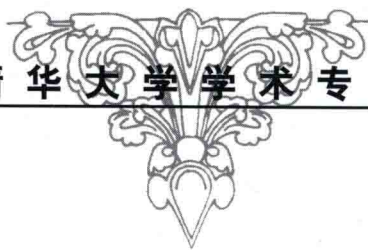


清华大学学术专著



Space Robotics: Modeling, Planning and Control

空间机器人：建模、规划与控制

梁斌 徐文福 著



清华大学出版社



清华大学学术专著

Space Robotics: Modeling, Planning and Control

空间机器人：建模、规划与控制

梁斌 徐文福 著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

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过程中取得的研究成果,对空间机器人的建模、规划及控制等相关的基本理论和方法进行了系统、深入的论述,包括空间机器人运动学及动力学建模基础及建模方法、动力学耦合特性表征及评价、在轨参数辨识、非完整路径规划、运动学及动力学奇异回避、目标自主捕获的视觉伺服控制、非合作目标位姿测量、空间机器人系统协调控制、数学仿真及地面实验验证等。本书所阐述的内容理论与实际紧密结合,可用于解决航天器在轨制造、维修维护、太空垃圾清理、空间大型设施建设等涉及的空间机器人技术方面的问题。本书的理论及方法大多已发表在国际顶级期刊、国际顶级学术会议论文集,并已实际用于我国航天型号项目上,具有极强的创新性和实用价值。

本书可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的教材,也可供从事空间机器人技术研究及应用的研发人员及工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

空间机器人:建模、规划与控制/梁斌,徐文福著.—北京:清华大学出版社,2017

(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-47258-2

I. ①空… II. ①梁… ②徐… III. ①空间机器人 IV. ①TP242.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 125962 号

责任编辑:王一玲 战晓雷

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:44

字 数:1071千字

版 次:2017年12月第1版

印 次:2017年12月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:198.00元

产品编号:044514-01

自 1957 年苏联发射世界上第一颗人造地球卫星以来的 60 年间,人类利用航天技术不断开展各种太空探索和空间应用活动,发射了大量的航天器,在通信广播、导航定位、对地观测、载人航天、空间科学、月球探测和深空探索等方面取得了巨大的成就,推动了人类社会的进步和发展。由于外层空间环境接近真空,轨道上的大气阻力极其微弱,导致遗留在轨道上的失效飞行器和空间碎片越积越多,不仅占用了宝贵的轨道资源,而且对人类正常的空间活动构成了威胁。当前,开展太空垃圾清理和轨道资源保护已刻不容缓。

另一方面,为进一步开发太空,需要在轨组装和建造各种大型、超大型的航天系统,如空间站和太空望远镜等。如果靠宇航员来完成这些系统的装配建造和维修维护,就需要发展像美国航天飞机那样可返回地面和重复使用的载人飞行器,并依靠航天员的出舱或舱内活动完成各种作业。但是,此种方式成本高,风险大,且能到达的飞行高度有限,不能满足各种轨道高度、尤其是高轨作业的需要。此外,空间科学实验也需要机器人的精准操作和维护照料。因此,发展具有智能的空间机器人技术成为当今空间技术的一个重要方向,各航天大国正竞相积极开展研究,以实现对各种轨道高度飞行器的组装、维护、故障排除、轨道垃圾的清理以及空间科学实验操作。

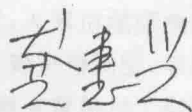
空间机器人工作于外太空环境,是自由漂浮的多体系统,相对于地面固定基座或其他类型的机器人,面临更加复杂的理论和技术挑战。由于微重力环境、基座自由漂浮,空间机械臂的运动会导致基座的姿态和质心位置发生变化,而这一变化又影响了机械臂末端的定位和定姿,即机械臂与基座之间存在动力学耦合,如何描述、评价并应用动力学耦合特性,一直是空间机器人领域研究的热点和难点;同时,自由漂浮空间机器人系统为无根的非完整约束系统,其工作空间及奇异位形呈现出动态不确定性,相关的建模、规划及控制等与其他类型的机器人相比有显著的不同;为了确保空间机器人入轨后能圆满完成任务,需要在发射前对其算法进行充分的实验验证,此种实验的困难之处是模拟空间的微重力环境以消除地面重力对试验结果产生的影响。

国家 863 计划航天技术领域从 1991 年开始,成立了空间机器人及遥科学专家组,开展相关的研究,我本人从 1997 年起见证了这一重要技术的发展,看到了梁斌同志从一名刚毕业的博士,到专家组成员,再到国家 863 空间智能机器人重大项目专家组组长的成长历程,前后历时将近 20 年,从我国首个空间智能机器人系统设想的提出、系统概念设计、关键技术攻关、地面试验样机研制、飞行试验样机研制、在轨试验等全过程。2013 年 7 月 20 日,我国以“一箭三星”方式成功发射了试验七号技术科学试验卫星,成功进行了空间机械臂操作等空间维护技术试

