

机器人科学与技术丛书 04

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

并联机器人 机构学基础

刘辛军
谢福贵 著
汪劲松

Fundamental of Parallel Robotic Mechanisms

高等教育出版社

科学与技术丛书 04

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

并联机器人 机构学基础

Fundamental of Parallel Robotic Mechanisms

刘辛军 谢福贵 汪劲松 著

BINGLIAN JIQIREN
JIGOUXUE JICHU

高等教育出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

并联机器人机构学基础 / 刘辛军, 谢福贵, 汪劲松
著. -- 北京: 高等教育出版社, 2018. 10
(机器人科学与技术丛书; 4)
ISBN 978-7-04-050604-4

I. ①并… II. ①刘… ②谢… ③汪… III. ①机器人
机构 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第210936号

策划编辑 刘占伟 责任编辑 刘占伟 封面设计 杨立新 版式设计 杜微言
插图绘制 于博 责任校对 吕红颖 责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	北京汇林印务有限公司	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
开本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.com
印张	17.75		http://www.hepmall.cn
字数	360千字	版次	2018年10月第1版
插页	8	印次	2018年10月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	89.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 50604-00

内容简介

本书基于作者对并联机器人机构学基础理论 20 余年的持续研究,紧紧围绕并联机构的“型(构型)”、“性(性能)”、“度(尺度)”,建立了系统的并联机器人设计理论与方法。

全书总共分为 3 篇:构型分类与综合、性能评价与优化设计以及综合设计实例。

第 1~2 章为构型分类与综合篇,主要围绕并联机构的“型”来展开描述。第 1 章基于现有构型系统地对并联机器人机构进行了分类综合;第 2 章则从方法论(观察法、演化法、线图法)的角度对 2~6 自由度并联机器人机构进行了构型综合,旨在找到简单、实用的新机构。

第 3~5 章为性能评价与优化设计篇,主要针对并联机构的“性”和“度”建立相应的运动学优化设计方法,是全书的精华与核心所在。第 3 章构建了反映并联机构运动和力传递/约束特性的性能评价体系;第 4 章则在第 3 章所提性能评价指标的基础上对并联机构的奇异性进行了研究;第 5 章基于运动和力传递/约束性能指标定义了设计指标,建立了一套并联机构运动学尺度综合方法。

第 6~7 章为综合设计实例篇,是对前两部分理论方法的综合应用。第 6 章介绍了一种 5 自由度大摆角全并联加工机器人的构型与优化设计过程;第 7 章则对一种 4 自由度高速并联拾取机器人开展了运动学优化设计。

作为全书的数学基础,在附录中还增加了对旋量理论基础的概述。

本书可供机构学、机器人学、机械制造、精密工程等相关专业的研究生参考,也可以作为相关行业工程师、设计师的参考资料。

《机器人科学与技术》丛书编委会

名誉主编: 熊有伦

主 编: 戴建生

委员 (按姓氏笔画排序):

丁 汉	丁华峰	丁希仑	于靖军	王田苗	王汝贵	王国彪
王树新	王 皓	王德伦	方跃法	邓宗全	孔宪文	甘东明
史超阳	朱向阳	刘辛军	刘 宏	刘宏斌	刘金国	刘荣强
杨广中	杨廷力	李 兵	李泽湘	李建民	李树军	李洪波
李秦川	李瑞琴	李端玲	邹慧君	沈惠平	张 丹	张克涛
张建伟	张宪民	陈学东	陈贵敏	陈 焱	陈义明	金国光
赵 杰	赵景山	侯增广	姚立纲	徐扬生	徐 凯	高 峰
郭为忠	郭进星	黄 田	黄 真	黄 强	曹政才	崔 磊
康荣杰	葛巧德	韩建达	楼云江	蔡敢为	廖启征	熊蔡华
颜鸿森	戴振东	魏国武	Andreas Müller	Gim Song Soh		

前 言

并联机器人机构具有多闭环的结构特征,通过多个运动支链协同作用实现末端的运动输出,是一类与传统串联机器人机构互为补充的机构。与传统的串联机器人机构相比,并联机器人机构具有结构紧凑、刚度高、动态响应快等优点,在自动化生产线、先进制造装备、生物医学装置、航空航天运动模拟等领域的应用取得了巨大成功。

