

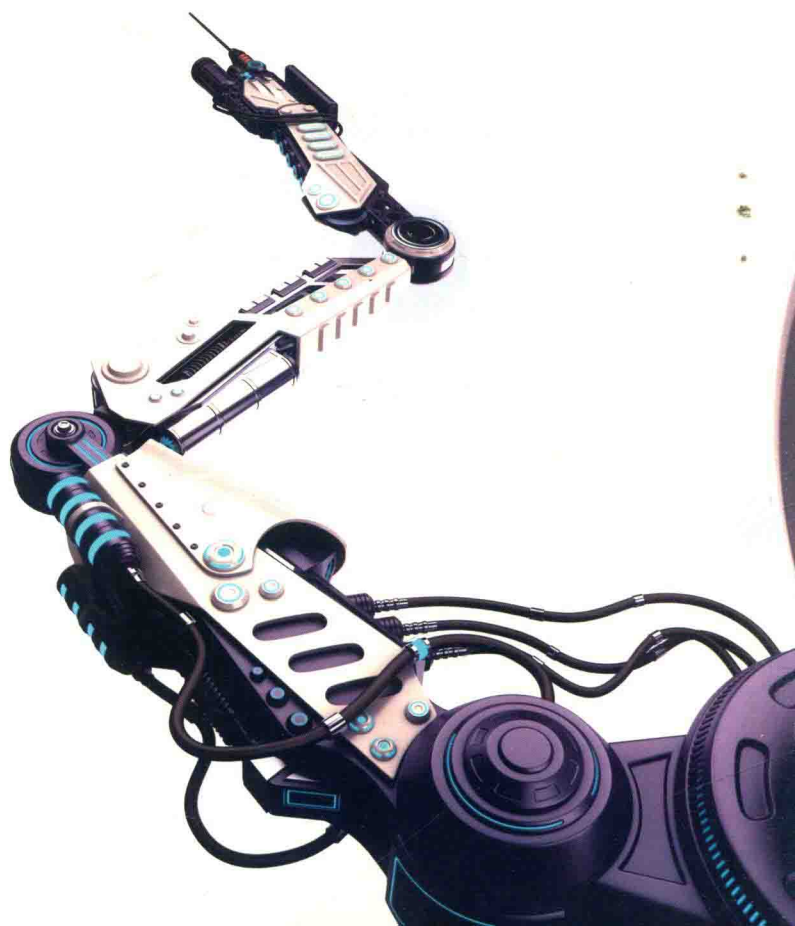


国家新闻出版改革发展项目库入库项目
机器人和人工智能技术丛书
普通高等教育“十三五”规划教材

柔体机器人的动力学 与控制技术

DYNAMICS AND CONTROL TECHNOLOGY
OF FLEXIBLE ROBOT

褚明◎编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



国家新闻出版改革发展项目库入库项目
机器人和人工智能技术丛书
普通高等教育“十三五”规划教材

柔体机器人的动力学 与控制技术

褚 明 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书共分为 12 章,内容涉及柔体机器人的振动模态分析、动力学模型与数值方法、柔性关节的精密控制策略、大负载动力学特性、振动控制方法、接触操作阻抗控制等典型问题的研究,特别地,提出了一种面向软接触操作的柔体机器人新模型,对该类柔体机器人动力学分析和稳定控制的机理进行了新概念和新方法的有益探索。

本书可作为机械工程或控制科学与工程专业的硕博研究生选读教材。

图书在版编目(CIP)数据

柔体机器人的动力学与控制技术 / 褚明编著. -- 北京:北京邮电大学出版社,2019.8
ISBN 978-7-5635-5786-8

I. ①柔… II. ①褚… III. ①柔性机器人—机器人技术 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 162026 号

书 名:柔体机器人的动力学与控制技术

作 者:褚 明

责任编辑:满志文 穆菁菁

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京玺诚印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:11.75

字 数:289 千字

版 次:2019 年 8 月第 1 版 2019 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5786-8

定 价:45.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

人类对太空探索的不断深入,使空间任务越来越多;而太空环境的特殊性和危险性,使很多空间任务不能完全依靠宇航员完成。空间机器人具有适应太空恶劣作业环境的能力,采用机器人协助或代替宇航员完成一些太空作业在经济性和安全性两方面都具有现实意义,已成为当前空间技术领域的重要研究方向。“善攻者动于九天之上”,自从第一颗人造卫星于1957年10月成功发射,便开创了人类太空时代的新篇章。可以说,当前的太空正在成为新的兵家必争之地,这就决定了空间机器人在国防领域中具有极其重要的战略地位。

近年来,美、俄、日等国都在空间机器人研究方面持续发力。2011年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)启动了“凤凰计划”太空技术验证项目,目标就是利用轨道航天器抓捕地球静止轨道上的退役卫星,回收利用其可用部件,并在轨组装生成具有完备功能的新卫星。显而易见,这一技术将对美军未来的太空作战行动产生全面而深远的影响。它不仅能够使美军在未来的太空站中,对遭敌方打击而摧毁的卫星进行快速抢修和替换,同时也能显著抵消他国卫星武器的威慑效力。我国对载人航天工程项目的研发也已持续投入20余年,带动了机械、控制、遥感、信息与通信等学科基础理论的深入研究和关键技术突破,按照国家部署的航天“三步走”规划,将在2022年前后建成在轨运营10年以上的自主空间站,届时,空间机器人将在该航天工程建设中发挥不可替代的重要作用。

