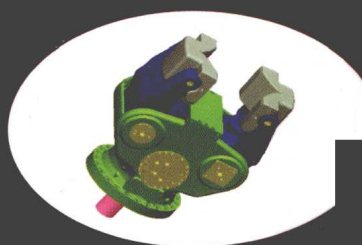
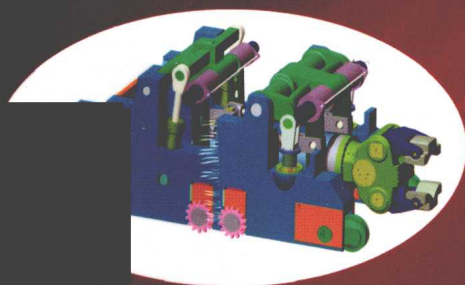


并联机器人 型综合的 G_F 集理论

高峰 杨加伦 葛巧德 著



G_F Sets



科学出版社
www.sciencep.com

并 联 机 器 人 型综合的 G_F 集理论

高 峰 杨加伦 葛巧德 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是一部介绍作者提出和建立的并联机器人型综合的 G_F 集理论的专著。主要内容包括:并联机器人末端特征的 G_F 集的定义与分类、 G_F 集合成的移动定律与转动定律和推论、并联机器人综合模型、 G_F 集的求交运算性质和法则、支链中运动副转动轴线迁移定理以及具有特定末端特征的支链设计、并联机器人末端特征的 G_F 集组合形式和并联机器人的构型、考虑输入与输出关联关系的并联微操作机器人和重载操作机的拓扑构型等。本书的特色是用机构学的基本原理和数学的集合论相结合建立了系统的并联机器人机构拓扑设计的 G_F 集理论,为机器人和机构的发明提供了理论、技术和实用的工具。

本书可供从事机械和自动化相关专业研究的大学教师、研究人员、工程技术人员、硕士和博士研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

并联机器人型综合的 G_F 集理论/高峰,杨加伦,葛巧德著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029199-8

I. ①并… II. ①高…②杨…③葛… III. ①机器人技术—研究
IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 198560 号

责任编辑:刘宝莉 陈 捷 / 责任校对:李 影
责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)
2011 年 1 月第一次印刷 印张: 13 1/4
印数: 1—2 500 字数: 303 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

机械加强和延伸了人类自身肢体的功能,提高了人类适应大自然的能力,推动了人类社会的进步和文明的进程。机构是机械的骨架与执行器,是产品设计的核心和发明创造的源泉。机构的新颖性决定了产品的创新性。现代机构学研究的目的是揭示机器性能与机构拓扑的映射规律,实现构型综合;建立表达机器运动与动力学性能的全域定量指标,实现性能评价;在有限域中揭示各种性能与尺度间映射规律,实现尺度综合,从而为现代机械的设计奠定理论和技术基础。由于并联机器人机构是“知识密集型”机构,其拓扑设计是机械产品设计中最具挑战性和体现原创特质和发明性的核心内容,所以,研究并联机器人机构型综合理论对提高机械产品的设计、创新和竞争力有着十分重要的意义。

科学和艺术的共同基础是人类的创造力。毕加索说,“我生是为了与他人不同”;中国清代艺术家石涛说,“古人之须眉不能生我之容貌”。科学研究成果的价值体现在它的特色和新颖性。并联机器人构型的主要挑战是要提出与坐标系无关、无量纲、有顺序和非代数性的评价指标;建立运算的基本定律、拓扑设计运算性质和法则、数综合方法、支链中运动副布置顺序原理、考虑输入与输出关联关系的拓扑设计方法等。本书介绍了我们十年来提出和建立的并联机器人机构拓扑设计的 G_F 集理论体系,主要内容包括:并联机器人末端特征的 G_F 集定义和表达式, G_F 集的分类; G_F 集合成的移动定律和转动定律,一维转动、二维转动和三维转动的推论;并联机器人末端特征维数、支链数、主动支链数、主动支链上的驱动器数和被动支链数的关系模型以及数综合; G_F 集求交运算性质和法则;支链中运动副转动轴线迁移定理以及具有特定末端特征的支链设计;并联机器人末端特征的 G_F 集组合形式和相应的组合条件;纯移动、一维转动、二维转动和三维转动的并联机器人的构型;考虑输入与输出关联关系的并联微操作机器人和重载操作机的拓扑构型等。