验,使我国空间机器人技术跻身国际先进行列。梁斌同志担任试验七号卫星工程型号的任务设计总师和总指挥,为我国空间机器人技术的发展作出了重大贡献。

本书作者历经 20 年研究,对自由漂浮空间机器人系统动力学的建模理论、路径规划、协调控制等开展了系统、深入的研究,取得了重要研究成果,并应用于我国首个空间机器人的研制。具体成果包括:①建立了我国首个自由漂浮空间机器人系统的动力学模型,并开展了全系统任务仿真和评估;②提出了动力学等价机械臂及基座质心等效机械臂的概念和建模方法,并将其用于空间机器人系统的构型设计、参数优化及智能控制;③提出了高效的动力学耦合建模与分析方法,将多维的耦合问题分解为低维的子问题,定义了相应的动力学耦合因子,解决了以往方法运算量大、且存在数值奇异的问题;④提出了目标捕获自主路径规划及协调控制方法,实现对完全自由漂浮目标的自主捕获,完成了我国首次在轨捕获漂浮目标的实验;⑤提出了将动力学奇异转换为实时的运动学奇异的回避方法,以及“奇异分离+阻尼倒数”的运动学奇异回避方法,提高了算法的实时性;⑥提出了自由漂浮空间机器人系统的非完整路径规划方法,仅通过机械臂关节的控制,同时实现机械臂末端及基座姿态同时到达期望状态;⑦针对空间机器人系统在轨质量特性发生变化从而影响控制性能的问题,提出了基于等效单体和等效双体的自由漂浮空间机器人系统动力学参数在轨辨识方法;⑧针对建立地面微重力环境模拟的问题,提出了基于“动力学模拟”+“运动学等效”的空间机器人地面实验的思想,并开发了地面实验系统。

本专著是梁斌教授、徐文福教授结合多年来在承担国家重大工程型号项目、自然科学基金、国家 863 计划等项目过程中取得的研究成果,经过认真总结和提炼写成的一部学术著作。书中提出了一系列科学、有效、实用的方法,理论联系实际,由浅入深,结构清晰,内容丰富,语言简洁明了,体现了很好的写作水平。期望该书的出版能使相关领域的读者受益,推动空间机器人技术的进一步发展。



国家 863 计划航天航空领域专家委员会主任

中国工程院院士

2017 年 12 月 9 日

过去的 50 年,人类对空间开始进行探索,并且卓有成效。现已有大量的卫星和飞船为人类提供导航、通信和各类试验等服务工作。空间机器人的出现和发展使人类可以更安全、更精确、更便捷地完成地球轨道上的各种科研和生产作业,为将这一不适合人类生存、曾经一片荒芜的新领域,变成人类最有价值的生活场所创造了可能性。空间机器人可以组装、维护、修理、保障各种功能更为复杂和强大的卫星、空间站、望远镜和发电站,灵活地清理各种太空垃圾,更高效地利用和更严密地保护越来越宝贵的轨道资源。

空间机器人是国际上的研究热点。1997 年日本发射了工程试验“卫星-7 号”,2007 年美国发射了“轨道快车”,进行了空间交会和在轨服务试验。2013 年 7 月 20 日,中国以“一箭三星”方式成功发射了试验七号技术科学试验卫星,开展了空间机械臂操作等空间维护技术试验,标志着我国空间机器人从学术研究阶段进入工程开发阶段,为我国实现以空间机器人为载体的在轨服务、故障卫星维修、轨道垃圾清理、大型航天器组装、卫星系统维护甚至太空制造提供了坚实的技术基础。本书的作者,尤其是梁斌教授,作为该项目的负责人,为该项目作出了重大贡献。

空间机器人具有微重力环境下运行、基座自由漂浮、动作严重影响定位和姿态的特点,并且要完成复杂的人类任务,甚至是人类都不能完成的任务。空间机器人对工程技术界提出了强烈的发展需求和巨大的技术挑战。

本书对空间机器人的动力学建模进行了系统的描述,对空间机器人的运动规划和控制方法提出了可行性方案。本书对于有关领域的研究生、工程师和科研人员应该是一本十分有用的参考图书,相信对该领域的发展也有所作用。

