

★ ★ ★ ★ ★
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程

制造强国建设

空间机器人系列

Modeling, Planning and Control of Space Manipulators

空间机械臂 建模、规划与控制

陈钢 著

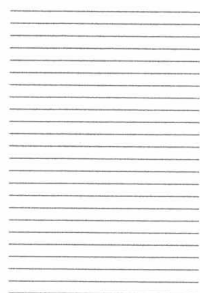
★ ★ ★ ★ ★
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
制造强国建设

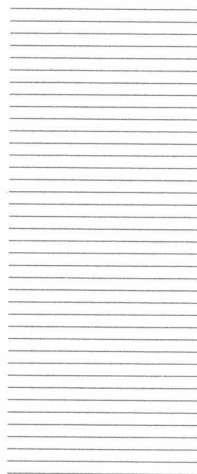
空间机器人系列



空间机械臂 建模、规划与控制

Modeling, Planning and Control of
Space Manipulators

陈钢 著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

空间机械臂建模、规划与控制 / 陈钢著. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2019.9
国之重器出版工程. 空间机器人系列
ISBN 978-7-115-51914-6

I. ①空… II. ①陈… III. ①空间机械臂—研究
IV. ①TP242.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第178954号

内 容 提 要

本书基于作者多年来承担航天领域重大项目及其他国家级项目中取得的研究成果,对空间机械臂建模、规划及控制的相关基本理论和方法进行了系统深入的论述:首先回顾了空间机械臂发展现状及涉及的关键技术,然后介绍了空间机械臂运动学及动力学的建模方法,并在此基础上对空间机械臂任务规划、路径规划、轨迹优化的基本理论及其在多种任务需求下的具体应用进行了详细介绍,最后在控制层面对空间机械臂接触碰撞控制以及柔顺控制进行了阐述。书中的理论方法紧密结合实际,可用于解决空间机械臂目标捕获、在轨组装与服务、星表样品采集等任务中涉及的空间机械臂技术问题。

本书既可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为从事空间机器人技术研究及应用的科技工作者的参考书。

-
- ◆ 著 陈 钢
责任编辑 刘盛平
责任印制 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
固安县铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 720×1000 1/16
印张: 25 2019年9月第1版
字数: 462千字 2019年9月河北第1次印刷
-

定价: 128.00 元

读者服务热线: (010)81055552 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



前 言

随着人类对太空探索的不断深入，空间机械臂在航天领域中扮演的角色越来越重要。然而，恶劣的空间环境和繁重复杂的操作任务也对空间机械臂性能提出了越来越高的要求。为实现空间机械臂的可靠稳定运行，确保操作任务的顺利执行，开展空间机械臂规划与控制技术的研究对我国载人航天、深空探测等国家科技重大专项任务至关重要。

规划与控制技术是保障空间机械臂长期安全可靠运行的基础，对于提升空间机械臂运行安全性及太空作业效率具有重要意义。在空间机械臂执行操作任务时，需规划与控制空间机械臂的运动规律及操作过程中的作用力与作用力矩变化，此时空间机械臂运动学与动力学建模问题成为空间机械臂规划与控制的基础；针对待执行任务目标，受太空资源稀缺、任务复杂等因素的影响，需通过分析、分解与规划，将复杂的任务目标划分为一系列空间机械臂可直接执行的动作序列，以实现空间资源的优化配置，此时需研究空间机械臂的任务规划问题；针对大负载搬运等典型操作任务，在空间机械臂运行至期望位姿或将负载搬运至指定位置时，往往需考虑约束条件（如关节角度限制）与优化目标（如输出力矩峰值最小化），以获得任务执行代价最小的运行轨迹，此时应解决空间机械臂的路径规划及轨迹优化问题；针对部分接触操作任务，如目标捕获，为实现接触碰撞扰动最小，保持空间机械臂乃至整个系统的稳定性，需研究空间机械臂的接触碰撞控制方法；当操作任务要求空间机械臂与环境持续接触时，空间机械臂除需控制末端运动外，还需精确输出操作力，这将涉及空间机械臂的柔顺控制问题。

针对上述问题，作者多年来在国家自然科学基金和 973 计划项目等的支持下，开展了 10 多年的研究，取得了一系列的研究成果。本书正是在这些



研究成果的基础上，系统深入地梳理与阐述了空间机械臂建模、规划及控制的相关基本理论和方法。本书可用于指导解决空间机械臂应用过程中遇到的相关难题，书中所涉及的理论与方法大多已发表在国内外顶级期刊或学术会议论文集中，并申请了多项国家发明专利，部分成果已成功应用于我国航天项目上，具有较高的创新意义和使用价值。

