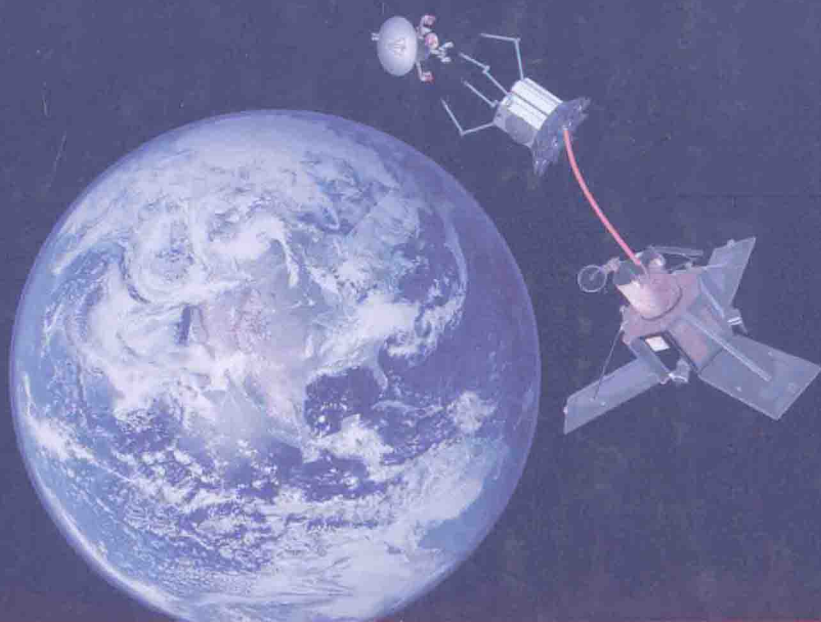




航天科技图书出版基金资助出版

空间绳系机器人 技术

黄攀峰 孟中杰 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

空间绳系机器人技术

黄攀峰 孟中杰 著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

空间绳系机器人技术/黄攀峰, 孟中杰著. --北京:
中国宇航出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5159-0778-9

I. ①空… II. ①黄… ②孟… III. ①空间机器人-
机器人技术 IV. TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 189675 号

责任编辑 马 航 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版 中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 14.5 字 数 418 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0778-9

定 价 110.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前 言

随着人类在太空活动的不断发展，如何处理太空垃圾已经成为人类航天活动的新课题。为了尽可能地挽回损失和净化轨道环境，世界各国正在研究以空间机器人为手段，以卫星维修、卫星寿命延长和太空垃圾清理为目的的在轨服务技术。现有的“平台/基座+多自由度机械臂手”构型的空间机器人在辅助变轨、轨道垃圾清理、失控卫星救助等方面显得力不从心。机械臂几乎属于全刚体系统，因此，刚体机械臂的“点对点”操作模式对空间机器人系统的制导、导航与控制（GNC）提出了很高的要求；而且，对于失控卫星的援救，空间机械臂几乎没有成功的例子。美国曾经利用航天飞机上的机械臂系统试图援救西班牙的失控卫星，但是以失败告终。可见，这种“点对点”的在轨操作模式对空间机器人系统本身和机械臂都提出了很高的要求。机械臂作用范围也受到机械臂长度和刚体灵活性的限制。空间机械臂主要针对合作目标的捕获和操作，因此空间机械臂系统不能很好地适应未来多样化的在轨服务。

空间绳系机器人是指具有绳系结构的空间机器人系统，其典型的结构是利用空间绳系取代多自由度机械臂，组建“平台/基座+空间绳系+捕获装置”的空间机器人结构，它可以实现在轨捕获和清理任务。这种空间绳系机器人的操作半径可达数百米级，远远大于传统的空间机器人。与传统的空间机器人相比，空间绳系机器人在任务安全性和可靠性等方面有了显著的提高。由于特殊的绳系结构，空间绳系机器人执行任务的操作距离得到了很大的扩展。较远的操作距离不仅避免了平台载体向目标的近距离逼近、停泊和机动过程，减少了平台的能量消耗，更为重要的是避免了平台与目标的直接接

