

Dynamics of Lower-Mobility Parallel Manipulators

少自由度并联机器人机构动力学

刘善增 著



科学出版社

少自由度并联机器人机构动力学

Dynamics of Lower-Mobility Parallel Manipulators

刘善增 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

21世纪以来,少自由度并联机器人机构学成为国际机构学界研究的热点,受到了各行各业的广泛关注。少自由度并联机器人与6自由度并联机器人相比,具有机械结构简单、制造成本低和容易控制等优点,在工业、生活中具有广泛的应用前景。少自由度并联机器人的动力学研究是其高精度控制和应用的前提与基础。本书的主要内容包括:机构学的基础知识,少自由度并联机器人机构运动学和动力学,柔性并联机器人机构的动力学建模与分析等8章内容。同时,为了方便读者阅读和进行机器人机构学的相关研究,本书还特别在附录中编入了与机器人机构学有关的数学基础知识、物体转动惯量以及微分方程求解等内容。

本书可以作为机械工程、自动化、机器人技术和智能控制等行业从事机构学或机器人研究和应用开发的科研工作者、工程技术人员和高等院校师生的学习、科研参考书。

图书在版编目(CIP)数据

少自由度并联机器人机构动力学/刘善增著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046390-6

I. ①少… II. ①刘… III. ①机器人—结构动力分析 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第274916号

责任编辑:李涪汁 孙 静/责任校对:张怡君

责任印制:徐晓晨/封面设计:许 瑞

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年11月第一次印刷 印张:20 7/8

字数:450 000

定价:129.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

20 世纪 50 年代以来,人们发射卫星,建立空间站,观测月球、火星乃至河外星系,积极探索遥远星体上的生命迹象,以及搜寻人类未来可能生存的环境。同时,人们也在加速对自身以及其他生物体的探究,比如克隆技术、人造器官、基因工程、神经网络、模式识别、仿生机器人等,正极力扩展对生物智能和进化遗传的认知与应用。机器人则是人类设计出来的与人类自身功能相似的一种智能机械装置,在现代工业生产、生活中,机器人已经逐渐成为人类不可或缺的重要助手。据预测,2050 年前后人类将进入机器人时代。

我国早在公元前几百年就有了机器人的传说。例如,公元前九百多年的西周时期,巧匠偃师就做了一个能歌善舞、“千变万化,惟意所适”的(木偶)机器人;春秋晚期的木匠鲁班曾惹母亲生气,为了哄母亲开心,他用木材制造了一只飞的大鸟,《墨子》里称其“成而飞之,三日不下”;东汉时期的张衡发明的指南车,可视为世界上最早的机器人雏形;三国时期的诸葛亮制作的用来运输军事粮草的“木牛流马”,可以说就是一种栩栩如生的仿生移动机器人。1738 年,法国人杰克·戴·瓦克逊发明了会嘎嘎叫、游泳、进食、排泄的机器鸭;1768~1772 年,瑞士钟表匠德罗斯(Jaquet Droz)父子制造出了写字偶人、绘图偶人和弹风琴偶人,世界哗然。1959 年第一台工业机器人(可编程、圆坐标)在美国产生,接着 Unimation 公司于 1961 年造出了第一台商用工业用机器人,标志着机器人发展进入了新纪元,从此机器人研究在世界范围内拉开了序幕,机器人的应用迅速扩展到了人类活动的各个领域。

目前,机器人学(robotics)已经成为当今世界极为活跃的研究领域之一,它涉及机构学、机械动力学、电子学、自动控制、人工智能、计算机技术等多个学科,代表了机电一体化的最高成就。机构学在广义上又称为机构与机器科学(mechanism and machine science),是机械设计及理论二级学科的重要研究分支,在机械工程一级学科中占有基础研究地位;同时,机构学又是一门古老的学科,距今已有数千年的历史,一直伴随以及推动着人类社会文明的发展。机器人机构学的研究对象主要是机器人的机械系统以及机械与其他学科的交叉点。机器人的机械系统是机器人重要的和基本的组成部分,是机器人实现各种运动、操作任务和指令等的主体,是机器人研究和应用的基础。因此,进行机器人机构学和机械动力学的研究,对机器人技术的发展具有重要意义。