全书共 10 章。第 1 章重点介绍了空间机械臂的发展现状与其涉及的关键技术；第 2 章和第 3 章作为后续章节的理论基础，分别总结了空间机械臂运动学与动力学的建模方法；第 4 章介绍了任务规划方法及其在空间机械臂领域的具体应用；第 5 章介绍了空间机械臂路径规划方法，包括关节空间路径规划、笛卡儿空间路径规划和非完整路径规划；第 6 章通过梳理空间机械臂应用过程中的优化目标与约束条件，阐述了空间机械臂的轨迹优化基本理论；第 7 章阐述了考虑运动特性的空间机械臂轨迹优化方法，包括空间机械臂避奇异路径规划、避障路径规划以及重复运动规划；第 8 章介绍了典型工况下空间机械臂轨迹优化方法，包括空间机械臂低速运动轨迹优化和空间机械臂负载操作轨迹优化。此 5 章（第 4 章至第 8 章）可为空间机械臂在自由运动阶段顺利执行操作任务提供保障；第 9 章介绍了空间机械臂接触碰撞动力学建模方法及接触碰撞控制策略；第 10 章总结了空间机械臂柔顺控制方法，并阐述了环境干扰力作用下以及不确定模型下的空间机械臂柔顺控制方法。此 2 章（第 9 章与第 10 章）对提升空间机械臂在接触操作阶段执行在轨操作任务的安全性和可靠性具有重要意义。

随着航天事业的不断发展，很多新思想、新技术也在不断涌现并被引入空间机械臂的实际应用中，因此空间机械臂相关理论与方法仍在完善之中，加之作者水平有限，书中难免有疏漏或不妥之处，诚望学术界同仁和广大读者批评指正。

作者

2019 年 6 月



目 录

第 1 章 空间机械臂发展现状及关键技术	001
1.1 空间机械臂概述	002
1.1.1 空间机械臂的研究意义	002
1.1.2 空间机械臂的构成	003
1.1.3 空间机械臂的分类	005
1.2 国内外空间机械臂发展现状	006
1.2.1 国外典型空间机械臂发展现状	006
1.2.2 我国空间机械臂发展概况	011
1.2.3 空间机械臂基本参数与功能总结	012
1.3 空间机械臂应用分析	014
1.3.1 空间机械臂应用的影响因素分析	014
1.3.2 空间机械臂应用的技术分析	016
1.4 空间机械臂规划与控制关键技术	017
1.4.1 空间机械臂运动学建模	017
1.4.2 空间机械臂动力学建模	019
1.4.3 空间机械臂任务规划	021
1.4.4 空间机械臂路径规划与轨迹优化	022
1.4.5 空间机械臂接触碰撞控制	024
1.4.6 空间机械臂柔顺控制	026
1.5 小结	028



第 2 章 空间机械臂运动学模型	039
2.1 机械臂连杆间几何关系的描述方法	040
2.1.1 T 矩阵法	040
2.1.2 D-H 法	042
2.1.3 MDH 法	044
2.1.4 MCPC 法	046
2.1.5 旋量法	049
2.1.6 机械臂建系方法总结	052
2.2 空间机械臂位置级运动学问题	052
2.2.1 空间机械臂位置级正运动学问题	053
2.2.2 空间机械臂位置级逆运动学问题	054
2.3 空间机械臂速度级运动学问题	060
2.3.1 空间机械臂速度级正运动学问题	060
2.3.2 空间机械臂速度级逆运动学问题	067
2.3.3 算例：2 自由度自由漂浮机械臂系统运动学建模	069
2.4 小结	073
第 3 章 空间机械臂动力学模型	075
3.1 机械臂动力学建模方法	076
3.1.1 牛顿-欧拉法	076
3.1.2 拉格朗日法	077
3.1.3 凯恩法	080
3.1.4 空间算子代数法	082
3.1.5 哈密尔顿法	087
3.1.6 机械臂动力学建模方法总结	088
3.1.7 典型动力学建模方法在空间机械臂上的应用	089
3.2 机械臂柔性动力学建模方法	097
3.2.1 基于假设模态法的机械臂柔性动力学建模方法	098
3.2.2 基于集中质量法的机械臂柔性动力学建模方法	100
3.2.3 基于有限元法的机械臂柔性动力学建模方法	106
3.2.4 机械臂柔性变形表征方法总结	110
3.2.5 典型柔性动力学建模方法在空间机械臂上的应用	110
3.3 小结	122