当前,航天工程中应用的操作型空间机器人以具有轻质大跨度特征的柔体机械臂为典型代表,研究该类多柔体机器人系统的动力学与控制问题是实现空间机器人高效、高精度操作的关键。本书以空间环境下的柔体机器人为研究对象,对其动力学特性和相关的主动控制策略展开了深入的分析 and 研究。全书共分为12章,内容涉及柔体机器人的振动模态分析、动力学模型与数值方法、柔性关节的精密控制策略、大负载动力学特性、振动控制方法、接触操作阻抗控制等典型问题的研究。特别地,提出了一种面向软接触操作的柔体机器人新模型,对该类柔体机器人动力学分析和稳定控制的机理进行了新概念和新方法的有益探索。

本书的所有研究成果来源于国家自然科学基金的持续资助和支持,所述的理论方法和应用均已通过了数值仿真系统的验证,某些研究成果已经在相关的型号装备上进行了实验验证。因此,本书关于柔体机器人动力学与控制技术的研究成果对于机械系统动力学和自动控制理论的发展具有深远的学术借鉴意义,同时,对于拓展空间机器人的操控能力,为未来服务于在轨维修、在轨装配、在轨碎片清除等操作任务提供了技术支撑。书中难免有一些不足之处,殷切地欢迎广大读者批评指正。

褚 明
于北京邮电大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 柔体机器人系统的应用现状	1
1.3 柔体机器人关键技术研究现状	4
1.3.1 柔体机器人的动力学关键技术	4
1.3.2 柔体机器人的主动控制	6
1.4 柔体机器人的研究价值和学术意义	7
第 2 章 柔体机器人的刚/柔/控耦合模态特性	8
2.1 引言	8
2.2 柔体机器人的动力学/控制器耦合模态分析	9
2.2.1 柔性关节/柔性臂杆系统的力学模型	9
2.2.2 关节控制器作用下的反馈约束特性	10
2.2.3 动态约束的复杂边界条件	10
2.2.4 频域内的模态分析	11
2.2.5 状态空间求解的复模态法	13
2.2.6 数值仿真与分析	16
2.3 柔体机器人的刚/柔耦合模态分析	19
2.3.1 大范围刚体运动时的模态分析	19
2.3.2 数值仿真与分析	20
2.4 多自由度柔体机器人的有限元模态分析	21
2.4.1 虚拟样机技术	21
2.4.2 多柔体系统的有限元分析	22
2.4.3 某型多自由度柔体机器人的模态分析仿真	24
2.5 本章小结	26
第 3 章 柔体机器人的动力学方程与数值方法	27
3.1 引言	27
3.2 多柔体系统动力学	28
3.2.1 柔体机器人刚/柔/控耦合建模的变分原理	28

3.2.2	单连杆大柔度机器人的动力学模型	34
3.2.3	双连杆大柔度机器人的动力学模型	35
3.3	柔体机器人 stiff 微分方程的数值方法	37
3.3.1	拉氏空间、哈氏空间与状态空间	37
3.3.2	闭环状态反馈 stiff 方程的 PIM 法	40
3.3.3	柔体机器人微分方程 PIM 法的数值实验	41
3.4	数值仿真与分析	45
3.5	本章小结	48
第 4 章	柔性关节摩擦和不确定补偿的轨迹控制	49
4.1	引言	49
4.2	柔性关节的动力学模型	50
4.2.1	摩擦环节与预测模型	50
4.2.2	柔性关节的标称力学模型	52
4.2.3	柔性关节的动态不确定力学模型	53
4.3	柔性关节摩擦和不确定项补偿的高精度轨迹控制	54
4.3.1	级联系统的反演鲁棒控制	54
4.3.2	小波神经网络的结构设计	56
4.3.3	动态不确定柔性关节的小波神经—鲁棒复合控制	59
4.3.4	稳定性分析	65
4.4	数值仿真与分析	66
4.5	本章小结	69
第 5 章	柔体机器人的振动主动控制	70
5.1	引言	70
5.2	微分几何反馈线性化	71
5.2.1	光滑函数、向量场和微分同胚	71
5.2.2	李导数及其相对阶	72
5.2.3	单输入—单输出系统的反馈线性化	73
5.2.4	多输入—多输出系统的反馈线性化	76
5.3	柔体机器人反馈观测的稳定性分析	77
5.3.1	单连杆柔性臂的反馈线性化和稳定性	77
5.3.2	双连杆柔性臂的稳定反馈观测器设计	80
5.4	柔体机器人的全局终端滑模振动鲁棒控制	82
5.5	数值仿真与分析	85
5.6	本章小结	87
第 6 章	大负载柔体机器人的动力学模型	88
6.1	引言	88

