

郭 盛 曲海波 著

# 冗余并联机器人构型综合与应用



科学出版社

# 冗余并联机器人构型综合与应用

郭 盛 曲海波 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书在冗余并联机器人机构构型综合与应用方面展开研究,提出了驱动冗余和结构冗余并联机器人的构型综合方法,并针对典型冗余并联机器人进行应用研究。

本书第1章至第6章提出了驱动冗余并联机器人构型综合方法及理论,得到了系列三转动、三移动和混合自由度的驱动冗余并联机器人构型,并探讨了驱动冗余对并联机器人非期望运动的消除;第7章至第9章给出了一种新型链接度计算公式,以及结构冗余并联机器人构型综合方法及理论,并以一类链接度等于3的结构冗余并联机器人进行了说明;第10章至第12章给出了典型冗余并联机器人机构在飞行模拟器开发方面的应用示例。

本书可作为高等院校机械设计及理论专业的研究生和高年级本科生教材,同时也可以作为机器人领域科研人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

冗余并联机器人构型综合与应用/郭盛,曲海波著. —北京:科学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-03-049303-3

I. ①冗… II. ①郭… ②曲… III. ①冗余度机器人—研究  
IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第150084号

责任编辑:余 丁 闫 悦 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年7月第一次印刷 印张:13 1/4 彩插:2

字数:250 000

定价:76.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

机构学是机械工程的基础理论，具有较强的工程实用价值。运用机构学的理论和方法开发出具有自主知识产权的机械产品，从而增强产品的市场竞争力，对于建设新型的机械工业将发挥十分重要的作用，并有利于推动我国从制造大国走向制造强国。

冗余并联机器人是由多个并行链构成的闭链运动系统，即末端执行器通过至少两个独立运动链与机座相连。冗余并联机器人结构上具有低惯量、大负载能力、高速高精度等优点，故它在精密仪器、现代机床、高速自动化生产线等领域有着广阔的应用前景。随着国内外学者对冗余并联机器人机构的不断深入研究，该类并联机器人的优点和特性得到了深入的发掘，也越来越多地被应用于众多领域。

本书两位作者一直致力于单闭环机构、多闭环机构的综合方法研究，他们将理论和实际应用紧密结合，对冗余并联机器人机构的构型综合方法、典型机构性能分析以及关键应用技术等基本问题进行了严谨而详实的阐述，语言精练，深入浅出，体现了两位青年学者在并联机器人研究领域的高深造诣与深厚的研究基础。

本书作为冗余并联机器人构型综合与应用方面的专著，主要创新之处在于：提出了驱动冗余并联机器人的构型综合方法；建立了转动型、移动型及混合型驱动冗余并联机器人的机构分析方法；研究了驱动冗余对并联机器人非期望运动的消除问题；对结构冗余并联机器人构型综合方法、拓扑变换以及自由度/链接度特性进行了研究；并在上述基础上，研究了驱动冗余并联机器人在新型飞行模拟器的工程应用中的关键技术。

本书作为一本系统化的冗余并联机器人构型综合与应用技术方面的专著，非常适合高校学生和工程技术人员阅读。本书可作为从事机械工程设计、制造、运行、维修的科技人员，高等院校进行机械工程学习、研究、教学的本科生、研究生、教师，以及从事机械产品生产的领导和管理人员的教材和参考书。

Fellow, EIC; Fellow, ASME; Fellow, CSME

加拿大约克大学机械工程系 系主任



2016年6月

# 前 言

本书两位作者先后师从方跃法教授学习和研究并联机构。在方教授的指导下，学习机构学基础知识、螺旋理论、并联机构综合理论、并联机构分析知识及相关应用技术。作者所取得的研究成果，都得益于方教授对于我们长期的知识传授及科研引领。在此，将本书献给我们敬爱的方老师！

针对本书内容的研究历时将近 6 年。在此期间，两位作者一直致力于单闭环机构、多闭环机构的综合方法研究。在此基础上，进一步拓展到冗余并联机构设计方法的研究，并尝试分析此类机构的性能。同时，探索冗余并联机构的关键应用技术。在研究过程中，不同程度地向从事并联机构研究的各位大师进行请教，包括加州大学欧文分校的 J. Michael McCarthy 教授（2010 年到 2011 年作者郭盛在美国访学的合作导师）、法国国家信息与自动化研究所的 Jean-Pierre Merlet 高级研究员（2010 年到 2012 年作者曲海波在法国访学的合作导师）、台湾成功大学颜鸿森教授（2005 年到 2006 年作者郭盛在台湾成功大学的博士后导师）、伦敦大学国王学院的戴建生教授等学者。学者们不同程度地启迪了我们的心智，鼓励了我们的研究。在此，作者对他们表示衷心的感谢！

