

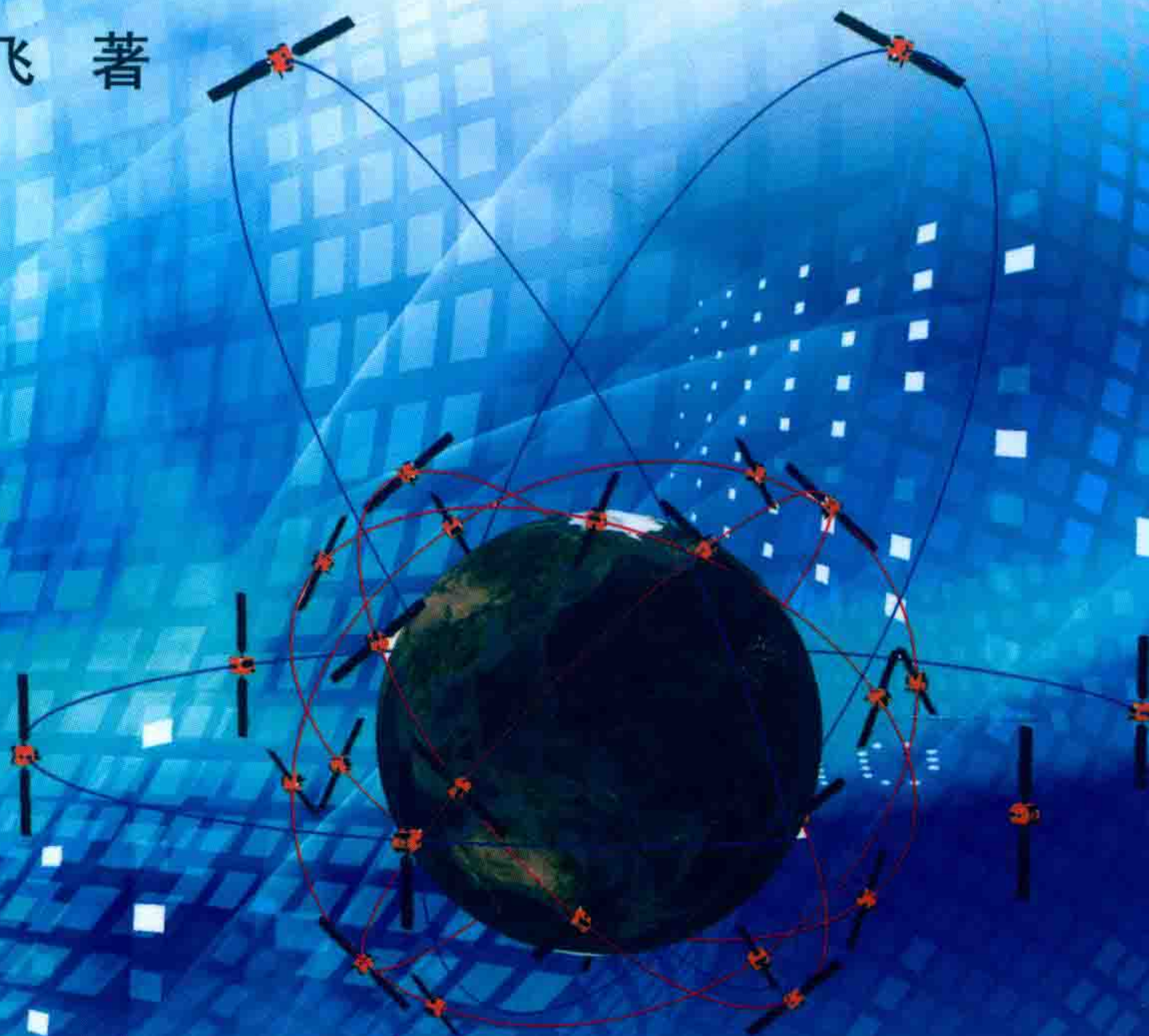


国防科技图书出版基金

卫星星座 轨道设计方法

Orbital Design Methods of Satellite Constellations

■ 张雅声 冯飞 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

责任编辑：辛俊颖
丁福志
责任校对：苏向颖
封面设计：徐 鑫



卫星星座轨道设计方法

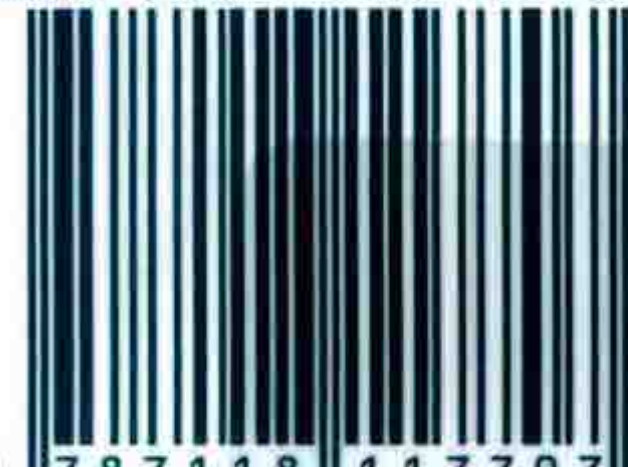
Orbital Design Methods of Satellite Constellations



► 上架建议：航空航天 ◀

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-11770-7



9 787118 117707 >

定价：150.00 元



国防科技图书出版基金

卫星星座轨道设计方法

Orbital Design Methods of Satellite Constellations

张雅声 冯 飞 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

卫星星座轨道设计方法/张雅声,冯飞著.—北京:
国防工业出版社,2019.3

ISBN 978-7-118-11770-7

I.①卫… II.①张… ②冯… III.①卫星—星座—设计
IV.①P185

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 028393 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京龙世杰印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 11½ 字数 196 千字

2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 150.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 (按姓氏笔画排序)

