3 例: MSSM	136	7.7.1.2 关节的机械限制	166
6.5.3.1 类型 3d 的构型	136	7.7.1.3 实例	167

7.7.2	参数轨迹验证	168	9.6.1	逆动力学	193
7.8	运动规划	168	9.6.2	正动力学	194
7.8.1	全局运动规划	168	9.7	练习	195
7.8.1.1	平面机器人的单元分解法	169	第10章 标定		196
7.8.1.2	空间机器人的单元分解法	170	10.1	引言	196
7.8.1.3	路线图	171	10.2	标定方法的类型与原理	196
7.8.2	机床运动规划和零件定位	172	10.2.1	标定原理	196
7.8.3	全局运动规划方法的展望	172	10.2.2	标定方法的比较	197
7.9	练习	173	10.2.3	标定方法中存在的问题	197
第8章 静力学分析		174	10.3	外部标定	198
8.1	力旋量和关节力的关系	174	10.3.1	外部测量方法分类	198
8.1.1	基本关系	174	10.3.2	正运动学标定	198
8.1.2	力旋量计算	174	10.3.3	逆运动学标定	199
8.1.3	关节力计算	174	10.3.4	固定腿长标定	200
8.2	最大关节力和最大力旋量	175	10.3.5	利用其他几何元素的标定	200
8.2.1	位姿上的最大关节力	175	10.3.6	解的唯一性	200
8.2.2	平移工作空间中的最大关节力	175	10.3.7	能观性	201
8.2.3	一般工作空间中的最大关节力	176	10.4	自动标定	201
8.2.4	位姿上的最大力旋量	176	10.5	机械约束标定	202
8.2.5	工作空间中的最大力旋量	177	10.6	标定位姿计算	202
8.3	力性能指标	178	10.7	练习	203
8.4	并联机器人作为力传感器	179	第11章 设计		204
8.5	刚度和柔性	179	11.1	引言	204
8.5.1	并联机器人的刚度矩阵	179	11.2	减少设计参数的数量	205
8.5.1.1	弹性模型	179	11.3	图册法	206
8.5.1.2	梁模型	180	11.4	代价函数法	206
8.5.2	被动柔顺与力反馈控制	181	11.5	精确综合法	209
8.5.3	刚度映射	181	11.5.1	工作空间综合	209
8.5.3.1	等刚度映射	181	11.5.2	速度综合	210
8.5.3.2	6-UPS 机器人的等刚度线	182	11.6	参数空间法	211
8.5.4	工作空间中的刚度极值	184	11.6.1	参数空间	211
8.5.5	刚度和设计	184	11.6.2	原理	211
8.6	静态平衡	185	11.6.3	允许域计算	211
8.7	练习	185	11.6.4	搜索合适的机器人	214
第9章 动力学		187	11.6.5	设计实例	214
9.1	引言	187	11.6.6	优点和缺点	214
9.2	MSSM 的逆动力学	188	11.7	其他设计问题	215
9.3	6-UPS 机械臂动力学	189	11.8	练习	215
9.3.1	假设和符号	189	第12章 附录：系统求解方法		216
9.3.2	算法原理	190	12.1	同伦法	216
9.4	6-PUS 机器人动力学	192	12.2	消元法	216
9.5	计算时间	193	12.3	Gröbner 基	217
9.6	实例	193			

第 13 章 附录：区间分析法	218	13.5 机器人应用	221
13.1 引言	218	13.5.1 工作空间计算	221
13.2 函数性质和区间估计	219	13.5.2 奇异性检验	221
13.3 通用区间估计算法	219	13.6 小结	221
13.4 一般应用	220	第 14 章 附录：结论	223
13.4.1 系统求解	220	参考文献	224
13.4.2 全局优化	220		
13.4.3 线性系统求解	220		

第 1 章 绪 论

能让刚体（这里称为末端执行器）相对固定基座移动的机械系统，在众多应用中扮演着非常重要的角色。空间刚体可以不同的方式平移或旋转，这个运动称为它的自由度。空间刚体的总自由度数不能超过 6（如沿互相正交的轴的三个平移运动和围绕这些轴的旋转）。末端执行器的位置和方位（这里称为位姿）可以通过广义坐标描述；广义坐标通常是末端执行器特定点的坐标和定义末端执行器方位的角度，但也可以是唯一地定义末端执行器位姿的任何一组参数。只要机械系统能控制末端执行器的几个自由度，这个系统就被称为机器人。

过去的几年见证了机器人在工业领域中的重要发展，这主要归功于它们的灵活性。然而，大多数常用的机器人构型似乎不能适应某些特定任务。因此，研究者开始研究其他的机器人构型，这些构型越来越经常地应用于工业领域。在本书中研究的并联机器人就是如此。

1.1 典型机器人的特性

目前，大多数机械臂都无一例外地呈现出拟人的特征，一般特别像人的手臂。它们由一连串刚体组成，每一个刚体通过单自由度关节分别与位于它前面和后面的刚体连接，单自由度关节允许刚体绕轴旋转或平移；连接形式类似于串联电路，故这类构型称为串联机器人。串联机器人的一个例子是球形机器人，一系列部件从基座串联到末端执行器，每一个部件与后续部件通过旋转关节连接。如果机器人 n 个关节中每个关节都能被驱动，通常能够控制末端执行器的 n 个自由度。串联机器人 Scara 的构型是一个好的范例。它允许控制末端执行器的 4 个自由度（图 1.1）。表 1.1 和 1.2 给出了 Scara 和 6 自由度工业球形机器人的一般性质。

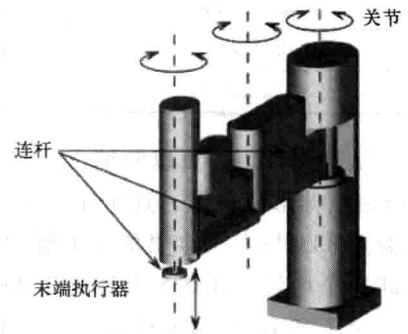


图 1.1 Scara 机器人

表 1.1 工业机械臂的性能指标（Scara 构型，制造商给出的机器人质量和负载能力单位为 kg 及重复精度单位为 mm）

机器人型号	自由度	质量	负载能力	重复精度	负载能力/质量
Adept 1800	4	34	5.5	± 0.02	0.1617
Adept 1XL	4	265	12	± 0.025	0.0452
Adept 3XL	4	266	25	± 0.038	0.0939
Epson E2C251	4	14	3	± 0.01	0.21442
Epson E2S45x	4	20	5	± 0.015	0.25