并联机构这块研究热土培养了众多青年学者，机构学家们各领风骚！几十年的研究，积累了大量的理论成果。前辈们在自由度分析、机构综合理论等方面的研究已经日臻完善。本书两位作者在前人研究的基础上，尝试拓展并联机构的研究内容及新的方法探索，并希望将研究成果应用到工程装备的开发和工程应用实践中。本书的宗旨是与各位研究者分享我们取得的初步研究成果，希望各位专家能指出书中存在的错误，以促进和帮助我们取得新的进步！

本书得到国家自然科学基金（51475035，51505023）及教育部高等学校基本科研业务费（2013JBZ013）的资助，在此表示感谢！

本书承蒙国家“千人计划”张丹教授的审阅和指点，在此一并感谢！

作 者

于北京交通大学机械工程楼

2016 年 4 月

# 目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 冗余并联机器人发展及现状	1
1.2 基本概念	4
1.3 本书内容	4
参考文献	6
第 2 章 驱动冗余并联机器人构型综合方法	11
2.1 空间约束与基本运动	11
2.2 构型综合方法	14
2.3 闭环驱动单元分析	16
2.4 开环子支链分析	17
2.5 本章小结	21
参考文献	22
第 3 章 具有三转动自由度的驱动冗余并联机器人	23
3.1 自由度要求	23
3.2 支链机构分析	25
3.2.1 支链机构的约束分析	25
3.2.2 F1 系列支链驱动单元	28
3.2.3 F2 系列支链驱动单元	29
3.2.4 F3 系列支链驱动单元	30
3.2.5 F 和 C 混合系列支链驱动单元	31
3.2.6 第一类支链机构	32
3.2.7 第二类支链机构	33
3.3 转动型驱动冗余并联机构	34
3.4 本章小结	36
参考文献	36
第 4 章 具有三移动自由度的驱动冗余并联机器人	39
4.1 自由度要求	39

4.2	支链机构分析	40
4.2.1	支链机构的约束分析	40
4.2.2	支链驱动单元	41
4.2.3	C1 系列支链驱动单元	42
4.2.4	C2 系列支链驱动单元	42
4.2.5	C3 系列支链驱动单元	44
4.2.6	第一类支链机构	45
4.2.7	第二类支链机构	46
4.3	移动型驱动冗余并联机构	47
4.4	本章小结	49
	参考文献	49
<b>第 5 章</b>	<b>具有混合自由度的驱动冗余并联机器人</b>	<b>51</b>
5.1	具有三自由度的 2R1T 型并联机构	51
5.1.1	自由度要求	51
5.1.2	冗余驱动并联机构构型	54
5.2	具有三自由度的 2T1R 型冗余驱动并联机构	56
5.2.1	自由度要求	56
5.2.2	冗余驱动并联机构构型	57
5.3	具有四、五自由度的冗余驱动并联机构	59
5.3.1	自由度要求	59
5.3.2	冗余驱动并联机构构型	63
5.4	本章小结	65
	参考文献	65
<b>第 6 章</b>	<b>驱动冗余对并联机器人非期望运动的消除</b>	<b>66</b>
6.1	3-UPU 并联机器人及其末端约束螺旋系	66
6.2	3-UPU 并联机器人的非期望运动	69
6.2.1	非期望运动的数值解释	69
6.2.2	非期望运动的物理意义	72
6.3	基于冗余支链消除非期望运动	77
6.4	一种 4-UPU 纯移动驱动冗余并联机器人机构	79
6.4.1	平行条件的证明	80
6.4.2	动平台链接度分析	81
6.4.3	运动学与奇异分析	82
6.4.4	机构工作空间与容错特性分析	85
6.5	本章小结	88

