

Mathematica

数学软件与数学实验

章美月 刘海媛 金 花 编著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

014002380

0245
73-2

Mathematica

数学软件与数学实验

章美月 刘海媛 金花 编著



北航

01688040

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

0245

73-2

内 容 提 要

本书是在 2010 年出版的《数学软件 Mathematica 及其应用》的基础上修订而成的。对原书的内容进行了大篇幅的调整,又增加了“数学实验”的内容,也包括更换书名。修订后,该书更适应高等院校对该课程的教学需要。

本书结合数学的各个分支由浅入深地介绍了 Mathematica 软件的应用和实验,共有两篇,第一篇 Mathematica 软件,分 8 章,第 1~2 章介绍 Mathematica 软件的基本操作、基本计算;第 3 章介绍 Mathematica 软件的编程方法和技巧;第 4 章介绍各种图形的绘制方法;第 5 章介绍 Mathematica 软件在线性代数上的应用;第 6 章介绍 Mathematica 软件在插值、拟合和数学规划上的应用;第 7 章介绍 Mathematica 软件在微分方程求解上的应用;第 8 章介绍 Mathematica 软件在概率论和数理统计上的应用。第二篇数学实验,分 20 个实验,实验 1~7 是高等数学实验;实验 8 是特殊图形和声音;实验 9 是基本编程;实验 10~14 是数值分析实验;实验 15~20 是概率统计实验。本书设有附录,每一章和每一个实验后面都配有习题,便于读者练习、巩固和提高。

本书可作为高等学校理工类、经管类专业数学软件课程的教材和参考书,也可供工程技术人员、科研工作者使用。

图书在版编目(CIP)数据

Mathematica 数学软件与数学实验/章美月,刘海媛,金花编著. —2 版. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1857 - 5

I. ①数… II. ①章…②刘…③金… III. ①数值计算—Mathematica 软件—教材 IV. ①O245

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 080776 号

书 名 Mathematica 数学软件与数学实验
编 著 章美月 刘海媛 金 花
责任编辑 周 红
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 18.5 字数 332 千字
版次印次 2013 年 6 月第 2 版 2013 年 6 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

PREFACE

Mathematica 软件是世界上著名的、具有充分集成环境的符号运算系统,拥有强大的数值计算和符号运算能力。Mathematica 软件函数命令都是模拟数学函数的结构来定义的,所有程序都可以看做是一个或大或小的函数。Mathematica 软件程序易编写,适用于自然科学和社会科学各领域的科学计算。目前 Mathematica 软件用户数以百万,很多大学把 Mathematica 软件作为大学生在校的必修课之一。有些学校利用 Mathematica 软件作为数学类课程教学改革的支撑平台,它的应用范围正在不断扩展。

当前,很多高校设置“数学实验”,将其作为一个重要的实践创新课程,旨在通过数学实验课程使学生学会用数学,同时培养学生用数学解决实际问题的能力。由于 Mathematica 软件在数学表示和函数绘图上的优势,许多高校采用 Mathematica 软件作为“数学实验”课程的主要工具。本书的第一版《数学软件 Mathematica 及其应用》于 2010 年出版,出版后获得了许多教师和读者朋友的好评,特别是本书的定位得到了认同。现在的《Mathematica 数学软件与数学实验》是原书的修订版。为了更好地适应高等院校对该课程的教学需要,这次修订对原书进行了大幅度的调整,针对“数学实验”课程教学,又增加了“数学实验”的内容,包括更换书名。本书的创新之处首先是使用了新版的 Mathematica 8 软件系统编制程序,程序更精炼;其次是数学