6.2 Kane 方法	88
6.2.1 广义速率、偏速度和偏角速度	88
6.2.2 Kane 方程的建立	89
6.3 大负载单柔杆的弯曲振动模态分析	89
6.4 大负载单柔杆的运动学分析	95
6.5 大负载单柔杆的动力学建模	96
6.5.1 广义速率、偏速度和偏角速度	96
6.5.2 动力学方程	97
6.6 本章小结	101
第 7 章 大负载柔体机器人的振动控制	102
7.1 引言	102
7.2 基于奇异摄动的系统分解	102
7.3 滑模变结构控制器设计	103
7.3.1 滑模变结构控制	103
7.3.2 滑模变结构控制器设计	104
7.3.3 抖振问题	105
7.4 最优控制器设计	106
7.4.1 最优控制的数学描述	106
7.5 大负载柔体机器人控制算法	107
7.5.1 混合控制方法	107
7.5.2 状态反馈控制设计	114
7.6 本章小结	118
第 8 章 柔体机器人接触操作的阻抗控制	119
8.1 引言	119
8.2 阻抗控制算法原理	119
8.2.1 阻抗控制模型	119
8.2.2 目标控制参数性能分析	120
8.3 柔体机器人阻抗控制算法	122
8.4 数值仿真	123
8.4.1 运动空间下的轨迹跟踪	123
8.4.2 接触操作时固定点的力控制	126
8.4.3 接触操作时的接触力控制	126
8.5 本章小结	128
第 9 章 软接触柔体机器人的关节结构设计	129
9.1 引言	129
9.2 关节功能需求分析	129

9.3	关节阻尼缓冲方法	131
9.3.1	磁流变液	131
9.3.2	阻尼缓冲方法	132
9.4	关节方案设计	132
9.4.1	驱动传动机构设计	133
9.4.2	可控柔性组件设计	135
9.4.3	可控柔性组件	136
9.5	本章小结	137
第 10 章	软接触柔体机器人的动力学分析	138
10.1	引言	138
10.2	软接触阻尼缓冲任务分析与设计	138
10.3	软接触单关节动力学特性分析	139
10.3.1	z 轴直线方向受接触力后的动力学仿真	139
10.3.2	z 轴直线和旋转方向受接触力后动力学仿真	141
10.3.3	空间六维方向动力学仿真	142
10.4	软接触柔体机器人的动力学特性仿真分析	145
10.5	本章小结	148
第 11 章	软接触柔体机器人的动力学模型	150
11.1	引言	150
11.2	基于 Kane 方法的质点系和刚体系方程	150
11.2.1	质点系下的 Kane 方程	150
11.2.2	刚体系统的 Kane 方程	151
11.3	具有可控阻尼的柔体机器人模型	152
11.4	运动学分析	153
11.4.1	广义坐标	153
11.4.2	变换矩阵	154
11.4.3	偏角速度及其导数	154
11.4.4	偏线速度及其导数	155
11.4.5	柔体机器人的运动学方程	156
11.5	动力学分析	157
11.5.1	刚体 k 的受力分析	157
11.5.2	等效主动力(矩)	158
11.5.3	等效惯性力(矩)	159
11.5.4	柔体机器人的动力学方程	159
11.6	算例仿真	159
11.7	本章小结	161

第 12 章 软接触柔体机器人的振动控制	163
12.1 引言	163
12.2 微粒群优化算法	163
12.3 基于微粒群优化的软接触柔体机器人抑振策略	167
12.3.1 目标函数的确定	167
12.3.2 算法及参数选择	167
12.3.3 算法终止条件	168
12.3.4 控制具体流程	168
12.4 软接触柔体机器人的 PID 振动控制	169
12.4.1 控制器的设计	169
12.4.2 参数选择	169
12.5 两种控制方案的仿真对比	170
12.6 本章小结	176
参考文献	177

第1章 绪 论

1.1 引言

世界航天事业的迅速发展使人类对太空的探索不断深入,现在大量的空间任务需要完成,如空间探测、加工、装配、维修,空间站的建造,科学实验载荷的照料等。太空环境具有微重力、高真空、高温差、强辐射、照明差等特殊特性,这使宇航员的舱外作业存在高度的危险性,因此,在设计载人航天系统时,要时刻考虑宇航员的安全问题,这就不可避免要付出昂贵的费用。例如,美国的“自由号”空间站耗资几百亿美元,其中的生命保障系统、居住系统和宇航员舱外活动系统三部分的研制费用占总花费的 $1/5$,其功耗占总功耗的 30% 左右,同时,每天每位宇航员要花费 50 万~ 100 万美元。另外,美国的阿波罗飞行计划共耗资 600 亿美元。而前苏联在航天领域的投资不低于美国,更为重要和惨痛的代价是两国都发生过宇航员罹难的事。历史的经验教训充分说明了载人航天的高风险和高投入,完全有必要考虑利用空间机器人代替宇航员进行太空操作。空间机械臂是当前太空探索活动中广泛应用的一种空间机器人,具有适应太空恶劣作业环境的能力,因此,采用空间机械臂协助或代替宇航员完成一些太空作业在经济性和安全性两方面都具有现实意义。

