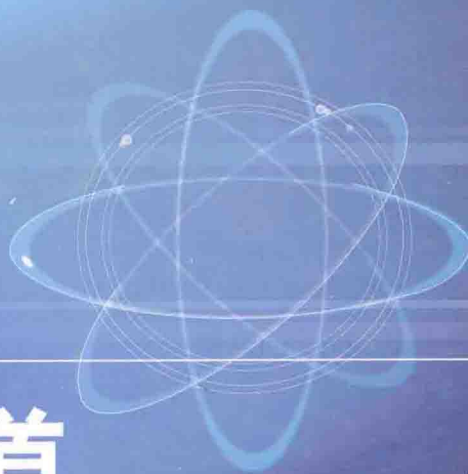




国防科技图书出版基金



空间特殊轨道 理论与设计方法

Theory and Design Method
of Special Space Orbit

■ 张雅声 徐艳丽 周海俊 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

空间特殊轨道理论与设计方法

Theory and Design Method of Special Space Orbit

张雅声 徐艳丽 周海俊 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间特殊轨道理论与设计方法/张雅声,徐艳丽,
周海俊著. —北京:国防工业出版社,2015. 1

ISBN 978-7-118-09728-3

I. ①空... II. ①张... ②徐... ③周...

III. ①空间-轨道-研究 IV. ①V412. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 246351 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售



*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13½ 字数 220 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 65.00 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

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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。

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总装备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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作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	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	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

空间轨道是天体在太空中运行的路线,又称为轨迹,简称为轨道,包括发射轨道、运行轨道和再入轨道。空间轨道理论则是空间轨道设计所遵循的原理和方法,而空间轨道设计是航天器设计的关键技术之一。

轨道设计受到航天器轨道动力学、空间环境、任务要求、有效载荷性能等多种因素的影响,而轨道设计理论则远在第一颗人造地球卫星上天之前就已经被提出来了。随着人类对太空应用需求的不断拓展以及航天技术的不断发展,那些经典的轨道理论和轨道设计方法已经越来越不能满足新型航天任务的需求,迫切需要研究提出一些能够符合新型航天任务需要、有效发挥先进航天技术优势的新型空间轨道理论。本书就是针对这些需求,结合近十年研究成果撰写的。

本书主要分为两大部分 8 个章节,其中第一部分为第 1 章和第 2 章,主要是概述回归轨道、太阳同步轨道、冻结轨道、逗留轨道等经典轨道类型及其设计方法,并提出本书的重点研究内容——空间特殊轨道的概念、类型和应用领域;第二部分为第 3 章~第 8 章,分别对悬停轨道、螺旋巡游轨道、多目标交会轨道、主动接近轨道、快速响应轨道和极地驻留轨道 6 种特殊的空间轨道的概念、特点、设计方法及其应用进行具体介绍。

本书的主要内容均来源于研究团队多年的研究成果,李智教授、王磊副教授、徐晓静硕士、周海俊博士、李远飞硕士等都为本书做出了重要贡献,在此表示衷心的感谢!

由于轨道设计理论涉及面广,并随着航天应用的拓展而不断发展,加之作者的认识水平有限,文中难免有不当和遗漏之处,诚请读者批评指正!

本书可作为从事航天发展战略研究和航天技术研究与工程技术人员的技术参考书,也可以作为高等院校航空宇航科学与技术学科研究生的教学参考书。

作 者
2014 年 1 月

目 录

第 1 章 典型轨道概述	1
1.1 回归轨道	1
1.1.1 回归轨道的定义	1
1.1.2 不同的轨道周期	2
1.1.3 地球静止轨道及其应用	3
1.2 太阳同步轨道	5
1.2.1 太阳同步轨道的定义	5
1.2.2 太阳同步轨道的特点	6
1.2.3 太阳同步回归轨道及其应用	8
1.3 冻结轨道	8
1.3.1 冻结轨道的定义	8
1.3.2 闪电轨道及其应用	10
1.4 逗留轨道	11
1.4.1 逗留轨道的定义	11
1.4.2 逗留轨道的应用	12
1.5 小结	14
第 2 章 空间特殊轨道的概念及其应用	15
2.1 空间特殊轨道的概念	15
2.1.1 轨道设计理念的差异	15
2.1.2 轨道控制与轨道设计相耦合	17
2.1.3 满足特殊的空间应用需求	18
2.2 空间特殊轨道的分类	20
2.2.1 悬停轨道	20
2.2.2 巡游轨道	21
2.2.3 多目标交会轨道	23
2.2.4 主动接近轨道	23
2.2.5 快速响应轨道	25
2.2.6 极地驻留轨道	25
2.3 空间特殊轨道的描述	26