软件和数学实验交相呼应,读者学习更方便。

本书共有两篇,第一篇数学软件,分8章,第1、2章介绍 Mathematica 软件的基本操作、基本计算;第3章介绍 Mathematica 软件的编程方法和技巧;第4章介绍各种图形的绘制方法;第5章介绍 Mathematica 软件在线性代数上的应用;第6章介绍 Mathematica 软件在插值、拟合和数学规划上的应用;第7章介绍 Mathematica 软件在微分方程求解上的应用;第8章介绍 Mathematica 软件在概率论和数理统计上的应用。第二篇数学实验,分20个实验,实验1~7是高等数学实验;实验8是特殊图形和声音;实验9是基本编程;实验10~14是数值分析实验;实验15~20是概率统计实验。本书设有附录,每一章和每一个实验后面都配有习题,便于读者练习、巩固和提高。

本书可作为高等学校理工类、经管类专业数学软件课程和数学实验课程的教材和参考书,也可供工程技术人员、科研工作者使用。由于作者水平有限,不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者

2013年4月

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

《微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列》

编写委员会

主任委员 丁衡高

副主任委员 尤 政

委 员 (以拼音排序)

丁桂甫 邓中亮 郝一龙 黄庆安

金玉丰 金仲和 康兴国 李佑斌

刘晓为 欧 黎 王晓浩 王跃林

温志渝 邢海鹰 杨拥军 张文栋

赵万生 朱 健

序

1994年11月2日,我给中央领导同志写信并呈送所著《面向21世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,提出微米纳米技术是一项面向21世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,应大力倡导在我国及早开展这方面的研究工作。建议得到了当时中央领导同志的高度重视,李鹏总理和李岚清副总理均在批示中表示支持开展微米纳米技术的跟踪和研究工作。

国防科工委(现总装备部)非常重视微米纳米技术研究,成立国防科工委微米纳米技术专家咨询组,1995年批准成立国防科技微米纳米重点实验室,从“九五”开始设立微米纳米技术国防预研计划,并将支持一直延续到“十二五”。

2000年的时候,我又给中央领导写信,阐明加速开展我国微机电系统技术的研究和开发的重要意义。国家科技部于当年成立了“863”计划微机电系统技术发展战略研究专家组,我担任组长。专家组全体同志用一年时间圆满完成了发展战略的研究工作,这些工作极大地推动了我国的微米纳米技术的研发和产业化进程。从“十五”到现在,“863”计划一直对微机电系统技术给以重点支持。

2005年,中国微米纳米技术学会经民政部审批成立。中国微米纳米学术年会经过十几年的发展,也已经成为国内学术交流的重要平台。

在总装备部微米纳米技术专家组、“863”专家组和中国微米纳米技术学会各位同仁的持续努力和相关计划的支持下,我国的微米纳米技术已经得到了长足的发展,建立了北京大学、上海交通大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等加工平台,形成了以清华大学、北京大学等高校和科研院所为主的优势研究单位。

十几年来,经过国防预研、重大专项、国防“973”、国防基金等项目的支持,我国已经在微惯性器件、RF MEMS、微能源、微生化等器件研究,以及微纳加工技术、ASIC技术等领域取得了诸多突破性的进展,我国的微米纳米技术研究平台已经形

成,许多成果获得了国家级的科技奖励。同时,已经形成了一支年富力强、结构合理、有影响力的科技队伍。

现在,为了更有效、有针对性地实现微米纳米技术的突破,有必要对过去的研究工作做一阶段性的总结,把这些经验和知识加以提炼,形成体系传承下去。为此,在国防工业出版社的支持下,以总装备部微米纳米技术专家组为主体,同时吸收国内同行专家的智慧,组织编写一套微米纳米技术专著系列丛书。希望通过系统地总结、提炼、升华我国“九五”以来微米纳米技术领域所做出的研究工作,展示我国在该技术领域的研究水平,并指导“十二五”及以后的科技工作。

丁衡高

2011年11月30日

致 谢

本书是在清华大学精密仪器与机械学系智能微系统研究室的各位老师及同学的多年努力支持下完成的。书稿在多次交流与沟通中不断改进、完善,每次修改的经历点点滴滴都历历在目。空间微系统与微纳卫星技术能够通过这本书进行总结,也体现了科研不断吐故纳新、稳步提高的规律和特点。在本书的撰写过程中我的学生及同事们,如任大海、张高飞、李滨、杨建中、邢飞、阮勇、赵开春、李伟及张帆等,给了我有力的支持和帮助,在文献资料的搜集和文稿的校对方面做了很多工作,在此一并致谢。

