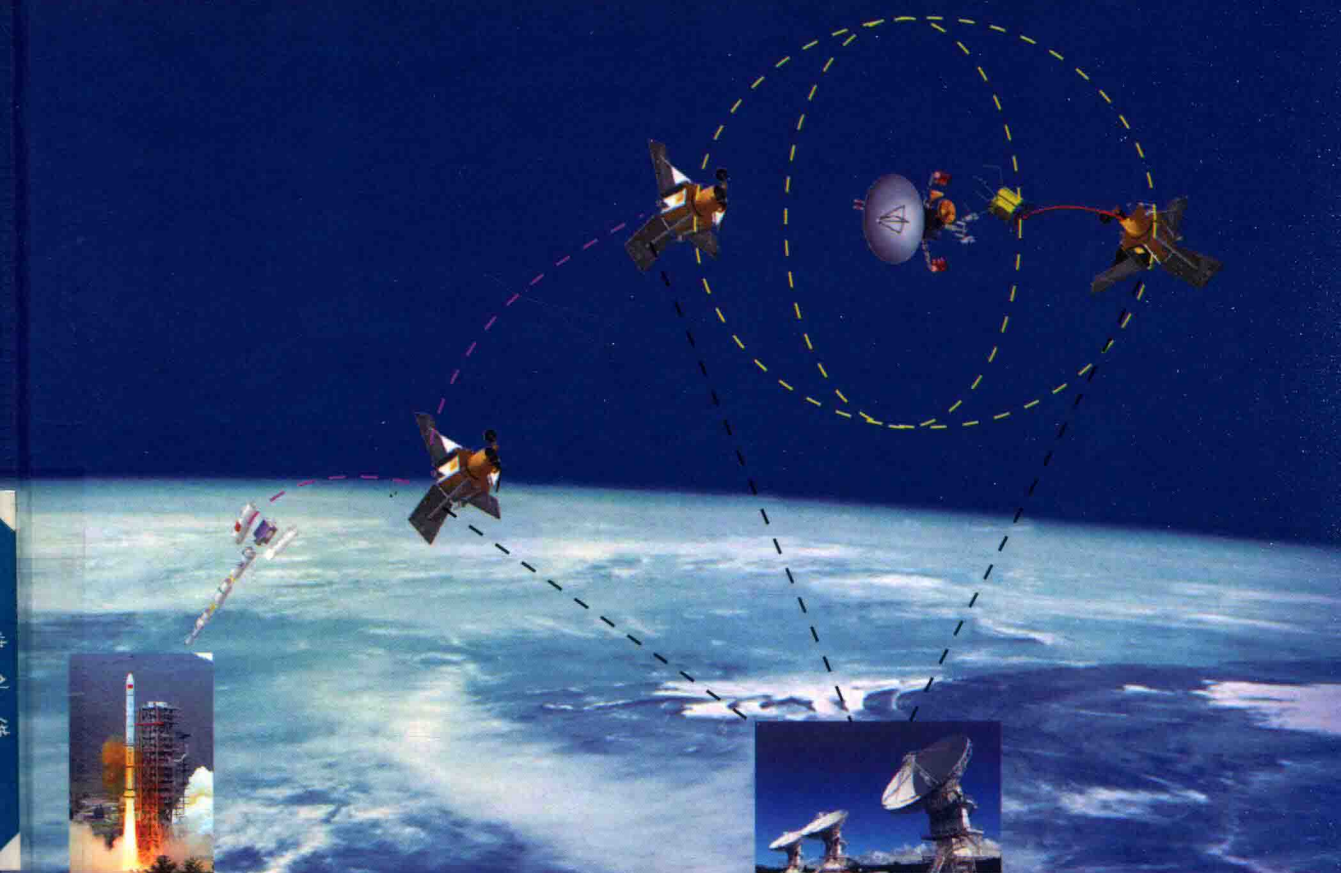




航天科技图书出版基金资助出版

空间绳系机器人 飞行控制技术

孟中杰 黄攀峰 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

空间绳系机器人飞行控制技术

孟中杰 黄攀峰 著



中国宇航出版社

· 北京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间绳系机器人飞行控制技术 / 孟中杰, 黄攀峰著

. -- 北京: 中国宇航出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5159-1455-8

I. ①空… II. ①孟… ②黄… III. ①空间机器人—
飞行控制—机器人控制 IV. ①TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 045837 号

责任编辑 舒承东 封面设计 宇星文化

出版 中国宇航出版社
发行

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2018 年 3 月第 1 版
2018 年 3 月第 1 次印刷

规格 787×1092

开本 1/16

印张 15.25

字数 372 千字

书号 ISBN 978-7-5159-1455-8

定价 128.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助20~30项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

前 言

随着人类太空活动的不断增多,在轨服务技术受到越来越多的重视,已经成为空间技术发展的一个新热点。在这方面,空间机器人拥有独特的优势,因此,各航天大国相继开展空间机器人的研究。空间绳系机器人具有"空间平台星(含系绳控制机构)+空间系绳+抓捕器"的新型结构,是一种由传统空间机械臂与空间绳系系统结合形成的柔性空间机器人系统,是当前在轨服务技术发展的热点方向之一。该机器人的操作半径由空间系绳长度决定,可达数百米,远大于传统的空间机器人。由于空间系绳的存在,使得末端操作机构与空间平台星本体分离,操作过程中即使出现意外情况,也不会对空间平台星本体产生较大的安全威胁;末端抓捕器与空间平台星相比,有较小的质量和转动惯量,因此在任务过程中其机动性更高,且降低了对GNC的要求;另外,还避免了空间平台星的近距离逼近和停靠,减少了任务过程中的推进剂消耗。