触，消除了与目标发生直接碰撞的可能性，大大提高了平台在任务中的安全性。当发生捕获任务失败或者捕获装置故障时，平台可以通过系绳控制捕获装置对目标进行重复捕获或者回收维修，因此任务可靠性较高。如此一来，利用空间绳系机器人实现对失效卫星的清理具有明显的优势和很高的应用价值。本书对空间绳系机器人的产生、发展、研究方向以及关键技术等方面内容进行了详细地阐述，为空间绳系机器人技术未来的空间应用奠定了坚实的理论基础。

近年来，空间操作与控制技术已经成为空间技术发展的新方向，以空间飞行器的接管与控制、空间垃圾清理、在轨加注、空间飞行器援救等为代表的空间操作与控制任务的需求日趋增加。因此，开发能够满足空间操作与控制任务的新型空间机器人技术成为了未来空间飞行器技术发展的方向。高智能化的空间绳系机器人就是在这种紧迫需求下产生的，其“以小博大”的设计理念使其在对轨道垃圾清理、失控卫星援救、非合作目标捕获等方面具有不可替代的优势和能力。

本书是本研究团队近年来在空间绳系机器人研究过程中的理论成果的提炼和升华，是对所攻克的主要关键技术形成的重要理论成果的汇集，融合了研究过程中产生的技术报告和研究生学位论文等。本书重点介绍空间绳系机器人系统组成、任务描述，空间绳系机器人系统动力学建模、目标测量技术、逼近目标的轨迹规划技术、逼近控制技术及捕获目标后处理技术等。

本书共分为7章，第1章介绍了空间绳系机器人的概念、产生与发展历程、典型应用情况以及遇到的挑战等；第2章概要介绍了空间绳系机器人系统的组成、任务描述以及各分系统的详细介绍等；第3章，全面分析了空间绳系机器人系统的动力学建模问题，并对动力学特性进行了详细的分析；第4章介绍了基于视觉空间绳系机器人目标的跟踪与测量技术，并介绍了地面测量实验验证情况；第5章对空间绳系机器人逼近目标过程的轨迹规划技术进行了深入研究和分析；第6章结合逼近目标的轨迹规划方法，介绍了逼近过程的

协调控制方法；第7章介绍了空间绳系机器人完成目标捕获后的处理技术，主要包括复合体的姿态协调控制技术、目标的回收技术和拖曳变轨技术等。

本书的完成是集体智慧的结晶，除了作者之外，徐秀栋、蔡佳、王东科、胡仄虹等同志也做了大量工作，在此一并表示感谢。

本书可供从事空间飞行器技术、空间机器人技术以及深空探测技术研究的工程技术人员参考，也可作为高等院校航天应用类相关专业研究生和本科生高年级学生的教材使用。希望本书的出版对于推动空间机器人在我国的研究与应用起到良好的作用。

作 者

2014年7月5日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 空间绳系机器人的定义	1
1.2 空间绳系机器人的产生与发展	3
1.2.1 空间机器人	3
1.2.2 空间绳系技术	22
1.2.3 空间绳系机器人	33
1.3 空间绳系机器人的应用与研究方向	38
1.4 本书内容介绍	39
第 2 章 空间绳系机器人系统	40
2.1 空间绳系机器人组成结构	40
2.2 空间绳系机器人任务流程	42
2.2.1 平台变轨	42
2.2.2 目标捕获	57
2.2.3 拖曳变轨	58
2.3 空间绳系机器人分系统介绍	59
2.3.1 分离释放分系统	59
2.3.2 目标操作分系统	69
2.3.3 状态测量分系统	74
2.3.4 飞行控制分系统	77
2.3.5 综合管理分系统	80
2.4 电源与供配电方案	86
2.5 热控方案	88