本书所涉及的研究成果是在国家自然科学基金(No. 50125526、No. 50728503、No. 50835003、No. 50821003、No. 30770538)、国家“973”计划(No. 2006CB705400)、国家重大科技专项(2009ZX04013-021、2009ZX04002-061、2010ZX04004-112)、国家“863”计划(2009AA044102、2009AA044101、2008AA042602)等项目支持下完成的,在此对给予项目的相关单位表示感谢。同时,也感谢岳义博士、葛浩博士、史巧硕博士及宫金良博士对本书的成果做出的贡献。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

高 峰

于上海交通大学 机械与动力工程学院

2010 年 9 月

符号与标记

G_F 集	generalized function set
$T_i (i=a,b,c)$	移动特征
$R_j (j=\alpha,\beta,\gamma)$	转动特征
O_i	第 i 个转动中心
$A // B$	A 平行于 B , A 、 B 代表直线或者平面
$A \nparallel B$	A 不平行于 B
$A \perp B$	A 垂直于 B
$A \not\perp B$	A 不垂直于 B
$\square AB$	包含 AB 的平面
$A - O_i$	A 通过转动中心 O_i
$A \otimes O_i$	A 不通过转动中心 O_i
$A = B$	A 与 B 重合
$A \neq B$	A 与 B 不重合
R	转动副
P	移动副
U	万向铰
S	球副
U^*	纯平动万向铰
$U^\wedge$	转-平动万向铰
$^\wedge U$	转-平动万向铰
U^p	平面移动万向铰
$^p U$	平面移动万向铰
P_a	平行四边形铰链

2-UU	平行四边形万向铰
$A_{//}B_{//}$	轴线 A 平行于轴线 B
$(AB)_O$	轴线 A 与轴线 B 交于点 O
$\cap$	G_F 集求交运算符

目 录

前言

符号与标记

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 机构拓扑学研究的意义	1
1.3 并联机构的应用	2
1.4 机构自由度计算公式	5
1.5 机构型综合的群论方法	6
1.6 机构型综合的图论方法	6
1.7 机构型综合的螺旋理论	6
1.8 机构型综合的线性变换方法	7
1.9 机构型综合的单开链方法	7
1.10 本书内容	8
第二章 机器人末端特征 G_F 集及其特性	9
2.1 概述	9
2.2 G_F 集的定义	9
2.3 G_F 集的分类	10
2.4 G_F 集的合成定律	12
2.4.1 移动特征合成定律	12
2.4.2 转动特征合成定律	12
2.5 并联机构拓扑的构成条件	15
第三章 G_F 集的求交运算法则	17
3.1 概述	17
3.2 G_F 集求交运算的性质	17
3.3 G_F 集的求交运算定理	18
3.3.1 第一类与第一类纯移动 G_F 集求交定理	18
3.3.2 两个具有一维转动特征的第一类 G_F 集求交定理	19
3.3.3 两个具有二维转动特征的第一类 G_F 集求交定理	20
3.3.4 两个具有三维转动特征的第一类 G_F 集求交定理	21
3.3.5 两个具有一维转动特征的第一类与第二类 G_F 集求交定理	22