20 世纪 80 年代以来,国内学者在(机器人)机构学、机械动力学方面取得了世界瞩目的丰硕成果,也出版了一些优秀的学术著作,例如《空间机构的分析与综合(上册)》(张启先编著)、《高等机构学》(白师贤编著)、《机器人学》(熊有伦、丁汉、刘恩沧编著)、《高等空间机构学》(黄真、赵永生、赵铁石著)、《柔顺机构学(中文版)》(Larry L. Howell 著,余跃庆翻译)、《并联机器人机构学理论及控制》(黄真、孔令富、方跃法著)、《机器人机构拓扑结构学》(杨廷力著)、《弹性连杆机构的分析与设计(第 2 版)》(张策、黄永强、王子良、陈树勋等著)、《机械动力学》(唐锡宽、金德闻编著),等等。本人在学习、教学、科研的过程中阅读这些书籍,受

益匪浅。

机构学和机械动力学的主要研究内容为结构学、运动学、动力学三大部分。随着现代机械向高速(以提高效率)、精密(以适应精密作业)、重载(以提高性价比)、轻型(以降低能耗)方向的发展,机构或机械动力学问题显得特别重要,已经成为直接影响机械装备性能的关键因素。机构及机器人动力学领域的重点研究方向有弹性机构动力学、柔性机器人动力学、机器人机构动平衡等。

本书就是针对机器人机构学和机械动力学展开的,更确切地说,本书阐述的是少自由度并联机器人机构的动力学问题,内容涉及刚体动力学、弹性机构动力学、柔性机器人动力学、运动规划以及机构动平衡和设计等相关知识,较为全面地涵盖了机器人机构动力学的研究内容。本书也可以说是本人近年来的一些教学、科研、实践经验的总结。出版此书的缘由在于,在本人的教学、科研、工作过程中,时常会有校内外的研究生、工程技术人员等提出或询问机器人机构动力学的问题或柔性机构的振动问题等,特别是空间柔性并联机构的动力学建模问题;目前这方面的参考书籍稀少,在一定程度上妨碍了相关人员的学习、工作或科研进度,因此,本人希望通过出版此书对其提供些许帮助。当然,对本人来说,也需要进行学习、教学、科研实践经验的总结,以便将来更好地服务于教学和科研工作。

本书的编写力求结构清晰、通俗易懂;在动力学分析过程中,采用的方法简明、易于掌握;公式推导严谨、详尽,为了便于读者理解,给出了大量算例分析。通过阅读或学习本书,读者对并联机器人机构动力学的认知能够提高,有利于深刻理解机器人机构学的动态特性。希望本书对读者的学习、工作和科研等有益。

本书第2章内容主要根据熊有伦等(1993)、于靖军等(2009)、孙桓等(2006)、杨义勇和金德闻(2009)、叶敏和肖龙翔(2001)、约翰·J.克拉格(2005)、克来格(2006)、张启先(1984)等的文献编写,第4章第4.3节的内容主要根据张策等(1997)、杜兆才(2008)、Yang和Sadler(1990)、Piras(2003)等的文献编写,附录A、B和D主要根据巴特和威尔逊(1985)、哈尔滨工业大学理论力学教研室(2006)、日本机械学会(1984)、机械工程师手册编委会(1990)等的文献编写。这些内容是特地为了方便读者阅读本书而编排的,同时,也为了方便学习或从事相关内容研究的读者查阅,以免去其查找文献资料的辛劳(这一点本人深有体会,有时为了查阅一份资料要耗费几天的时间,而有些资料根本无从查起)。

本书可作为机械工程、自动化、机器人等专业高年级本科生、研究生以及相关工程技术人员的学习、科研参考书。希望本书能为机械工程以及自动化等学科的学生、研究者以及工程技术人员的学习、科研起到抛砖引玉的微薄作用。

在此,首先对北京工业大学的余跃庆教授表示诚挚的感谢,余跃庆教授是本人攻读博士学位时的导师,对本书相关内容的研究给予了很大帮助。同时,本人也要特别感谢中国矿业大学的朱真才教授、李艾民教授和李威教授等对本人教学、科研工作的支持和帮助。