才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	甘茂治
甘晓华	卢秉恒	巩水利	刘泽金	孙秀冬
芮筱亭	李言荣	李德仁	李德毅	杨伟
肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	郭云飞
唐志共	陶西平	韩祖南	傅惠民	魏炳波

前 言

1957年10月4日,苏联将全世界第一颗人造地球卫星发射进入太空轨道,标志着人类进入太空新纪元的开始。半个多世纪以来,人造卫星凭借其独特的位置优势——“站得高,看得远”发挥了举足轻重的作用,在经济、军事、科学等各个领域得到了广泛应用。

在人造卫星应用早期,主要是通过单颗卫星来完成既定任务。但是,随着航天任务对信息时效性、全球性和连续性的要求越来越高,通信、导航、预警、侦察监视等系统向空间发展的趋势不断增强,单颗卫星在时间分辨率、空间分辨率等方面已经不能满足任务要求,因此,卫星星座概念应运而生。多颗卫星组网形成的卫星星座,在覆盖性能方面有了明显改善,成为信息获取、传输和分发的理想选择。

从地面覆盖范围的角度考虑,卫星星座可以大致分为两大类,即全球覆盖星座和区域覆盖星座。目前,国际上对全球覆盖星座的研究较多,形成了比较全面的星座设计方法;但是,对于区域覆盖星座的研究较少,没有形成比较有效的区域覆盖星座设计方法。然而,针对特定需求,区域覆盖星座相对于全球覆盖星座而言,性价比更高。从应用范围考虑,许多国家最关心的仍是本国领土范围内或某个特定区域的问题,如环境监测、成像侦察、通信等,对建立全球覆盖的星座没有强烈需求;从经济角度考虑,建立与维护全球覆盖星座耗资巨大,多数国家没有足够的经济实力支撑。因此,本书在介绍全球覆盖星座的基础上,重点介绍几种各具特色的区域覆盖星座。

本书系统介绍了卫星星座的概念、分类和发展现状,并结合多年科学研究成果,针对全球、区域、纬度带等不同覆盖要求,以及混合、异构、推扫等不同星座轨道构型,详细介绍了六种卫星星座的轨道设计方法,重点阐述了区域覆盖椭圆卫星星座、纬度带连续覆盖卫星星座、多功能混合卫星星座、异构卫星星座和推扫区域全覆盖卫星星座等多种卫星星座的轨道设计方法,并分别进行了典型方案设计仿真,对其可行性和应用价值进行了论证,具有非常强的实用性。