此为序。

徐扬生

中国工程院院士



自从第一颗人造地球卫星发射升空以后,人类对于太空的探索步伐从未放慢,而是越来越重视空间资源的开发和利用。各种类型的航天器不断发射入轨,为人类提供通信、导航、遥感等多种服务;同时,人类已经或计划在太空建造各种空间站、太空望远镜、太阳能电站等大型、超大型的空间设施。然而,航天器由于故障、完全失效或任务结束而被放弃后,停留在空间将成为新的太空垃圾,不但占用了宝贵的轨道资源,还危及其他航天器的安全。随着大量人造物体进入太空,空间碎片逐年增多,严重影响了人类进入和开发太空的步骤。因此,开展航天器维修维护、轨道垃圾清理及大型空间设施的建设具有极其重要的意义。如果这些工作依靠宇航员来完成,其成本将十分高昂,也是十分危险的,因为恶劣的太空环境会给宇航员的空间作业带来巨大的威胁。用空间机器人代替宇航员进行太空作业不仅可以使宇航员避免在恶劣太空环境中工作时可能受到的伤害,还可以降低成本,提高空间探索的效益。

鉴于空间机器人及其在轨服务具有巨大的应用前景,包括中国在内的各主要航天大国开展了大量研究并已经或将要进行在轨演示验证,在不远的未来将达到实用化的目标。我们课题组早在 20 世纪 90 年代初就在国家高技术研究发展计划(即 863 计划)、国家自然科学基金等的持续支持下,开展了应用基础理论研究和工程型号项目的研制。作为主要单位参与研制的我国首个空间机器人系统已于 2013 年成功发射并开展了在轨维护技术科学试验,使我国一跃进入了世界空间机器人技术强国的行列。

相对于地面固定基座或其他类型的机器人,空间机器人处于微重力状态,基座自由漂浮,机械臂的运动会导致基座的姿态和质心位置发生变化,而这一变化又影响了机械臂末端的定位和定姿,使得相关的建模、规划及控制等与其他类型的机器人相比有极大的不同;而且,为了确保空间机器人发射入轨后能圆满完成任务,需要在发射前对关键的规划和控制算法进行充分的仿真分析和实验验证,而在地面进行空间环境的模拟和实验系统的建设也是极其复杂的。经过 20 多年不懈的努力,作者所领导的课题组开展了大量相关的研究,克服了各种困难,取得了一系列的研究成果。本书旨在对这些研究成果进行系统的总结,以为相关的科学家和工程师提供参考,同时,对未来需要进一步深化研究的课题也进行了阐述。书中涉及的理论及方法大多发表在国际顶级期刊、国际顶级学术会议论文集中,并已实际用于我国的航天型号项目上,具有较强的创新性和实用价值。通过本书的学习,读者将会在理论、方法和实践上得到极大的提高,可用于解决航天器在轨制造、维修维护、太空垃圾清理、空间大型设施建设等所涉及的空间机器人技术方

面的问题。

全书共分为 16 章。第 1 章主要介绍空间机器人的概念、需求分析、国内外发展现状及趋势；第 2 章为机器人运动学基础知识，包括机器人状态描述、正/逆运动学问题、D-H 及 M-D-H 建模方法和典型构型机械臂的解析逆运动学求解；第 3 章介绍了机器人微分运动学及奇异分析的基础，包括速度级及加速度级微分运动学方程的推导、雅可比矩阵的计算、典型机械臂的奇异构型分析等；第 4 章为机器人动力学基础知识，阐述了动力学建模的基本原理，以及常用的拉格朗日法和牛顿-欧拉法两种建模方法；第 5 章介绍了空间机器人的感知手段，包括基座姿态敏感器、关节位置和力/力矩传感器、机器人视觉传感器和天基目标测量敏感器；第 6 章论述了空间机器人系统的运动学建模方法，包括一般运动学建模方法和虚拟机械臂建模方法及应用；第 7 章介绍了空间机器人系统的动力学建模方法，包括通用动力学建模方法、动力学等价机械臂建模方法和多领域统一建模方法；第 8 章阐述了空间机器人系统动力学耦合的概念、建模及评估方法，定义了动力学耦合因子并用于减小扰动的路径规划和目标捕获后的鲁棒控制；第 9 章阐述了空间机器人系统动力学参数在轨辨识方法，实现了对基座、机械臂及目标卫星的动力学参数辨识，所采用的基于等效单体及等效双体的辨识方法不仅可完整辨识系统的参数，还大大降低了计算量；第 10 章介绍了空间机械臂路径规划的概念、关节空间路径规划以及笛卡儿空间路径规划方法，并针对具体任务进行了仿真；第 11 章阐述了自由漂浮空间机器人非完整路径规划的理论依据、基于遗传算法的非完整路径规划方法，以及目标停靠与基座姿态重稳定中的应用问题；第 12 章阐述了“奇异条件分离+阻尼倒数”的运动学奇异回避方法，以及将空间机器人动力学奇异回避转换为实时的运动学奇异回避的算法；第 13 章论述了空间机器人目标捕获的自主路径规划方法，包括基于位置和基于图像两种方法，并进行了比较和分析；第 14 章论述了 3 种典型的非合作目标自主识别与位姿测量方法，包括基于立体视觉的帆板支架识别与位姿测量、基于双目协作相机的通信天线支架识别与位姿测量，以及基于立体视觉的星箭对接环及喷嘴的识别与位姿测量方法；第 15 章论述了空间机器人系统的协调控制方法，包括基于前馈补偿的协调控制，以及可同时实现最优交会与目标捕获的方法；第 16 章针对空间机器人关键算法的验证和评估，论述了空间机器人系统全数学仿真、半物理仿真以及全物理仿真（即实验）等方法，并分析了各自的优缺点和应用情况。