但由于空间系绳的分布质量、弹性、柔性等特点以及抓捕器的多刚体特性,空间绳系机器人是一种典型的刚柔耦合系统,其控制问题十分复杂。而目标星的非合作特性、测量/执行器同时受限、空间轨道动力学等极大地加剧了空间绳系机器人的控制难度。本书按照空间绳系机器人的典型操作任务流程,充分考虑多个工程应用中实际存在的约束问题,分别研究其目标逼近、目标抓捕、辅助稳定、拖曳变轨等四个阶段的控制问题,为空间绳系机器人的研究与应用奠定了基础。

全书分为7章。第1章对空间绳系机器人飞行控制技术的发展现状进行介绍。第2章介绍了空间绳系机器人的动力学建模及目标逼近控制方法。重点介绍了以最小代价逼近目标星的中远距逼近控制方法和测量信息不完备条件下的超近距逼近控制方法。第3章介绍了利用空间绳系机器人的目标抓捕稳定控制方法。针对抓捕后的辅助稳定问题,第4章到第6章分别利用推力器、推力器/系绳协调、仅用系绳三种方式进行辅助稳定控制。其中,第4章研究了针对推力方向已知、推力方向未知/变化、组合体姿态/系绳状态联合控制三个问题;第5章研究了利用系绳张力/推力器协调、系绳张力臂/推力器协调的目标星辅助稳定控制方法;第6章研究了系绳摆动抑制和目标星姿态稳定控制问题。第7章介绍了利用系绳的目标星拖曳变轨控制方法,分别研究了拖曳轨道设计、拖曳过程防缠绕及拖曳过程的组合体姿态稳定控制问题。

本书是集体智慧的结晶,除作者之外,王东科、王秉亨、鲁迎波、胡仄虹、胡永新等多位同志也做了大量工作,在此一并表示感谢。最后,特别感谢航天科技图书出版基金对本书的资助,以及中国宇航出版社为本书出版所做的大量工作。

本书可供从事空间机器人技术、空间绳系系统、飞行控制等相关专业的工程技术人员参考,也可以作为高等院校航天应用类、飞行控制类相关专业研究生和高年级本科生的辅助教材。希望本书的出版对于推动空间绳系机器人的研究和应用起到良好的作用。研究刚刚开始,精彩将不断涌现!

本书内容是作者所在研究团队多年来研究工作的总结,内容丰富、全面,具有很强的理论性和实用性。囿于水平,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正,不吝赐教,使之完善提高。

作 者

2017 年 10 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 空间绳系机器人的概念	1
1.2 空间绳系机器人的研究计划与进展	2
1.2.1 空间绳系系统类型	2
1.2.2 空间绳系系统研究计划	4
1.3 空间绳系机器人飞行控制研究进展	9
1.3.1 空间绳系机器人动力学建模	10
1.3.2 空间绳系机器人目标星逼近控制	11
1.3.3 空间绳系机器人目标星抓捕控制	13
1.3.4 空间绳系机器人目标星辅助稳定控制	16
1.3.5 空间绳系机器人拖曳变轨控制	18
1.4 本书内容介绍	19
第2章 空间绳系机器人的目标逼近控制	21
2.1 空间绳系机器人的动力学模型	21
2.1.1 空间系绳动力学模型	22
2.1.2 空间绳系机器人动力学建模	23
2.1.3 空间绳系机器人动力学模型离散化	27
2.1.4 空间绳系机器人动力学模型验证	31
2.2 空间绳系机器人的中远距离逼近控制	34
2.2.1 空间绳系机器人逼近动力学任务分析	34
2.2.2 中远距离逼近的邻域最优控制器设计	37
2.2.3 仿真分析	41
2.3 空间绳系机器人的超近距离逼近控制	46
2.3.1 帆板支架边缘线观测模型	46
2.3.2 目标星超近距离逼近模型	48
2.3.3 基于直线跟踪的混合视觉伺服控制	50
2.3.4 实验分析	53
2.4 小结	56

第3章 空间绳系机器人的目标抓捕稳定控制	57
3.1 空间绳系机器人目标抓捕动力学分析	57
3.1.1 空间目标星动力学模型	57
3.1.2 空间绳系机器人/目标碰撞模型	58
3.1.3 空间绳系机器人/目标碰撞分析	60
3.2 空间绳系机器人目标抓捕稳定控制	83
3.2.1 空间绳系机器人目标抓捕模型	83
3.2.2 基于阻抗控制的抓捕鲁棒自适应控制	84
3.2.3 仿真分析	90
3.3 小结	98
第4章 利用推力器的空间目标星辅助稳定控制	99
4.1 空间绳系机器人/目标星组合体快速稳定控制	99
4.1.1 空间绳系机器人/目标星组合体动力学模型	99
4.1.2 基于快速终端滑模的组合体姿态控制器设计	101
4.1.3 基于零空间修正伪逆法的控制力矩分配	107
4.1.4 仿真分析	110
4.2 推力方向未知/变化的组合体稳定控制	115
4.2.1 推力方向未知的组合体姿态自适应控制	115
4.2.2 推力方向变化的控制力鲁棒分配	117
4.2.3 仿真分析	119
4.3 组合体姿态/系绳状态自适应稳定控制	120
4.3.1 系绳/机器人/目标星组合体动力学模型	121
4.3.2 基于动态逆的自适应抗饱和控制	121
4.3.3 仿真分析	124
4.4 小结	132
第5章 系绳/推力器协调的空间目标星辅助稳定控制	133
5.1 系绳张力/推力器协调稳定控制	133
5.1.1 系绳张力/推力器协调稳定控制任务分析	133
5.1.2 鲁棒自适应反步控制器设计	134
5.1.3 仿真分析	138
5.2 系绳机械臂机构/推力器协调稳定控制	146
5.2.1 系绳/机械臂/目标星组合体动力学建模	146
5.2.2 机械臂/推力器协调控制器	148
5.2.3 仿真分析	152
5.3 小结	156