本书可供航天器设计与应用管理人员和工程技术人员使用,也可作为高等院校研究生、本科生的教学参考书。

目 录

第 1 章 卫星星座的基本知识	1
1.1 卫星星座的定义	1
1.2 卫星星座的分类	3
1.3 卫星星座轨道设计基础	6
1.3.1 基本轨道参数	6
1.3.2 典型的卫星轨道类型	8
1.3.3 几种特殊的轨道类型	14
1.3.4 地面轨迹分离数	19
1.4 典型的卫星星座	22
1.4.1 导航卫星星座	22
1.4.2 通信卫星星座	35
1.4.3 导弹预警卫星星座	44
第 2 章 全球覆盖星座设计方法	49
2.1 Walker 星座及其描述方式	49
2.2 星形星座设计方法	50
2.3 δ 星座设计方法	51
2.3.1 δ 星座的特点	51
2.3.2 δ 星座结构参数模型	53
2.3.3 相位因子的设计方法	54
2.4 玫瑰星座设计方法	57
2.5 σ 星座设计方法	58
2.6 Ω 星座设计方法	62
2.7 复合 Walker 星座设计方法	63
第 3 章 区域覆盖星座设计方法	67
3.1 区域覆盖轨道类型	67
3.1.1 地球静止轨道 GEO	67
3.1.2 倾斜地球同步圆轨道 IGSCO	68
3.1.3 倾斜地球同步椭圆轨道 IGSEO	69
3.1.4 大椭圆轨道 HEO	71

3.2	基于 GEO 的区域覆盖星座设计方法	72
3.3	基于 IGSO 的区域覆盖星座设计方法	74
3.3.1	基于 IGSCO 的区域覆盖星座设计方法	74
3.3.2	基于 IGSEO 的区域覆盖星座设计方法	76
3.4	基于 HEO 的区域覆盖星座设计方法	79
3.4.1	大椭圆轨道设计	79
3.4.2	大椭圆轨道星座设计	81
3.5	典型区域导航星座设计与仿真	82
3.5.1	轨道选择	82
3.5.2	星座设计	83
3.5.3	导航性能仿真	86
第 4 章	纬度带覆盖星座设计方法	88
4.1	纬度带覆盖的含义	88
4.2	卫星环的覆盖特性	89
4.2.1	单颗卫星的覆盖特性	89
4.2.2	圆轨道卫星环的覆盖特性	91
4.2.3	椭圆轨道卫星环的覆盖特性	93
4.3	基于圆轨道的纬度带覆盖星座设计方法	97
4.3.1	卫星环的拼接	97
4.3.2	基于卫星环的纬度带覆盖星座设计方法	98
4.3.3	仿真分析与性能对比	101
4.4	基于椭圆轨道的纬度带覆盖星座设计方法	105
4.4.1	椭圆轨道设计	105
4.4.2	椭圆轨道卫星环设计	106
4.5	典型纬度带通信星座设计与仿真	108
4.5.1	中椭圆轨道设计与仿真	108
4.5.2	中椭圆轨道卫星环设计与仿真	110
4.5.3	星间链路设计与仿真	113
第 5 章	异构星座设计方法	115
5.1	异构星座的特点	115
5.2	典型异构星座设计方法	116
5.2.1	轨道形状不同的异构星座	116
5.2.2	轨道倾角不同的异构星座	119
5.2.3	轨道高度不同的异构星座	121
5.2.4	轨道平面分布不均匀的异构星座	122
5.2.5	轨道平面内卫星分布不均匀的异构星座	122

5.3	异构预警星座设计与仿真	122
5.3.1	星座构型分析	123
5.3.2	星座轨道设计	123
5.3.3	星间链路设计	128
第6章	混合星座设计方法	130
6.1	混合星座的概念	130
6.2	混合侦察星座的特点	131
6.2.1	混合侦察星座的组成和功能	131
6.2.2	混合侦察星座的工作模式	132
6.3	混合侦察星座的设计方法	133
6.3.1	轨道高度设计	134
6.3.2	轨道倾角设计	135
6.3.3	升交点赤经设计	136
6.3.4	相位差设计	138
6.3.5	成像载荷侧视角设计	139
6.4	典型混合侦察星座设计与仿真	140
6.4.1	初始条件	141
6.4.2	轨道设计	141
6.4.3	初始相位设计	142
6.4.4	探测性能仿真	143
第7章	推扫星座轨道设计方法	147
7.1	推扫星座的特点	147
7.1.1	区域间隔全覆盖	147
7.1.2	覆盖区域拼接推扫	148
7.2	推扫区域的确定方法	150
7.3	推扫星座卫星数量的确定方法	152
7.4	并行推扫星座构型设计方法	154
7.5	串行推扫星座构型设计方法	159
7.6	典型推扫星座设计与仿真	163
7.6.1	并行推扫星座设计与仿真	163
7.6.2	串行推扫星座设计与仿真	166
参考文献	169

