

新一代信息科学与技术

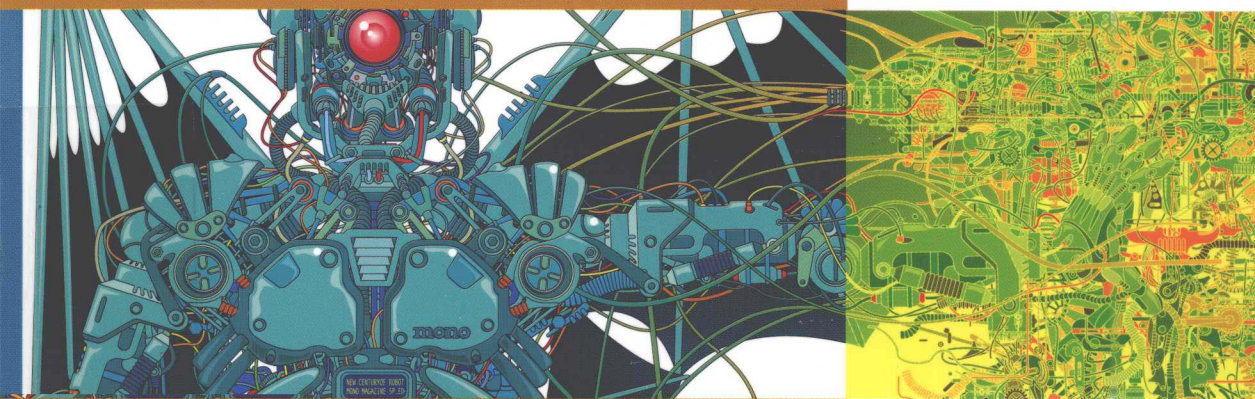
# 柔性臂机器人

## 建模、分析与控制

吴立成 杨国胜  
郅新凯 孙富春

著

Flexible-Link Manipulator  
Modeling, Analysis and Control



 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

新一代信息科学与



Flexible-Link Manipulator

Modeling, Analysis and Control

柔性臂机器人

ROUXINGBI JIQIREN

建模、分析与控制

JIANMO FENXI YU KONGZHI

吴立成 杨国胜 郅新凯 孙富春 著



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书主要介绍柔性机器人(包括柔性冗余度机器人和柔性臂空间机器人)建模、运动学/动力学分析、轨迹规划、振动抑制与轨迹跟踪控制的若干方法。全书共分8章,包括绪论、柔性臂机器人动力学建模、柔性臂空间机器人动力学建模、柔性冗余度机器人动力学分析、柔性双臂空间机器人运动学分析、柔性双臂空间机器人轨迹规划、柔性臂空间机器人抑振轨迹规划和柔性臂机器人控制。书中给出了一个柔性双臂空间机器人和一个两连杆柔性机器人的完整的动力学方程,并对所介绍的理论方法给出仿真实例。

本书适合作为高等学校相关专业研究生的学习参考书,也可供从事机器人研究和应用的科技工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

柔性臂机器人:建模、分析与控制/吴立成等著. —北京:高等教育出版社,2012.4

ISBN 978-7-04-034692-3

I. ①柔… II. ①吴… III. ①柔性臂-机器人 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 027562 号

策划编辑 陈红英      责任编辑 陈红英      封面设计 张楠      版式设计 杜微言  
责任校对 殷然      责任印制 田甜

---

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	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	北京嘉实印刷有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开 本	787mm×1092mm 1/16		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 张	9.25	版 次	2012年4月第1版
字 数	130千字	印 次	2012年4月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	39.00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 34692-00

# 前言

随着机器人性能要求的提高,研究轻质、重载、高速、高精度、高灵活性、高适应性、智能化的机器人已成为时代的需要。考虑机器人结构柔性,充分研究柔性机器人,是运用满足轻质、高速等性能要求的机器人的前提。但由于柔性连杆机械臂导致系统动力学行为复杂,其建模与控制等方面都需要在已有的机器人学理论基础之上研究新的有效方法。