3.3.6	两个具有二维转动特征的第一类与第二类 G_F 集求交定理	23
3.3.7	两个具有三维转动特征的第一类与第二类 G_F 集求交定理	24
3.3.8	第二类一维纯转动与三维纯转动 G_F 集求交定理	25
3.3.9	第二类二维纯转动与三维纯转动 G_F 集求交定理	26
3.3.10	两个具有三维纯转动特征的第二类 G_F 集求交定理	26
3.4	纯移动 G_F 集求交运算法则	27
3.5	一维转动 G_F 集求交运算法则	29
3.6	二维转动 G_F 集求交运算法则	35
3.7	三维转动 G_F 集求交运算法则	39
第四章	给定末端特征的机器人支链设计	43
4.1	概述	43
4.2	简单与复合运动副	43
4.3	支链中转动轴线迁移定理	46
4.4	具有纯移动末端特征的支链	47
4.4.1	$G_F^I(T_a \ T_b \ 0; \ 0 \ 0 \ 0)$ 类支链设计	47
4.4.2	$G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; \ 0 \ 0 \ 0)$ 类支链设计	48
4.5	具有一维转动末端特征的机器人支链	50
4.5.1	$G_F^I(T_a \ 0 \ 0; \ R_a \ 0 \ 0)$ 类支链设计	50
4.5.2	$G_F^I(T_a \ T_b \ 0; \ R_a \ 0 \ 0)$ 类支链设计	51
4.5.3	$G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; \ R_a \ 0 \ 0)$ 类支链设计	53
4.5.4	$G_F^II(R_a \ 0 \ 0; \ T_a \ 0 \ 0)$ 类支链设计	55
4.5.5	$G_F^II(R_a \ 0 \ 0; \ T_a \ T_b \ 0)$ 类支链设计	56
4.6	具有二维转动末端特征的机器人支链	56
4.6.1	$G_F^I(T_a \ 0 \ 0; \ R_a \ R_\beta \ 0)$ 类支链设计	57
4.6.2	$G_F^I(T_a \ T_b \ 0; \ R_a \ R_\beta \ 0)$ 类支链设计	57
4.6.3	$G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; \ R_a \ R_\beta \ 0)$ 类支链设计	59
4.6.4	$G_F^II(R_a \ R_\beta \ 0; \ 0 \ 0 \ 0)$ 类支链设计	64
4.6.5	$G_F^II(R_a \ R_\beta \ 0; \ T_a \ 0 \ 0)$ 类支链设计	64
4.6.6	$G_F^II(R_a \ R_\beta \ 0; \ T_a \ T_b \ 0)$ 类支链设计	65
4.7	具有三维转动末端特征的机器人支链	67
4.7.1	$G_F^I(T_a \ 0 \ 0; \ R_a \ R_\beta \ R_\gamma)$ 类支链设计	67
4.7.2	$G_F^I(T_a \ T_b \ 0; \ R_a \ R_\beta \ R_\gamma)$ 类支链设计	68
4.7.3	$G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; \ R_a \ R_\beta \ R_\gamma)$ 类支链设计	70
4.7.4	$G_F^II(R_a \ R_\beta \ R_\gamma; \ 0 \ 0 \ 0)$ 类支链设计	71
4.7.5	$G_F^II(R_a \ R_\beta \ R_\gamma; \ T_a \ 0 \ 0)$ 类支链设计	71