Contents

Chapter 1	Elementary Knowledge of Satellite Constellation	1
1.1	Definition to Satellite Constellation	1
1.2	Classification to Satellite Constellation	3
1.3	Fundamental Orbit Design to Satellite Constellation	6
1.3.1	Fundamental Orbit Parameters	6
1.3.2	Typical Types of Orbit	8
1.3.3	Several Special Orbits	14
1.3.4	Separated Values of Ground Track	19
1.4	Typical Satellite Constellations	22
1.4.1	Navigation Satellite Constellations	22
1.4.2	Communication Satellite Constellations	35
1.4.3	Missile Warning Satellite Constellations	44
Chapter 2	Design Method to Global Coverage Satellite Constellations	49
2.1	Presentation to Walker Constellation	49
2.2	Design Method to Star Constellation	50
2.3	Design Method to δ Constellation	51
2.3.1	Characteristics of δ Constellation	51
2.3.2	Model of δ Constellation	53
2.3.3	Design Method to Phase Factor	54
2.4	Design Method to Rose Constellation	57
2.5	Design Method to σ Constellation	58
2.6	Design Method to Ω Constellation	62
2.7	Design Method to Hybrid Walker Constellation	63
Chapter 3	Design Method to Regional Coverage Constellation	67
3.1	Classification of Regional Coverage Orbit	67
3.1.1	Geostationary Orbit	67
3.1.2	Inclined Geosynchronous Circular Orbit	68
3.1.3	Inclined Geosynchronous Elliptical Orbit	69

3.1.4	Highly Eccentric Orbit	71
3.2	Design Method to Regional Coverage Constellation Based on GEO ...	72
3.3	Design Method to Regional Coverage Constellation Based on IGSO	74
3.3.1	Design Method to Regional Coverage Constellation Based on IGSCO	74
3.3.2	Design Method to Regional Coverage Constellation Based on IGSEO	76
3.4	Design Method to Regional Coverage Constellation Based on HEO ...	79
3.4.1	Design Method to HEO	79
3.4.2	Design Method to HEO Constellation	81
3.5	Approach and Simulation to Classical Regional Navigation Constellation	82
3.5.1	Orbits to the Constellation	82
3.5.2	Design to the Constellation	83
3.5.3	Simulation to the Performance of Navigation Constellation	86
Chapter 4	Design Method to Latitudinal Coverage Constellation	88
4.1	Implication of Latitudinal Coverage Constellation	88
4.2	Features to Ring-Coverage	89
4.2.1	Coverage Features to Single Satellite	89
4.2.2	Features to Ring-Coverage of Circle Orbit	91
4.2.3	Features to Ring-Coverage of Elliptical Orbit	93
4.3	Design Method to Latitudinal Coverage Constellation Based on Circle Orbit	97
4.3.1	Ring-Coverage Splicing	97
4.3.2	Design Method to Latitudinal Coverage Constellation Based on Ring-Coverage	98
4.3.3	Simulation and Performance	101
4.4	Design Method to Latitudinal Coverage Constellation Based on Elliptical Orbit	105
4.4.1	Design Method to Elliptical Orbit	105
4.4.2	Design Method to Ring-Coverage of Elliptical Orbit	106
4.5	Approach and Simulation to Classical Latitudinal Communication Constellation	108