机器人一般为开链机构,冗余度机器人机构链较长,必须考虑柔性以保证精度。而柔性机器人要具有高灵活性和适应性,也必然会从一杆发展到多杆,再到运动学冗余。因此将柔性机器人和冗余度机器人的研究结合起来,即研究柔性冗余度机器人是很有必要的。

空间机器人一般具有质轻、臂长和负载大等特点,必须考虑臂杆柔性才能获得良好的控制精度和性能。在太空失重状态下,往往要求自由飞行空间机器人必须是多臂型,以便能完成复杂的任务。因此研究柔性臂空间机器人,尤其是多柔性臂空间机器人也具有非常重要的实践意义。

为便于感兴趣的科研和技术人员学习和了解包括柔性冗余度机器人和柔性臂空间机器人在内的柔性臂机器人研究现状和一些重要的研究和分析方法。作者大量分析和总结了领域内各类最新文献,并以作者的博士论文、博士后出站报告以及国家自然科学基金项目研究成果等为基础,系统性地选择柔性机器人、柔性冗余度机器人或柔性臂空间机器人建模、运动学/动力学分析、轨迹规划、振动抑制与轨迹跟踪控制等方面的若干重要内容,著成此书。

本书自动笔至脱稿,历时近两年。其间为之殚精竭虑,一心要精益求精并早日付梓以飨读者。今终尝所愿,又因虑及作者水平有限,书中错误与遗漏难免,而惴惴之心油然。惟有恳请广大读者不吝批评指正为盼。

作者

2011年10月

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 柔性机器人研究现状 .....	2
1.1.1 柔性机器人动力学建模 .....	3
1.1.2 柔性机器人动力学控制 .....	4
1.2 冗余度机器人研究现状 .....	5
1.2.1 冗余度机器人优化目标及优化策略 .....	6
1.2.2 冗余度机器人优化算法的实现 .....	7
1.2.3 柔性冗余度机器人研究现状 .....	7
1.3 空间机器人研究现状 .....	8
1.3.1 空间机器人运动学与动力学建模 .....	9
1.3.2 空间机器人动力学奇异与工作空间分析 .....	10
1.3.3 空间机器人本体位姿扰动控制 .....	11
1.3.4 空间机器人非完整路径规划 .....	11
1.3.5 空间机器人计算机仿真 .....	12
1.3.6 柔性臂空间机器人 .....	13
参考文献 .....	13
<b>第 2 章 柔性臂机器人动力学建模</b> .....	23
2.1 假设模态法 .....	23
2.1.1 平面两连杆柔性机器人的动力学建模——简支梁边界条件 .....	25
2.1.2 动力学方程的符号推导 .....	27
2.1.3 动力学方程的离散形式 .....	29
2.2 子杆法 .....	30
2.2.1 单个柔性杆的虚拟刚性子杆及被动关节模型 .....	31
2.2.2 动静态参数计算 .....	32

2.2.3	子杆数目及子杆法适用范围的讨论 .....	34
2.2.4	柔性机器人整体动力学模型 .....	35
2.2.5	结构阻尼系数 .....	38
2.2.6	算例仿真及结果分析 .....	38
	参考文献 .....	42
<b>第 3 章</b>	<b>柔性臂空间机器人动力学建模 .....</b>	<b>43</b>
3.1	柔性双臂空间机器人动力学建模 .....	43
3.1.1	坐标系建立 .....	43
3.1.2	变换矩阵 .....	44
3.1.3	坐标向量 .....	44
3.1.4	速度、角速度向量 .....	45
3.1.5	系统动能 .....	46
3.1.6	质量矩阵 .....	46
3.1.7	刚度矩阵 .....	51
3.1.8	质量矩阵对广义坐标的偏导数 .....	51
3.1.9	离心力和哥氏力 .....	57
3.1.10	广义主动力 .....	59
3.1.11	动力学方程及其分解 .....	60
3.2	动力学方程求解 .....	62
3.2.1	求解流程 .....	62
3.2.2	矩阵求逆算法 .....	63
3.2.3	数值积分算法 .....	63
3.2.4	动力学逆解算法 .....	64
	参考文献 .....	64
<b>第 4 章</b>	<b>柔性冗余度机器人动力学分析 .....</b>	<b>65</b>
4.1	柔性冗余度机器人振动控制的复模态算法 .....	66
4.1.1	刚性冗余度机器人运动学反解基本问题概述 .....	66
4.1.2	柔性冗余度机器人运动学反解 .....	68
4.1.3	柔性冗余度机器人的计算力矩抑振控制原理 .....	69
4.1.4	自运动选择方法 .....	71
4.1.5	算例仿真及结果分析 .....	72
4.2	柔性冗余度机器人的力矩优化 .....	77