与地面机械臂相比,空间机械臂具有微重力、大跨度、轻质量、大自重比和低频低阻尼等柔性特征,是柔体机器人在工程领域的典型应用案例,对柔体机器人关键技术的研究已经成为空间技术研究领域内的一个重要的研究方向。柔体机器人系统关节控制器的设计必须满足实现关节精确定位的同时快速抑制臂杆弹性振动的双重要求。对于靠关节驱动完成臂端定位的多柔体系统——空间机械臂,其非最小相位特征显著,且系统在运动过程中的构型和操作负载呈现时变和不确定性,而关节控制器对臂杆的动态反馈约束和大范围刚体运动对臂杆振动模态的反作用,更是使系统呈现出典型意义上的“刚/柔/控耦合”特征,其各项动力参数难以确定,这些问题的出现严重破坏了控制器的有效性,导致系统运动失稳。因此,对柔体机器人的动力学特性进行合理分析并提出有效的控制器设计方案不仅成为当今动力学和控制理论的挑战性课题,也成为柔体机器人顺利实现工程应用的关键技术问题。

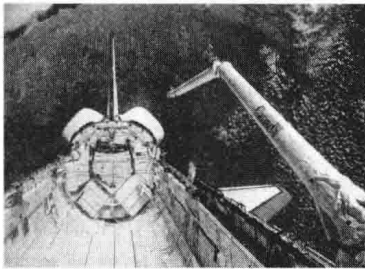
1.2 柔体机器人系统的应用现状

早在1976年,美国的“观察者-III”航天器上的机械手在地面的遥控操作下对月球土壤

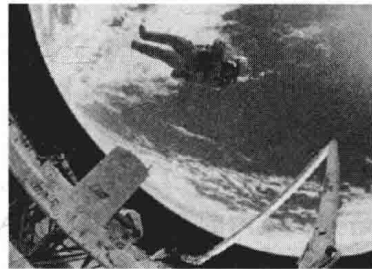
进行了标本采集。同年,其发射的月球车上携带的遥控机械手也曾对月球表面进行过探测。1982年,美国又陆续发射了“海盗-I”和“海盗-II”火星探测器利用机械臂采集并挖掘火星的岩石和土壤样品,以寻求生命迹象。苏联发射的“月球-16”和“登月者”月球考察机器人,其上面安装的空间机械臂在遥控操作时具有一定的自主功能,曾成功地完成了月面采样等科学考察任务。另外,苏联宇航员还在空间机械臂的协助下完成了飞行器的对接任务和燃料加注任务。

鉴于空间机器人的优良表现,美国在研究永久性空间站的同时也投入了巨资和人力研发供空间站使用的空间机械臂。1984年5月,NASA向美国国会提交的一份题为《用于空间站和国民经济的高级自动化和机器人技术》(Advanced Automation and Robotics Technology for the Space Station and the US Economy)的报告,使各个国家充分认识到发展自动化和机器人技术(AR)在空间活动中的重要性。近二十多年来,美国、俄罗斯(包括前苏联)、欧空局、日本等国家和组织对空间机械臂开展了广泛和深入的研究,围绕着运动学与路径规划、动力学与控制算法、地面设备与系统的建设等课题做了大量的工作,其发展概况综述如下。

加拿大的斯帕(Spar)公司先后研制了“Canada-1”(图1-1)和“Canada-2”(图1-2)两套空间柔性机械臂。其中,1号臂安装于美国的航天飞机上,多次随航天飞机执行太空作业任务。2001年4月,它协助完成了2号臂在国际空间站上的安装。其相关参数:长度15.2 m,直径38 cm,总质量410 kg。在无荷载条件下,其移动速度可达600 mm/s;有荷载时,其移动速度60 mm/s,无荷载时能移动到距目标点的精度范围为152 mm,操作荷载质量可达30 000 kg。其材料由强度极高的碳纤维合成材料制造,外面裹以凯夫纤维(质地牢固质量轻的合成纤维),起到缓冲保护作用。



(a) “Canada-1”实物图



(b) “Canada-1”协助航天员操作

图1-1 “Canada-1”空间机器人

“Canada-2”空间机器人用于国际空间站上的移动服务系统MMS,安装在站上桁架的基座装置上,并可沿该桁架移动。其最初设计的目的是在航天飞机不能自行与空间站对接时依靠机械臂将航天飞机拉到空间站旁。其相关参数:长度17.6 m,质量936 kg,负荷时的移动速度为6 mm/s,空载时的移动速度为600 mm/s,移动到距目标点的精度范围6.4 mm,可操作质量达100 t、尺寸为18.3 m×4.6 m的有效载荷,其材料由高强度的铝、不锈钢和环氧石墨复合材料制造。

尽管“Canada-2”具有相当的灵活性,但仍然无法照顾到空间站的每个角落。为此,欧空局以法俄两国为主要力量又设计了一个“European Robotic Arm”(ERA)空间机器人系统并安装到空间站上,如图1-3所示。ERA伸展时的总长度为11 m,在被安装到国际空间站上