4.5.1	Approach and Simulation to Middle Elliptical Orbit	108
4.5.2	Approach and Simulation to Ring-Coverage of Middle Elliptical Orbit	110
4.5.3	Approach and Simulation to Inter-Satellites Links	113
Chapter 5 Design Method to Heterogeneous Satellite Constellation		115
5.1	Characteristics of Heterogeneous Constellation	115
5.2	Design Method to Classical Heterogeneous Constellation	116
5.2.1	Heterogeneous Constellation with Different Eccentricities	116
5.2.2	Heterogeneous Constellation with Different Inclinations	119
5.2.3	Heterogeneous Constellation with Different Heights	121
5.2.4	Heterogeneous Constellation with Asymmetrical Distribution of Orbital Planes	122
5.2.5	Heterogeneous Constellation with Asymmetrical Distribution to Satellites on the Orbital Plane	122
5.3	Approach and Simulation to Heterogeneous Missile Warning Constellation	122
5.3.1	Constellation Structure	123
5.3.2	Constellation Orbit Design	123
5.3.3	Approach to Inter-Satellites Links	128
Chapter 6 Design Method to Hybrid Constellation		130
6.1	Concept of Hybrid Constellation	130
6.2	Characteristics of Hybrid Reconnaissance Constellation	131
6.2.1	Composition and Function to Hybrid Reconnaissance Constellation	131
6.2.2	Operating Mode to Hybrid Reconnaissance Constellation	132
6.3	Design Method to Hybrid Reconnaissance Constellation	133
6.3.1	Orbital Heights	134
6.3.2	Orbital Inclination	135
6.3.3	Right Ascension of Ascending Node	136
6.3.4	Phase Difference	138
6.3.5	Orientation to the Field of Imaging Payload	139
6.4	Approach and Simulation to Classical Hybrid Reconnaissance Constellation	140

6. 4. 1	Original State	141
6. 4. 2	Orbit Design	141
6. 4. 3	Design to Initial Phase	142
6. 4. 4	Simulation to Detection Performance	143
Chapter 7	Design Method to Scanning Constellation	147
7. 1	Characteristics of Scanning Constellation	147
7. 1. 1	Full Coverage to Regional Area	147
7. 1. 2	Coverage Splicing to Scanning Constellation	148
7. 2	Approach to the Scanning Area	150
7. 3	Calculation to the Quantity of Satellites	152
7. 4	Design Method to the Structure of Parallel Scanning Constellation	154
7. 5	Design Method to the Structure of Serial Scanning Constellation	159
7. 6	Approach and Simulation to Classical Scanning Constellation	163
7. 6. 1	Approach and Simulation to Parallel Scanning Constellation	163
7. 6. 2	Approach and Simulation to Serial Scanning Constellation	166
References		169

第 1 章 卫星星座的基本知识

自卫星出现几十年来,虽然单颗卫星的性能不断提高,但是仅依靠单颗卫星难以完成大区域乃至全球的覆盖任务。随着卫星之间的联系越来越紧密,由多颗卫星协作完成航天任务已经成为卫星应用的主流。因此,一种新型的空间系统——“卫星星座”应运而生!

1.1 卫星星座的定义

按照天体力学的规律在太空运行,执行探索、开发、利用太空和天体等特定任务各类飞行器,统称为航天器。按照航天器是否载人,又可以将航天器分为无人航天器和有人航天器。其中,在太空轨道上环绕地球运行(不少于一圈)的无人航天器称为人造地球卫星,简称卫星。

卫星是发射数量最多、用途最广的一种航天器,其发射数量占航天器发射总数的 90% 以上。1957 年 10 月 4 日苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星——“人造地球卫星”1 号;1970 年 4 月 24 日我国也发射了我国历史上的第一颗人造地球卫星——“东方红”1 号。据美国空间监视网(Space Surveillance Network, SSN)提供的数据显示,截至 2018 年 11 月,已编目的空间目标总数为 19173 个,其中大部分为空间碎片,包括运载火箭、废弃卫星等^[1]。除去火箭等其他碎片,仅统计各主要国家和组织的在轨航天器,整理结果见表 1.1 所示。

表 1.1 截至 2018 年 11 月世界各国发射航天器的数量统计表

类别 \ 国家/组织	美国	中国	俄罗斯	欧空局	日本	印度	其他国家(地区)	总计
已发射航天器(含在役与已失效但未坠落的航天器)	1667	322	1519	151	173	89	895	4816
箭体、碎片	4734	3665	5071	548	108	117	114	14357

可见,美国、俄罗斯及中国的在轨航天器数量庞大,显著多于其他国家和组织。在大量的在轨航天器中,卫星星座是一类重要的在轨工作形式。

卫星在地球万有引力作用下始终以一定的速度绕地球质心飞行,除地球静

止轨道卫星外,卫星不能够固定在地球表面某点的上空,其覆盖区域总是随时间的变化而不断变化,而且这种变化规律严格受轨道高度和轨道倾角等因素的制约,因此,在大多数情况下,单靠一颗卫星难以实现全球或特定区域的不间断通信和观测。由于卫星在轨道上的运行在时间和空间上遵循一定的规律,所以,可以利用多颗卫星相互补充和衔接共同完成同一任务。例如,同时覆盖更为广阔的区域或者使特定区域的覆盖特性得到改善,从而保证目标区域能够以任务要求的时间间隔或覆盖重数被卫星覆盖。