其次,感谢父母和弟弟,他们一直辛勤劳作,生活俭朴,在精神和物质上都给予了本人强大支持。

再者,特别感谢妻子刘春梅和儿子刘嘉明,尤其是妻子贤惠勤俭、任劳任怨,一直为家庭默默付出,他们是我学习、工作的动力源泉。

最后,感谢本人主持或参与的国家自然科学基金资助项目(No.50575002、No. 51475456、

No.51575511)、北京市自然科学基金资助项目 (No.3062004)、中国博士后科学基金面上项目 (No.20100481178)、国家留学基金项目、中国矿业大学青年科技基金项目 (No.2010QNA26、No.2014QNB18、No.2015XKMS022) 和北京工业大学第六届研究生科技基金重点资助项目 (ykj-2007-1069), 以及江苏高校优势学科建设工程项目、机械电子工程江苏省重点学科、江苏省矿山机电装备重点实验室 (中国矿业大学)、江苏省矿山智能采掘装备协同创新中心等的资助和支持。此外, 还向本书参考或引用过的文献的所有作者表示真诚的谢意, 尽管某些文献在本书中没有被直接引用, 但本人学习、工作过程中通过阅览这些论文或著作, 或多或少地得到了一些启发, 这些文献对本人学习、工作的顺利开展起到了很大的促进作用。

由于本人能力和经验的限制, 书中存在的缺点或错误在所难免, 敬请读者和各方面专家批评指正。

著 者

2015 年 3 月

目 录

序言

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人	1
1.2 并联机器人	1
1.3 柔性机器人	8
1.4 机构学的发展阶段与机器人机构学的研究内容	8
1.4.1 机构学的发展阶段	8
1.4.2 机器人机构学的研究内容	9
1.4.3 机器人机构动力学	9
1.5 本书主要内容	12
第 2 章 机构学的基础知识	14
2.1 机构学与机器人学的基础知识	14
2.1.1 构件及其自由度	14
2.1.2 运动副及其分类	14
2.1.3 运动链与机构	17
2.1.4 机构的活动度	20
2.1.5 机器人机构的分类	20
2.2 机械动力学的研究内容与方法	27
2.2.1 机械系统中常见的动力学问题	27
2.2.2 机械动力学分析的一般过程	28
2.2.3 机械系统中的元件组成	28
2.2.4 建立动力学模型的原理与方法	30
2.3 位姿描述与坐标变换	39
2.3.1 位姿描述	39
2.3.2 点的映射	42
2.3.3 齐次坐标与齐次变换	44
2.3.4 运动算子	46
2.3.5 变换矩阵的运算	48
2.3.6 变换方程	50
2.3.7 欧拉角与 RPY 角	52
2.3.8 旋转变换通式	57
2.4 机器人机构的构件位姿描述	62
2.4.1 构件参数和运动副变量	62

2.4.2	构件位姿描述	63
2.5	速度、加速度的变换	64
2.5.1	速度变换	64
2.5.2	机器人机构的构件速度描述	67
2.5.3	雅可比	68
2.5.4	加速度变换	71
2.5.5	机器人机构的构件加速度描述	72
2.6	机器人机构中的静力分析	72
2.6.1	构件的受力与平衡方程	73
2.6.2	等效关节力与力雅可比矩阵	74
2.7	速度与静力的笛卡儿变换	75
第 3 章	少自由度并联机器人机构的运动学和动力学	77
3.1	平面五杆机构的运动学与动力学分析	78
3.1.1	平面五杆机构的运动学分析	78
3.1.2	平面五杆机构的动力学分析	80
3.1.3	算例分析	82
3.2	3-RRR 并联机构的运动学与动力学分析	85
3.2.1	3-RRR 并联机构的运动学分析	85
3.2.2	3-RRR 并联机构的动力学分析	88
3.2.3	算例分析	91
3.3	3-RRS 并联机构的运动学与动力学分析	93
3.3.1	3-RRS 并联机构的位姿分析	93
3.3.2	3-RRS 并联机构的运动学分析	96
3.3.3	3-RRS 并联机构的动力学分析	101
3.3.4	算例分析	104
3.4	3-RRC 并联机构的运动学与动力学分析	106
3.4.1	3-RRC 并联机构的运动学分析	106
3.4.2	3-RRC 并联机构的动力学分析	110
3.4.3	算例分析	113
第 4 章	柔性并联机器人机构的动力学建模与求解	117
4.1	引言	117
4.2	柔性机器人动力学分析方法	118
4.3	3-RRR 柔性并联机器人机构的动力学建模	120
4.3.1	基于相对坐标法的支链运动微分方程	121
4.3.2	基于绝对坐标法的支链运动微分方程	127
4.3.3	运动学约束条件	134
4.3.4	动力学约束条件	138
4.3.5	系统的动力学方程	138