4.7.6 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma; \ T_a \ T_b \ 0)$ 类支链设计	72
第五章 移动并联机器人型综合	74
5.1 概述	74
5.2 二维移动并联机器人型综合	74
5.3 三维移动并联机器人末端特征的组合形式	78
5.4 三维移动并联机器人机构类型	80
第六章 具有一维转动特征的并联机器人型综合	84
6.1 概述	84
6.2 $G_F^{\text{I}}(T_a \ 0 \ 0; \ R_\alpha \ 0 \ 0)$ 型并联机器人型综合	84
6.3 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ 0; \ R_\alpha \ 0 \ 0)$ 型并联机器人型综合	87
6.3.1 末端特征 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ 0; \ R_\alpha \ 0 \ 0)$ 的组合形式	87
6.3.2 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ 0; \ R_\alpha \ 0 \ 0)$ 型并联机器人机构类型	89
6.4 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ T_c; \ R_\alpha \ 0 \ 0)$ 型并联机器人型综合	95
6.4.1 末端特征 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ T_c; \ R_\alpha \ 0 \ 0)$ 的组合形式	95
6.4.2 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ T_c; \ R_\alpha \ 0 \ 0)$ 型并联机器人机构类型	96
6.5 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ 0 \ 0; \ T_a \ 0 \ 0)$ 型并联机器人型综合	100
6.6 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ 0 \ 0; \ T_a \ T_b \ 0)$ 型并联机器人型综合	102
6.6.1 末端特征 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ 0 \ 0; \ T_a \ T_b \ 0)$ 的组合形式	102
6.6.2 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ 0 \ 0; \ T_a \ T_b \ 0)$ 型并联机器人机构类型	103
第七章 具有二维转动特征的并联机器人型综合	106
7.1 概述	106
7.2 $G_F^{\text{I}}(T_a \ 0 \ 0; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 型并联机器人型综合	106
7.2.1 末端特征 $G_F^{\text{I}}(T_a \ 0 \ 0; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 的组合形式	106
7.2.2 $G_F^{\text{I}}(T_a \ 0 \ 0; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 型并联机器人机构类型	107
7.3 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ 0; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 型并联机器人型综合	110
7.3.1 末端特征 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ 0; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 的组合形式	110
7.3.2 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ 0; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 型并联机器人机构类型	112
7.4 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ T_c; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 型并联机器人型综合	116
7.4.1 末端特征 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ T_c; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 的组合形式	116
7.4.2 $G_F^{\text{I}}(T_a \ T_b \ T_c; \ R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 型并联机器人机构类型	116
7.5 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ R_\beta \ 0; \ 0 \ 0 \ 0)$ 型并联机器人型综合	119
7.6 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ R_\beta \ 0; \ T_a \ 0 \ 0)$ 型并联机器人型综合	122
7.6.1 末端特征 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ R_\beta \ 0; \ T_a \ 0 \ 0)$ 的组合形式	122
7.6.2 $G_F^{\text{II}}(R_\alpha \ R_\beta \ 0; \ T_a \ 0 \ 0)$ 型并联机器人机构类型	123

7.7	$G_F^{\parallel}(R_a R_b 0; T_a T_b 0)$ 型并联机器人型综合	126
7.7.1	末端特征 $G_F^{\parallel}(R_a R_b 0; T_a T_b 0)$ 的组合形式	126
7.7.2	$G_F^{\parallel}(R_a R_b 0; T_a T_b 0)$ 型并联机器人机构类型	127
第八章	具有三维转动特征的并联机器人型综合	130
8.1	概述	130
8.2	$G_F^{\perp}(T_a 0 0; R_a R_b R_\gamma)$ 型并联机器人型综合	130
8.2.1	末端特征 $G_F^{\perp}(T_a 0 0; R_a R_b R_\gamma)$ 的组合形式	130
8.2.2	$G_F^{\perp}(T_a 0 0; R_a R_b R_\gamma)$ 型并联机器人机构类型	131
8.3	$G_F^{\perp}(T_a T_b 0; R_a R_b R_\gamma)$ 型并联机器人型综合	135
8.3.1	末端特征 $G_F^{\perp}(T_a T_b 0; R_a R_b R_\gamma)$ 的组合形式	135
8.3.2	$G_F^{\perp}(T_a T_b 0; R_a R_b R_\gamma)$ 型并联机器人机构类型	136
8.4	$G_F^{\perp}(T_a T_b T_c; R_a R_b R_\gamma)$ 型并联机器人型综合	139
8.5	$G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; 0 0 0)$ 型并联机器人型综合	140
8.5.1	末端特征 $G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; 0 0 0)$ 的组合形式	140
8.5.2	$G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; 0 0 0)$ 型并联机器人机构类型	143
8.6	$G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; T_a 0 0)$ 型并联机器人型综合	146
8.6.1	末端特征 $G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; T_a 0 0)$ 的组合形式	146
8.6.2	$G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; T_a 0 0)$ 型并联机器人机构类型	147
8.7	$G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; T_a T_b 0)$ 型并联机器人型综合	150
8.7.1	末端特征 $G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; T_a T_b 0)$ 的组合形式	150
8.7.2	$G_F^{\parallel}(R_a R_b R_\gamma; T_a T_b 0)$ 型并联机器人机构类型	151
第九章	二至六自由度并联微操作机器人构型	155
9.1	概述	155
9.2	并联微操作机器人支链类型	155
9.3	并联微操作机器人输入与输出关联关系	159
9.4	六自由度并联微操作机器人构型	161
9.4.1	1-2-3型6-DOF并联微操作机构	161
9.4.2	2-2-2型6-DOF并联微操作机构	162
9.5	五自由度并联微操作机器人构型	163
9.5.1	2-2-1型5-DOF($xyz\beta\gamma$)并联微操作机构	163
9.5.2	1-1-3型5-DOF($xyz\beta\gamma$)并联微操作机构	165
9.5.3	1-2-2型5-DOF($yz\alpha\beta\gamma$)并联微操作机构	165
9.6	四自由度并联微操作机器人构型	167
9.6.1	1-1-2型4-DOF($xyza$)并联微操作机构	167
9.6.2	0-1-3型4-DOF($yz\alpha\beta$)并联微操作机构	168