为了完成某特定空间任务而协同工作的多颗卫星的集合称为卫星星座,简称星座。星座中的卫星都部署在地球大气层以外的太空轨道上,并且这些卫星的轨道在太空中构成一个相对稳定的空间几何构型;同时,这些卫星之间还保持着相对固定的时空关系。显然,卫星星座的应用主要是扩大对地面的覆盖范围或是形成对目标区域的多重覆盖,通过卫星间的协同配合,大幅度提高通信、导航以及对地观测等应用效果。

卫星星座的概念在 1945 年被提出后,由于其巨大的技术优势和广阔的应用前景,引起了广泛的重视。但是,由于卫星星座存在卫星数量较多、成本较高、建设周期长、运行管理复杂等现实约束,只有少数的国家具备经济和技术实力发展卫星星座。因此在 20 世纪,相比于卫星的迅猛发展,卫星星座的发展则较为迟缓。进入 21 世纪以后,随着计算机技术、小型化技术、载荷技术、先进发射技术等一系列先进技术的出现和发展,利用卫星星座来完成各种航天任务的可行性不断增强。

另外,我们还要介绍一种特殊的卫星星座,叫做分布式卫星系统。它由相同或不同功能的多颗卫星组成,它们之间只有通过紧密的协同工作才能够实现特定的功能。分布式卫星系统是 20 世纪 90 年代提出的概念,其基本思想就是用多个低成本的小卫星实现一个复杂的大卫星的功能。与传统的单颗卫星相比,分布式卫星系统能够提供较长的基线,在对地遥感、侦察监视、空间探测等领域具有很高的应用价值。这种分布式卫星系统主要是基于高精度测量与控制、分布式载荷等先进技术,并采用卫星编队飞行技术来实现,各颗卫星之间通过信息交换和任务支持形成一个完整系统。也就是说,缺少任意一颗卫星,这种卫星星座都无法完成任务。因此,从功能上讲,分布式卫星系统可以被视为一颗“虚拟卫星”。但是,从轨道动力学角度来讲,分布式卫星系统表现为多颗卫星的编队飞行,并且要求卫星轨道之间满足一定的关系,从而形成封闭的相对运动轨迹,再利用编队卫星构成的这种特定空间几何构型来实现任务目标。所以,从空间布局上讲,分布式卫星系统也可以被视为紧凑型的卫星星座。

相反,从概念上讲,卫星星座也属于一种分布式卫星系统。因为它是通过把

多颗卫星分布在不同轨道上,利用多颗卫星之间的配合来实现整个系统功能的扩展。所以说,分布式卫星系统区别于卫星星座的最大特点就是它的各卫星之间存在着紧密的信息互联和协同控制。

通常用星座轨道构型和星间链路构型来描述卫星星座。星座轨道构型是指以卫星轨道为基础,对星座的空间几何结构以及卫星间相互关系的描述,简称星座构型,它反映了星座中卫星的时空布局。星间链路是指星座中卫星之间的信息链路,分为永久星间链路和临时星间链路,这两种链路有时也被称为静态星间链路和动态星间链路。星间链路构型是指星座中星间链路的拓扑结构,它描述了星座中卫星之间的信息传递关系。本书重点介绍的是卫星星座的轨道构型设计方法。

1.2 卫星星座的分类

最早提出卫星星座概念的是英国的 Arthur C. Clarke,他于 1945 年 10 月在 *Wireless World* 上发表了一篇名为 *Extra-Terrestrial Relays* 的文章中指出:在地球静止轨道上等间隔放置三颗卫星,就可以实现全球除两极以外的覆盖。因此,地球静止轨道也被称为 Clarke 轨道。由三颗地球静止轨道卫星构成的星座如图 1.1 所示。