本书得到了国家自然科学基金(61673239, 61573116, U1613227)、国家 863 重大项目、国家 863 重点项目，以及深圳市空间机器人与遥科学重点实验室(ZDSYS20140512091043835)和深圳市基础研究学科布局项目(JCYJ20160427183553203, JCYJ20150529141408781)等课题的资助。本书的完成是集体智慧的结晶，除了作者梁斌、徐文福教授外，课题组的研究生仇越、杜晓东、史也、王学谦、胡松华、胡忠华、闫磊等也进行了大量的工作，在此一并表示感谢。另外，对本书所参考的所有文献的作者表示诚挚的谢意。

梁斌教授总体负责本书的统筹规划和修订，重点编写了其中的第 1、4、5、7、8、10、14、16 章，徐文福教授重点编写了第 2、3、6、9、11、12、13、15 章，李兵教授、王学谦博士、胡忠华博士、牟宗高博士、闫磊博士等参与了本书的文字校阅工作。

由于空间机器人技术不断发展完善,应用不断普及,对其功能和性能的要求不断提高,很多新技术在不断地对相关的理论和方法产生影响,相关的理论和方法仍在发展和完善之中,加之编写时间有限,书中难免有些不妥之处,敬请广大读者指正。

作者

2018年1月

目次

1. 绪论	1
1.1 空间机器人的概述及分类	1
1.2 空间机器人任务分析	1
1.3 空间机器人的主要组成	1
1.4 空间机器人的主要组成	1
1.5 空间机器人的主要组成	1
1.6 空间机器人的主要组成	1
1.7 空间机器人的主要组成	1
1.8 空间机器人的主要组成	1
1.9 空间机器人的主要组成	1
1.10 空间机器人的主要组成	1
1.11 空间机器人的主要组成	1
1.12 空间机器人的主要组成	1
1.13 空间机器人的主要组成	1
1.14 空间机器人的主要组成	1
1.15 空间机器人的主要组成	1
1.16 空间机器人的主要组成	1
1.17 空间机器人的主要组成	1
1.18 空间机器人的主要组成	1
1.19 空间机器人的主要组成	1
1.20 空间机器人的主要组成	1
1.21 空间机器人的主要组成	1
1.22 空间机器人的主要组成	1
1.23 空间机器人的主要组成	1
1.24 空间机器人的主要组成	1
1.25 空间机器人的主要组成	1
1.26 空间机器人的主要组成	1
1.27 空间机器人的主要组成	1
1.28 空间机器人的主要组成	1
1.29 空间机器人的主要组成	1
1.30 空间机器人的主要组成	1
1.31 空间机器人的主要组成	1
1.32 空间机器人的主要组成	1
1.33 空间机器人的主要组成	1
1.34 空间机器人的主要组成	1
1.35 空间机器人的主要组成	1
1.36 空间机器人的主要组成	1
1.37 空间机器人的主要组成	1
1.38 空间机器人的主要组成	1
1.39 空间机器人的主要组成	1
1.40 空间机器人的主要组成	1
1.41 空间机器人的主要组成	1
1.42 空间机器人的主要组成	1
1.43 空间机器人的主要组成	1
1.44 空间机器人的主要组成	1
1.45 空间机器人的主要组成	1
1.46 空间机器人的主要组成	1
1.47 空间机器人的主要组成	1
1.48 空间机器人的主要组成	1
1.49 空间机器人的主要组成	1
1.50 空间机器人的主要组成	1
1.51 空间机器人的主要组成	1
1.52 空间机器人的主要组成	1
1.53 空间机器人的主要组成	1
1.54 空间机器人的主要组成	1
1.55 空间机器人的主要组成	1
1.56 空间机器人的主要组成	1
1.57 空间机器人的主要组成	1
1.58 空间机器人的主要组成	1
1.59 空间机器人的主要组成	1
1.60 空间机器人的主要组成	1
1.61 空间机器人的主要组成	1
1.62 空间机器人的主要组成	1
1.63 空间机器人的主要组成	1
1.64 空间机器人的主要组成	1
1.65 空间机器人的主要组成	1
1.66 空间机器人的主要组成	1
1.67 空间机器人的主要组成	1
1.68 空间机器人的主要组成	1
1.69 空间机器人的主要组成	1
1.70 空间机器人的主要组成	1
1.71 空间机器人的主要组成	1
1.72 空间机器人的主要组成	1
1.73 空间机器人的主要组成	1
1.74 空间机器人的主要组成	1
1.75 空间机器人的主要组成	1
1.76 空间机器人的主要组成	1
1.77 空间机器人的主要组成	1
1.78 空间机器人的主要组成	1
1.79 空间机器人的主要组成	1
1.80 空间机器人的主要组成	1
1.81 空间机器人的主要组成	1
1.82 空间机器人的主要组成	1
1.83 空间机器人的主要组成	1
1.84 空间机器人的主要组成	1
1.85 空间机器人的主要组成	1
1.86 空间机器人的主要组成	1
1.87 空间机器人的主要组成	1
1.88 空间机器人的主要组成	1
1.89 空间机器人的主要组成	1
1.90 空间机器人的主要组成	1
1.91 空间机器人的主要组成	1
1.92 空间机器人的主要组成	1
1.93 空间机器人的主要组成	1
1.94 空间机器人的主要组成	1
1.95 空间机器人的主要组成	1
1.96 空间机器人的主要组成	1
1.97 空间机器人的主要组成	1
1.98 空间机器人的主要组成	1
1.99 空间机器人的主要组成	1
1.100 空间机器人的主要组成	1