4.3.6	基于刚柔耦合的有限元法模型	140
4.3.7	算例分析	147
4.3.8	模型分析	151
4.4	3-RRS 柔性并联机器人机构的动力学建模	152
4.4.1	系统单元划分	152
4.4.2	柔性构件的单元模型	152
4.4.3	单元位移型函数	153
4.4.4	单元动能	155
4.4.5	单元变形能	155
4.4.6	单元动力学方程	156
4.4.7	支链动力学方程	156
4.4.8	运动学约束	161
4.4.9	动力学约束	164
4.4.10	系统动力学方程	166
4.5	方程求解	168
4.6	3-RRC 与 3-RSR 柔性并联机器人机构的建模简介	170
4.7	算例分析	173
第 5 章	柔性并联机器人机构的动力分析	177
5.1	引言	177
5.2	机构动态力分析	177
5.3	构件动应力分析	181
5.4	算例分析	183
第 6 章	柔性并联机器人机构的虚拟样机仿真	188
6.1	引言	188
6.2	SAMCEF 软件简介	188
6.3	SAMCEF 软件仿真流程	190
6.4	柔性并联机器人机构的动态仿真	191
6.4.1	3-RRR 柔性并联机器人仿真	191
6.4.2	3-RRS 柔性并联机器人仿真	193
6.4.3	3-RSR 柔性并联机器人仿真	209
6.4.4	3-RRC 柔性并联机器人仿真	217
第 7 章	柔性并联机器人机构的动态特性分析与优化设计	221
7.1	引言	221
7.2	频率特性分析	221
7.2.1	特性分析	221
7.2.2	算例分析	223
7.3	阻尼振动特性分析	226
7.3.1	特性分析	226

7.3.2 算例分析	227
7.4 构件截面参数的优化设计	228
7.4.1 截面参数优化的数学模型	229
7.4.2 算例分析	230
第 8 章 柔性并联机器人机构的运动规划与动力规划	234
8.1 引言	234
8.2 初始位形优化	235
8.2.1 插值函数分析	236
8.2.2 算例分析	239
8.3 输入运动规划	240
8.3.1 输入运动规划分析	240
8.3.2 算例分析	241
8.4 动力规划	244
8.4.1 动力规划分析	244
8.4.2 算例分析	244
主要参考文献	247
附录 A 数学基础知识	257
A.1 代数	257
A.1.1 幂与对数	257
A.1.2 排列与组合	258
A.1.3 矩阵与行列式	259
A.1.4 代数方程	263
A.1.5 常见函数的级数展开	264
A.2 三角函数与双曲函数	265
A.2.1 三角函数公式	265
A.2.2 三角函数方程的求解	265
A.2.3 平面三角形	266
A.2.4 反三角函数	266
A.2.5 双曲函数	266
A.2.6 三角函数与指数函数及双曲函数的关系	267
A.3 导数与微分	267
A.3.1 一般公式	267
A.3.2 基本公式	268
A.4 积分	269
A.4.1 不定积分	269
A.4.2 定积分	273
A.5 矢量及其运算	275
A.5.1 矢量代数	275

A.6	平面与直线	278
A.6.1	平面及其方程	278
A.6.2	直线及其方程	279
附录 B	物体的转动惯量	281
B.1	物体转动惯量的一般理论	281
B.1.1	转动惯量的定义	281
B.1.2	惯性半径	281
B.1.3	转动惯量的定理	282
B.1.4	惯量积	282
B.1.5	惯量椭圆柱体	283
B.2	面积惯性矩的一般理论	283
B.2.1	面积惯性矩的定义	283
B.2.2	面积惯性矩的定理	284
B.2.3	惯性椭圆	284
B.3	简单形状物体的转动惯量计算	285
B.4	转动惯量的测定	286
附录 C	角坐标系表示法的 24 种等价旋转矩阵	290
C.1	12 种欧拉角表示法的旋转矩阵	290
C.2	12 种绕固定轴旋转的旋转矩阵	291
附录 D	机构运动微分方程的求解	293
D.1	直接积分法	294
D.1.1	中心差分法	294
D.1.2	Houbolt 法	296
D.1.3	线性加速度法	298
D.1.4	Wilson θ 法	299
D.1.5	Newmark 法	301
D.2	实振型叠加法	303
D.2.1	振型的广义位移	303
D.2.2	忽略阻尼的分析	305
D.2.3	有阻尼的分析	306
D.3	复振型叠加法	307
D.3.1	阻尼系统特征值问题	307
D.3.2	阻尼系统振型的正交性	309
D.3.3	响应的求解	310
附录 E	平面柔性并联机器人机构动力学方程的相关矩阵	312
附录 F	空间柔性并联机器人机构动力学方程的相关矩阵	319
F.1	单元质量矩阵 M_e	319
F.2	单元刚度矩阵 K_e	320