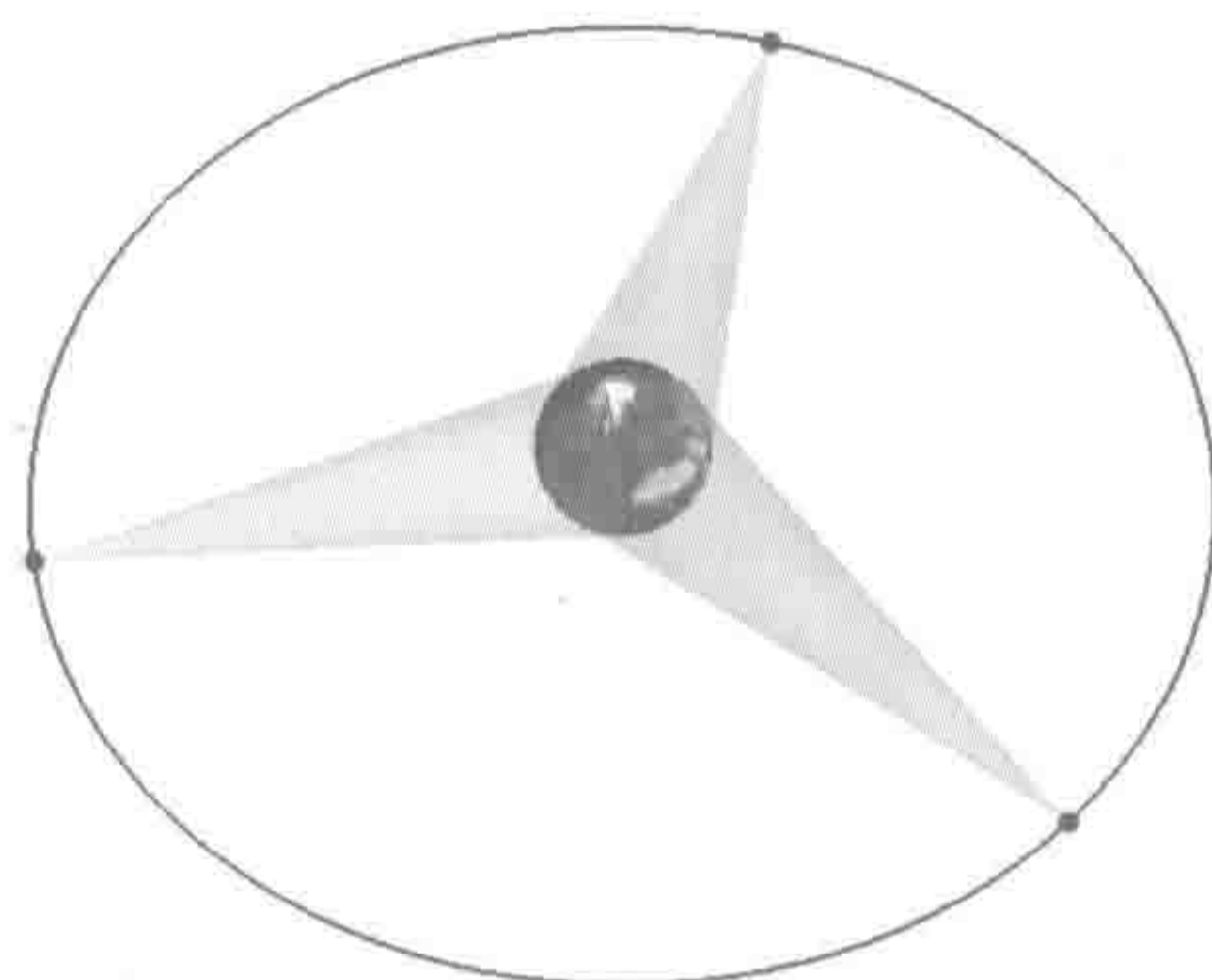


图 1.1 Arthur C. Clarke 提出了第一个卫星星座设想

美国的 DSP 导弹预警卫星星座和 Milstar 军事通信卫星星座都是由部署在地球静止轨道上的多颗卫星组成的典型地球静止轨道卫星星座,它们对地覆盖能力如图 1.2、图 1.3 所示。

从这两幅图可知,地球静止轨道卫星星座无法实现对全球的覆盖。另外,由于地球静止轨道只有一条,站位资源已经非常紧张,因此,卫星星座只有部署在低于地球静止轨道高度的轨道空间才能够得到更加广泛的应用。于是,就出现了轨道倾角不为 0° 的倾斜轨道卫星星座、轨道形状为椭圆的椭圆轨道卫星星