第 1 章 空间机器人发展现状及趋势	1
1.1 引言	1
1.2 空间机器人的概念及分类	2
1.3 空间机器人需求分析	4
1.3.1 频繁的卫星失效导致了巨大的经济损失	4
1.3.2 不断增长的轨道垃圾严重影响正常卫星的安全	8
1.3.3 大型空间设施的建设与维护需求越来越紧迫	10
1.3.4 新型空间技术对在轨服务的推动	11
1.3.5 空间机器人代替宇航员是未来在轨服务的必然	12
1.3.6 空间机器人在轨服务内容	12
1.4 载人航天器机械臂国内外发展现状	14
1.4.1 航天飞机机器人 SRMS	14
1.4.2 国际空间站机器人	18
1.4.2.1 空间站移动服务系统	18
1.4.2.2 日本实验舱遥控机械臂系统	20
1.4.2.3 欧洲机械臂系统	22
1.4.3 中国的舱外自由移动机器人系统 EMR	24
1.4.4 中国的空间站机器人系统	25
1.5 自由飞行空间机器人国内外发展现状	26
1.5.1 已成功在轨演示的自由飞行空间机器人	26
1.5.2 美国的空间机器人技术发展分析	28
1.5.2.1 轨道快车	28
1.5.2.2 机器人燃料加注实验	29
1.5.2.3 FRENDD 项目	30
1.5.2.4 “凤凰”计划	30
1.5.2.5 大型望远镜及空间结构在轨服务计划	31
1.5.2.6 太空服务基地计划	32
1.5.2.7 在轨制造计划	33
1.5.2.8 美国在轨服务发展小结	33
1.5.3 日本的空间机器人技术发展分析	34
1.5.4 德国的空间机器人技术发展分析	36
1.5.5 欧洲空间局的空间机器人技术发展分析	37
1.5.6 加拿大的空间机器人技术发展分析	38
1.5.7 中国的空间机器人技术发展分析	40