F.3 支链 $B_iC_iP_i$ 的系统广义坐标与单元构件 B_iC_i 的系统广义坐标之间的转换关系.....	321
F.4 支链 $B_iC_iP_i$ 的系统广义坐标与单元构件 C_iP_i 的系统广义坐标之间的转换关系.....	322

第1章 绪 论

1.1 机 器 人

机器人学 (robotics) 是人类进入 20 世纪以来具有代表性的多学科交叉的边缘科学, 是正在蓬勃发展的一个重要领域。它包括机构学、机械动力学、电子学、控制工程、传感技术、计算机科学、模式识别、人工智能、仿生学等广泛的领域。其中, 机器人机构的运动学和动力学是机器人研究与开发的基础。

1961 年, 美国 Unimation 公司推出第一台实用的工业机器人 Unimate(图 1-1), 标志着第一代机器人 (操纵型机器人) 的诞生。接着, 第二代机器人 (自动型机器人) 和第三代机器人 (智能型机器人) 相继出现并投入应用。现今, 机器人已经广泛应用于汽车工业、电子工业、核工业等工业部门, 在娱乐服务、医疗卫生、采掘建筑、农林业等行业也有较为广泛的应用, 特别在海洋开发、宇宙探测等人类能力极限以外的环境中也逐渐出现了机器人的身影。所以, 对机器人的研究和应用已经成为世界各国科学研究工作者和相关行业单位的重要研究课题。机器人智能化的高低反映了一个国家科学技术的发展水平; 机器人的应用状况则是一个国家工业自动化水平的重要标志。

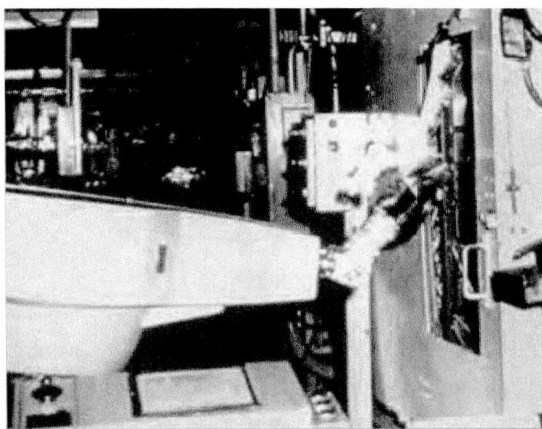


图 1-1 Unimate 工业机器人

1.2 并联机器人

根据组成机器人机械结构的连接形式, 机器人一般可以分为串联机器人 (如图 1-2, 组成机器人的机械结构以串联形式连接, 即串联机构)、并联机器人 (如图 1-3, 组成机器人的机械结构以并联形式连接, 即并联机构) 和串并混联机器人。串联机器人一般由基座、腰部 (或臂部)、大臂、小臂、腕部和手部构成, 大臂、小臂以串联方式连接。并联机器人的机械结

构为并联机构 (parallel mechanism, PM), 并联机构即运动平台与固定平台之间由两个或两个以上分支相连, 机构具有两个或两个以上的自由度, 且以驱动器分布在不同的支路上 (以并联方式驱动) 的机构。