2.3.1	轨道根数	26
2.3.2	无奇点根数	27
2.3.3	直角坐标分量	27
2.4	小结	28
第3章	悬停轨道理论与设计方法	29
3.1	悬停轨道的概念	29
3.2	定点悬停轨道设计	30
3.2.1	动力学模型	30
3.2.2	开环控制方式	37
3.2.3	闭环控制方式	41
3.3	区域悬停轨道设计	44
3.3.1	受限区域构型分析	45
3.3.2	区域悬停轨道控制	50
3.3.3	单次脉冲区域悬停轨道	61
3.3.4	多脉冲区域悬停轨道	67
3.4	偏置地球静止轨道设计	68
3.4.1	偏离轨道平面的偏置轨道	70
3.4.2	轨道平面内的偏置轨道	71
3.4.3	轨道偏置能量分析	72
3.5	小结	73
第4章	螺旋巡游轨道理论与设计方法	74
4.1	螺旋巡游轨道的概念	74
4.2	相对运动模型精度分析	76
4.2.1	精确相对运动动力学方程	76
4.2.2	相对运动动力学方程的简化	78
4.2.3	相对运动动力学模型精度分析	80
4.2.4	巡游航天器相对运动动力学模型分析	81
4.3	遍历巡游轨道设计	85
4.3.1	基于 Hill 方程的设计方法	86
4.3.2	基于 E/I 矢量法的设计方法	87
4.3.3	设计约束	88
4.3.4	仿真分析	91
4.4	往返巡游轨道设计	94
4.4.1	设计方法	94

4.4.2	设计约束	96
4.4.3	仿真分析	96
4.5	可控巡游轨道设计	99
4.5.1	螺旋环设计	100
4.5.2	进入走廊设计	101
4.5.3	单次脉冲控制策略	104
4.5.4	快速巡游控制策略	109
4.6	小结	112
第5章	基于穿越点的多目标交会轨道理论与设计方法	113
5.1	多目标轨道交会问题描述	113
5.2	穿越点的概念及其确定方法	115
5.2.1	穿越点的概念	115
5.2.2	穿越点的确定方法	117
5.3	基于穿越点的轨道交会策略	120
5.3.1	基于穿越点的设计思想	120
5.3.2	交会轨道设计策略	120
5.3.3	轨道交会控制方法	122
5.4	非共面同构多目标交会轨道设计方法	126
5.5	非共面异构多目标交会轨道设计方法	129
5.5.1	设计步骤	129
5.5.2	交会轨道设计方法	130
5.5.3	穿越点点集确定方法	131
5.5.4	交会弹道设计方法	133
5.6	仿真分析与方法修正	136
5.6.1	基于穿越点的轨道交会仿真	136
5.6.2	基于穿越点的轨道交会方法修正	140
5.7	小结	143
第6章	主动接近轨道理论与设计方法	144
6.1	主动接近轨道的概念	144
6.2	接近轨道设计	145
6.2.1	调相轨道	145
6.2.2	近距离接近轨道	148
6.3	相对位姿动力学模型	149
6.3.1	相对姿态动力学模型	150

6.3.2	相对位置动力学模型	151
6.4	最终逼近轨道设计	154
6.4.1	三轴稳定型目标的最终逼近	155
6.4.2	姿态无控型目标的最终逼近	158
6.4.3	仿真实现	161
6.5	小结	163
第7章	快速响应轨道理论与设计方法	164
7.1	快速响应轨道的概念	164
7.2	圆形快速绕飞轨道	167
7.2.1	圆形快速绕飞轨道设计	167
7.2.2	目标禁区的定义	170
7.2.3	安全性分析	173
7.3	快速进入空间轨道	180
7.3.1	低轨快速进入轨道设计	181
7.3.2	Cobra 轨道设计	182
7.4	小结	184
第8章	极地驻留轨道理论与设计方法	185
8.1	极地驻留轨道的概念	185
8.2	极地驻留轨道设计方法	186
8.2.1	圆型限制性三体问题下的动力学模型	186
8.2.2	驻留距离固定时极地驻留轨道设计	188
8.2.3	驻留距离不固定时极地驻留轨道设计	189
8.3	极地驻留轨道优化设计	192
8.4	小结	194
附录	利用 Matlab 软件优化设计交会轨道	195
参考文献		200