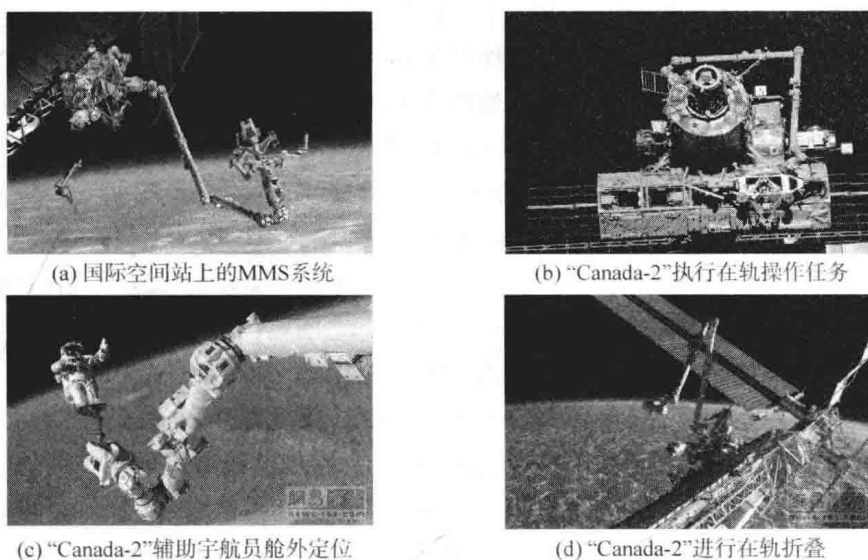


图 1-2 “Canada-2”空间机器人

后,它将能够搬运最重达 8 t 的物资并可对空间站的外表面进行监测。此外,ERA 上还装备有摄像机,可以准确地将执行太空行走任务的宇航员送往指定区域。

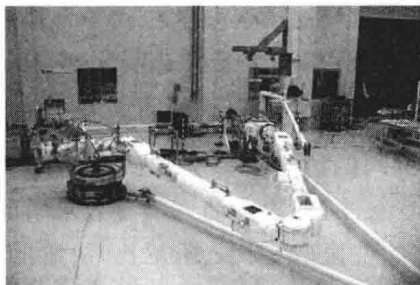


图 1-3 欧空局 ERA 机械臂平台

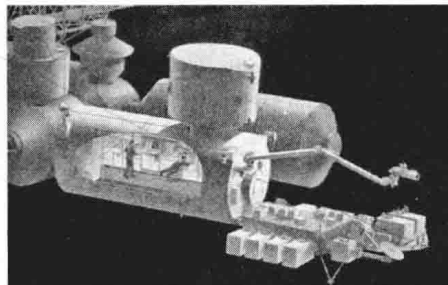


图 1-4 日本实验舱机械臂系统

日本安装于国际空间站上的实验舱(图 1-4)由接近大型客车大小的圆筒形后勤储藏室(长 11.2 m,宽 4.4 m,重 15.2 t)、实验室(3.9 m×4.4 m,重 4.2 t)和两个长度分别为 10 m 和 1.9 m 的空间机械臂以及舱外实验平台(4 m×5.6 m×5 m,重 4.2 t)共四部分组成,预计使用寿命 10 年。远程操纵系统(RMS)由两个机械臂组成,主要用于保障舱外设施实验,可进行部件在轨更换任务。主机机械臂长 9.9 m,能够处理重达 6.4 t 的大件物体,主臂末端附有小型机械臂长 1.9 m,用来处理小物件。机械臂上装有电视摄像机,航天员可以从舱内监视控制操作过程。每个机械臂有 6 个关节,可模拟人体胳膊的运动。空间机械臂专门用来将压力舱内的实验载荷(设计尺寸长、宽、高分别为 1.85 m、0.8 m、1.0 m,质量不超过 500 kg)或硬件穿过科研气闸与舱外设施和实验后勤舱的进行调换,更换维修“希望”号并处理轨道更换单元。

我国在 2008 年已成功完成了宇航员的出舱任务,目前正在建设自主的空间站系统(图 1-5)。空间机器人将在太空活动中发挥重要的作用,因此,对柔体机器人各项关键技术的研究成果会大大推动我国宇航事业的发展。

分析如图 1-1~图 1-4 所示的各个空间机器人系统,可以发现它们具有相同的特点:为提高操作的灵活性必须设计多自由度的构型,发射时的质量要求使得空间机械臂必须选用轻质材料,太空大范围操作的要求使得臂杆具有大跨度特点,操作负载的大惯量要求关节处须安装减速器。空间机械臂具有的这些结构特点也随之带来了其特殊的动力学性质:首先,关节控制器的驱动力矩使臂杆根部处于时变的反馈约束状态下,导致臂杆边界的静不定问题,引起模态参数的不确定性;其次,臂杆的大范围刚性运动与自身弹性振动相互耦合,两者互为反作用,使最终的定位精度难以保证;再次,臂杆的弹性变形效应使得靠关节驱动完成机械臂末端定位的系统传递函数呈现非最小相位特征;最后,系统受到各种外界不确定干扰(如多变的负载)和非线性特性(如关节处的间隙、摩擦)的影响,鲁棒稳定性变差。由此,引出了柔体机器人系统的动力学分析和控制器设计问题。以下对其展开详细的论述。