本书序

微纳卫星是以微机电一体化系统(MEMS)技术和由数个 MEMS 组成的专用集成微型仪器(ASIM)为基础的一种全新概念的卫星。采用多维集成技术,利用大规模集成电路的设计思想和制造工艺,不仅把机械部件像电子电路一样集成起来,而且把传感器、执行机构、微处理器以及其他电学和光学系统都集成在一个极小的空间内,形成机电一体化的具有特定功能的卫星部件或系统。

20 世纪 80 年代末,以微纳卫星为代表的微小型航天器以一种全新的概念、崭新的设计思想成为航天领域最活跃的研究方向。由于微纳卫星采用了大量的高新技术,具有功能密度与技术性能高、投资与营运成本低、灵活性强、研制周期短、风险小等优点,使它既能以单星廉价快速完成多项航天任务,又能以多星组网、编队飞行与虚拟卫星的方式,完成大卫星难以胜任的空间任务。微纳卫星现已广泛应用于数据通信与传输、地面与空间环境监测、导航定位以及科学试验等诸多领域。

我于 1994 年撰写了《面向 21 世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,指出微米纳米技术是一项面向 21 世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,特别指出 MEMS 技术将在微卫星中发挥重大作用。

清华大学尤政教授及其团队及时把握住发展机遇,通过与英国萨里(Surrey)大学空间中心的合作,在吸收消化国外先进技术的同时,立足国内微米纳米技术,特别是 MEMS 的进步,自主创新研制了 NS-1/NS-2、MEMSat 等微纳卫星,在高校走出一条通过引进—消化吸收—再创新的微纳卫星技术发展之路。一方面,作者探索以 MEMS 技术为代表的微米纳米技术在航天领域的应用,运用以 MEMS 技术为代表的微电子、光电子及微机械、超精细加工等新技术、新材料,研究适合于空间环境工作的航天器主要功能部件微型化、智能化的新原理、新工艺、新方法,研制出若干适合于航天领域使用的 MEMS 器件与微组件;另一方面,作者以适合航天领域使用的 MEMS 器件与微系统为基础,研制以微型化、轻量化、低成本、短周期与高性能为特征的空间微系统——微纳卫星等。本书系统介绍他们自主研发的我国第一颗纳卫星(NS-1)以及基于 MEMS 技术高性能微型化卫星功能部件等科研成果。这些成果曾获得国家技术发明二等奖 2 项,国家科技进步二等奖 2 项,获国

家发明专利 20 余项,为微纳卫星技术与 MEMS 技术的空间应用做出了重要贡献。

希望该书的出版对有志从事微纳卫星技术,特别是 MEMS 在航天领域应用技术研发的科技人员有所帮助与启发。

丁卫高

2012 年 10 月

前 言

1. 绪言

随着计算机、新材料、微纳米、微电子机械、高密度能源以及空间推进技术的迅速发展,微小型航天器的重量和尺寸显著减小。从20世纪80年代末开始,以微纳卫星为代表的微小型航天器以一种全新的设计理念成为航天领域最活跃的研究方向,并已广泛应用于数据通信与传输、地面与空间环境监测、导航定位以及科学试验等诸多领域。

随着航天技术的飞速发展,国家安全和军事战略对空间的依赖也越来越强,而对微纳卫星提出了更高的要求。军方对卫星利用的第一目的就是通信和侦察,即战术通信、战略侦察、战场摄影、监视导弹发射、收集战术情报、支援飞机和舰艇作战等。微纳卫星对于军事应用来讲最大的优点是适应性强、可移动和机动发射,能按需要对固定区域进行全天时、全方位监视。现代高技术战争,战场向外层空间的延伸是必然的趋势,利用微纳卫星作为空间攻防武器平台,具有明显的优势。第一,成本低,适合军事航天装备的承受能力。第二,重量轻,可利用一箭多星等方式进行快速机动发射,因而具有快速反应能力和很强的生存能力。第三,研制周期短,一般可以在几个月的时间内完成设计与研制。第四,价格低廉,对敌方价格高昂的大型卫星进行破坏和干扰,达到以较小的投入有效抵抗敌方空间优势的效果,符合非对称战略的构想。以微纳卫星为代表的微小型航天器是军事强国空间控制条件下,进入空间和利用空间的一条必要途径。