9.6.3	1-1-2 型 4-DOF($yza\beta$)并联微操作机构	168
9.6.4	1-1-2 型 4-DOF($za\beta\gamma$)并联微操作机构	169
9.7	三自由度并联微操作机器人构型	170
9.7.1	1-1-1 型 3-DOF(xyz)并联微操作机构	170
9.7.2	1-2-0 型 3-DOF($xy\gamma$)并联微操作机构	171
9.7.3	0-0-3 型 3-DOF($za\beta$)并联微操作机构	172
9.7.4	0-1-2 型 3-DOF($za\beta$)并联微操作机构	172
9.8	二自由度并联微操作机器人构型	173
9.8.1	1-1-0 型 2-DOF(xy)并联微操作机构	173
9.8.2	0-0-2 型 2-DOF(za)并联微操作机构	174
9.9	三种并联微操作机器人	175
第十章	重载操作机的构型	176
10.1	概述	176
10.2	锻造操作机输入和输出关联特性与分解	176
10.3	Ⅵ型操作机主运动机构的构型	178
10.4	Ⅴ型操作机主运动机构的构型	179
10.5	Ⅳ型操作机主运动机构的构型	181
10.6	Ⅲ型操作机主运动机构的构型	183
10.7	锻造操作机构型的应用	184
参考文献		192

第一章 绪 论

1.1 概 述

人类赖以生存的大千世界如此多姿多彩,不仅是因为大自然创造了千姿百态的生灵,而且是由于这些生灵中最具有智慧的人类创造了如此多的机械。地球上存在着两种“机械”,即“自然机械”和“人造机械”。“自然机械”是经过大自然亿万年进化而创造出的动物生灵。“人造机械”是人类创造和发明的各种机械。那么,这两种“机械”是以什么原理构造而成的?它们有什么样的功能和特性?人们应如何根据性能来设计和创造各种机械?这些都是机构学领域长期研究的基本科学问题。现代机构和机器人学研究的长期任务是:揭示并联机器人末端特征与机构拓扑的映射规律,实现构型综合;建立表达并联机器人运动与动力学性能的全域定量指标,实现性能评价;在有限域中揭示各种性能与尺度间映射规律,实现尺度综合。

由于机构是现代机械装备的骨架与执行器,机构创新决定了产品的创新性,现代机构正向高速度、高加速度、高精度、高刚度、高承载和极端服役等方向发展,故应用现代数学、力学、信息与控制等理论,系统研究机构拓扑和尺度设计的新理论和新方法是开发具有我国自主知识产权和优良性能的现代机械装备的重要基础。

1978年,澳大利亚 Hunt 教授将 Stewart 平台定义为并联机器人。由于并联机构的分析和综合复杂且困难,是“知识密集型机构”,所以,近 30 年来并联机器人机构学成为国际机构和机器人领域的研究热点。并联机器人具有刚度大、承载能力高、结构紧凑以及惯量小等特性^[1~4],广泛适用于多维重载操作、微纳精细操作和动态模拟等方面,如空间对接模拟、飞行训练器、振动与地震仿真、矿山开采装备、隧道挖掘盾构、锻造操作装备及微创手术装置等都采用了并联机构技术。但并联机构设计的挑战包括不能用一般代数描述机构拓扑特征、性能评价需要全域定量、尺度综合呈现多目标与非线性,因此,长期以来并联机构设计理论是国际机器人领域的研究前沿。