运动学设计(含构型设计与参数设计)是机器人/装备设计开发的主要环节之一,直接影响整机的性能。然而,由于并联机构的多环结构与多参数特点,相关的运动学设计是一个非常具有挑战性的难题,突出体现在构型创新、性能评价和尺度综合上。以性能评价为例,近年来研究表明,若以评价串联机构性能的局部条件数指标来评价具有混合自由度或平动型等部分并联机构时,会出现异常。IFTToMM 法国委员会主席 J. P. Merlet 教授在美国机械工程年会的主题报告中也承认“机构综合是一个非常困难的问题”。

针对并联机构设计过程中的创新设计、性能评价与优化设计等难题,本书作者系统地开展了并联机构构型设计、性能分析与评价、尺度综合等基础理论研究及其应用工作,借助旋量理论和空间模型理论等工具,在构型综合与创新设计方法、运动与力传递/约束性能评价、图谱化尺度综合等方面形成了原创性、系统性的研究成果。目前已发表相关学术论文 100 余篇,其中在 *ASME Transactions*、*Mechanism and Machine Theory* 等国际核心期刊发表 SCIE 论文 50 余篇。所提出的理论方法得到国际同行的认可并予以借鉴。此外,相关研究成果获中国发明专利授权 30 余项。

全书共分为 3 篇。第 1~2 章为构型分类与综合篇,主要围绕并联机构的“型”来展开描述。第 3~5 章为性能评价与优化设计篇,主要针对并联机构的“性”和“度”建立相应的运动学优化设计方法,是全书的精华与核心所在。第 6~7 章为综合设计实例篇,分别围绕航空加工与工业自动化生产线应用,给出两个成功的设计案例,同时也是对前面两部分理论方法的综合应用。

第 1 章基于现有构型系统地对并联机器人机构进行了分类综述;第 2 章则从方法论(观察法、演化法、线图法)的角度对 2~6 自由度并联机器人机构进行了构型综合,旨在找到简单、实用的新机构。第 3 章构建了反映并联机构运动和力传递/约

束特性的性能指标评价体系;第4章则在第3章所提指标的基础上对并联机构的奇异性进行了研究;第5章基于运动和力传递/约束性能指标定义了设计指标,建立了一套并联机构运动学尺度综合方法。第6章介绍了一种5自由度大摆角全并联加工机器人的构型与优化设计过程;第7章则对一种4自由度高速并联拾取机器人开展了运动学优化设计。

本书作者均为从事并联机器人机构学基础理论及技术应用研究的科研人员。作者指导的博士生的研究成果为本书的撰写提供了素材,博士毕业生包括吴超、陈祥等。对本书的所有贡献者表示诚挚的感谢!

本书研究工作得到了国家自然科学基金(资助号:91748205、51425501、51675290)、北京市科技计划(课题编号:Z171100000817007)等项目的资助。本书的出版得到了高等教育出版社的大力支持,在此表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免有疏虞之处,热忱欢迎读者和专家批评指正。

作者
于北京 清华园
2018年6月

目 录

第一篇 构型分类与综合

第 1 章 并联机器人机构的分类	3
1.1 并联机器人的定义和特征	3
1.2 运动副和支链	5
1.3 结构体系	10
1.3.1 2 自由度并联机构	11
1.3.2 3 自由度并联机构	13
1.3.3 4 自由度并联机构	22
1.3.4 5 自由度并联机构	24
1.3.5 6 自由度并联机构	25
1.4 小结	29
参考文献	29
第 2 章 并联机器人机构的构型综合	35
2.1 自由度分析	35
2.1.1 观察法	36
2.1.2 演化法	38
2.1.3 运动学分析法	39
2.1.4 旋量法	41
2.2 构型演化	45
2.3 构型综合	48
2.3.1 含平行四边形闭环子链的并联机构构型综合	48
2.3.2 基于演化法的并联机构构型综合	71
2.3.3 基于 Grassmann 线几何和线图法的并联机构构型综合	77
2.4 小结	89