---

4.2.1 关节力矩优化方案 .....	77
4.2.2 动力学优化算法 .....	79
4.2.3 数值仿真 .....	80
参考文献 .....	83
<b>第5章 柔性双臂空间机器人运动学分析 .....</b>	<b>85</b>
5.1 空间机器人雅可比 .....	85
5.1.1 柔性双臂空间机器人雅可比矩阵 .....	85
5.1.2 系统广义雅可比矩阵 .....	88
5.1.3 对等刚性系统雅可比矩阵 .....	89
5.1.4 对等刚性系统质量矩阵 .....	90
5.1.5 对等刚性系统广义雅可比矩阵 .....	92
5.2 空间机器人工作空间 .....	92
5.2.1 对等刚性系统工作空间分析 .....	93
5.2.2 柔性臂空间机器人工作空间分析 .....	97
5.2.3 对称运动工作空间分析 .....	98
参考文献 .....	98
<b>第6章 柔性双臂空间机器人轨迹规划 .....</b>	<b>99</b>
6.1 时间参数化算法 .....	99
6.2 基座运动轨迹规划 .....	102
6.2.1 路径规划 .....	102
6.2.2 动力学约束 .....	103
6.3 捕捉目标的关节运动轨迹规划 .....	104
6.3.1 运动学逆解 .....	104
6.3.2 路径规划与动力学约束 .....	105
6.4 综合规划及仿真实例 .....	106
6.4.1 综合规划算法 .....	106
6.4.2 仿真实例 .....	107
6.5 非完整运动规划 .....	108
6.5.1 自由飘浮空间机器人的非完整性 .....	108
6.5.2 非完整运动规划算法 .....	109
6.5.3 空间机器人非完整关节运动规划 .....	111
6.5.4 仿真实例 .....	111



---

参考文献 .....	113
<b>第 7 章 柔性臂空间机器人抑振轨迹规划 .....</b>	<b>114</b>
7.1 振动抑制轨迹规划原理 .....	114
7.2 轨迹描述与生成 .....	116
7.3 振动抑制轨迹规划算法 .....	117
7.4 仿真实例 .....	120
参考文献 .....	122
<b>第 8 章 柔性臂机器人控制 .....</b>	<b>123</b>
8.1 逆动力学控制 .....	123
8.1.1 控制算法 .....	123
8.1.2 逆动力学控制算法稳定性分析 .....	125
8.1.3 逆动力学控制仿真 .....	126
8.2 神经网络控制 .....	128
8.2.1 分块策略及动力学模型 .....	129
8.2.2 神经网络控制方案 .....	131
8.2.3 学习样本 .....	132
8.2.4 神经网络控制仿真 .....	133
参考文献 .....	135
<b>索引 .....</b>	<b>136</b>

# 第 1 章 绪论

自古以来,人们就幻想着制造某种与人类自身所具有的功能相似的机器装置。我国古典名著《三国演义》中诸葛亮制作木牛流马运送粮草的故事,就是这种幻想在文学作品中的体现。人类真正开始实现这一幻想,对机器人技术展开广泛研究却是近几十年的事,并且现在所说的机器人一般指工业机器人。自 1961 年第一台商用工业机器人 Unimate 问世以来,机器人因其广泛的应用背景得到了迅猛的发展。机器人技术成为当今高科技发展的一个重要方向。机器人学作为研究机器人及其相关技术的科学,也已成为涉及机械、电气、计算机、传感器和人工智能等多个领域的综合性学科。