---

参考文献 .....	89
<b>第 7 章 新型链接度计算公式及其应用 .....</b>	<b>91</b>
7.1 基本运动支链 .....	91
7.2 动平台位置和姿态的确定 .....	95
7.3 新型链接度计算公式 .....	96
7.4 与修正 Kutzbach-Grübler 自由度公式的比较 .....	99
7.5 基于新型链接度计算公式的一类并联机构构型综合方法 .....	100
7.5.1 构型综合步骤 .....	100
7.5.2 基于基本运动支链的构型综合实例 .....	101
7.5.3 基于闭环运动支链的构型综合实例 .....	107
7.5.4 机构链接度验证 .....	109
7.6 本章小结 .....	113
参考文献 .....	113
<b>第 8 章 一类结构冗余并联机器人构型综合方法 .....</b>	<b>115</b>
8.1 结构冗余并联机器人构型综合方法 .....	115
8.2 链接度等于 3 的一类结构冗余并联机器人构型 .....	118
8.2.1 满足情况 1 的一类结构冗余并联机器人 .....	118
8.2.2 满足情况 2 的一类结构冗余并联机器人 .....	120
8.2.3 满足情况 3 的一类结构冗余并联机器人 .....	120
8.3 本章小结 .....	123
<b>第 9 章 可重构结构冗余并联机器人的拓扑变换和自由度/链接度特性 .....</b>	<b>124</b>
9.1 可重构结构冗余并联机器人与可重构运动支链 .....	125
9.1.1 可重构并联机构构型 .....	125
9.1.2 可重构运动支链 .....	125
9.2 自由度/链接度分析 .....	128
9.2.1 链接度分析 .....	128
9.2.2 机构整体自由度分析 .....	129
9.3 可重构拓扑变换分析 .....	129
9.4 本章小结 .....	131
参考文献 .....	131
<b>第 10 章 新型飞行模拟器机构构型设计 .....</b>	<b>133</b>
10.1 飞行模拟器研究背景及现状 .....	133
10.2 新型飞行模拟器机构的提出 .....	134



10.2.1	飞行器姿态描述 .....	134
10.2.2	新型飞行模拟器 .....	135
10.2.3	链接度/自由度分析 .....	137
10.3	运动学分析 .....	138
10.3.1	逆运动学 .....	138
10.3.2	正运动学 .....	140
10.4	速度/加速度分析 .....	143
10.4.1	速度分析 .....	143
10.4.2	加速度分析 .....	144
10.5	工作空间分析 .....	145
10.5.1	位置工作空间分析 .....	146
10.5.2	姿态工作空间分析 .....	151
10.6	奇异性分析 .....	157
10.6.1	奇异性分类 .....	157
10.6.2	奇异的数学判据 .....	158
10.7	本章小结 .....	161
	参考文献 .....	161
<b>第 11 章</b>	<b>运动系统的结构设计及控制系统建立 .....</b>	<b>163</b>
11.1	铰链的结构设计及装配 .....	163
11.1.1	万向铰链的结构设计及装配 .....	164
11.1.2	球铰链的结构设计及装配 .....	164
11.2	新型飞行模拟器控制系统的设计及建立 .....	166
11.2.1	控制系统的总体方案 .....	166
11.2.2	控制系统的选型及建立 .....	168
11.3	本章小结 .....	170
<b>第 12 章</b>	<b>飞行模拟器机构样机虚拟仿真及试验分析 .....</b>	<b>172</b>
12.1	基于虚拟样机的控制策略 .....	172
12.2	虚拟样机的建立 .....	173
12.3	虚拟样机的仿真分析 .....	177
12.3.1	平移运动仿真 .....	177
12.3.2	单自由度旋转运动仿真 .....	180
12.4	样机的试验分析 .....	183
12.4.1	大俯仰角运动的试验分析 .....	183
12.4.2	真实飞行曲线的试验分析 .....	187

---

12.5 本章小结.....	191
参考文献 .....	192
附录 A 杆件约束方程中的相关表达式 .....	193
附录 B 速度分析中的相关表达式 .....	194
彩图	