参考文献	89
------	----

第二篇 性能评价与优化设计

第 3 章 并联机器人机构的运动/力性能分析及评价	97
3.1 运动与力的旋量描述	99
3.1.1 运动旋量与螺旋运动	99
3.1.2 力旋量	99
3.1.3 运动旋量与力旋量的互易积	100
3.2 运动旋量与力旋量的求解	101
3.2.1 传递与约束力旋量	101
3.2.2 输入与输出运动旋量	105
3.2.3 运动和力的传递关系	109
3.2.4 运动和力旋量子空间	110
3.3 运动/力性能评价方法及指标	114
3.3.1 非冗余并联机构的性能指标	114
3.3.2 冗余并联机构性能指标	136
3.4 综合应用案例	139
3.4.1 3-UPU 并联机构概述	139
3.4.2 3-UPU 机构运动/力传递特性分析	140
3.4.3 3-UPU 机构运动/力约束特性分析	142
3.5 小结	144
参考文献	146
第 4 章 并联机器人机构的奇异性分析与评价	149
4.1 奇异机理及分类	150
4.1.1 少自由度并联机构	150
4.1.2 6 自由度并联机构	150
4.2 奇异性分析的新方法	151
4.2.1 方法体系	151
4.2.2 应用实例	155
4.3 距离奇异位形远近的评价	159
4.3.1 评价指标	160
4.3.2 应用实例	160
4.4 小结	167
参考文献	168

第 5 章 并联机器人机构的尺度综合	169
5.1 基于性能图谱的优化设计方法 (PCbDM)	169
5.1.1 无量纲化方法 (PFNM) 及参数设计空间 (PDS)	170
5.1.2 设计指标	174
5.2 优化设计一般流程	178
5.3 设计实例	180
5.3.1 3-PRS 并联机构	180
5.3.2 2 自由度球面 5R 并联机构	185
5.3.3 3 自由度姿态精调机构	194
5.4 小结	199
参考文献	200

第三篇 综合设计实例

第 6 章 5 自由度并联加工机器人的运动学设计	203
6.1 应用背景	203
6.2 构型创新设计	204
6.3 运动学分析	207
6.3.1 自由度分析与验证	207
6.3.2 运动学逆解及奇异性分析	209
6.4 运动学优化设计	219
6.4.1 参数设计空间	220
6.4.2 性能评价指标	220
6.4.3 尺度综合	222
第 7 章 4 自由度并联机器人的运动学设计	229
7.1 应用背景	229
7.2 运动学逆解	230
7.3 性能指标	232
7.4 性能图谱及尺度综合	235
7.5 工作空间辨识	238
7.6 样机开发	242
附录 旋量理论基础	245
A.1 旋量的定义	245

A.2 旋量的基本运算	247
A.3 旋量系及其基本性质	248
参考文献	251
索引	253

第一篇 构型分类与综合

构型创新设计是机器人/装备开发的起点和关键,也是其创新的根本,机构原理构型从本质上决定了机器人/装备的整体性能。由于并联机构的多闭环结构特征,根据所需的自由度形式设计机构原理构型是非常具有挑战性的复杂过程。

本篇分为两章,主要围绕并联机构的“型”来展开描述。第1章基于现有构型系统地对并联机器人机构进行了分类综合;第2章则从创新设计方法的角度对并联机器人机构进行了构型综合,旨在找到简单、实用的新机构。

第 1 章 并联机器人机构的分类

并联机器人机构是一类与传统串联机器人机构互为补充的机构。与串联机构的开链结构形式截然不同, 并联机构具有空间多闭环的结构特征, 通过多个运动学支链的协同作用实现终端的运动输出。这种结构形式使得并联机构具有结构紧凑、刚度高、动态响应快等优点, 这也是并联机构问世几十年以来一直被工业界和学术界广泛关注的主要原因。最早在工业上获得成功应用的是用于开发飞行模拟器的 6 自由度 Gough–Stewart 平台 (Huang et al., 2005)。后续影响较大的包括用于开发包装生产线上高速机械手的 3 自由度 DELTA 并联机构 (Clavel, 1990) 和 4 自由度 H4 并联机构 (Pierrot et al., 1999), 以及应用于加工领域的基于 3-PRS (P —— 移动副; R —— 转动副; S —— 球副) 并联机构的 Sprint Z3 主轴头 (Wahl, 2000) 和德国 Metrom 公司开发的 5 自由度全并联加工中心 (Schwaar, 2004)。