国内外微小卫星的发展现状和技术实践证明,利用现有的微加工设备及工艺条件,采用专用集成模块化的微电子机械制造技术,可以开发研制出微纳卫星或芯片级卫星,从而促使卫星向更小型、更廉价的方向发展。以美国喷气推进实验室为代表的一批国外研究机构,在微纳卫星的设计与研制方面,已经取得了可喜的进展。

21世纪初将是微纳卫星迅速发展的新时期,重量轻、体积小、性能好、成本低、研制周期短、可进行编队和组网的微纳卫星将成为保障国家经济建设、社会发展及国家安全的一类重要航天装备。为此,跟踪国外微纳卫星的发展趋势,利用微电子

机械、计算机和新材料等领域的最新成果以及新的设计理念与方法,发展我国自己的微纳卫星及其相关技术,可以为国家安全和经济建设提供有力的保障,同时推进我国卫星技术及其应用的产业化进程。

1.1 微纳卫星的概念

美国宇航公司(Aerospace)在1993年对小卫星、微卫星和纳卫星做了以下定义:小卫星是一种可用常规运载器发射的航天器,质量为10kg~500kg;微卫星为所有的系统和子系统都全面体现微电子机械系统(MEMS)技术,并可实现一种或几种实用功能,质量为0.1kg~10kg的卫星;纳卫星是一种尺寸减小到最低限度的微卫星,其功能有赖于一种分布式星座或编队结构来实现,质量小于0.1kg。目前,国内外的文献报道和技术实践对英国萨里大学提出来的分类方法更普遍认同(表1)。

表1 小卫星的分类

名 称	质量(含燃料)/kg
小卫星(MiniSat)	100~500
微卫星(MicroSat)	25~100
纳卫星(NanoSat)	1~25
皮卫星(PicoSat)	0.1~1
飞卫星(FemtoSat)	<0.1

其中微纳卫星不仅是一个重量的概念,最主要的是在结构设计和功能应用上与其他卫星有根本的区别。到目前为止,现有的微纳卫星还没有采用纳米技术,而是大量采用建立在现有技术水平上的MEMS技术。

1.2 微纳卫星的技术特点

微纳卫星具有以下几个鲜明的技术特点:

(1) 微纳卫星是以MEMS技术和由数个MEMS组成的专用集成微型仪器(ASIM)为基础的一种全新概念的卫星。采用多维集成技术,利用大规模集成电路的设计思想和制造工艺,不仅把机械部件像电子电路一样集成起来,而且把传感器、执行机构、微处理器以及其他电学和光学系统都集成在一个极小的空间内,形成机电一体化的具有特定功能的卫星部件或分系统。

(2) 在应用上多采用分布式结构,由多颗卫星组成卫星阵列完成一个总体功能。如在太阳同步轨道的18个等间隔轨道面上,各自以一定的方式等间隔地分布排列功能不同的36颗卫星(共计648颗),就可保证在任何时刻都能覆盖全球,相当于3颗地球同步观测卫星的功能。采用分布式的星座结构或编队飞行,可使卫星系统的可靠性显著提高。卫星可以分批多次发射,其中某一部分失效后,很容易

利用新发射的其他卫星将他们替换,承受大的经济损失和系统失败的风险大大降低。从军事上说,分布式系统将使系统的生存能力提高。微纳卫星在战时应急通信、侦察和星座组网应用方面具有极大的优势。