第 6 章 仅利用系绳的空间目标星辅助稳定控制	158
6.1 利用系绳的机器人/目标星组合体摆动抑制	158
6.1.1 空间绳系机器人/目标星组合体动力学模型	158
6.1.2 组合体摆动抑制控制指令设计	160
6.1.3 组合体摆动抑制控制器设计	161
6.1.4 仿真分析	164
6.2 利用系绳的机器人/目标星组合体姿态稳定控制	168
6.2.1 利用系绳的机器人/目标星姿态动力学模型	168
6.2.2 姿态平衡状态与运动约束分析	172
6.2.3 姿态欠驱动抗饱和控制律设计	175
6.2.4 系绳张力控制律设计	183
6.2.5 仿真分析	184
6.3 小结	190
第 7 章 利用系绳的空间目标星拖曳控制	191
7.1 利用系绳的空间目标星拖曳轨道设计	191
7.1.1 组合体时间/能量拖曳轨道优化	191
7.1.2 组合体双脉冲旋转拖曳变轨方法	198
7.2 拖曳变轨中目标星防缠绕技术	201
7.2.1 考虑缠绕的空间目标星拖曳变轨模型	202
7.2.2 拖曳过程系绳缠绕抑制方法	205
7.2.3 仿真分析	207
7.3 推力/系绳不共线下的组合体姿态稳定	212
7.3.1 组合体拖曳变轨姿轨控制指令设计	212
7.3.2 欠驱动分层滑模姿轨耦合控制器	213
7.3.3 仿真分析	216
7.4 小结	219
参考文献	221

第 1 章 绪 论

1.1 空间绳系机器人的概念

随着人类太空活动的不断增多，在轨服务技术受到越来越多的重视，已经成为空间技术发展的一个新热点。在轨服务主要包括在轨维修、在轨加注、在轨实验、辅助空间站组装、轨道垃圾清理等方面。传统在轨服务中，航天员是完成相关复杂任务的主要执行者，太空中极度恶劣的环境会对航天员的生命安全造成严重威胁。在辅助变轨、轨道垃圾清理、失控卫星救助等方面，空间机器人拥有独特优势，成为帮助或取代航天员的最佳选择，因此各航天大国相继开展空间机器人的研究^[1-4]。

目前的空间机器人是“基座/平台+多自由度机械臂+机械手”的构型，属于全刚体系统^[5-9]，如图 1-1 所示。空间机器人已经在哈勃望远镜修复、国际空间站建造等应用中发挥了主要作用。欧美和日本进行了多次实验型自主空间机器人的发射^[10-15]，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。但受机械臂长度和刚体灵活性的限制，这类空间机器人在操作时需要充分靠近目标，在执行失控卫星救助、轨道垃圾清理等非合作目标捕获任务时灵活性较差，安全性不高。除此之外，传统空间机器人具有整体惯量较大、系统动态响应较差及在执行任务过程中能耗较高的缺点。美国曾经试图利用航天飞机上的空间机器人系统援救西班牙的失控卫星，但以失败告终。