近几年来,航空航天等领域对机器人的性能提出了越来越高的要求。研究轻质、重载、高速、高精度、高灵活性、高适应性、智能化的机器人已成为时代的需求。要满足轻质、高速等要求,就必须对机器人的结构柔性进行研究,即研究柔性机器人。机械臂中的柔性可能出现在关节和连杆两个地方。关节的柔性一般可以看成是扭曲的弹簧。如传动系统认为是柔性的,则柔性可能是由减速器、轴杆、传动链引起的。连杆的柔性可能是由连杆的扭曲、弯曲和拉伸引起的。由于柔性连杆机械臂所涉及的问题更复杂,而应用对其需求也更高,除空间机械臂外,即便是普通的地面用途的机械臂,当机械臂高速运行、其连杆做得很长或末端负载较重时,连杆的弹性和可能激发的振动就成了不可忽略的因素。连杆弹性的存在不但使得机械臂的控制变得困难,而且易激发结构共振导致系统损坏。由于柔性连杆的机械臂的建模和控制比柔性关节机械臂的建模和控制更复杂,因此,在理论上柔性连杆机械臂的研究应吸引更多的注意力。

要使机器人具有高灵活性和高适应性,机器人应具有较多的自由度,甚

至自由度冗余而成为冗余度机器人。一方面,柔性机器人要走向实用,要具有高灵活性和适应性,必然会从一杆发展到多杆,再发展到运动学冗余。另一方面,机器人一般为开链机构,冗余度的要求使机器人机构链增长,忽略柔性变形将很难获得高精度。另外,冗余度机器人所具有的冗余特性还可用来改善柔性机器人的柔性效应。因此,有必要将柔性机器人和冗余度机器人的研究结合起来,即研究柔性冗余度机器人。这一领域的研究有望获得满足轻质、重载、高速、高精度、高灵活性、高适应性等要求的高性能机器人,因此具有重要的研究价值。国内外已有众多学者开始了这一新领域的研究,并取得了不少有价值的理论研究成果。

空间机器人一般具有质轻、臂长和负载大等特点,必须考虑臂杆柔性才能获得良好的控制精度和性能。因此,目前国际上已有许多文献研究了柔性空间机器人的建模与控制问题,对柔性多臂空间机器人系统的研究则还刚刚开始,但显然将成为进一步研究的重要方向和热点。在太空失重状态下,物体(包括机器人本身)都处于自由飘浮状态,要完成比较复杂的操作就要求自由飞行空间机器人必须是多臂型,其中至少一只操作手臂稳定工件,其余操作手臂用来完成操作任务。空间机器人多臂协调系统能提供更高的负载能力,并能完成复杂的装配任务,为空间机器人提供更大的操作灵活性。因此,近年来国内外对自由飞行空间机器人的研究一般都是基于多臂型来进行的,其中双臂型具有典型意义,因此被广泛采用。

综上所述,本书将分别讨论柔性连杆机械臂、柔性冗余度机器人及柔性双臂空间机器人的建模、运动学分析、动力学、振动抑制的轨迹规划和轨迹跟踪控制方法等方面的内容。

## 1.1 柔性机器人研究现状

柔性机器人由于其高速、低耗、质轻等特点,在空间机器人等应用领域占有重要地位。因此,近年来对柔性机器人的研究受到广泛的关注。由于柔性机器人是无穷维连续分布参数系统且存在较大的变形,其运动规律与刚性机器人存在本质上的差别,因而在动力学建模和控制中均需采用不同的方法。从本质上说,柔性机器人必须用无穷维连续分布参数模型来描述,而实际上对分布参数系统的控制往往只能基于有限维模型进行设计。因此,如何建立