2.6 小结	90
第3章 空间绳系机器人动力学/运动学	91
3.1 空间绳系机器人系统的动力学/运动学建模	92
3.1.1 基于珠子模型的建模与求解	92
3.1.2 基于 Ritz 法的建模与求解	96
3.1.3 基于混合单元法的建模与求解	100
3.1.4 基于牛顿—欧拉矢量方法的建模与求解	103
3.1.5 基于 Hamilton 原理的建模与求解	124
3.2 空间绳系机器人系统的动力学特性分析	139
3.2.1 平衡状态分析	139
3.2.2 纵向振动分析	141
3.2.3 碰撞特性分析	144
3.2.4 径向释放特性分析	148
3.2.5 切向释放特性分析	149
3.2.6 回收运动特性分析	151
3.3 小结	154
第4章 空间绳系机器人的感知测量技术	155
4.1 内部感知测量技术	157
4.1.1 位置传感器	157
4.1.2 角度传感器	158
4.1.3 速度传感器	159
4.1.4 加速度传感器	159
4.1.5 陀螺仪	160
4.1.6 GPS	161
4.2 外部非视觉感知测量技术	162
4.2.1 触觉传感器	162
4.2.2 力或力矩传感器	164
4.2.3 接近觉传感器	165
4.2.4 滑觉传感器	166

4.2.5 测距传感器	167
4.2.6 其他外部传感器	168
4.3 基于视觉的感知测量技术	169
4.3.1 图像预处理及基元提取	171
4.3.2 远场方位角量测方案	190
4.3.3 近场相对位姿量测方案	204
4.3.4 空间绳系机器人目标跟踪与测量实验	231
4.4 小结	242
第 5 章 空间绳系机器人的轨迹规划技术	243
5.1 航天器轨迹规划问题概述	243
5.1.1 航天器轨迹规划问题分类	244
5.1.2 航天器轨迹规划主要方法	245
5.2 空间绳系机器人逼近目标轨迹规划简介	254
5.3 基于速度增量的机器人逼近轨迹规划	256
5.3.1 基于速度增量的逼近轨迹规划方法	257
5.3.2 基于速度增量的 V -bar 方向逼近规划仿真	263
5.3.3 基于速度增量的 R -bar 方向逼近规划仿真	274
5.3.4 基于速度增量的任意方向逼近规划仿真	286
5.4 基于常推力的机器人逼近轨迹规划	297
5.4.1 基于常推力的逼近轨迹规划方法	297
5.4.2 基于常推力的 V -bar 方向逼近规划仿真	299
5.4.3 基于常推力的 R -bar 方向逼近规划仿真	306
5.5 基于变推力的机器人逼近轨迹规划	307
5.5.1 基于变推力的逼近轨迹规划方法	307
5.5.2 基于变推力的 V -bar 方向逼近规划仿真	310
5.5.3 基于变推力的 R -bar 方向逼近规划仿真	313
5.5.4 基于变推力的任意方向逼近规划仿真	316
5.6 空间绳系机器人规划控制力的优化分配	319
5.6.1 空间绳系机器人规划控制力优化分配方法	319

5.6.2 规划控制力优化分配仿真分析	322
5.7 小结	327
第6章 空间绳系机器人逼近控制技术	329
6.1 基于推力器的空间绳系机器人逼近控制方法	330
6.1.1 空间绳系机器人逼近动力学模型	330
6.1.2 空间绳系机器人逼近控制器设计	332
6.2 考虑平台运动的空间绳系机器人逼近位置协调控制	345
6.2.1 空间绳系机器人目标逼近动力学模型	345
6.2.2 空间绳系机器人逼近控制器的设计	346
6.3 基于可移动系绳点的空间绳系机器人逼近姿态协调 控制	352
6.3.1 基于可移动系绳点的空间绳系机器人姿态动力 学模型	353
6.3.2 空间绳系机器人逼近姿态控制任务分析	357
6.3.3 空间绳系机器人逼近姿态控制器设计	358
6.4 考虑系绳姿态干扰的空间绳系机器人逼近协调控制	367
6.4.1 空间绳系机器人逼近轨道/姿态动力学模型	367
6.4.2 空间绳系机器人逼近协调控制总体流程	369
6.4.3 空间绳系机器人逼近位置协调控制器设计	370
6.5 小结	378
第7章 空间绳系机器人的捕获后处理技术	379
7.1 空间绳系机器人/目标复合体姿态协调控制	379
7.1.1 空间绳系机器人/目标复合体姿态动力学模型	379
7.1.2 空间绳系机器人/目标复合体姿态协调控制 方法	383
7.2 空间绳系机器人的回收技术	392
7.2.1 空间绳系机器人回收动力学建模	392
7.2.2 基于闭环反馈的空间绳系机器人回收控制	397