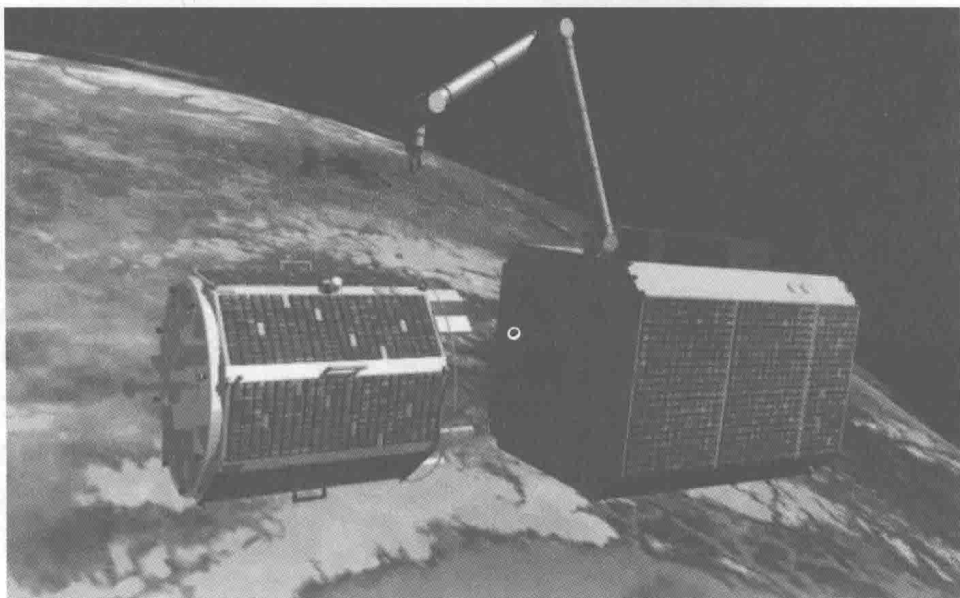


图 1-1 空间机器人示意图

为了弥补传统空间机器人存在的执行任务灵活性较差、操作范围小、安全可靠性的缺点,目前发展起来一种“空间平台星(含系绳控制机构)+空间系绳+抓捕器”的新型空间绳系机器人系统^[16],如图1-2所示。利用空间系绳取代多自由度机械臂,操作半径由空间系绳长度决定,可达数百米,远大于传统的空间机器人;由于空间系绳的存在,使得末端操作机器人与空间平台本体分离,操作过程中即使出现意外情况,也不会对空间平台本体产生较大的安全威胁;末端抓捕器与空间平台星相比,有较小的质量和转动惯量,因此在任务过程中其机动性能更高,降低了对GNC的要求;另外,还避免了空间平台星近距离的逼近和停靠,减少了任务过程中的推进剂消耗。

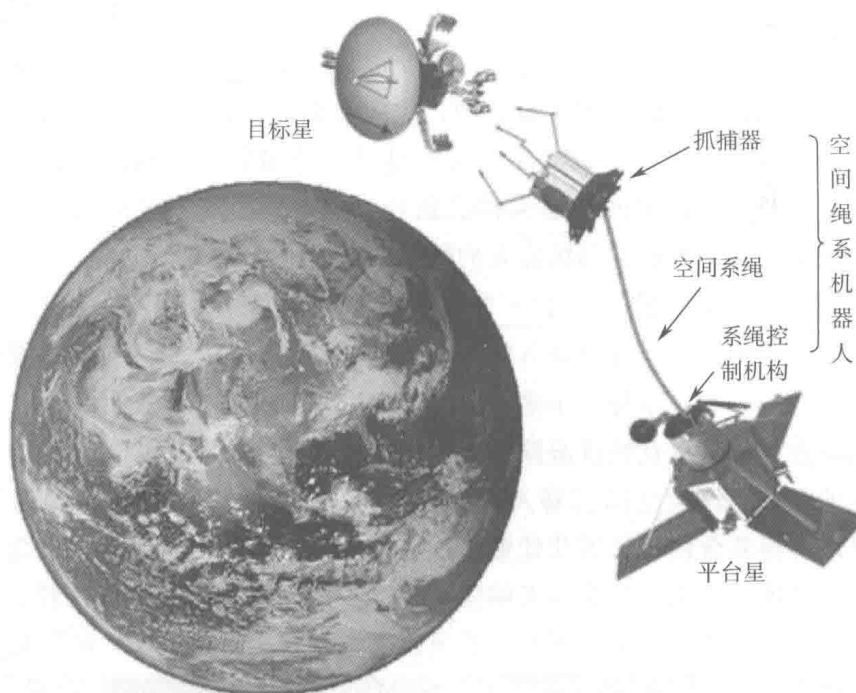


图1-2 空间绳系机器人系统

1.2 空间绳系机器人的研究计划与进展

机械臂式的刚体空间机器人是目前最为成熟的空间机器人系统,从20世纪60年代开始,在各种空间任务中发挥了巨大的作用,例如:美国的轨道快车计划、Robonaut类人机器人、加拿大的国际空间站机械臂、日本的ETS-VII等。空间绳系机器人是一种特殊的空间机器人,同时具备空间机器人和空间系绳在空间在轨服务中的独特优势,是空间机器人技术和空间绳系技术结合的产物。本节从空间绳系系统的发展开始,介绍空间绳系机器人的发展历程。

1.2.1 空间绳系系统类型

空间绳系技术的应用早期起因于空间救生、微重力实验及外空辐射测量等方面的需

要, 后来随着研究的展开与深入, 科学家们逐渐发现这种航天系统还具有其他许多新颖独特的应用, 这些新应用的发现又促进了空间绳系技术的研究与发展^[17-24]。其主要应用包括: 空间电梯、星际转移、人工重力产生、轨道提升、载荷入轨/离轨、航天器重力稳定、空间环等。对不同应用进行梳理, 将空间绳系系统分为以下四种类型。

(1) 静止绳系系统

在静止绳系系统使用过程中, 系绳的长度和数量、航天器的数量和质量以及它们的相互位置和指向是不变的。可用于深空、近地空间、地球大气和地球表面研究等^[25], 静止绳系技术在空间资源开发和空间环境探测方面有其独特的优点和广泛的应用前景, 如图 1-3 所示。