恰当的、行之有效的模型,并据此设计高性能的控制器,是柔性机器人研究中面临的两个主要问题。目前,在柔性机器人建模和控制的研究仍存在很多极富挑战性的课题。

### 1.1.1 柔性机器人动力学建模

柔性机器人的结构柔性包括关节柔性和连杆柔性。关节柔性指机器人传动机构和关节转轴的扭曲变形,通常用集中参数模型描述。连杆柔性则指机器人连杆的弹性变形、剪切变形等,通常需用偏微分方程所代表的分布参数模型加以描述。

在柔性机器人的动力学建模中,使用的力学原理多种多样。其中,拉格朗日方法是最常用的方法之一<sup>[1-8]</sup>。它将普通连杆视为具有有限自由度的系统,然后用拉格朗日方程写出动力学方程。Low 等建立了由柔性前臂和刚性后臂组成的双连杆柔性机器人的动力学模型,得到一组非线性积分-微分方程<sup>[2]</sup>。Siciliano 等对多连杆柔性机器人建模得到的封闭形式的动力学方程具有一定的通用性<sup>[1]</sup>。Matsuno 等在拉格朗日方法的基础上结合扩充 Hamilton 原理进行建模<sup>[3]</sup>。Marco 等指出了拉格朗日方法结合假设模态法建立的动力学方程的一些重要性质<sup>[7]</sup>。Cetinkunt 等研究了如何使用符号推解软件(REDUCE 软件)进行柔性机器人的拉格朗日方法建模<sup>[8]</sup>。

基于 Hamilton 原理建模是另一种常用的方法<sup>[9-11]</sup>。它将连杆视为连续体,写出对应的 Hamilton 原理形式,导出相应的数学方程和边界条件,再利用试函数(trial function)的适当组合来逼近系统方程的解。用这种方法,Benati 和 Morro 讨论了  $N$  根柔性连杆组成的柔性机器人动力学方程的建立问题,方法具有通用性<sup>[9]</sup>。Choi 等建立了由两根刚性杆和一根柔性杆组成的三连杆柔性机器人的动力学模型,并用辛流形等数学工具讨论了方程的非线性特征<sup>[10]</sup>。

有限元法是振动分析中一种应用广泛且行之有效的数值分析方法<sup>[12-19]</sup>。它将一个复杂结构抽象成为由有限个单元在有限个节点处对接而成的组合结构,其中每个单元都是一个弹性体,单元的位移用节点位移的插值函数表示。柔性连杆机器人是典型的复杂结构,其弹性振动也可用有限元来分析。Chang 等的工作具有一定的代表性<sup>[12]</sup>。Edelstein 等的研究对两杆柔性机器人进行了仿真<sup>[19]</sup>。有限元模型非常复杂,计算效率很低,一般只限

于研究单杆柔性机器人或对柔性机器人系统进行分析。

迄今为止,对柔性机器人建模,一般都从拉格朗日方程和/或 Hamilton 原理出发,所得到的模型往往是一组高度非线性的积分-微分方程,求解十分困难。为此,便有了各种简化、处理和求解的方法和算法,如假设模态法 (assumed-mode method)、拟静态处理法 (quasi-static task)、连续积分法 (sequential integration method)、线性化法 (linearization)、有限元法 (finite-element method)、旋量代数法 (rotational algebra) 等。但即使经过这些简化处理,方程的求解仍很复杂且困难,因此,建立满足实时控制要求的动力学方程是柔性机器人发展的关键之一。

另外,使用人工神经网络来逼近模拟柔性机器人的动力学逆模型,也应算是建模方法的一种。如 Sandeep Jain 等使用遗传算法作为神经网络的学习算法,实现了单杆柔性机器人动力学逆模型的神经网络逼近<sup>[20]</sup>。这一方法能获得计算效率非常高的模型,但其精度稍差,并且收敛速度慢,目前还只能应用于结构较简单的一杆、两杆柔性机器人。