第 4 章 空间机械臂任务规划	125
4.1 空间机械臂任务规划框架	126
4.2 基于分层任务网络的空间机械臂任务规划方法	128
4.2.1 分层任务网络规划器介绍	129
4.2.2 空间机械臂分层任务网络规划域	130
4.2.3 空间机械臂分层任务网络化简	133
4.2.4 仿真算例	135
4.3 基于改进图的空间机械臂任务规划方法	137
4.3.1 空间机械臂任务规划要素表征	137
4.3.2 基于模拟退火算法图拓展改进	140
4.3.3 多约束条件下融合多目标的任务规划解提取	142
4.3.4 仿真算例	144
4.4 小结	148
第 5 章 空间机械臂路径规划	149
5.1 关节空间路径规划	150
5.1.1 基于梯形速度插值函数的路径规划	150
5.1.2 基于多项式插值函数的路径规划	155
5.1.3 仿真算例	157
5.2 笛卡儿空间路径规划	161
5.2.1 点到点路径规划	161
5.2.2 连续跟踪路径规划	164
5.2.3 基于视觉伺服的路径规划	171
5.2.4 仿真算例	173
5.3 非完整路径规划	174
5.3.1 非完整路径规划的数学描述	175
5.3.2 非完整路径规划问题的求解	176
5.3.3 仿真算例	177
5.4 小结	179
第 6 章 空间机械臂轨迹优化基本理论	181
6.1 空间机械臂轨迹优化模型建立	182
6.1.1 优化目标	182



6.1.2	约束条件	188
6.1.3	轨迹优化模型	191
6.2	空间机械臂轨迹优化问题求解	192
6.2.1	单目标轨迹优化方法	192
6.2.2	多目标轨迹优化方法	193
6.3	仿真算例	196
6.4	小结	204
第 7 章	考虑运动特性的空间机械臂轨迹优化	205
7.1	空间机械臂避奇异路径规划	206
7.1.1	空间机械臂奇异问题转化	206
7.1.2	空间机械臂奇异条件分析	207
7.1.3	基于末端速度修改的空间机械臂避奇异路径规划	212
7.1.4	仿真算例	215
7.2	空间机械臂避障路径规划	218
7.2.1	基于 A* 算法的空间机械臂构型空间避障路径规划	218
7.2.2	基于多传感器信息的空间机械臂实时避障路径规划	226
7.2.3	仿真算例	231
7.3	空间机械臂重复运动规划	238
7.3.1	空间机械臂重复运动优化算子	239
7.3.2	基于重复运动优化算子的空间机械臂重复运动规划	242
7.3.3	仿真算例	245
7.4	小结	248
第 8 章	典型工况下空间机械臂轨迹优化	251
8.1	空间机械臂低速运动轨迹优化	252
8.1.1	低速运动特性影响因素分析	252
8.1.2	低速空载运动轨迹优化	265
8.1.3	低速重载运动轨迹优化	270
8.2	空间机械臂负载操作轨迹优化	278
8.2.1	空间机械臂负载能力评估	278
8.2.2	面向大负载点到点路径规划任务的空间机械臂轨迹优化	284



8.2.3	面向大负载连续跟踪路径规划任务的空间机械臂轨迹优化	292
8.3	小结	303
第9章	空间机械臂接触碰撞控制	307
9.1	空间机械臂接触碰撞动力学方程	308
9.1.1	空间机械臂离散接触碰撞动力学方程	308
9.1.2	空间机械臂连续接触碰撞动力学方程	313
9.1.3	仿真算例	315
9.2	空间机械臂碰前构型优化	320
9.2.1	空间机械臂构型优化目标函数的建立	320
9.2.2	空间机械臂构型优化策略设计	324
9.2.3	仿真算例	326
9.3	空间机械臂碰后稳定控制	331
9.3.1	空间机械臂末端位姿补偿控制	331
9.3.2	空间机械臂基座姿态自运动调整	336
9.3.3	仿真算例	339
9.4	小结	341
第10章	空间机械臂柔顺控制	343
10.1	机械臂柔顺控制方法	344
10.1.1	力/位混合控制法	344
10.1.2	阻抗控制法	351
10.1.3	自适应控制法	352
10.1.4	机械臂柔顺控制方法总结	353
10.2	环境干扰力作用下空间机械臂接触力柔顺控制	355
10.2.1	已知环境干扰力作用下的接触力柔顺控制	355
10.2.2	未知环境干扰力作用下的接触力柔顺控制	368
10.3	不确定模型下空间机械臂自适应柔顺控制	371
10.3.1	机械臂动力学模型不确定下的空间机械臂自适应柔顺控制	371
10.3.2	环境刚度模型下不确定的空间机械臂自适应柔顺控制	378
10.4	小结	385