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 冗余并联机器人发展及现状

并联机构是一类典型的多环空间机构，通过多条运动支链连接动平台和基座。由于其具有高刚度、高承载能力及较小的误差积累等性能，并联机构获得了科研和工业领域等众多学者的广泛关注。特别是通过球副与动平台铰接的并联机构，由于其潜在的工业应用，更是得到了深入的研究。在众多的并联机构（通过球副与动平台铰接）中，最著名的是具有 6-SPS 结构的 Stewart 并联机构<sup>[1]</sup>及其变形结构。6-SPS 并联机构可以用于轮胎检测装置，如图 1-1 所示，或者飞行模拟器装置。另一个此类经典并联机构是由 Hunt<sup>[2]</sup>提出的 3-RPS 并联机构，此机构可以归类为 3-[PP]S 型并联机构<sup>[3]</sup>。3-[PP]S 型并联机构经常被用来构建并联机床动力头，例如，3-PRS<sup>[4,6]</sup>和 3-RPS<sup>[5,6]</sup>并联机构均被用来设计成并联机床动力头，并分别命名为 Z3 和 A3 动力头，如图 1-2 所示。

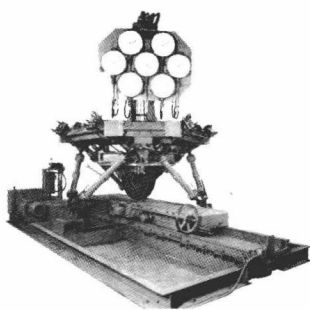
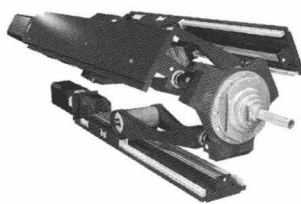
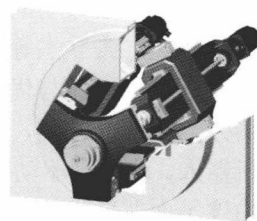


图 1-1 轮胎检测装置<sup>[1]</sup>



(a) Z3 动力头



(b) A3 动力头

图 1-2 并联动力头装置<sup>[4-6]</sup>

鉴于并联机器人的性能优点，许多学者将并联机器人应用于航天器对接装置、制造业虚拟轴机床、拾取装备等方面。在这些实际应用中，不仅要求并联机器人装备能够实现期望的工作任务、较大的非奇异工作空间、高刚度和高承载能力等性能，还要求并联机器人装备运行的安全性和可靠性。但是，现有的并联机器人装备在运行过程中，由于机电耦合以及机械本体的设计等问题，往往会产生不同程度的振动，影响了整个机器人装备在高速运行时的安全性和末端操作器的定位精度。当并联机器人装备发生故障和错误时，机构末端操作器一般不能继续实现期望的工作任务。除此之外，由于发生故障时瞬时载荷分布不均引起的冲击，会导致并联机器人装备的进一步损坏。

因此,在提高并联机器人装备的各种操作性能的同时,更应该保障并联机器人装备在运行过程中的安全可靠性和容错性能,这是近期并联机器人实用化研究的主要方向之一。

通过冗余(驱动冗余和结构冗余)来提高并联机器人性能是机构学与机器人学领域的重点研究方向。许多学者从不同的方面都有涉及,但目前并没有冗余并联机器人机构构型综合的统一认识和系统的设计方法。为了实现机构的高性能,一些学者尝试通过叠加、并联组合或者混合输入的角度进行冗余系统的设计。

对于驱动冗余并联机构的研究,现在的一些学者多是针对某一特定构型的机构进行研究分析,或者对驱动冗余并联机构进行了一些概念上的研究分析。虽然驱动冗余并联机构的实现方式有三种<sup>[7]</sup>,即在非冗余并联机构的某些支链的被动关节处添加主动驱动;在非冗余并联机构上添加具有主动驱动的运动学支链;既驱动已有支链的被动关节,又添加带驱动的运动学支链。但是众多学者把研究方向定位在了驱动冗余并联机构的第二种实现方式上,并针对某一特定的冗余驱动并联机构进行了相关的研究。Merlet<sup>[8-10]</sup>高级研究员讨论了并联机器人机构的公开难题,并指出驱动冗余将会对并联机构的运动学正解、奇异规避等方面产生有利影响,进而提高机构的力控制特性和运动学标定。