### 1.1.2 柔性机器人动力学控制

设计和制造柔性机器人的主要目的之一,是期望获得较高的运动速度和高精度的控制性能。这对机器人的控制器提出了较高的要求。而柔性机器人的结构柔性又给系统的建模和控制带来了困难。因此,柔性机器人的动力学控制成了一个极富挑战性且亟待解决的问题。

轨迹跟踪控制是机器人控制的基本任务之一。刚性机器人的轨迹跟踪控制研究已经比较成熟,且已广泛用于工业机器人的生产实际<sup>[21-25]</sup>,而柔性机器人的轨迹跟踪控制刚刚起步。原因之一是由于柔性部件产生的弹性变形将引起机器人末端执行器的轨迹误差并产生高频振动。振动抑制和误差补偿是柔性机器人控制中面临的两个主要问题。为了抑制甚至消除柔性机器人的末端振动,人们进行了大量的研究。

经典控制方法由于理论成熟且易于实现而得到了应用。Yigit 曾经对柔性机器人系统的独立关节 PD 控制问题展开了研究,论证了系统的稳定性,可保证系统在受到有限摄动时仍能稳定工作<sup>[21]</sup>。Yim 对两个刚性杆和一个柔性杆组成的机器人进行了研究,给出了所谓柔性机器人的逆笛卡儿轨道跟踪控制策略,并讨论了镇定器的设计问题<sup>[23]</sup>。上述方法都在一定程度上改

善了柔性机器人连杆末端的振动。

反馈线性化是另一类常用的方法<sup>[26-29]</sup>。这种方法通过非线性反馈或动态补偿等方式将非线性系统变换成线性系统,然后再按线性系统的理论完成系统的各种控制目标。Wang 等讨论了含单柔杆的多杆机器人的反馈线性化问题<sup>[26],[29]</sup>。结果表明,对于所研究的一类柔性机器人,不能实现输入-状态反馈线性化,但可实现输入-输出反馈线性化。Khorrami 等提出了一种阶段控制方法,能提高系统的控制性能和对参数变化的鲁棒性<sup>[28]</sup>。Vandegrift 等研究了多杆柔性机器人连杆位置与速度的非线性反馈控制问题,控制性能有很大的提高<sup>[29]</sup>。

其他方法还有奇异摄动法和非线性补偿控制等<sup>[30-38]</sup>,这都是基于模型的方法。为了消除模型不确定性及外部扰动等带来的影响,学者们采用了自适应控制、变结构控制等鲁棒控制方法。Lucibello 等对双杆柔性机器人进行了非线性自适应控制研究<sup>[34]</sup>。Madhavan 和 Singh 提出了一种控制双连杆柔性机器人的变结构算法,但未讨论如何消除或抑制变结构控制中的抖振现象<sup>[35]</sup>。Austin 等进一步改善了抖振的问题<sup>[38]</sup>。

智能控制方法由于能根据环境自主地调整控制规律而特别适合于不确定性系统的控制<sup>[39-43]</sup>。由于柔性机器人的动力学模型非常复杂,基于模型的控制方法常因模型不准确而无法获得预期的控制效果。智能控制可克服这些弱点。常见的智能控制方法如模糊控制、神经网络控制和递阶控制等也已用来研究柔性机器人控制,以消除和减弱因动力学模型的误差。Kubica 等提出了一种模糊控制策略,采用 PD 型推理规则和全状态来控制单杆柔性机器人的刚体运动和一阶扰曲振形<sup>[39]</sup>。Moudgal 等采用直接模糊控制和基于规则的专家控制构成双层递阶结构对两连杆柔性机器人进行控制,取得了良好的控制效果<sup>[40]</sup>。

## 1.2 冗余度机器人研究现状

由于冗余度机器人具有的优良特性,国内外许多学者都对之进行了系统而深入的研究,迄今已成为机器人学研究中的一个重要方向。冗余度机器人的突出特点是:对于机器人末端的一个位形,其对应的关节空间解有无穷多,即具有冗余特性。利用冗余特性,可以根据实际需要确定性能指标,从而得