1.2 机构拓扑学研究的意义

在人类文明和社会发展的过程中,制造业始终是创造社会财富的主要来源,也

是体现综合国力的重要衡量指标。当今世界经济全球化,各国的综合国力和竞争能力体现于机械产品的设计能力。因为制造业的灵魂是设计,而制造和被制造机械的灵魂是机构,所以现代机构学的理论研究是制造业的基础,是现代机械产品发明创造的源泉,是提高国家制造业水平和国际竞争能力的关键。

机械伴随着甚至是推动了人类社会的进步和文明的发展,加强了人类自身四肢的功能,提高了人类改造大自然的能力。现代机械是由机构、驱动、控制、传感与信息处理五个子系统构成的机电一体化系统,而机构系统是现代机械的骨架与执行器。机构的创新设计决定了产品的创新性,如果机构拓扑设计有缺陷,则制造出的将会是“有先天不足的产品”或“有残疾的机械产品”。由于机构拓扑创新具有原创的特征性质,是机械发明中最具有挑战性和发明性的核心内容,所以,现代机构拓扑设计理论的研究对提高我国机械产品的自主设计、创新和国际竞争能力都有着十分重要的意义。

1.3 并联机构的应用

并联机构具有高刚度、高承载能力和高速度等特点,在许多领域得到广泛和重要应用。1931年, Gwinnett 获得了并联机构式的娱乐设备的专利授权^[5],此专利是国际上有记载的第一个关于并联机构的发明专利。1934年, Pollard 申请并于1940年获得了用于汽车喷漆装置的并联机构专利^[6]。之后于1942年, Pollard 又获得了用于汽车喷漆的3腿五自由度并联机器人专利^[7]。1954年, Gough 设计制作了一台用于检测轮胎的并联装置,至今收藏于英国国家工业和科技博物馆。Cappel 在1964年申请并于1967年获得了第一个并联运动模拟器的专利^[8]。

Stewart 在论文“A Platform with Six Degrees of Freedom”^[9]中首次描述了具有六自由度的并联机构。这篇论文对后来的并联机器人的研究产生了重大影响,至今 Stewart 机构仍是国际上机器人领域研究论文中出现最多的词。国际上将并联机构称为 Stewart 平台^[10~14]。自1978年 Hunt^[15]明确将六自由度并联机构作为机器人机构以来,并联机器人已经成为国际上机器人领域的研究热点。Hunt 应用空间机构自由度计算公式和螺旋理论,对这种并联形式的机器人进行了机构综合研究,给出了多种二至六自由度的并联机构的基本形式。

并联机构已经在多种重型制造装备(如并联机床)、重载操作装备(如锻造操作机)、大型工程机械(如巨型电铲)、大型动态仿真系统(如飞机模拟器)、重载振动模拟装置(如地震模拟器)、微纳操作装备、重载或高速机器人以及人机交互感知装置等领域广泛应用。

1. 动态模拟

动态模拟器是并联机构应用最早的装备之一,但现在仍然具有广阔的市场,主

要包括娱乐、飞行训练、地震和振动模拟、空间对接过程模拟等装置的动态模拟器。模拟器可以让驾驶员不需要使用真实的机械装备就可感受真实的驾驶环境,极大地降低了培训成本、提高了培训效率。

目前,至少有 60 余家公司^[16]生产和销售并联机构动态模拟器,如 Frasca 公司生产的 S-92 型飞行模拟器^[17]、Toyota 公司推出的汽车驾驶模拟器^[18]、MTS 公司生产的地震模拟器^[19]以及上海交通大学研制的伺服电机驱动的六轴冗余输入地震模拟器^[20~23]。1971 年,美国 MTS 系统公司为加州大学伯克利分校提供了当时美国最大的、台面为 $6.1\text{m} \times 6.1\text{m}$ 的水平向和垂直向同时运动的双向地震模拟台,之后该公司又为世界各地提供了大量的地震模拟装置。