本章将从运动副、支链以及机构层面逐步介绍并联机构的结构体系, 并基于自由度类型对并联机构进行分类枚举。

1.1 并联机器人的定义和特征

可以使一个刚体相对于固定平台 (简称定平台) 运动的机械系统在很多实际应用领域中都占有举足轻重的地位。刚体在空间中可以以移动和转动等不同方式运动, 这些运动称为自由度 (degrees of freedom, DOF)。一个刚体在空间中的自由度总数不能超过 6 个 (如图 1.1 所示, 3 个沿 x 、 y 、 z 方向的平动自由度和绕这 3 个轴的转动自由度)。一个能够控制末端执行器实现若干个自由度的机械系统称之为机器人 (robot 或 manipulator)。

近年来, 机器人在工业领域得到了广泛应用。对机器人需求的增长, 主要源于机器人的灵活性。然而常见工业机器人的结构构型在某些任务中并不适用, 因此人们

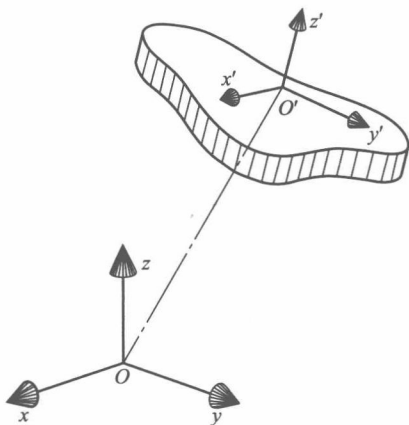


图 1.1 笛卡儿坐标系下的刚体相对转动

开始研究其他类型的构型并逐步将其应用到工业领域。并联机器人就是这样发展起来的, 将多体运动转化为其他部件受限运动的系统就是并联机构。

并联机构是由一个 n 自由度的末端执行器 (或动平台)、一个固定平台以及 m ($m > 1$, 且可能大于或小于 n) 个连接动平台和固定平台的独立运动支链组成的闭环系统。这些运动支链由构件和运动副组成, 机构由 k ($k \geq n$) 个指定运动副上的驱动器驱动。根据定义, 并联机构有如下几种:

- (1) $k = n$, 非冗余驱动并联机构, 属并联机构中最常见的一种;
- (2) $k > n$, 冗余驱动并联机构;
- (3) $m > n$, 具有冗余支链的并联机构;
- (4) $m < n$, 每条支链上具有一个或多个驱动副的并联机构;
- (5) $n = m = k$, 全并联机构。

在情况 (3) 中, 通常只有一条没有驱动副的冗余支链 (通常称之为被动支链)。对于这种机构, 动平台的自由度通常取决于被动支链的活动度¹。

并联机构又可分为对称型和非对称型, 其中对称并联机构需满足以下条件:

- (1) 全并联机构;
- (2) 动平台与定平台上的运动副遵循特定的规则布局;
- (3) 所有支链中相应的固长构件长度相等;
- (4) 所有支链上的运动副都以相同布局排列;
- (5) 所有支链上的驱动副数量相同, 位置一致。

不满足以上条件的则是非对称并联机构。并联机构之所以引起人们的关注有以下两点原因:

¹机构的活动度是指完全确定机构的位形所需要的独立输入数量。一般情况下, 与自由度相一致, 不过, 两者之间有所区别。

(1) 最少可用两条支链完成力在支链上的分布。

(2) 当驱动副被锁定时, 机构停留在原有位置。在某些场合, 这对安全保障很重要。

由于所受外力可以由多个驱动器来分担, 因此并联机构可实现更大的承载能力。通常, 并联机构在精度、刚度和重载操作能力方面都有着出色的表现。它们已经大量应用于从天文到飞行模拟器等很多方面, 并逐渐扩展到机床领域。