到期望目标下的优化解。因此,从控制的角度来说冗余度机器人研究的核心是冗余优化方法。这包含两个主要问题:优化策略的选择和优化策略的数学计算实现。前者包括优化目标的确立和优化方法的选择;后者包括雅可比矩阵广义逆的求解和优化算法的具体计算实现。围绕这两个主题,人们对冗余度机器人的运动学优化、动力学优化及雅可比矩阵伪逆求解等问题进行了广泛而深入的研究。

### 1.2.1 冗余度机器人优化目标及优化策略

冗余度机器人优化控制方法的基本思路是:首先根据机器人的实际工作需要确定期望的性能指标,即确定优化目标;然后将优化目标变换成以“自运动”向量为自变量的函数式;最后选择合适的计算方法,即优化策略,确定出最优的“自运动”向量。根据这一思路,人们对多种优化目标进行了研究。

冗余度机器人的运动学优化以机器人系统的运动学参数为优化目标。最初,运动学优化围绕提高灵活性、避障、避奇异和限制关节角极限等单目标进行。在灵活性的研究中,Yashicawa通过定义可操作度指标定量描述了机器人灵活性的大小<sup>[44]</sup>;Klein等人对数种有关灵活性的指标进行了比较<sup>[45]</sup>。奇异位形是影响机器人灵活性的重要因素,针对这一问题,Kircanski等人以操作度作为指标对避奇异进行了研究,取得了较好的效果<sup>[46]</sup>。避障是机器人灵活性的重要应用。在避障的研究中,Maciejewski和Khatib提出了势函数法<sup>[47,48]</sup>;Kircanski将势函数法修改为罚函数法<sup>[49]</sup>;Boddy通过对多障碍物时的避障问题的研究,提出了避障的一般方法<sup>[50]</sup>。在避关节角极限的研究中,Liegeois和Zghal建立了避关节角极限的优化指标<sup>[51,52]</sup>;Dubey以梯度法对此指标进行了优化<sup>[53]</sup>;Chan用加权最小范数解与梯度法优化效果进行了对比<sup>[54]</sup>。继单目标优化之后,人们对多目标优化进行了研究。最初,Maciejewski、Fenton、Nakamura等只是把各单目标简单相加<sup>[55,56]</sup>,随后,Cleary和Pamanes引入了指标的权系数,从此开始了对权系数确定的研究<sup>[57,58]</sup>。Nakamura和Walker以子任务优先权的方法确定权系数<sup>[59]</sup>;McGhee以概率统计的方法确定权系数<sup>[60]</sup>;李鲁亚提出子优化度和综合优化度的概念,可实现权系数的实时决定<sup>[61]</sup>。

冗余度机器人的动力学优化以机器人系统的动力学参数为优化目标。动力学优化实现起来远比运动学优化困难,至今仍有很多问题未得到解决。

目前,动力学优化主要围绕对机器人动能和关节力矩的优化展开。Whitney以惯量加权伪逆优化关节速度时,实际上具有动能优化的效果<sup>[62]</sup>。Khatib的研究可实现动能的最小化,对动力学优化做出了开拓性的贡献<sup>[63]</sup>。在对关节力矩的优化中,Hollerbach对关节力矩最小的局部优化控制进行了研究<sup>[64]</sup>;Kazerounian通过拉格朗日乘子法导出了关节力矩最小二乘问题的求解方法<sup>[65]</sup>。

冗余度机器人的运动学和动力学同时优化可使机器人具有更好的性能,但同时优化的问题至今未得到完善的解决。Maciejewski仅分析了动力学与运动学性能之间的关系;Eppinger只定性地提出了动力学优化设计中应考虑的一些准则。除运动学和动力学优化外,位置/力控制优化也得到了较深入的研究,Khatib、Chen、Fisher等的工作具有一定的代表性<sup>[66-68]</sup>。在容错优化控制的研究中,Lewis和Ting等做出了多方面的探索<sup>[69,70]</sup>。