第 1 章

空间机械臂发展现状及关键技术

随着空间技术的飞速发展，特别是空间站、航天飞机等的诞生及成功应用，空间机械臂作为完成目标捕获、在轨组装与服务、星表样品采集等任务的一项关键性装备越来越受到人们的关注。本章首先概述空间机械臂的研究意义、构成及分类，然后介绍国内外空间机械臂的发展现状以及应用分析，最后阐述空间机械臂在规划和控制方面涉及的关键技术。



| 1.1 空间机械臂概述 |

1.1.1 空间机械臂的研究意义

1957年10月4日，苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星——斯普特尼克1号(Sputnik-1)，标志着人类进入太空时代。经过60多年的不懈努力，人类探索的脚步已突破地球引力的限制，深入到地球、太阳系及其之外的浩瀚宇宙。人类对宇宙的探索极大地推动了人类社会的科技进步，对人们的生活和生活方式也产生了巨大的影响。

作为近年来蓬勃发展的研究领域，机器人在人类航天事业中扮演着举足轻重的角色，其身影出现在多种空间装备中，如应用于星表探测任务的着陆器、巡视器以及应用于在轨任务的卫星、空间站等，使一些人类无法亲自完成的空间探索任务成为可能，极大地拓展了人类在宇宙中的活动能力与探索范围。空间机械臂属于特种机器人中的一种，随着人类太空探索步伐的逐渐加快，其应用的必要性与优越性日益凸显：一方面，空间操作任务繁重复杂，如空间站舱体转位与组装、大质量/惯量负载搬运、大型结构对接、航天器故障维修、太空垃圾清理等，仅仅依靠宇航员难以完成；另一方面，空间环境



复杂多变，其具有的超真空、高温差及强辐射等特点，使得宇航员舱外作业高度危险，无论是执行在轨操作任务还是星表探测任务，都不可避免地在宇航员生命保障系统的设计与维护上投入高昂成本。空间机械臂具有跨度大、操作灵活、负载能力强等突出优点，可通过在轨操作、地面遥操作或自主操作等方式执行空间操作任务。

1.1.2 空间机械臂的构成

空间机械臂包含机械臂和基座 2 个部分。机械臂由关节和连杆交替连接构成，其一端固定于基座，另一端（末端）安装有末端执行器。空间机械臂简化结构如图 1-1 所示。

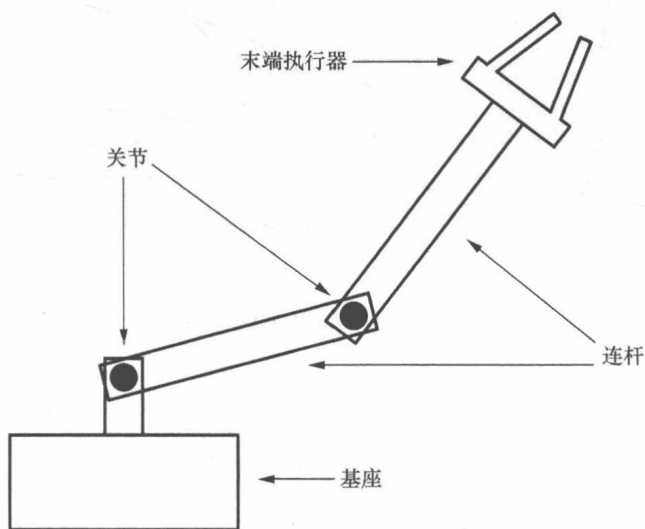


图 1-1 空间机械臂简化结构

1. 基座

基座是搭载机械臂的平台。根据不同的任务需求，机械臂可安装于不同类型的基座上，如国际空间站、卫星、星表巡视器（如月球车、火星车）等，如图 1-2 所示。由于基座与机械臂间存在运动耦合，机械臂运动会使基座产生扰动，使基座姿态发生变化，进而影响空间机械臂操作精度，最终有可能导致空间机械臂操作任务失败。