1.6	空间机器人技术发展趋势分析	40
1.7	小结	44
	参考文献	44
第2章	机器人运动学基础	49
2.1	引言	49
2.2	刚体的位置和姿态	49
2.2.1	刚体位置的描述	50
2.2.2	刚体姿态的描述	50
2.2.2.1	旋转变换矩阵表示法	50
2.2.2.2	欧拉角表示法	52
2.2.2.3	欧拉轴-角表示	57
2.2.2.4	单位四元数表示法	59
2.2.2.5	小角度下的姿态表示	61
2.2.2.6	各种姿态表示的优缺点分析	62
2.2.3	齐次坐标与齐次变换	63
2.3	刚体的运动	64
2.3.1	刚体的一般运动	64
2.3.2	刚体的姿态运动学	65
2.3.2.1	旋转变换矩阵表示下的姿态运动	65
2.3.2.2	欧拉角表示法	66
2.3.2.3	欧拉轴-角表示	70
2.3.2.4	单位四元数表示	70
2.3.3	姿态奇异条件分析	71
2.3.3.1	姿态奇异条件及特性分析	71
2.3.3.2	第Ⅰ类欧拉角的奇异分析	72
2.3.3.3	第Ⅱ类欧拉角的奇异分析	73
2.4	机械臂状态描述	74
2.4.1	关节状态变量与关节速度	74
2.4.2	末端位姿与末端速度	75
2.4.3	关节空间与任务空间	76
2.5	机械臂运动学正问题和逆问题	78
2.6	位置级运动学问题	78
2.6.1	平面2连杆机械臂位置级正运动学举例	79
2.6.2	平面2连杆机械臂位置级逆运动学举例	79
2.7	机器人连杆坐标系建立的D-H法	81
2.7.1	经典D-H表示法	81
2.7.1.1	D-H坐标系与D-H参数	81
2.7.1.2	各连杆D-H坐标系建立的步骤	82
2.7.1.3	基于D-H参数的齐次变换矩阵	84
2.7.2	改造后的D-H表示法	85
2.8	典型构型机械臂的解析运动学求解	87

2.8.1	3DOF 拟人肘机械臂	87
2.8.1.1	3DOF 拟人肘机械臂正运动学方程	87
2.8.1.2	3DOF 拟人肘机械臂逆运动学方程	87
2.8.2	3DOF 球腕机械臂	90
2.8.2.1	3DOF 球腕机械臂正运动学方程	90
2.8.2.2	3DOF 球腕机械臂逆运动学方程	91
2.8.3	6DOF 腕部分离机械臂	93
2.8.3.1	6DOF 腕部分离机械臂正运动学方程	94
2.8.3.2	6DOF 腕部分离机械臂逆运动学方程	95
2.9	小结	100
	参考文献	100
第3章	机器人微分运动学与奇异分析基础	101
3.1	引言	101
3.2	机器人的速度级运动学	101
3.2.1	速度级运动学方程	101
3.2.2	机器人的微分运动	103
3.2.2.1	采用 6D 状态变量描述末端位姿时	103
3.2.2.2	采用齐次变换矩阵描述末端位姿时	103
3.2.3	速度级运动学举例	105
3.2.3.1	平面 2 连杆机械臂速度级正运动学举例	105
3.2.3.2	平面 2 连杆机械臂速度级逆运动学举例	105
3.3	机器人的加速度级微分运动学	106
3.3.1	加速度级运动学方程	106
3.3.2	加速度级运动学举例	106
3.3.2.1	平面 2 连杆机械臂加速度级正运动学举例	106
3.3.2.2	平面 2 连杆机械臂加速度级逆运动学举例	106
3.4	雅可比矩阵的计算方法	107
3.4.1	不同坐标系表示下的雅可比矩阵的关系	107
3.4.2	利用各关节位姿齐次变换矩阵	107
3.4.3	根据末端位姿矩阵直接微分	108
3.5	雅可比矩阵计算实例	109
3.5.1	拟人的 3DOF 肘机械臂	109
3.5.2	3DOF 球腕机械臂	111
3.5.3	6DOF 腕部分离机械臂	111
3.6	典型运动学奇异臂型分析	112
3.6.1	3DOF 拟人肘机械臂	112
3.6.1.1	奇异条件确定	112
3.6.1.2	奇异臂型与运动退化分析	113
3.6.2	3DOF 球腕机械臂	115
3.6.3	6DOF 腕部分离机械臂	116
3.6.3.1	腕部运动的分解	116

3.6.3.2 奇异条件的确定	118
3.7 基于微分运动学的通用逆运动学求解方法	121
3.7.1 算法原理	121
3.7.2 算法流程	122
3.7.3 算法举例	122
3.8 小结	123
参考文献	123
第4章 机器人动力学基础	125
4.1 引言	125
4.2 动力学建模的基本原理	125
4.2.1 欧拉方程	125
4.2.1.1 刚体动量矩	125
4.2.1.2 欧拉力矩方程	127
4.2.2 达朗贝尔原理	127
4.2.3 虚位移原理	128
4.2.3.1 广义坐标	128
4.2.3.2 虚位移原理	128
4.2.3.3 广义力	129
4.2.4 拉格朗日方程	129
4.2.4.1 仅考虑动能情况下	129
4.2.4.2 仅考虑势能情况下	130
4.2.4.3 一般拉格朗日方程	131
4.3 机器人动力学基础	131
4.3.1 拉格朗日方法	132
4.3.1.1 连杆的动能	132
4.3.1.2 连杆的势能	134
4.3.1.3 拉格朗日动力学方程	134
4.3.1.4 拉格朗日动力学方程举例	135
4.3.2 牛顿-欧拉法	140
4.3.2.1 力和力矩的递推关系式	141
4.3.2.2 递推的牛顿-欧拉动力学算法	142
4.4 小结	142
参考文献	143
第5章 空间机器人感知	144
5.1 引言	144
5.2 空间机器人基座姿态敏感器	144
5.2.1 陀螺	145
5.2.2 星敏感器	146
5.2.2.1 工作原理	146
5.2.2.2 主要技术指标	147