许多学者针对某一特定驱动冗余并联机器人构型进行了分析研究。Zanganeh 等<sup>[11,12]</sup>(1994年)提出了一种冗余驱动并联机器人,冗余驱动器的使用增加了机构的工作空间,并且改善了机构的奇异和灵巧性,它采用9条支链和9个驱动器。Kock 等<sup>[13,14]</sup>提出了一种平面移动的二自由度驱动冗余并联机器人,并且研究了此种机构具有弹性杆件的情况。张立杰等<sup>[15-20]</sup>利用空间模型理论对 Kock 提出的二自由度驱动冗余并联机器人进行了性能与优化设计研究,并将此机构扩展为球面二自由度驱动冗余的并联机器人。在同一时期,李泽湘<sup>[21,22]</sup>的研究团队同样开发了平面二自由度驱动冗余的并联机器人。这两种驱动冗余的并联机器人的原始构型是相同的,即将传统的3-RRR三自由度平面并联机构的动平台简化为一个复合的转动副。Chakarov<sup>[23-25]</sup>针对一类执行点接触任务的驱动冗余平面并联机构,进行了机构驱动器的选择分析与刚度建模控制分析。其基本观点是:协调冗余的直线驱动支链以实现机构末端操作器的平面运动。Marquet 等<sup>[26]</sup>利用四个直线驱动实现一种悬挂式并联机构 ARCHI 的平面三自由度运动,并进行了运动和机构受力的分析。随后,Krut 等<sup>[27]</sup>又提出一种五自由度驱动冗余并联机构 Eureka,由于驱动冗余和特定的动平台形式,它可以获得 $\pm 90^\circ$ 倾斜角。吴军等<sup>[28-30]</sup>在改造传统非冗余混联机床时,利用增加一个主动驱动支链的方式给出了一种三自由度驱动冗余并联机构,通过分析表明驱动冗余方式可以提高机床的性能。接着,Wang 等<sup>[31,32]</sup>又对此驱动冗余并联机构的动力学性能、优化设计做了进一步的研究。Gogu<sup>[33,34]</sup>在原有并联机构综合方法的基础上,通过对机构支链添加具有特定运动形式的冗余驱动关节,得到了完全各向同性的驱动冗余并联机构,其关键点在于冗余驱动关节的运动形式必须与机构的某一个自由度的运动形式同步。Saglia 等<sup>[35-39]</sup>提出了一

种用于踝关节康复的两自由度冗余驱动并联机构(3-SPS/U),此机构能够实现脚底板的背屈(plantar/dorsiflexion)和内外翻(inversion/eversion),并通过冗余驱动消除奇异位形和提高工作空间内的灵巧性,能够完全满足踝关节康复过程所要求的运动。Kim等<sup>[40]</sup>开发了快速加工的六自由度冗余驱动并联机床 Eclipse,其基本结构为3-PPRS,机构中各个支链的第一个移动副P均沿着同一个环形轨道。通过使用冗余的驱动器,消除了工作空间内的部分奇异位形,增强了系统的刚度。在此基础上,他们又开发了Eclipse II<sup>[41,42]</sup>,其动平台具有360°偏转能力。Zhao等<sup>[43,44]</sup>基于冗余驱动的思路设计了一种8-PSS型六自由度冗余输入地震模拟器。闫彩霞等<sup>[45-47]</sup>针对一种平面三自由度驱动冗余并联机构,从驱动冗余和结构冗余的角度对并联机器人的容错性能进行了研究,分析了故障发生前后机器人驱动力矩重新分配的情况。曲海波等<sup>[48-50]</sup>提出了驱动冗余并联机器人的构型综合设计理论,得到了机器人机构发生故障时的容错工作空间。

上述研究通过添加冗余驱动来提高并联机器人的操作性能,证明了冗余的存在对并联机器人运动学正解、奇异的规避以及运动学标定等方面都具有一定的提高。但是不可避免地增加了机构控制的难度,冗余驱动并联机器人的各个驱动关节需要进行严格的运动协调才能控制末端操作器实现期望的工作任务。而由于制造、装备误差的存在,致使并联机器人存在内应力叠加等问题,增加了并联机器人在运行过程中的能量损耗。当发生故障并锁定故障关节后,得到的并联机器人可重构构型加剧了运动协调带来的控制难度。因此,克服上述缺点,而保留并联机器人由于冗余带来的优点,是研究冗余并联机器人的一个重要内容。在并联机器人的基础上添加冗余结构,使冗余并联机器人的冗余输入与输出能够实现自适应的运动协调,被认为是一种提高并联机器人装备操作性能,保障在运行过程中的安全性和容错性能的有效途径。