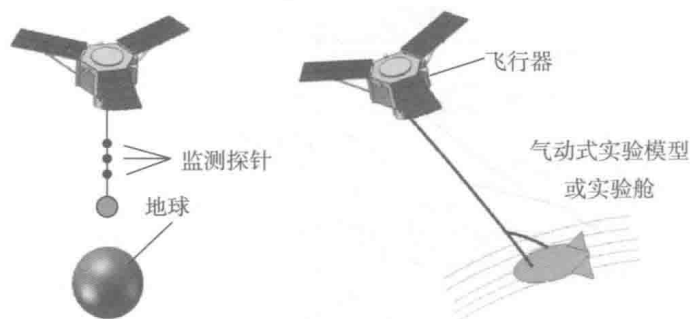


图 1-3 静止绳系系统

(2) 空间动量交换绳系系统

空间动量交换绳系系统的特点是: 系绳的数量和长度、航天器的数量和质量以及它们的相互位置和指向是经常改变的。该系统由高强度绳索、系绳展开/回收机构及控制平台组成。系统可用于完成航天器的轨道机动而不消耗推进剂, 即用系绳把航天器抓住并把它拖走, 如图 1-4 所示。

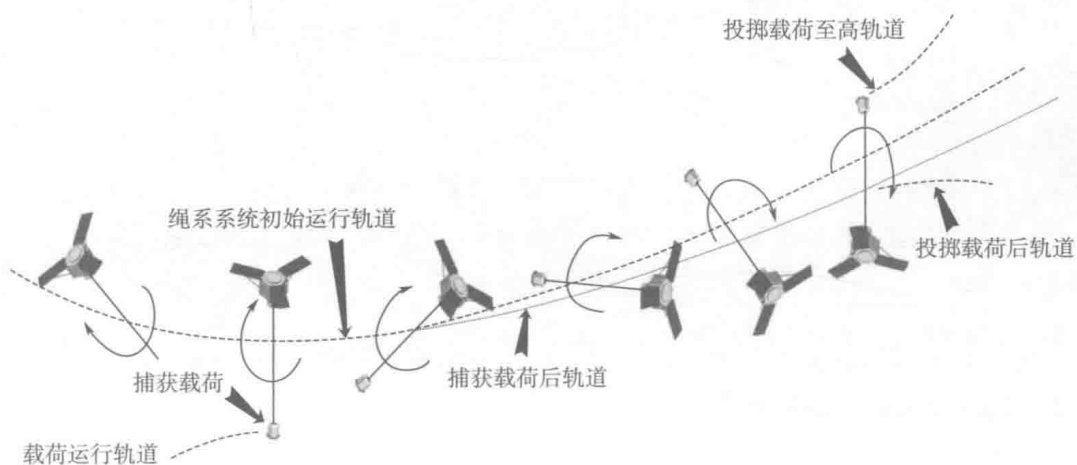


图 1-4 空间动量交换绳系系统

(3) 空间电力绳系系统

如图 1-5 所示,空间电力绳系系统高速运动切割地磁力线的同时,绳索一端电子收集器收集等离子层中电子,沿绳索流动到另一端,通过电子发射器将电子送回等离子层,形成闭环电路,从而产生电磁力。利用该系统在轨道上运动的部分动能,可以产生功率为兆瓦量级的电能,可以保持/提升/降低飞行器轨道高度而不必消耗推进剂。

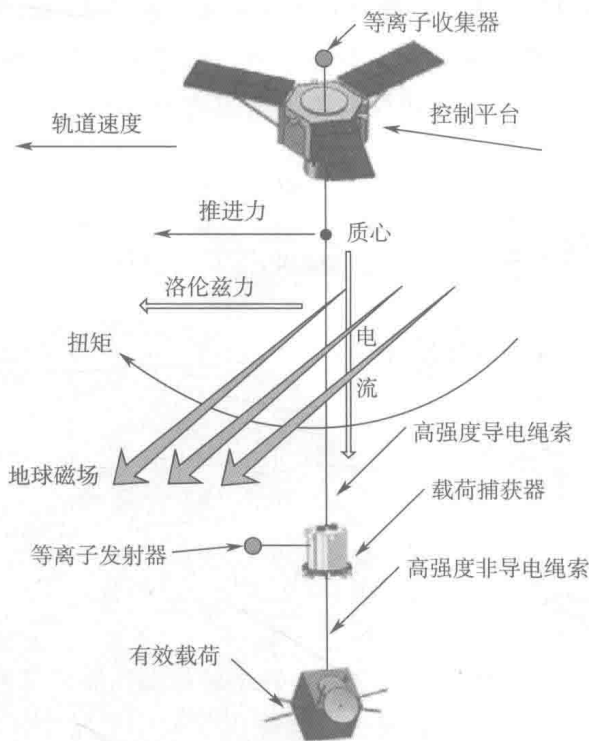


图 1-5 空间电力绳系系统

(4) 空间绳系机器人系统

如图 1-2 所示,空间绳系机器人是一种利用系绳取代空间机械臂的新型空间机器人。它可以在分离速度、抓捕器推力器、系绳张力等作用下对目标星进行较远距离捕获,然后进行辅助稳定、操作、回收、拖曳等操作。与上述三类空间绳系系统相比,空间绳系机器人的系绳较短,一般仅数百米,更注重对目标星的操作,在抓捕时更多关心抓捕器/目标星的相对位姿控制;在后续更多关心组合体的姿态问题,包括系绳姿态和目标星姿态等;在辅助变轨时,由于系绳较短,采用拖曳变轨方式。按抓捕器的种类,可将空间绳系机器人分为爪式、网式、矛式、机械臂式等多种类型。

1.2.2 空间绳系系统研究计划

空间绳系系统目前处于空间应用的前沿,近几十年来,美国、欧盟、日本等均开展了大量的空间绳系系统相关研究计划,完成了多次空间绳系系统在轨实验。已完成的主要实验情况如表 1-1 所示^[26]。