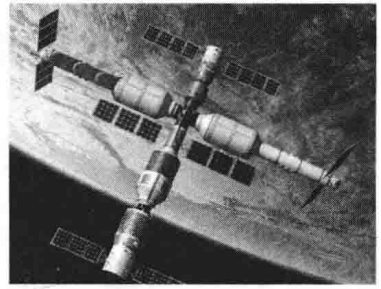


图 1-5 我国空间站模拟图

1.3 柔体机器人关键技术研究现状

1.3.1 柔体机器人的动力学关键技术

约束是动力学建模的基本依据,对同一结构选择不同的约束类型会导致动力学解的巨大差异,能否确切地描述结构的约束类型和相应的边界条件,关系到动力学参数求解的准确性。众所周知,机械结构的振动特性是由其模态参数(如主振型、频率、阻尼比)决定的,而模态参数不仅取决于机构的构型、质量分布等因素,更重要的是其边界约束条件。

柔体机器人是典型的闭环反馈伺服驱动系统,其历经大范围运动时的动态特性是由柔性机构的机械刚度和阻尼,以及由控制器的控制刚度和阻尼相互耦合的等效刚度和等效阻尼决定的,它们对于确定臂杆的边界约束条件和相应弹性变形量的离散化描述起到了决定性作用,最终也影响到机械臂系统动力学模型的合理性和可靠性。Cekintunt 专门研究了定轴转动单连杆柔性臂在控制器闭环反馈作用下的约束类型问题,认为采用 clamped-mass 模型比 pinned-mass 模型更接近实际,但必须使得驱动关节的控制刚度足够大。一直从事多柔体系统动力学研究的 Shabana 也注意到了力学系统与控制器的相互作用,他采用带 Lagrange 乘子的运动微分方程结合有限元法,分析了控制器作用下不同的约束形式对系统响应的影响。对于实际的伺服系统,考虑到运动平稳性和避免自激等问题,伺服增益一般不能太大,这使得控制器刚度要小于(甚至远远小于)机械刚度,从而导致系统的低阶固有频率下降。张铁民将带有反馈控制的柔性臂边界条件视为铰支弹簧,研究了反馈增益与柔性臂固有频率的变化规律,并通过一系列实验结果对理论分析进行了验证。研究表明:控制器增益对柔性臂低阶频率及边界条件的确定具有极大的影响。阎绍泽等对直接在电机轴上固连的柔性臂的动力特性进行了实验研究,发现电机上电前后臂杆的基频相差 23.4%。然而,当前的文献在研究柔性臂的动力学建模时,却几乎都将臂作为静定梁模型处理,相应的离散化

振型和结构频率也按照定边界条件确定,而没有涉及控制器对机构特性的影响,这样建立的动力学模型与真实情形之间存在很大差距,所得结果必然也不能反映系统的真实特性。

由此可见,当前对柔体机器人的动力学分析大多仅考虑机械特性,而对系统动力响应产生重要影响的控制器耦合动力学特性的研究文献不多,而且很少有学者对其进行合理的建模和分析。伺服机械系统的动力学分析应研究运动基础上的机械特性,此时的动力学方程必然同时包含了伺服控制特性参数和机械特性参数。因此,统一考虑控制器特性和机械特性对柔体机器人系统进行分析,该方面内容的研究有待于深入开展。

对柔体机器人进行动力学建模时,首先需要对系统的弹性部分进行描述,然后再结合动力微分方程的推导方法完成对整个系统的刚柔耦合动力学建模。通常将弹性关节作为集中参数处理,简化为具有一定刚度的线性扭簧,臂杆按照分布参数处理,将弹性变形进行模态离散化描述。这种建模方法带来的问题是所得动力学方程既包含慢变刚性运动和快变弹性振动的刚柔耦合项,又包含了关节高频振动和臂杆低频振动的柔柔耦合项,尤其是双连杆结构的机械臂还包含了臂杆与臂杆振动量的耦合项,因此,方程的这种特殊非线性结构形式引起了相应数值求解的极大困难,称之为“stiff 问题”。Stiff 数值结果不理想的主要原因是每步计算的舍入误差和截断误差,以及这些误差在以后计算里的传播,前者由积分步长决定,而后者与算法的稳定性有关。对于引入闭环反馈控制律的动力学方程,由于方程右端的控制项与系统的反馈状态变量时刻相关,因此属于时变非线性 stiff 方程,解决该类方程的高精度数值求解问题是获得机械臂系统正确的动力响应的前提。