目前,利用结构冗余来提升并联机器人操作性能和容错性能的研究相对较少,现有冗余构型都是在常规并联机器人的基础上添加冗余结构,导致了构型的随意性和非对称性。Wang等<sup>[51]</sup>在并联机构分支中加入冗余关节,研究发现冗余结构可以使并联机器人减少其工作空间内的奇异位形。Mohamed等<sup>[52]</sup>设计分析了一种具有可重构动平台的结构冗余并联机器人,从而与刚性平台的并联机构不同,这种机构的平台可以直接作为抓取装置。Ebrahimi等<sup>[53]</sup>研究了六自由度结构冗余并联机器人的驱动配置问题。Kotlarski等<sup>[54,55]</sup>研究发现结构冗余能够改善并联机器人非奇异工作空间。Kim<sup>[56]</sup>利用结构冗余改善了并联机器人在工作空间内的性能指标。闫彩霞等<sup>[57]</sup>研究了结构冗余并联机器人的容错方法。苑飞虎等<sup>[58]</sup>提出了一种具有协调构件的结构冗余并联机器人,避免了超确定输入协调控制问题。上述研究多是针对实现工作任务的某一种特定机构构型进行改进优化设计,尚未形成结构冗余并联机器人的系统设计理论和方法。

综上所述,目前关于冗余并联机器人系统设计理论及分析方法仍是一项具有挑战性的难题,也是机器人机构学的一项前沿研究课题。基于冗余的方法克服传统并联机构的缺点,而保持固有的优点,全面提升冗余并联机构的各项性能,将为研制和开发基于并联机构的高性能技术装备奠定良好的理论基础。

## 1.2 基本概念

为了更好地理解本书的相关内容，本小节给出如下基本概念的定义。

(1) 机构自由度：确定机构唯一构型所需要的独立参数/独立驱动数目。

(2) 机构链接度/相对自由度：机构动平台相对于基座的独立运动数目。

(3) 驱动冗余并联机器人：机构独立驱动的数目大于机构的整体自由度数目。此定义没有对并联机构整体自由度与动平台的链接度之间的关系做出规定，即并联机构整体自由度可以大于或等于机构动平台的链接度。一般而言，驱动冗余并联机器人的整体自由度等于机构动平台的链接度，此时对机构自由度和链接度不做明确区分，所述自由度或链接度均具有相同的数目。

(4) 结构冗余并联机器人：并联机构的整体自由度大于机构动平台的链接度，但等于机构独立驱动的数目。所以，此时需要对机构自由度和链接度做出明确区分。

(5) 并联机构构型综合：确定机构的构件数目、运动副数目及其类型，以及可能的连接方式，以获得满足功能要求的所有并联机构构型。

## 1.3 本书内容

本书在冗余并联机器人机构构型综合与应用方面进行展开，提出了驱动冗余和结构冗余并联机器人的构型综合方法，并对典型冗余并联机器人的应用情况进行了说明。本书内容如下。

第2章分析了约束螺旋的相关性及对应的运动螺旋。并且针对目前驱动冗余并联机构的实现形式，提出了驱动冗余并联机构的构型综合方法，其主要特点是：将机构可能的约束耦合在支链单元内完成，从而获得非过约束或者低次过约束的驱动冗余并联机器人机构。

第3章基于提出的驱动冗余并联机器人构型综合方法，综合了一类具有三转动的驱动冗余并联机器人。分析了实现三转动自由度运动所要求的约束螺旋系，并确定了可能的支链单元及装配条件。利用提供纯约束力的单环机构来替代传统的开环支链，将机构可能的约束耦合在支链单元内完成，从而获得非过约束或者低次过约束的三转动驱动冗余并联机器人机构。最后以实例图形阐述了得到的三转动驱动冗余并联机器人机构构型形式。

第4章基于提出的驱动冗余并联机器人构型综合方法，综合了一类具有三移动驱动冗余并联机器人。分析了实现三移动自由度运动所要求的约束螺旋系，并确定了可能的支链单元及装配条件。利用提供纯约束力偶的单环机构来替代传统的开环支链，得到了非过约束或者低次过约束的三移动驱动冗余并联机器人机构，并以实例图形阐述了三移动驱动冗余并联机器人机构构型形式。