### 1.2.2 冗余度机器人优化算法的实现

优化方法是运筹学的重要组成部分,主要包括线性规划、非线性规划和动态规划等规划方法。对每种规划模型,在解析计算和数值计算方面都已经有了比较成熟的方法可用。但是,目前实用的方法几乎都是基于微分极值原理的梯度投影法。

在冗余度机器人优化算法的实现中,求解雅可比矩阵的广义逆是不可回避的难题,因为矩阵广义逆的求解本身就是一个亟待解决的数学问题。目前,雅可比矩阵广义逆的计算通常由奇异值分解来完成<sup>[71]</sup>。这是十分复杂的计算过程。为简化计算,人们进行了多方面的尝试。Hsia基于级数理论提出了一种快速的递推方法<sup>[72]</sup>;Dubey提出了用分解雅可比矩阵进行计算的方法<sup>[73]</sup>;李鲁亚研究了雅可比矩阵分解的原则<sup>[74]</sup>。刘永超等尝试采用了遗传算法作为优化算法进行机器人运动学逆解<sup>[75]</sup>。Wang等使用反馈神经网络实现了冗余度机器人的运动学逆解<sup>[76]</sup>。

### 1.2.3 柔性冗余度机器人研究现状

前已述及将冗余度机器人和柔性机器人研究结合起来,即研究柔性冗余度机器人具有重要意义。由于冗余度的引入,柔性冗余度机器人具有冗余特性,因而可进行冗余优化控制。这是区别于非冗余度柔性机器人的一个重要



特征。柔性冗余度机器人的优化目标主要在于克服结构柔性造成的振动和跟踪误差等不利影响。这是一个新的研究领域,已有的研究成果还比较少<sup>[77-84]</sup>。

首次对柔性冗余度机器人的冗余特性进行深入研究的是 Nguyen 等,是在 1992 年进行的工作<sup>[78]</sup>。他们的研究表明,冗余特性在很多情况下可用来减轻振动。他们还设计一种闭环控制算法,使机器人在精确跟踪给定轨迹的同时,能够消减柔性引起的振动。这种控制算法实质是通过选择合适的“自运动”,使机器人系统的激振力为零,从而使机器人系统的振动成为自由振动而很快衰减。他们还深入讨论了冗余度数和柔性自由度数之间关系对抑振效果的影响。Nguyen 等的工作为柔性冗余度机器人的控制研究做出了开拓性的贡献。此外, Baillieul 等对具有柔性关节的冗余度机器人进行了研究<sup>[79]</sup>。Kuo 等提出了求解冗余问题时将关节视为扭簧的有限方法(finite method)<sup>[80]</sup>。

国内的岳士岗利用有限元方法进行动力学建模,对柔性冗余度机器人的特性、设计等问题进行了较系统的研究和讨论<sup>[81]</sup>。北京航空航天大学陆震教授领导的课题组在这一领域进行了研究,其中,何广平<sup>[82]</sup>、边宇枢<sup>[83]</sup>、吴立成<sup>[84]</sup>等做出了很多有价值的成果。

### 1.3 空间机器人研究现状

国际上对自由飞行空间机器人的大量研究是在 20 世纪 80 年代初开始的。1983 年的一个 NASA 报告<sup>[85]</sup>首次提出应该建立一种可以在空间自由飞行,完成卫星的补给、修理、捕捉等操作的空间机器人系统,并给出了一个叫做 Telepresence Servicer Unit 的概念设计。之后美国、日本、加拿大、德国等发达国家高度重视该问题,相继拨出专款,建立了一些试验平台,如 MIT 的卫星机器人模拟车、Stanford 大学的双臂空间机器人和日本东京大学的空间机器人系统等,对自由飞行空间机器人的动力学、运动规划、非完整特性、协调控制和轨迹跟踪控制等问题进行了大量的研究<sup>[86,87]</sup>,也取得了许多有价值的成果。

1993,德国成功地实验了世界上第一个遥控操作空间机器人系统——ROTEX,实现了空间站组装、更换零件和捕捉自由飘浮卫星等简单任务。