传统 Lagrange 体系下的高精度数值积分算法如隐式 Runge-Kutta(RK)法、Adams 法、Newmark 法、Wilson - θ 法等从本质上讲并未脱离欧氏空间的范畴,其向后差分的递推格式相当于在系统上附加了耗散力,形成了算法阻尼,因此仍然无法适应长时间的积分历程,尤其对于机械臂这种多柔体旋转系统更容易出现违约情况或难以求得其准确的数值响应。Gear 法通常被认为是求解刚性微分方程的经典算法,但系统中存在高频分量时使得系统矩阵的某些特征值接近虚轴,算法失效。钟万勰提出的精细积分法——PIM 法,摒弃了差分类近似算法的全量式积分,代之以增量式积分,在 Hamilton 体系下实现了对一阶 stiff 微分方程的精确数值求解,其要点是利用指数矩阵的加法定理,采用了 2^N 类算法,可得到计算机精度范围内的精确解。孔向东、钟万勰采用 PIM 法求解了给定开环驱动力矩的条件下机械臂的动力学方程,并与 Gill 法做了比较。结果表明,PIM 法不但允许大步长积分,而且精度高、无条件稳定,所得结果不随仿真时间的延长而发散,这是 Gill 法不能实现的。邓子辰和郑涣军等利用精细积分法研究了不同伸展规律下悬臂结构的动态特征,表明了精细积分法在求解柔体动力学方程中的有效性。为解决传统 PIM 法在求解非齐次动力方程时,Duhamel 项的近似计算需要矩阵求逆的问题,谭述君、钟万勰又提出了不需矩阵求逆运算的多项式、正余弦、指数函数等特殊形式非齐次项的精细积分方法。针对同样的问题,顾元宪等采用增维的方法将非齐次项也看作动力方程的状态变量,将其纳入到求解中去,从而将非齐次的动力方程化为齐次方程,避免了矩阵的求逆运算,但所得新方程的维数是原来的两倍,计算量比较大。李金桥、于建华提出的算法将非齐次项在所论时刻展开成 Taylor 级数形式,对状态方程直接积分,不需对状态矩阵求逆。

对于柔体机器人这样的典型闭环反馈式非齐次动力方程,其非保守项与当前的状态反馈变量相关,且不同的控制律具有不同的表达形式,这样就不能通过普遍的线性化或级数展

开等方式进行 Duhamel 项的求解。因此,发展一种适于求解实时状态反馈动力学方程的 PIM 法,是解决机械臂系统闭环控制仿真的关键。

1.3.2 柔体机器人的主动控制

对于执行特定操作任务的柔体机器人,其控制策略需要解决两方面的问题,即完成标称轨迹的跟踪和实现弹性振动的抑制。其中前者与机器人的逆运动学规划的位置控制相关,后者需要从动力学角度进行振动控制,两者是相互结合在一起的。目前,该领域的研究成果不断涌现,主要包括经典 PD 控制、非线性反馈控制、自适应控制、变结构控制、智能控制、鲁棒控制等各种算法。下面分类综述其研究现状。

PD 控制是 PID 控制的一种形式,也是最早发展起来的控制策略之一,它将控制偏差通过比例 P、微分 D 的线性组合构成控制律。Yigit 研究了独立关节 PD 控制的鲁棒性,表明独立关节 PD 控制的稳定性不依赖于系统参数,而需要非离散化或线性化的运动方程来保证。由于 PD 控制是建立在柔体机器人线性化模型的基础上,在实施过程中往往对系统参数的变化和扰动很敏感,效果并不理想。因此,在柔性机械臂系统的控制应用中,一般还要结合其他控制方法组成复合控制律,以改善 PID 控制器性能。

反馈线性化是通过引入微分几何方法,利用状态空间的坐标变换和控制变换使得非线性系统的输入-状态映射或输入-输出映射反馈等价于线性系统,并应用线性系统控制理论设计各种控制目标的理论与方法。柔体机器人是一类高度非线性的系统,对它进行反馈线性化控制时可遵循以下步骤:

- (1) 将动力学模型简化为仿射非线性模型;
- (2) 寻找可反馈线性化的条件,并判别之;
- (3) 若满足条件,则可设计相应的动态反馈控制器,实现对柔性机械臂的反馈线性化控制。

奇异摄动法用于柔性机器人控制的思路之一是直接利用奇异摄动法给出的一种复合控制方式,忽略快变量以降低系统阶数,然后引入边界层校正来提高近似程度,这实际上相当于在两个时间尺度范围内分别独立完成设计任务。其中的慢子系统等效为刚性连杆机器人系统,因而可采用成熟的计算力矩等方法进行控制;而快子系统则由相应的快控制器进行镇定。对柔性机械臂这类动态系统而言,这种分解实际上就是一种时标的分解。张奇志等采用奇异摄动法将单杆柔性机械臂分解为慢变(刚性)和快变(弹性)两个子系统,前者采用 I/O 反馈线性化控制,而后者采用预测控制,这样设计的混合控制器避免了逆动力学和 I/O 反馈线性化遇到的零动力学不稳定问题。另一思路是利用积分流形的思想,将系统的非线性偏积分-微分方程模型中包含挠度和控制量的各项展成小参数 ϵ (充分小) 的幂级数并忽略所有 ϵ^2 以上各项,从而得到真实流形的一个精确逼近,再据此设计慢变控制策略和快变控制策略。利用奇异摄动法得到的慢模型,只代表刚性机械臂的动力学,而利用积分流形方法得到的慢子系统模型不仅包括了刚性臂的动力学,而且表示了弹性变形对刚体运动的影响,积分流形法很方便地把高频柔性模态的影响加入到修正模型中去。然而,对于一个给定的非线性系统,往往难以找出其精确流形,虽然通过线性化可得到流形的近似解,但精度要求越高其控制越难实现。