第5章基于提出的驱动冗余并联机器人构型综合方法,综合了一类具有混合自由度的驱动冗余并联机器人。分析了实现两转动一移动、两移动一转动和四、五自由度运动所要求的约束螺旋系,利用得到的单环机构替代传统的开环支链对动平台提供约束,得到了非过约束或者低次过约束的两转动一移动、两移动一转动和四、五自由度冗余驱动并联机器人机构,并以实例图形进行了阐述。

第6章针对典型的3-UPU并联机构总是存在非期望转动这一情况,进行了分析评估和规避研究。考虑约束误差对伴随转动的影响,约束螺旋与伴随转动直接的互易积将不再等于零,即约束螺旋对伴随转动存在做功现象。基于此,得到了伴随转动自由度运动的范数表达,并以此作为衡量指标检验了误差约束对非期望转动的影响幅度。通过添加冗余驱动支链的方式,对机构可能出现的伴随运动进行了消除。本章同时提出了一种新型4-UPU冗余驱动并联机构。该机构以2-UPU单环机构作为基础构型单元,消除了UPU类并联机构可能存在的伴随运动。此冗余驱动并联机构具有解析的正运动学求解,并且只有一种可以完全规避的结构奇异。当某一个驱动支链出现故障锁住时,机构动平台依然能够实现部分的空间移动运动,通过求解得到机构的容错工作空间。

第7章给出了机构整体自由度和链接度的区别,提出了一种确定动平台位置和姿态的原则,并基于此提出了一种新型链接度计算公式。此链接度计算公式适用于一类支链通过球副与动平台铰接的并联机构。基于提出的新型链接度计算公式,提出了一种针对支链通过球副与动平台铰接并联机构的系统综合方法。分别基于基本运动支链和闭环运动支链进行了此类并联机构的构型综合,并对机构的链接度进行了验证。

第8章基于提出的新型链接度计算公式和修正的Kutzbach-Grübler自由度计算公式,提出了一种结构冗余并联机器人构型综合方法,此方法适用于一类支链通过球副铰接动平台的结构冗余并联机器人。新提出的构型综合方法,将结构冗余并联机器人机构的整体自由度与链接度(动平台的独立运动数目)进行区分,并给出了此二者之间的数学表达。最后,以一类链接度等于3的结构冗余并联机器人构型综合为例进行了阐述。

第9章基于提出的一种新型可重构冗余并联机器人机构,分析了其可重构的三种非冗余构型。由于相对于基座得到的第 $i$ 条可重构运动支链的反螺旋系,不同于相对于中心动平台得到的第 $i$ 条可重构运动支链的反螺旋系。因此,提出了一种针对可重构构型的新型链接度计算公式。不同的可重构构型,具有不同的拓扑结构、自由度和链接度。

第10章以飞行模拟器为应用背景,提出一种新型驱动冗余并联机器人机构作为飞行模拟器的机械本体。首先,对此飞行模拟器机构进行了构型描述,分析了其自由度和链接度特性,验证了此模拟器机构具有较大的转角特性。接着,分析了该新型模拟器机构的运动特性,包括运动学分析、速度和加速度分析、工作空间分析和奇异性分析等。为飞行模拟器机构工作性能的进一步优化分析与控制奠定了理论基础。

第 11 章对新型飞行模拟器的运动系统进行设计和装配。主要包括运动系统机械本体的设计装配和多轴运动控制系统的建立。为了实现新型飞行模拟器大姿态大转角的运动要求,对机械本体中的万向铰链和球铰链进行了特殊的设计和装配,绘制了整个机械本体的三维模型,进行相关的加工和装配,得到了飞行模拟器运动系统机械本体的实物样机。根据冗余并联机构的控制特点,采用了基于独立式运动控制器的多轴联动控制系统。在考虑控制系统的效能和经济性的基础上选取合适的控制硬件,最终建立了飞行模拟器运动系统的控制系统。至此,新型飞行模拟器运动系统的样机已经制造装配完毕,为下一步进行的样机虚拟仿真及试验分析奠定了良好的基础。