(3) 由于微纳卫星重量轻,可以不使用高成本的大型运载工具进行发射,其发射成本显著降低,并且可以实现灵活、机动、快速发射。

(4) 有利于批量化生产。微纳卫星采取的集成设计方法使得设备更加轻巧坚固,可靠性得以提高,而且可以进行工业化的批量生产,从而明显降低卫星及其部件的研制费用。

(5) 由于微纳卫星的技术含量高,研制成本低,从而更适合大学参与研究与研制。这也从另一个侧面降低了它的研制费用,并且有利于高新技术成果的应用与飞行验证。目前,国内外许多著名大学都在参与微纳卫星的研究与研制,卫星的技术性能不断提高,应用方式和领域也在不断扩充。美国空军和航天局正大力支持美国大学的微纳卫星研究计划。微纳卫星研究计划是美国军用微纳卫星技术开发的一个重要组成部分,特别是编队飞行是微纳卫星进入实际应用的关键。一旦微纳卫星全面用于军事目的,则将从根本上改变军事力量的对比。

作为航天军事装备的重要组成部分,微纳卫星尤其是纳卫星具有以下技术优势:极强的空间生存能力、更高的性能价格比、可以批量部署、研制周期短、易于快速响应,同时还可采用分布式系统改变其功能,重组系统。

1.3 基于微纳卫星的分布式卫星的概念和内涵

由多颗微纳卫星按一定要求分别部署在一种或多种轨道上,共同完成某些空间飞行任务,称为分布式卫星。这样也从本质上区别于单颗卫星,在空间应用方面,从单颗卫星发展成为分布式卫星。

根据分布式卫星的上述概念,可以进一步把分布式卫星细分为星座、编队飞行、虚拟卫星。

1) 星座

由若干颗卫星按要求分布在单轨道或多轨道平面而构成。星座能提高地面覆盖范围直到全球和缩短重访时间,达到单颗卫星难以达到的目的。

2) 编队飞行

以某一点为基准,由若干颗卫星构成一个特定形状,这个特定形状的各颗卫星,一方面保持特定形状,同时又能绕地球中心旋转,它们当中每颗卫星绕地球飞行的轨道周期都是相同的。编队飞行各颗卫星互相协同工作来实现单颗大卫星的功能。每颗卫星都同其他卫星保持联系,共同承担信号处理、通信、有效载荷等,任务功能由整个编队飞行的星群来完成。

编队飞行与星座虽然都是由多颗卫星组成,但两者有较大差别:

(1) 编队飞行在应用上构成一个新概念,而星座仅增加地面覆盖区域,甚至连续覆盖,不出现空隙。

(2) 编队飞行星间距离短,各星之间是紧密型的,星间有通信和信息交换,各星是协同工作的,而星座各星之间是稀疏的。

(3) 从控制观点来看,编队飞行一般要求自主、实时、多个航天器协同控制,但星座控制一般达不到这种自主级别的实时协调控制,而只要求星座中各航天器的位置保持在规定精度的控制区内,不致相撞,或者在某种意义上不改变对地球的总体覆盖特性。

3) “虚拟卫星”或“分离模块航天器”

分离模块航天器国外研究项目以 F6 系统为代表。F6 系统(Future, Fast, Flexible, Fractionated, Free - Flying Spacecraft, System) 是美国国防高级研究计划局(DARPA)于 2007 年 9 月提出并实施的一项创新性航天器体系结构设计试验计划。“F6”代表“未来、快速、灵活、自由飞行、模块化信息交换合成航天器”中 6 个英文词的词头“F”,其中“6”还源自“信息交换合成航天器”(Spacecraft united by Information Exchange, SIX)。