7.3 空间绳系机器人的拖曳变轨技术	408
7.3.1 空间绳系机器人拖曳变轨动力学建模	408
7.3.2 基于伪谱法的空间绳系机器人最优拖曳技术	415
7.3.3 基于滚动时域优化的空间绳系机器人拖曳控制 技术	424
7.3.4 空间绳系机器人分离变轨技术	425
7.4 小结	429
参考文献	430

第 1 章 绪 论

1.1 空间绳系机器人的定义

随着人类太空活动的不断发展,人类在太空的资产也越来越多,在这些资产中,人造卫星占了绝大多数。这些卫星一旦发生故障,就得丢弃它们,如再发射新的卫星,这不仅仅增加了成本,并且丢弃的卫星成为了新的空间垃圾,对新发射卫星的安全将造成影响。若考虑重新回收这些故障卫星,并对其进行维修,以使它们重新工作,就可以延长其生命周期,此时,太空环境下的维修就成为了新的问题。如果派遣航天员去修理,不仅增加了航天员舱外活动的频率,太空中极度恶劣的环境也会对航天员的生命安全造成威胁。因此有必要研究新的故障卫星维修手段。

为了尽可能地挽回损失和净化轨道环境,世界各国正在研究以空间机器人为手段,以卫星故障维修、卫星寿命延长以及太空垃圾清理为目的的在轨服务技术。传统的“平台/基座+多自由度机械臂手”构型的空间机器人在辅助变轨、轨道垃圾清理、失控卫星救助等方面,显得力不从心;机械臂几乎属于全刚体系统,刚体机械臂的“点对点”的操作模式对空间机器人系统的 GNC 提出了很高的要求。对于失控卫星的援救,空间机械臂几乎没有成功的例子,美国曾经试图利用航天飞机上的机械臂系统援救西班牙的失控卫星,但是以失败告终。另外,机械臂作用范围也受到机械臂长度和刚体灵活性的限制。由于空间机械臂主要针对合作目标的抓捕和操作,因此空间机械臂系统不能很好地适应未来的空间碎片清理任务。

空间绳系机器人是指具有绳系结构的空间机器人系统(如图 1-1

所示),其典型的结构是利用空间系绳取代多自由度机械臂,组建“平台/基座+空间系绳+捕获装置”的空间机器人结构,可以执行空间在轨捕获和清理任务。这种空间绳系机器人的操作半径可达数百米级,远远大于传统的空间机器人。与传统的空间机器人相比,空间绳系机器人在任务安全性和可靠性等方面有了显著的提高。由于特殊的系绳结构,空间绳系机器人执行任务的操作距离得到了很大的扩展。较远的操作距离不仅避免了平台载体向目标的近距离逼近、停泊和机动过程,减少了平台的能量消耗,更为重要的是避免了平台与目标的直接接触,消除了与目标发生直接碰撞的可能性,大大提高了平台在任务中的安全性;当发生捕获任务失败或者捕获装置故障时,平台可以通过绳系控制捕获装置对目标进行重复捕获或者回收维修,任务可靠性较高。因此利用空间绳系机器人实现对失效卫星的清理具有明显的优势和很高的应用价值。本书对空间绳系机器人的产生、发展、研究方向以及关键技术等方面的内容进行了详细阐述,为空间绳系机器人技术未来的空间应用奠定了坚实的理论基础。