表 1-1 空间绳系系统已完成在轨实验情况

计划/任务	国家/地区	年份	系绳长度	展开长度
GEMINI-11/12	美国	1966	36 m	36 m
TPE-1/2	美国、日本	1980/1981	400 m	38/103 m
CHARGE-1/2/2B	美国、日本	1983/1984/1992	418/426/426 m	418/426/426 m
OEDIPUS-A/C	美国、加拿大	1989/1995	958/1174 m	958/1174 m
TSS-1/1R	美国、意大利	1992/1996	20/19.7 km	268 m/19.7 km
SEDS-1/2	美国	1993/1994	20/20 km	20/20 km
PMG	美国	1993	500 m	500 m
TIPS	美国	1996	4 km	4 km
ATE _x	美国	1998	6.05 km	22 m
PICOSAT1.0/1.1	美国	2000	30/30 m	30/30 m
YES2	俄罗斯、欧盟	2007	31.7 km	29 km
KUKAI	日本	2009	5 m	仅几厘米
T-REX	日本、美国	2010	300 m	300 m

1992 年, 美国 NASA 和意大利空间局 ASI 合作研制的绳系卫星系统 TSS-1^[26], 如图 1-6 所示。该项目采用亚特兰蒂斯号航天飞机作为试验航天器, 子卫星为球形, 直径 1.6 m, 质量 521 kg, 试验系绳采用直径 2.54 mm 的导电系绳, 以诺梅克斯作为缆芯, 一组 10 根涂有氟化乙烯绝缘材料的 34 号铜绞线缠绕在缆芯上, 外部采用凯夫拉纤维和诺梅克斯复合编制材料。子卫星携带推力器, 用于系绳展开初始阶段姿态控制和速度控制。该系统在轨完成了 12 项科学实验, 如电离层低频波测量、电动力特性和无线电物理研究等。

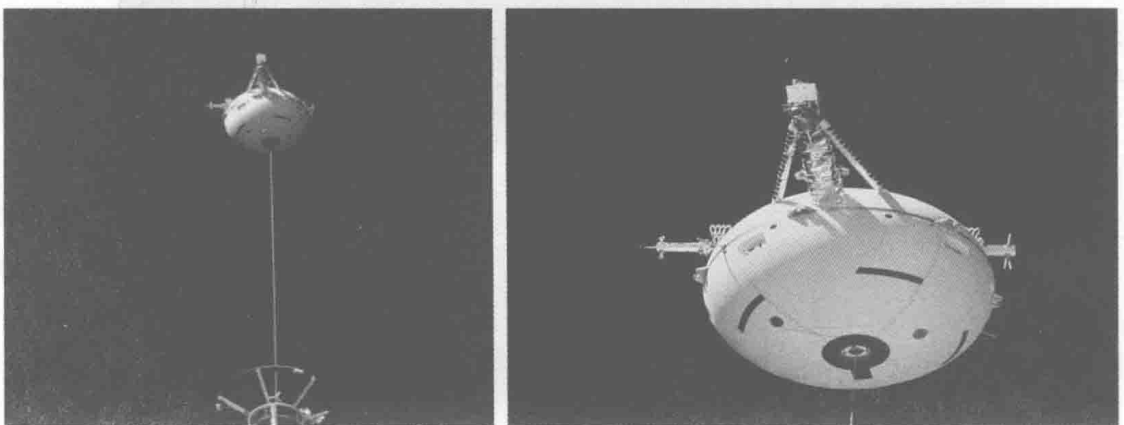


图 1-6 TSS-1 绳系卫星系统

1993 年, 美国利用 NASA 马歇尔航天飞行中心 (MSFC) 研制的小型可扩展的展开系统 SEDS-1 成功地进行了长绳系轨道飞行试验^[26]。验证了基于系绳不消耗推进剂而实现载荷返回的能力, 同时研究了载荷与系绳分离后的动力学。在轨实验中, 系绳展开过程

比预想的快且顺利,展开结束时相对速度达到 7 m/s ,进而导致一系列的系绳振荡。1994年,美国又发射了第二颗绳系小卫星 SEDS-2,在轨验证内容包括:反馈控制下展开控制机构的效率、空间系绳长期演化历程等。在轨实验结果表明:末端载荷沿预定轨迹运动且在展开结束段保持平稳,展开结束时,末端载荷沿当地铅垂方向,相对速度不大于 0.02 m/s ,振荡幅度也在 4° 以内。可惜的是,在入轨 4 天后,由于微流星撞击,导致系绳断裂,试验终止。

2007 年,为了验证系绳动态释放方法在实现在轨载荷返回方面的可行性,由俄罗斯和欧盟联合进行了 YES2 的在轨试验^[26-30]。该试验采用了直径 0.5 mm 、长度 31.7 km 的不导电系绳,并采用向下释放的方式。首先,系绳缓慢释放至 1.5 km ,子星在当地垂线附近摆动;然后停止释放系绳,系绳在当地垂线方向附近小幅振荡;再快速释放系绳,在科氏力作用下,系绳开始偏离当地垂线方向,以大角度向轨道飞行方向摆动;之后,向反方向施加一个减速脉冲,减小子星绝对速度;当子星振荡至当地垂线附近时,脱离系绳并进入大气层。