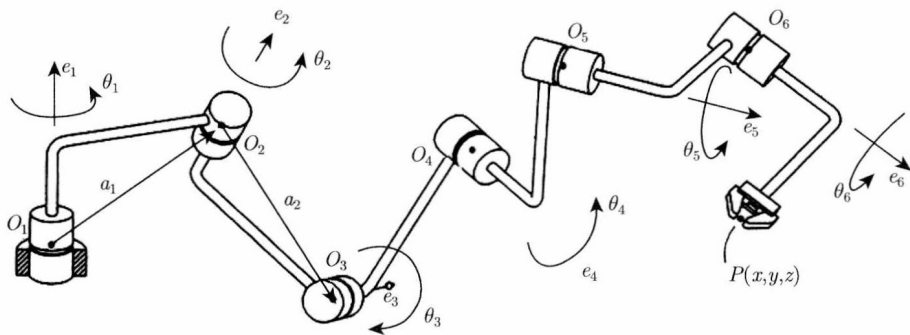


图 1-2 串联机器人

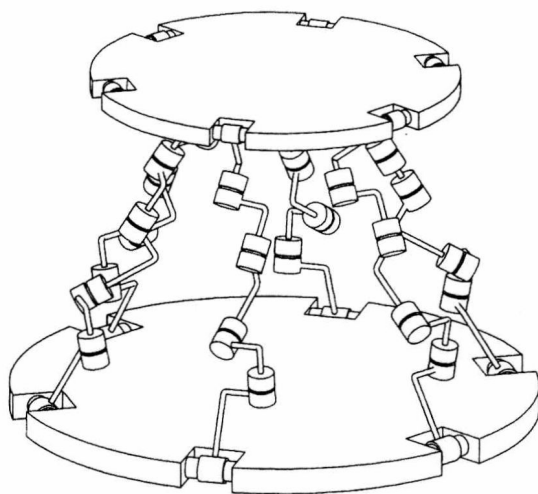


图 1-3 并联机器人

并联机构的构想最早可追溯到 1895 年, 那时, 数学家 Cauchy 就开始研究一种“用关节连接的八面体”, 这是目前知道的最早的并联机构。并联机构的研究最早可追溯到 20 世纪。1931 年, Gwinnett 在其专利中提出了一种基于球面并联机构的娱乐装置 (图 1-4)。1938 年, Pollard 提出采用并联机构 (图 1-5) 为汽车喷漆。1949 年, Gough 提出用一种并联机构的机器 (如图 1-6, 即 Stewart 平台机构) 检测轮胎, 这是真正得到运用的并联机构。1962 年, 美国高级工程师 Cappel 也独立发明了类似于 Gough 的并联机构并申请了专利 (图 1-7), 并于 1964 年将机构的专利授权给飞行模拟器制造公司 Link, 从而生产了世界上首台商用飞行模拟器 (图 1-8)。1965 年, 英国高级工程师 Stewart 提出了用于飞行模拟器的 6 自由度的并联机构——Stewart 平台 (图 1-9), 它是一个三角形的运动平台, 由 6 个液压缸驱动, 可以模拟 6 个自由度的空间运动。Stewart 设计的平台显然与我们现在所熟知的 Gough-Stewart 并联机构 (也称 Gough-Stewart 机构或 Stewart 机构) 完全不同 (图 1-10)。