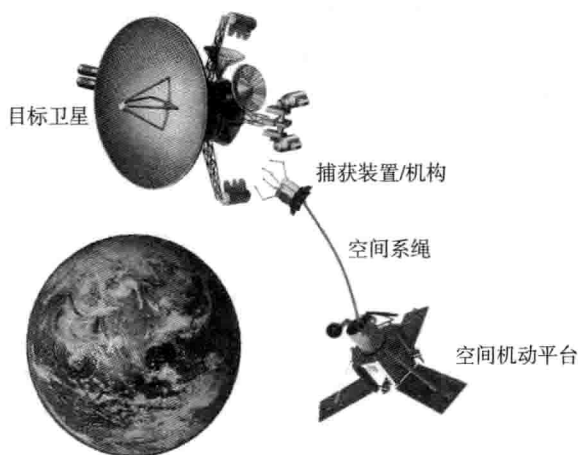


图 1-1 空间绳系机器人

1.2 空间绳系机器人的产生与发展

空间绳系机器人属于空间机器人的范畴,是一种新型的在轨捕获工具,它的产生是空间机器人技术和空间绳系技术共同作用的结果,因此我们首先对空间机器人技术和空间绳系技术的产生和发展进行介绍,使读者能够对空间绳系机器人的来龙去脉有个清晰的了解。

1.2.1 空间机器人

自古以来人类就向往在广阔无垠的天空自由翱翔,随着时代的变迁、技术的发展,人类不断地取得划时代的成果,也不断地扩展着自己的理想。从地面到天空,从滑翔到飞翔,从低空到高空,从地球到太空……随着人类空间活动的不断发展,航天飞机、宇宙飞船和空间站相继出现,空间机器人技术也越来越受到各国的重视。

空间机器人由机器人本体(卫星)和搭接在本体上的机械臂组成,它携带喷气装置,可以在宇宙空间自由飞行或浮游,代替航天员完成舱外作业。它的主要用途是对卫星提供在轨服务,即用来捕获、维修(包括零部件更换和能量补给等)失效卫星后,重新处理并投放卫星^[1],使卫星再生。

早在20世纪80年代,许多国家和研究机构就开始研究利用机器人替代航天员完成舱外活动和工作的可行性^[2]。目前,空间机器人学的研究在理论和实践两方面都取得了巨大的成就,空间机器人已经在哈勃望远镜的修复、国际空间站建造等应用中发挥了主要作用。欧美和日本也进行了多次实验型自主空间机器人的发射,并且在卫星捕获、航天器部件更换,以及轨迹跟踪、力控制实验等方面取得了成功。我国的空间机器人研究起步较晚,与空间机器人技术相关的研究主要集中在理论研究、地面实验和仿真分析等方面,对空间机器人工程化方面的研究较为欠缺^[3]。

当前,主要航天大国对空间机器人系统的研制工作已经持续了相当长的时间,并且都已经取得了成功应用。这些研究工作代表着空间机器人技术发展的方向,国外进行空间机器人技术研究的国家主要有美国、加拿大、欧盟和日本等,下面对各个国家空间机器人的相关研究和项目逐一进行介绍。

(1) 美国空间机器人项目

公认的世界上第一个空间机器人是美国 1967 年 4 月发射的勘探者 3 号月球探测器。该探测器重 280 kg,中心结构是 1 个 3 条腿的支架,上面装载各种探测仪器。之所以被称为机器人,是因为它具有一个活动机械臂。臂的末端有一把铲子,它在地面遥控下可挖掘月面土壤,掘进深度约为 18 cm。探测器能分析取出的土样,测定月面土质的硬度,以便为阿波罗载人飞船登月选择合适的着陆地点。

FTS (Flight Telerobotic Servicer) 由两个 7 自由度的机械臂和一个 5 自由度的定位腿组成,在机械臂末端装有力/力矩传感器,是类人机器人,工作于遥控操作模式下,其展开状态和存储状态如图 1-2 所示^[4,5]。该项目是美国最早的空间机器人项目,开始于 1986 年,主要目的是设计能够在空间站执行装配、维修、服务和视觉监测等任务的空间遥控操作机器人设备。原计划在航天飞机上进行 DTF-1