2009 年,日本 Kagawa 大学研发并首次进行了空间绳系机器人 KUKAI 的在轨验证试验^[31-32]。如图 1-7 所示,KUKAI 由母星、子星以及连接两者的 5 m 长的不导电系绳组成,此外子星上还安装一个两自由度的连杆机构,用于控制子星的姿态。母星是一个绳系展开系统,负责系绳展开和子星回收,子星是一个空间绳系机器人系统,通过自身机械臂的运动控制子星的姿态。母星、子星间采用蓝牙通信。该任务主要验证系绳的释放,以及利用连杆控制子星姿态的可行性。遗憾的是,由于机械故障,该任务的系绳仅释放了几厘米。

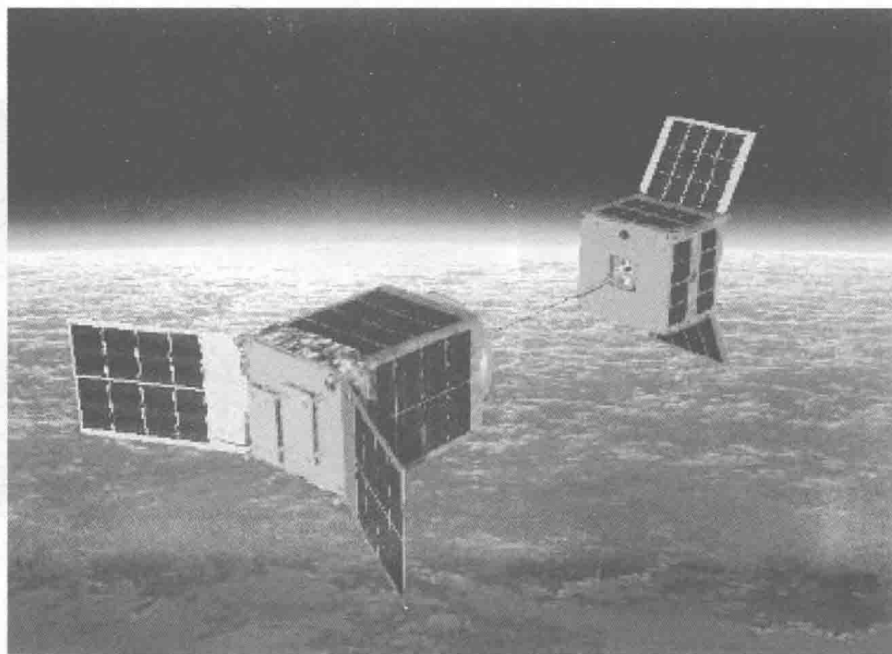


图 1-7 KUKAI 的模拟释放图

除了上述已经进行在轨验证的项目之外,目前各国正在进行多项空间绳系系统的研究计划。例如:美国 Tether Unlimited (TU) 公司研制的小型电动绳系推进系统 μ PET,如图 1-8 所示。该系统无需推进剂即可为微小卫星提供轨道提升/降低、倾角变化及姿态保持所需的推力。除此之外,还可作为重力梯度姿态控制单元使用。

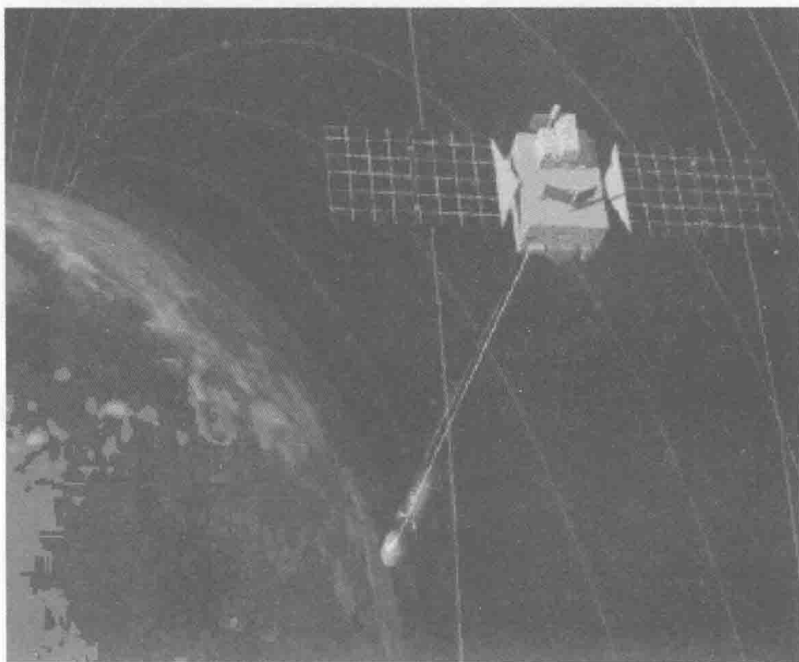


图 1-8 微小卫星无推进剂电动绳系推进系统

美国 NASA 支持的 MXER (Momentum — eXchange Electrodynamic Reboost) 项目^[33-36]设想利用绳索为载荷提供从 LEO 到 GEO 的轨道转移服务,并实现系统本身不消耗推进剂的轨道机动和轨道保持。该项目综合了动量交换绳索、电动绳索应用、绳索轨道提升等多个方面的技术,是绳系卫星相关技术的综合应用和发展前沿。