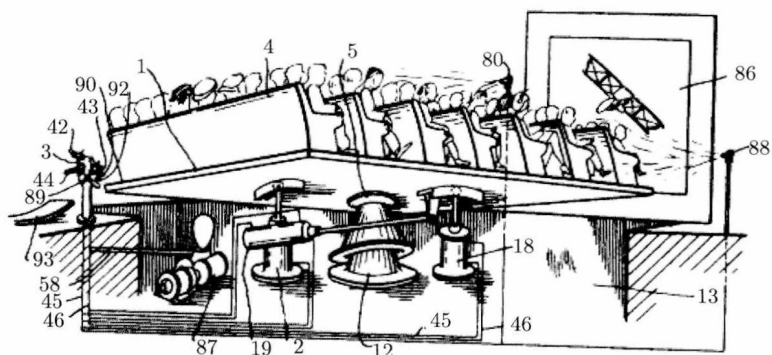


图 1-4 并联娱乐装置

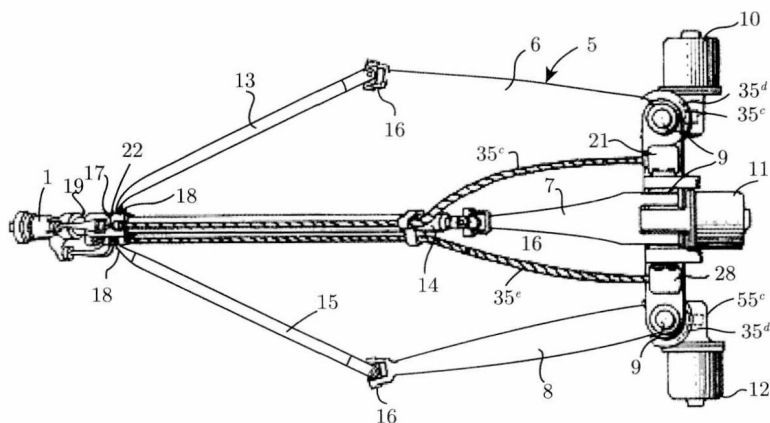


图 1-5 Pollard 提出的并联机构

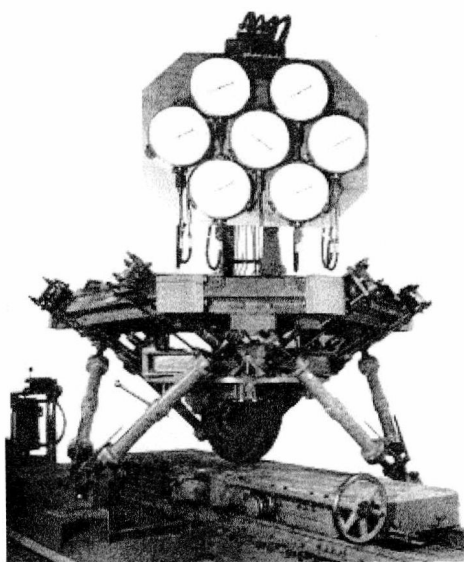


图 1-6 Gough 提出的并联机构

从结构上看, Stewart 机构的动平台通过六个相同的独立分支与定平台相连接, 每个分支中含有一个连接动平台的球铰、一个移动副和一个连接定平台的球铰, 为避免绕两个球铰中心连线的自转运动, 通常也用一个万向铰来代替其中一个球铰。自 1978 年澳大利亚著名机构学教授 Hunt 提出把 6 自由度的 Stewart 平台机构作为机器人机构以来, 并联机器人技术得到了广泛推广。