并联机构广泛应用于高速列车、船舰、坦克和汽车的动态性能试验、驾驶员培训以及公众娱乐设施中。德国研制的高速列车模拟驾驶舱不仅用于驾驶员的培训,而且已经作为旅游项目对公众开放。美国赛车模拟公司开发的赛车模拟系统,已在德国和美国投入商业运行,用于培训赛车运动员和作为公众娱乐设施。由于并联机构具有高动态性能,借助一些其他装置,可以给人一些身临其境的真实感,所以,随着并联机器人技术的发展,还会开发出更多的运动模拟器。

2. 医疗器械

在医疗领域,由于要求定位精度高,避免人工可能出现的颤抖,并联机器人用于显微外科手术,例如,哥伦比亚大学研制的 RSPR 型并联机器人^[24],用于操纵手术器械;Maurin 等^[25, 26]研制的五自由度具有半球形工作空间的医疗机器人,可安装于患者身体上,在 CT 扫描仪的配合下进行微创手术;U. R. S. 公司用并联机构开发了“Evolution 1”型手术机器人^[27];洪堡大学手术机器人实验室用 Delta 型并联机构开发出手术机器人^[28]。

3. 工业机器人

在 20 世纪 80 年代,瑞士洛桑工学院(EPFL)的 Clavel 首次提出 Delta 并联机构,随后,该机构被 ABB 公司开发为工业机器人,并广泛用于化妆品、食品和药品的生产与包装,取得了明显的经济效益。目前,多种并联机器人已经从学术界走向了工业生产的第一线,包括 PKM Tricept SL 公司的 Tricept 机器人^[29]、Adept 公司的 Quattro 机器人^[30]、ABB 公司的 IRB 360 机器人^[31]、Fanuc 公司的 F-200iB 机器人^[32]等。这些成功应用于工业的机器人充分发挥了并联机构的承载大、运动部分质量轻、动态性能好和精度高等特性。此外,在国内,天津大学研制了用于电池装配线的高速并联机器人。

4. 微纳操作

并联机器人的动平台由多个支链支撑,无累积误差,精度高,因而适合用于微

纳操作装备。Hesselbach 等^[33]研制了六自由度微操作并联机器人,用于微尺度装配。Bacher 等^[34]利用柔性铰链设计制作了三维移动并联机器人。国内的哈尔滨工业大学^[35, 36]、北京航空航天大学^[37, 38]和上海交通大学等也开展了微操作机器人^[39, 40]的研究,其中,上海交通大学研发了用于染色体切割的六维微操作机器人样机。

5. 力与力矩传感器

并联机构可用于设计六维力与力矩传感器^[41],如 Sorli 和 Pastorelli^[42]将 Stewart 结构六维力传感器用于机器人去毛刺和装配手的力与力矩测量;Dwarkanath 等^[43]设计出环形灵敏元件的 Stewart 结构六维力传感器;Kang^[44]研究了 Stewart 结构六维力传感器正运动学求解方法,并研制出传感器样机。国内北京大学^[45]和华中科技大学^[46]分别研究了基于 Stewart 平台结构六维力与力矩传感器的设计与优化。燕山大学和上海交通大学^[47~51]提出用弹性铰链代替球副设计出力敏元件非组装结构六维力与力矩传感器,缩小了传感器结构的尺寸,提高了传感器的灵敏度和精度,拓展了并联六维力与力矩传感器的应用范围。