5.2.3	太阳敏感器	148
5.2.4	红外地球敏感器	149
5.2.5	典型姿态测量部件组成及姿态确定算法设计	150
5.2.5.1	GNC 分系统的组成	150
5.2.5.2	姿态确定算法	151
5.3	机器人关节位置检测	152
5.3.1	电位计	152
5.3.2	旋转变压器	154
5.3.3	光电编码器	156
5.3.3.1	增量式光电编码器	157
5.3.3.2	绝对式光电编码器	158
5.4	机器人力/力矩感知	159
5.5	机器人视觉	161
5.5.1	相机成像模型	161
5.5.2	单目视觉与位姿测量	163
5.5.2.1	单目视觉系统与 PnP 算法	163
5.5.2.2	常用的 P3P 问题及其求解	164
5.5.3	双目视觉系统与立体匹配	169
5.6	天基目标测量敏感器	170
5.6.1	天基目标分类	170
5.6.2	国内外应用情况分析	170
5.6.3	天基目标测量敏感器简介	172
5.6.3.1	微波测距仪	172
5.6.3.2	激光测距仪	172
5.6.3.3	差分 GPS(RGPS)	173
5.6.3.4	光学测角相机	175
5.6.3.5	宽视场测量相机	175
5.6.3.6	窄视场成像相机	176
5.6.3.7	交会测量相机	176
5.6.3.8	典型目标测量设备配置方案	178
5.7	天基目标测量方案举例	179
5.7.1	GEO 非合作航天器在轨救援任务设计	179
5.7.1.1	在轨接近任务	180
5.7.1.2	绕飞监测任务	181
5.7.1.3	停靠与抓捕	181
5.7.1.4	在轨修复	181
5.7.2	天基目标测量分系统配置方案	181
5.7.3	GNC 算法设计	183
5.7.3.1	制导律的要求	183
5.7.3.2	控制的要求	183
5.7.3.3	导航的要求	183
5.8	小结	183

参考文献	184
第 6 章 空间机器人运动学建模	187
6.1 引言	187
6.2 符号及坐标系定义	188
6.3 位置级运动学方程	190
6.3.1 位置级正运动学方程	190
6.3.1.1 位置级正运动学方程一般式	190
6.3.1.2 空间机器人的正运动学方程举例	191
6.3.2 位置级逆运动学方程	194
6.3.2.1 空间机器人系统逆运动学方程解的存在性讨论	194
6.3.2.2 基座位姿已知时的逆运动学方程求解	195
6.3.2.3 仅基座姿态已知但系统不受外力时的逆运动学方程求解	197
6.4 微分运动学方程	199
6.4.1 速度级正运动学方程	199
6.4.1.1 空间机器人一般运动方程	199
6.4.1.2 空间机器人系统线动量和角动量	200
6.4.1.3 基座位姿稳定时的运动学方程	203
6.4.1.4 基座姿态受控模式的运动学方程	203
6.4.1.5 自由漂浮模式的运动学方程	204
6.4.2 速度级逆运动学方程	207
6.4.2.1 一般情况下的逆运动学方程	207
6.4.2.2 基座位姿固定时的逆运动学方程	207
6.4.2.3 基座姿态受控、系统不受外力时的运动学方程	208
6.4.2.4 自由漂浮模式的逆运动学方程与动力学奇异	208
6.4.3 平面 2 连杆空间机器人系统运动学方程举例	211
6.4.3.1 位置关系	211
6.4.3.2 一般运动方程	213
6.4.3.3 基座位姿固定模式下的运动学方程	214
6.4.3.4 基座姿态受控模式下的运动学方程	214
6.4.3.5 自由漂浮模式下的运动学方程	217
6.4.3.6 平面空间机器人 PIW 与 PDW 的分析	226
6.4.4 平面 3 连杆空间机器人系统运动学方程举例	228
6.4.4.1 位置关系	228
6.4.4.2 一般运动方程	230
6.4.4.3 基座位姿固定模式下的运动学方程	232
6.4.4.4 基座姿态受控模式下的运动学方程	232
6.4.4.5 自由漂浮模式下的运动学方程	235
6.5 虚拟机械臂建模及其应用	240
6.5.1 基于虚拟机械臂的运动学建模	240
6.5.2 工作空间分析	242
6.5.2.1 空间机器人工作空间类型	243