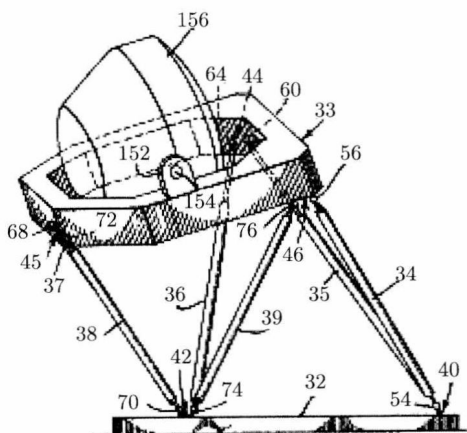


图 1-7 Cappel 提出的并联机构

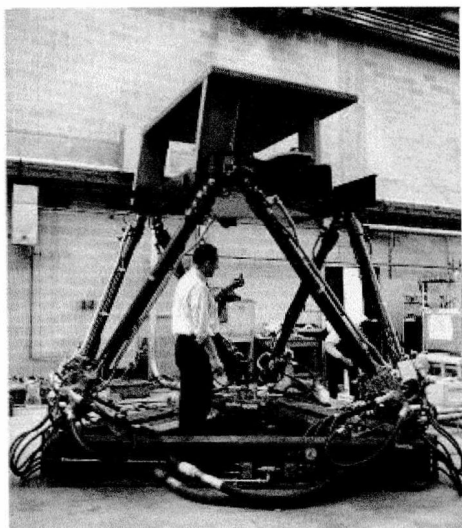


图 1-8 首台商用飞行模拟器

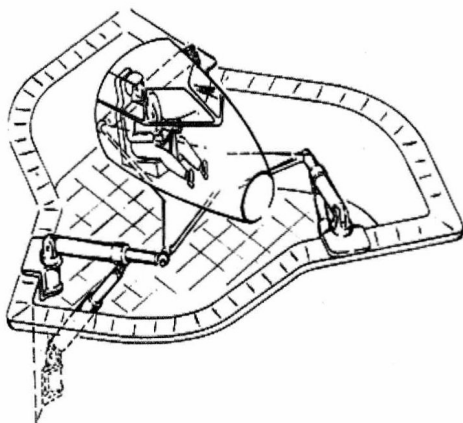


图 1-9 Stewart 提出的并联机构

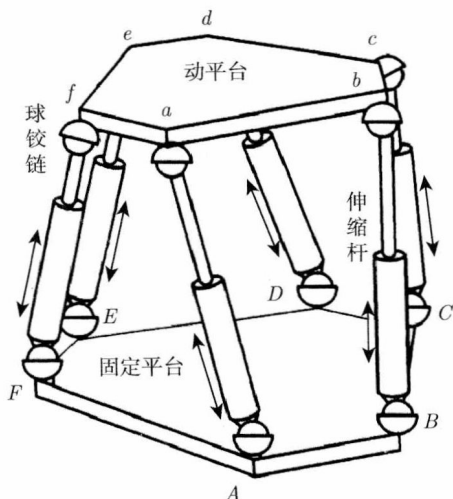


图 1-10 Gough-Stewart 并联机构

并联机器人特殊的结构形式, 使得并联机器人相比于串联机器人具有四个主要优点。第一, 由于并联机器人的累计误差少, 其运动精度较高; 第二, 由于并联机器人的驱动器固定在机座上或靠近机座, 其运动惯量小; 第三, 由于并联机器人系统的构件以并联方式运动,

其结构刚度更大，并且系统中不存在悬臂梁式负载；第四，并联机器人的运动学反解较简单，这对计算机实时控制有利。因此，并联机器人在需要高刚度、高精度和高运行速度以及良好的动态特性而无须较大工作空间和高可操作性的场合（如航空航天、制造装备以及医疗等领域）具有广泛的应用前景，例如 Delta 并联机器人（图 1-11）就是较为典型的并联机器人之一。迄今为止，并联机构的应用涉及飞行模拟器（图 1-12）、精密数控机床（这类机床又称为并联机床或虚拟轴机床，英文名为 parallel kinematic machine，简称 PKM，如 VARIAX 虚拟轴机床，图 1-13）、微动机器人（如 Nonapod 微动并联机器人，图 1-14）、医疗器械（图 1-15）、光学仪器（如灵巧眼，图 1-16）、空间对接机构（如飞船对接装置，图 1-17）、集成电路加工、高速自动化生产线等诸多现代高、精、尖技术领域以及需要被隔离的复杂环境和军事行业。



图 1-11 Delta 并联机器人



图 1-12 飞行模拟器

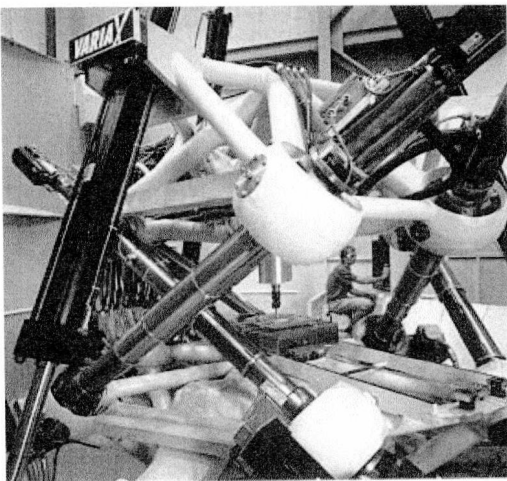


图 1-13 VARIAX 虚拟轴机床

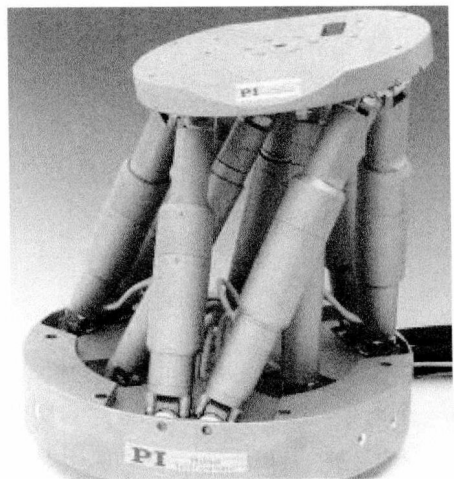


图 1-14 Nonapod 微动并联机器人