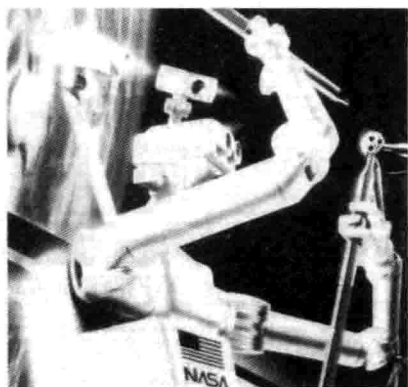


图 1-2 美国的 FTS 系统

和 DTF-2 共计两次飞行试验, 设计了桁架结构的装配、导线连接、太阳能电池装配、轨道可更换模块 (Orbit Replaceable Unit, ORU) 更换、视觉监测等实验。但于 1991 年 9 月, 该项目被停止了资金支持。

Ranger 是由 NASA 资助、Maryland 大学负责研制的灵巧空间机器人系统^[6,7], 以满足 HST (哈勃望远镜) 机器人服务的要求。将所有 HST 需要更换的器件集成在一个自由飞行本体上, 自由飞行本体上装一个机器人 (如 Ranger), 通过消耗型运载器 (如火箭) 携带发射升空, 然后在地面的监控下, 自由飞行本体与 HST 对接, 再由 Ranger 的灵巧机械臂执行服务功能, 更换陀螺、蓄电池或者科学仪器等。基于上述思想所设计的机器人为 RTFX (The Ranger Telerobotic Flight Experiment)。由于缺少免费的运载工具, 1996 年 Ranger 研发小组对系统进行重新设计, 开发了基于航天飞机演示任务的飞行硬件 RTSX (The Ranger Telerobotic Shuttle Experiment), 降低了原来的自由飞行能力, 但保持了机械臂的基本功能和构型。RTFX 和 RTSX 分别如图 1-3 和图 1-4 所示。

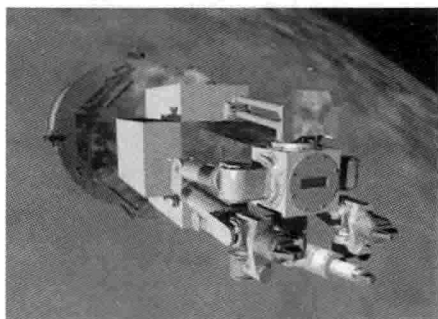


图 1-3 RTFX 概念图

AERCam (The Autonomous Extra-vehicular Robotic Camera) 是由 NASA JSC (Johnson Space Center) 开发的自由飞行相机^[8], 用于辅助航天飞机或空间站 (航天器母体) 进行视觉和非视觉监测的活动, 比如 EVA (监测、航天器母体外部的日常检查等)。其最

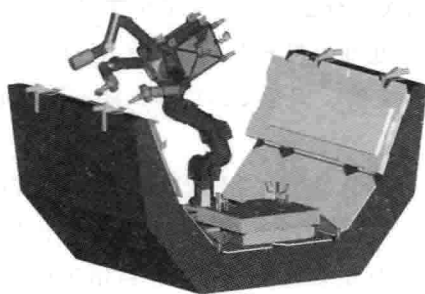


图 1-4 RTSX 系统

终的目的是拥有一个安装在载体航天器内部的系统，而且可以用指令控制该系统飞行到航天器母体外指定的某个位置，对航天器母体进行监测。该系统自动飞到指定的位置，执行监测，并将视频信息传给操作员（位于地面或者航天器母体中），以决定是否需要人参与EVA。AERCam于1996年通过评审，1997年10月进行在轨飞行演示，AERCam在轨执行任务的情况如图1-5所示。

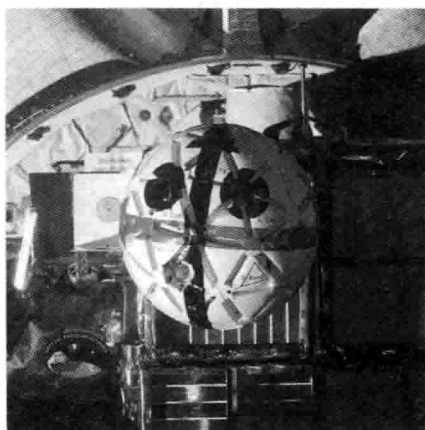


图 1-5 AERCam 示意图

Skyworker 是一个为了实现大质量载荷运输和装配任务的机器人，能够对大空间结构进行自主装配、监测和维修，由 NASA 对此