第 12 章主要对样机进行试验分析。首先选用了一种基于虚拟样机的并联机器人机构控制策略,建立了新型飞行模拟器运动系统的虚拟样机。为了验证虚拟样机的正确性和可靠性,利用虚拟样机进行了单自由度平移和旋转的仿真分析,将仿真结果与运动学解算所得的结果进行比较,可知利用虚拟样机得到的驱动参数是准确可靠的,为下一步进行真实样机的试验奠定了基础。在对真实的样机进行控制分析时,首先选择了战斗机中常见的大俯仰运动作为输入曲线,通过虚拟样机的仿真分析得到了真实样机的驱动参数,利用控制系统将驱动参数输入到各个驱动机构中,最终得到了样机的大俯仰运动,进一步验证了新型飞行模拟器运动系统的工作性能。最后结合洗出滤波算法,对真实飞机的起飞曲线进行了仿真分析,并在真实样机上进行了试验,为实际的工程应用提供了很好的借鉴。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Stewart D. A platform with six degrees of freedom. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1965, 180(1): 371-386.
- [ 2 ] Hunt K H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms. Journal of Mechanical Design, 1983, 105(4): 705-712.
- [ 3 ] Liu X J, Bonev I A. Orientation capability, error analysis, and dimensional optimization of two articulated tool heads with parallel kinematics. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(1): 011015 (9 pages).
- [ 4 ] Wahl J. Articulated tool head: US, US6431802. 2000.
- [ 5 ] Huang T, Liu H T. A parallel device having double rotation freedoms and one translation freedom: WO, WO2007/124637. 2007.
- [ 6 ] Chen X, Liu X J, Xie F G, et al. A comparison study on motion/force transmissibility of two typical 3-DOF parallel manipulators: The sprint Z3 and A3 tool heads. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(1): 74-89. doi: 10. 5772/57458.
- [ 7 ] Kim S. Operational quality analysis of parallel manipulators with actuation redundancy. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, USA, 1997, 3: 2651-2656.



- [ 8 ] Merlet J P. Parallel robot: Open problems. Proceedings of 9th International Symposium of Robotics Research, Snowbird, 1999.
- [ 9 ] Merlet J P. Redundant parallel manipulators. Laboratory Robotics and Automation, 1996, 8(1): 17-24.
- [10] Merlet J P. Still a long way to go on the road for parallel mechanisms. Keynote of ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 27th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Montréal, Canada, 2002.
- [11] Zanganeh K E, Angeles J. Mobility and position analyses of a novel redundant parallel manipulator. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, USA, 1994, 4: 3049-3054.
- [12] Zanganeh K E, Angeles J. Instantaneous kinematics and design of a novel redundant parallel manipulator. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, USA, 1994, 4: 3043-3048.
- [13] Kock S, Schumacher W. A parallel x-y manipulator with actuation redundancy for high-speed and active-stiffness applications. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998, 3: 2295-2300.
- [14] Kock S, Schumacher W. A mixed elastic and rigid-body dynamic model of an actuation redundant parallel robot with high-reduction gears. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, USA, 2000, 2: 1918-1923.
- [15] 张立杰, 刘辛军. 平面 2 自由度驱动冗余并联机器人的机构设计. 机械工程学报, 2002, 38(12): 49-53.
- [16] 张立杰. 平面两自由度驱动冗余并联机器人的承载能力分析. 机械设计与研究, 2003, 19(1): 28-30.
- [17] 张立杰, 刘辛军, 黄真. 平面 2 自由度驱动冗余并联机器人的性能分析. 机械工程学报, 2006, 42(7): 181-185.
- [18] 张立杰, 刘辛军, 黄真. 平面 2 自由度驱动冗余并联机器人的输出速度分析. 机械设计与研究, 2006, 23(2): 19-21.
- [19] 张立杰, 刘辛军. 一种平面冗余驱动并联机器人的优化设计. 机械设计与研究, 2007, 23(4): 35-38.
- [20] 张立杰, 李永泉, 史文雅. 一种球面 2-DOF 冗余驱动并联机器人的优化设计. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 59-64.
- [21] Cheng H, Yiu Y K, Li Z X. Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(4): 483-491.
- [22] 沈辉. 并联机器人的几何分析理论和控制方法研究[博士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [23] Chakarov D. Synthesis of parallel manipulators with redundant actuation. Proceedings of 3rd International Conference Power Transmissions, Kallithea, Greece, 2009, 295-300.