6.5.2.2 平面空间机器人系统示例	244
6.5.3 基于虚拟机械臂的逆运动学求解	247
6.6 小结	250
参考文献	250
第7章 空间机器人动力学建模	252
7.1 引言	252
7.2 空间机器人通用动力学建模方法	253
7.2.1 拉格朗日法	254
7.2.1.1 空间机器人系统的动能	254
7.2.1.2 空间机器人的拉格朗日动力学方程	255
7.2.1.3 自由漂浮空间机器人动力学方程	255
7.2.2 平面单连杆空间机器人动力学方程举例	256
7.2.3 平面双连杆空间机器人动力学方程举例	261
7.3 动力学等价机械臂建模	272
7.3.1 不受外力作用下空间机器人系统动力学建模	272
7.3.2 关节1为球关节时的固定基座机械臂动力学	274
7.3.3 动力学等价机械臂(DEM)及其与SM的等价性	275
7.3.3.1 动力学等价机械臂的定义	275
7.3.3.2 SM与DEM的运动学等价	275
7.3.3.3 SM与DEM的动力学等价	276
7.3.3.4 仿真验证	276
7.4 多领域统一建模方法	278
7.4.1 非因果建模思想	278
7.4.1.1 因果建模的局限性	278
7.4.1.2 非因果建模	279
7.4.2 空间机器人系统的多领域功能模块划分	280
7.4.3 单臂空间机器人系统多领域统一建模	282
7.4.3.1 空间机器人机构部分的建模	282
7.4.3.2 机械臂关节轴的建模	285
7.4.3.3 机械臂路径规划器(PathPlanning)	287
7.4.3.4 基座姿态控制执行机构的建模	288
7.4.3.5 姿态及轨道控制器	290
7.4.4 多臂空间机器人系统的多领域统一建模	291
7.4.5 仿真研究	292
7.4.5.1 单臂空间机器人操作的多领域统一仿真	292
7.4.5.2 双臂空间机器人操作的多领域统一仿真	294
7.5 小结	295
参考文献	295
第8章 空间机器人系统动力学耦合	298
8.1 引言	298

8.2 基于速度级运动学的动力学耦合建模及分析	298
8.2.1 自由漂浮状态下的动量守恒	298
8.2.2 关节与基座的耦合运动	299
8.2.3 末端与基座的耦合运动	299
8.2.4 动力学耦合测度	301
8.3 空间机器人混合动力学耦合分析	303
8.3.1 耦合运动分解	303
8.3.2 基座质心耦合的位置级建模	303
8.3.2.1 质心等效机械臂 BCVM	303
8.3.2.2 基座质心的耦合运动	305
8.3.3 基座姿态耦合的速度级建模	307
8.3.3.1 角动量守恒	307
8.3.3.2 基座姿态的耦合运动	308
8.3.4 动力学耦合因子	309
8.3.4.1 基座质心的位置级耦合	309
8.3.4.2 基座姿态的速度级耦合	310
8.3.4.3 实例分析	311
8.4 混合法与速度级建模方法的比较	316
8.4.1 速度级动力学耦合建模方法	316
8.4.2 混合动力学耦合建模	317
8.4.3 两种动力学耦合对比分析	317
8.5 基于混合方法的动力学耦合分析	319
8.5.1 不同负载质量对动力学耦合的影响	319
8.5.1.1 基座质心位置的耦合分析	320
8.5.1.2 基座姿态的耦合分析	321
8.5.2 安装角对动力学耦合的影响	321
8.5.2.1 基座质心位置的耦合分析	322
8.5.2.2 基座姿态的耦合分析	322
8.6 混合动力学耦合因子的应用	324
8.6.1 减小扰动的规划方法	324
8.6.1.1 几种负载下关节到基座的扰动等高线	324
8.6.1.2 几种负载下末端到基座的扰动等高线	329
8.6.2 未知目标捕获后的鲁棒控制方法	333
8.6.2.1 建立跟踪误差状态方程	335
8.6.2.2 H_{∞} 鲁棒控制器的设计	336
8.6.2.3 MATLAB 仿真分析	337
8.7 本章小结	340
参考文献	341
第9章 空间机器人系统参数在轨辨识	342
9.1 引言	342
9.2 传统航天器的动力学参数辨识	343