F6 系统的主要目的是演示和发展一种基于多个相对独立的模块、通过无线网络实现有机结合的新型航天器体系结构。F6 计划将建立一种面向未来的航天器体系结构,将传统的整体式航天器分解为可组合的分离模块,各分离模块可以快速批量制造和独立发射,在轨运行时通过无线数据连接和无线能量传输,构成一个功能完整的虚拟航天器系统。该系统在全寿命周期都具备系统重构和功能再定义的能力,以此有效降低航天器全寿命周期中各种不确定因素对天基系统在设计、制造和运行阶段造成的严重影响,使航天器能够实现在轨故障修复、功能更换和扩展,提高航天器执行任务的范围和能力,增强航天器的灵活性和可靠性,降低全寿命周期费用和 risk。同时,该无线连接松散结构和可灵活调节的飞行构型能够大大降低航天器被攻击的概率,并且即使部分模块销毁,也可以通过模块更换的方式快速廉价地进行补充和系统恢复,从而提高空间攻防对抗中的存活能力。模块的批量生产、分离发射入轨和在轨自主组网技术能够大大降低航天器从研制到投入使用的时,甚至可以直接通过发射载荷模块对已有航天器进行任务更换和扩展以满足任务要求,从而大大提高空间任务响应能力。

与卫星星座和卫星编队飞行相比,F6 系统存在本质区别。卫星星座和卫星编队飞行是当前分布式空间系统的两种主要工作模式。组网形成星座,可以提高时间分辨力、加大覆盖范围。将若干颗小卫星按一定的方式组织进行星间协同工作,可以使卫星星座达到单颗卫星独力工作难以达到的性能,但其代价是由卫星数目增加带来的整个系统的费用增高。编队飞行是多颗小卫星在围绕地球

运动的同时,彼此之间形成特定的编队构型。在运行过程中,各颗小卫星间始终保持较近的距离,彼此联系密切,通过星间通信和信息耦合互相协同工作,就像一颗大卫星一样共同完成某项空间任务。F6 系统与上述两者最大的本质差异是,它不是多卫星系统,准确地说,它不是参照常规卫星设计模式来形成功能完备的多个卫星的集合体,而是将航天器整体分解成若干个独立的功能模块,多个模块组成集群的方式在轨运行。单个模块虽然可以自由飞行,但不能独立完成常规航天器所具有的全部功能,只有多个模块通过无线网络协同工作才能共同实现一颗整星的功能。

F6 系统之所以能够得到美国政府、工业部门和学术界的如此重视,原因在于该项研究的进行将为航天器设计思想、工程技术、运营理念、空间应用等多个方面注入新鲜血液与活力,进而推进航天事业的快速发展和巨大进步。特别是在军事应用方面,该项目的研究将大大提高美国军方的空间作战响应能力和空间攻防对抗水平。它的研制成功将带来未来航天器设计理念、体系结构、运行管理、制造和发射模式甚至航天产业的组织结构的革命性变革,空间军事应用和对抗的方式也会随之发生重大变化。

微纳卫星及其相关技术已经成为当前航天领域的重点研究对象,并在军事应用和经济生活中展现出纳卫星技术带来的诸多革命性成果。

微纳卫星技术的发展和成熟,使以微纳星座、卫星编队飞行与虚拟卫星为代表的分布式空间系统(DSS)的发展成为可能,DSS 成为微纳卫星应用的重要发展方向。微纳卫星编队飞行有广泛的用途或潜在应用领域,包括立体成像、合成孔径、空间探测、物理探测、精确定位、空间信息集成(综合)等。若干微纳卫星编队飞行(虚拟卫星)组成功能更为强大的卫星星座,引起微小卫星技术及应用的深刻变革。因此,美国的 NASA、DARPA、AFOSR,欧洲 ESA、日本、俄罗斯等都在积极发展以微纳卫星为典型代表的微小卫星研制计划,并且已经开始将微纳卫星技术大量投入空间试验。

2. 国际微纳卫星航天发射的情况

随着世界各国对微纳卫星技术的不断探索和研究,研制出了众多的微纳卫星并实现了在轨飞行试验,微纳卫星技术正在迅速得到积累和提升。微纳卫星在科技、国民经济和军事等各方面的应用也越来越受到各国的关注和重视。

美国、欧洲各国、日本、俄罗斯以及加拿大、印度、韩国等国家纷纷开展了自己的微纳卫星研究和军民两方面的应用探索。

早期的微纳卫星及其应用领域如表 2 所列。