1.2 运动副和支链

并联机构是由运动副和支链以特定形式组成的闭环系统。其中的运动副可分为简单副和组合副两大类。图 1.2 列举了一些简单副类型, 如转动副 (R), 移动副 (P), 圆柱副 (C) 和球面副 (S) 等。图 1.3a 所示的是一种典型的组合运动副——万向节 (U)。注意到, 如果将球面副 (也称球铰) 设计成 3 个转动副的交叉组合, 它就变成了一个组合运动副 (图 1.3b)。

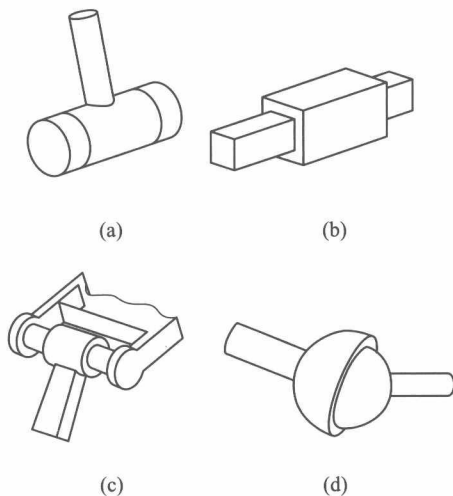


图 1.2 一些简单运动副: (a) 转动副 (R); (b) 移动副 (P); (c) 圆柱副 (C); (d) 球面副 (S)

表 1.1 列举了并联机构中最常见的运动支链, 这些支链称为简单支链。其中, 一个 6 自由度的支链意味着它的末端执行器在笛卡儿坐标系下有独立的 3 个移动自由度和 3 个转动自由度, 图 1.4 ~ 图 1.8 分别列举出了几种 2~6 自由度的简单支链。

为了提高并联机构的性能或限制某些特定的自由度, 一些以平行四边形机构为代表的简单机构也应用在运动支链上, 这样的支链称为复杂支链, 如图 1.9 所示的平面平行四边形机构、由 S 副组合而成的空间平行四边形机构、由 U 副组合而成的空间平行四边形机构等。

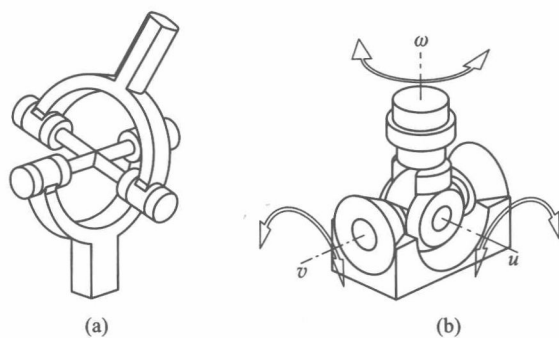


图 1.3 两种组合运动副: (a) 万向节 (U); (b) 球面副

表 1.1 并联机构中最常见的运动支链

自由度	运动副	支链举例	图示
2	R,R	RR	图 1.4a
	R,P	RP,PR	图 1.4b, 图 1.4c
	P,P	PP	
3	R,R,R	RRR	图 1.5a, 图 1.5b
	R,P,R	RPR,PRR	图 1.5c
	P,C	PC	图 1.14d
	R,C	RC,CR	
4	P,R,U	PUR,PRU,UPR,RPU	图 1.6a
	P,R,C	PRC,RPC,CPR	图 1.6b
	P,S	PS	图 1.6c
	P,R	PRRR	图 1.14c
	R,S	RS	
	R,C	CRR,RRC	图 1.6d
	R,R,S	RRS,RSR	图 1.7a
	R,P,S	RPS,PRS,SPR,PSR	图 1.7b, 图 1.7c
	P,S	PPS	图 2.49b
	P,C,U	PCU	图 2.50
5	R,U	RUU,URU,RRRU	图 1.7d
	R,C	RRCR	
	P,U	PUU,UPU	图 2.11
	R,P,U	RPUR (满足特殊条件)	图 1.32
	P,S	PSS,SPS	图 1.8a
6	P,U,S	PUS,UPS,SPU	图 1.30
	R,S	RSS,SRS	
	U,R,S	RUS,URS,SRU	图 1.8b
	P,R,S	PPRS,PPSR	图 1.8c