变结构控制是一种不连续的反馈控制方式,其中滑模控制是最常用的变结构控制,其特

点是在切换面上具有滑动方式,对参数变化和扰动不敏感,具有很强的鲁棒特性。变结构控制器的设计不需要机械臂系统的精确动态模型,模型参数的边界足以构造一个控制器,而且易于工程实现。变结构控制本质上是一种开关控制,在滑动模曲面上,系统达到平衡位置后并非稳定在零状态,而是在零位置附近不断地来回切换,因此该过程中会产生抖振现象。而关节处的高频抖振容易引发柔性机械臂的高频未建模动态,如果不加以抑制或消除,就可引起系统最终趋向发散,导致失稳,这个弊端也是阻碍滑模变结构发展的重要原因。

智能控制是基于知识的专家系统、模糊控制、神经网络控制及信息论等的鲁棒控制方法,主要应用于参数不确定性和结构不确定性等复杂的系统及具有较大时间常数和较大纯滞后的线性系统与确定性系统。由于智能控制研究的主要目标不是被控对象,而是控制器本身,研究的工具不是纯数学解析方法,而是定性定量相结合,数学解析与直接推理相结合的工程方法。柔性机械臂属于无穷维非线性分布参数系统,建模误差、参数不确定性和外部扰动等都将使其轨迹跟踪、位置/力控制等行为受到影响。应用智能控制理论研究柔性机械臂的鲁棒控制,可消除和减弱因动力学建模不准确所带来的控制误差。在柔体机器人参数不确定的情况下,用不基于模型的智能控制策略,将模糊控制、神经网络、自适应控制、变结构控制以及遗传算法等理论与方法融合,利用神经网络对模糊规则的结构和参数同时进行学习和训练,同时在学习与训练过程中引入遗传算法进行优化,再对模糊控制器的结构进行重新设计,以使柔性机器人的输出具有较好的鲁棒性、收敛性和稳定性等。近年来,神经网络、遗传算法等新型智能控制方法深入研究为解决柔性机器人控制中存在的一些问题提供了新的途径。

1.4 柔体机器人的研究价值和学术意义

空间技术是一个国家综合实力的体现,“神舟”飞船的成功试验标志着我国空间技术迈上了一个新的台阶,空间机器人将在太空探索中发挥重要的作用。因此,对柔体机器人的动力学特性和控制策略开展研究将极大地推动我国航天事业的可持续发展,其相应的理论成果和技术成果也会成为我国自然科学和工程建设的重要积累。

第2章 柔体机器人的刚/柔/控耦合模态特性

2.1 引言

柔体机器人的主要组成单元为关节和臂杆,系统的工作方式为:由各个关节控制器提供驱动力矩,使安装于关节输出轴端的臂杆绕关节中心轴旋转,根据不同的操作任务,可以在关节空间或笛卡儿空间内对机器人进行运动学规划,最终实现机器人末端的精确定位和对预定轨迹的跟踪。在操作过程中,处于运行状态的柔体机器人表现出如下特有的动力学性质:

首先,机器人在执行大负载和大惯量的操作任务时会产生大自重比,这使得关节处谐波减速器或行星齿轮减速器的柔性扭转变形效应明显,该扭转变形使臂杆根部处于弹性约束的边界条件下;

其次,关节控制器在进行位置跟踪时,将在各个规定的离散平衡位置附近对定位偏差进行反馈调节,因此,臂杆根部受到控制器产生的反馈约束力矩作用,具体表现为机械特性和电气特性相互作用的动力学/控制器耦合效应,这必将使臂杆的振动模态表现出不同于经典振动理论的特性;

再次,臂杆采用轻质材料并配以大跨度的尺寸设计,使臂杆自身在惯性激振力作用下的弹性振动效应不容忽视,并在运行过程中表现出大范围刚性运动叠加自身弹性振动的刚/柔耦合动力特性,且二者之间互为反作用;

最后,柔体机器人为多活动部件系统,在执行操作任务的过程中会处于不同的位姿和构型,此时,系统的模态特性呈现出时变和不确定性。

本章的主要内容和目标是:以典型柔性关节/柔性臂杆系统为研究对象,分析存在控制器反馈约束的复杂边界条件,建立臂杆的动力学/控制器耦合模态模型,并基于复模态理论求解臂杆在动平衡位置附近的模态参数;研究做定轴转动的柔性梁模型,建立刚/柔耦合模态模型,求解大范围刚性运动反作用于臂杆自身的弹性振动后,臂杆在运行过程中的模态特性参数;最后,对以上两种模态模型进行数值仿真实验以验证所建模型的有效性。特别地,针对由柔性关节和柔性臂杆组成的某型多自由度空间机械臂系统,由于常规的封闭解析法已难以适用于求解如此复杂的多柔体系统,进而借助有限元分析方法在 MSC. Patran/Nastran 软件环境下进行模态求解,得到在弹性边界约束和不同位姿下机械臂的模态参数。