在考虑目标捕获的空间绳系机器人方面,美国 TU 公司经过研究提出了 GRASP 系统(图 1-9),利用绳索在刚性杆件的支撑下形成一个网状结构,在交会的过程中可靠地抓捕载荷,并利用绳索的柔性特性来缓冲 MXER 系统抓捕和轨道转移过程中所产生的数倍重力加速度。

美国 NASA 支持下的 NIAC (先进概念研究所)于 2002 年提出空间目标捕获方法,图 1-10 所示为其建议的捕获概念,该概念基本上采用一种飞行捕获系统完成对目标的跟踪和捕获。另外,NIAC 还设计了旋转稳定飞网捕获模式,飞网弹出后依靠平台的低速旋转产生向心力打开飞网,而后形成“篮子”状构型,进而捕获目标,如图 1-11 所示。

EADS (欧洲宇航防务集团)的空间运输子公司于 2003 年初提出的 ROGER (同步轨道修复者机器人)项目^[37-40],如图 1-12 所示,引入了空间机动平台+多功能空间绳系机器人捕获系统的概念。ROGER 采用了两种捕获机构:空间爪和空间网,利用空间系绳实现对失效卫星的捕获任务。图 1-13 为爪式绳系捕获系统。

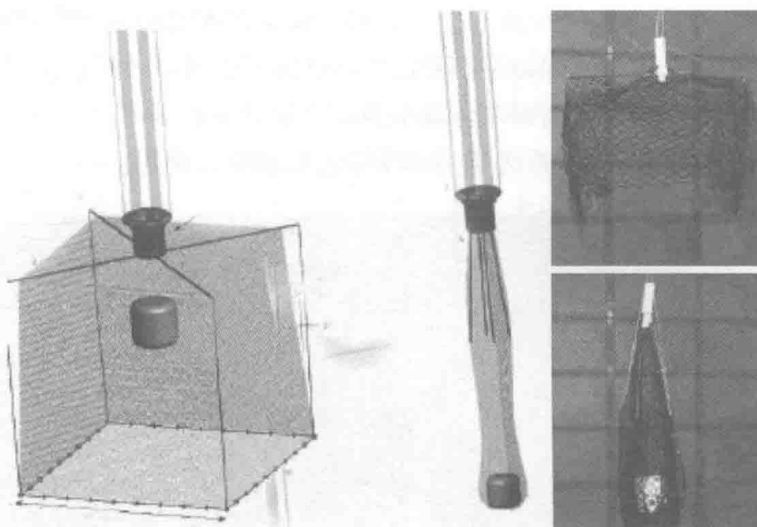


图 1-9 GRASP 项目中的捕获网原型

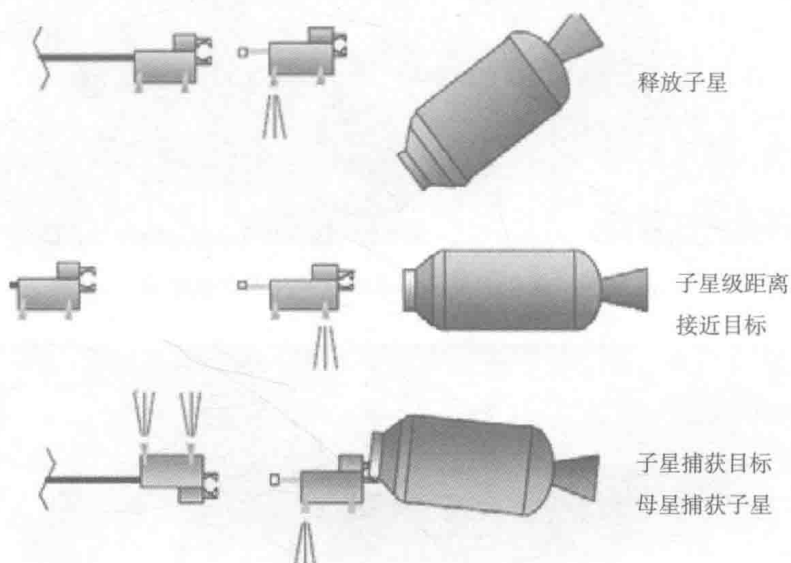


图 1-10 NIAC 在轨目标捕获概念

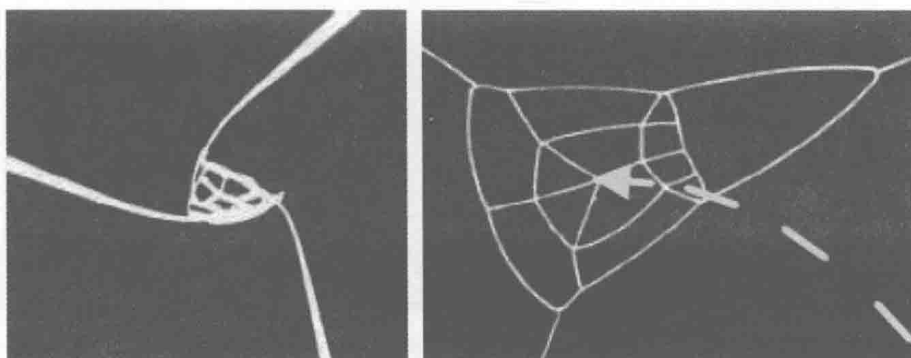


图 1-11 NIAC 旋转稳定飞网