6. 空间探测

对于空间探测领域,机器人仅需到达某些特定的位置,机器人的轨迹并不重要,由双稳态驱动器驱动的多自由度并联机器人^[52, 53]非常适合工作于这种场合。1993 年 Chirikjian 等提出了双稳态机器人概念,并进行了大量的深入研究^[54],如工作空间、位置反解和构型综合等。利用双稳态机器人可设计空间探测臂和空间探测机器人的腿的结构。航天技术的发展对空间技术的要求越来越高。空间对接是现代复杂航天器、载人空间站长期在轨运行期间不可或缺的操作活动,是完成空间组装、人员更换、补给、维修和回收等作业的先决条件。美国与苏联把并联机构已用于空间对接装置^[55]。

7. 并联机床

机床是机械制造业的基础,要提高制造业的水平,必须先提高机床的制造水平,也就是所谓的“工欲善其事,必先利其器”。20 世纪末,国际上出现并联运动机床^[56]。在美国 Giddings & Lewis 公司推出 Variax 型并联机床后,美国 Ingersoll 公司也推出了采用并联机构的 VOH1000 型立式加工中心和 HOH600 型卧式加工中心。并联机床制造、加工、控制、标定等技术的快速发展,促进了并联机构学的发展和进步。国内外许多企业和科研单位研发了大量的并联机床样机,且部分已实现商品化和应用于工业加工中的诸多方面^[57~60]。

Giddings & Lewis 公司和 Ingersoll 公司的创新探索,促使许多国家和研究机

构开展并联运动机床的研究。并联运动机床在运动学原理、机床设计方法、制造工艺、控制技术、动态性能研究和工业应用方面都先后取得了重大的突破。世界著名机床公司先后推出新产品,这使得并联机床进入了应用阶段。

美国 Hexel 公司推出的 P2000 型 5 坐标数控铣床由并联机构的工作台和传统立式铣床组成。德国 Index 机床公司于 2000 年用三自由度并联机构做成一个车削中心,除完成车削外,还可以进行铣削、激光硬化、激光焊接和磨削等工序。德国 DS Technologie 机床公司于 1999 年推出 Sprint 型卧式加工中心,用于加工飞机机身的结构件。德国 Reichenbacher 公司研制了 Pegasus 型木材加工中心。

1997 年,清华大学和天津大学合作研制出国内第一台并联机床样机 VAM-TY1,随后,很多单位都开始了并联机床的研制,如 1998 年东北大学研制了五轴联动三杆并联机床 DSX5-70;1999 年天津大学和天津第一机床总厂合作研制了三坐标并联机床样机 LINAPOD,此后又研制了立式 Delta 结构和卧式结构样机;1998 年哈尔滨工业大学研制了一台并联机床原型样机,此后与哈尔滨量具厂合作,对原型样机进行改进,并用于汽轮机叶片和模具的加工。中国科学院沈阳自动化研究所、北京航空航天大学、北京理工大学、中国人民解放军国防科学技术大学、燕山大学和上海交通大学等都先后开展了并联机床样机研究。

此外,并联机构还应用于绳索机器人、人机交互装置、仿生机器人的关节^[61~65]、重载操作^[66]、矿山开采、伺服锻造压机和电子封装等装备中。

1.4 机构自由度计算公式

自由度计算是机构拓扑学的基础。一百多年来,国际上有许多关于机构自由度计算的研究成果。Tsai 提出了基于 Grübler-Kutzbach 自由度计算公式的并联机器人型综合方法^[67, 68]。Grübler-Kutzbach 自由度公式为

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

式中: λ 为机构在空间运动的独立参数(空间机构 λ 取 6;平面或球面机构 λ 取 3); n 为包含机架的机构杆件数; j 为机构中的运动副数; f_i 为第 i 个运动副的自由度数; F 为机构的自由度数。

在利用机构自由度公式综合机构时,要考虑并联机构的独立环路数、机构杆件数、机构中的运动副数以及各环路的公共约束的关系,确定各支链的自由度数等。Merlet^[69]指出,该方法非常简单,但是由于没有考虑运动副的几何布置,可能会综合出无效的结构,存在一定的局限性。

Alizade 等^[70, 71]提出了分别适合串联机构、不含闭环支链的并联机构、具有闭环支链的并联机构以及串并混连机构的自由度公式,并用该公式进行了机器人机