Contents

Chapter 1	The Overview of Classical Orbits	1
1.1	Recursive Orbit	1
1.1.1	The Definition of Recursive Orbit	1
1.1.2	Different Definition of Orbit Period	2
1.1.3	Geostationary Orbit	3
1.2	Sun Synchronous Orbit	5
1.2.1	The Definition of Sun Synchronous Orbit	5
1.2.2	The Characteristic of Sun Synchronous Orbit	6
1.2.3	Repeating Sun Synchronous Orbit	8
1.3	Frozen Orbit	8
1.3.1	The Definition of Frozen Orbit	8
1.3.2	Molniya Orbit	10
1.4	Stay Orbit	11
1.4.1	The Definition of Stay Orbit	11
1.4.2	Application of Stay Orbit	12
1.5	Summary	14
Chapter 2	The Concept and Application of Special Space Orbit	15
2.1	The Concept of Special Space Orbit	15
2.1.1	Difference in Orbit Design Concept	15
2.1.2	Orbit Design Combined with Control	17
2.1.3	Meet the Need of Special Space Application	18
2.2	Types of Special Space Orbit	20
2.2.1	Hovering Orbit	20
2.2.2	Cruise Orbit	21
2.2.3	Muti – target Rendezvous orbit	23
2.2.4	Automatic Approximating orbit	23
2.2.5	Rapidly Response Orbit	25
2.2.6	Polar Stay Orbit	25
2.3	The Describtion of Special Space Orbit	26

2.3.1	Orbit Elements	26
2.3.2	Non – singularity Orbit Elements	27
2.3.3	Coordinate Component	27
2.4	The Summary	28
Chapter 3	The Theory and Design Method of Hovering Orbit	29
3.1	The Concept of Hovering Orbit	29
3.2	Design of Point Hovering Orbit	30
3.2.1	Dynamic model	30
3.2.2	Open – loop control	37
3.2.3	Close – loop control	41
3.3	Design of Region Hovering Orbit	44
3.3.1	Configuration of Confined Region	45
3.3.2	Orbit Control	50
3.3.3	Single – pulse Control	61
3.3.4	Multi – pulse Control	67
3.4	Design of Displaced Geostationary Orbit	68
3.4.1	Out – of – Plane Displaced Geostationary Orbit	70
3.4.2	In – Plane Displaced Geostationary Orbit	71
3.4.3	Energy Analysis	72
3.5	Summary	73
Chapter 4	The Theory and Design Method of Spiral Cruising Orbit	74
4.1	The Concept of Spiral Cruising Orbit	74
4.2	Model Accuracy Analysis of Relative Motion	76
4.2.1	Precisely dynamics model of the relative motion	76
4.2.2	Simplified dynamics model of the relative motion	78
4.2.3	Model accuracy analysis of the relative dynamics motion	80
4.2.4	Model analysis of the dynamics relative motion of the cruising orbit	81
4.3	Design of Traversal Cruising Orbit	85
4.3.1	Design Method based on Hill Equation	86
4.3.2	Design method based on E/I vector	87
4.3.3	Design Constraint	88
4.3.4	Simulation Analysis	91
4.4	Design of to – and – fro Cruising Orbit	94

4.4.1	Design Method	94
4.4.2	Design Constraint	96
4.4.3	Simulation Analysis	96
4.5	Design of Controllable Cruising Orbit	99
4.5.1	Design of the spiral loop	100
4.5.2	Design of the orbit entrance	101
4.5.3	The single – pulse control strategy	104
4.5.4	The control strategy of the fast cruise	109
4.6	Summary	112
Chapter 5	The Theory and Design Method of multi – target Rendezvous Orbit based on Traversing Point	113
5.1	The Problem of Multi – target Rendezvous	113
5.2	The concept and the determination of the traversing point	115
5.2.1	The concept of the traversing point	115
5.2.2	The determination of the traversing point	117
5.3	Orbit Rendezvous Strategy based on Traversing Point	120
5.3.1	Design method based on the traversing point	120
5.3.2	Orbit rendezvous strategy	120
5.3.3	Control method of the rendezvous orbit	122
5.4	Design Method of on – coplanar Homogeneous Multi – target Rendezvous Orbit	126
5.5	Design Method of on – coplanar Heterogeneous Multi – target Rendezvous Orbit	129
5.5.1	Step of the design of the rendezvous orbit	129
5.5.2	Design method of the rendezvous orbit	130
5.5.3	The determination of the group of the traversing point	131
5.5.4	Tesign method of the rendezvous trajectory	133
5.6	Simulation and Method Optimization	136
5.6.1	The simulation	136
5.6.2	Method of the optimization	140
5.7	Summary	143
Chapter 6	The Theory and Design Method of Initiative Approaching Orbit	144
6.1	The Concept of Initiative Approaching Orbit	144
6.2	Design of Approaching Orbit	145

6.2.1	Phase – change Orbit	145
6.2.2	Approaching Orbit	148
6.3	Dynamics Model of Relative Position and Attitude	149
6.3.1	Dynamics Model of Relative Attitude	150
6.3.2	Dynamics Model of Relative Position	151
6.4	Design of Ultimate Approaching Orbit	154
6.4.1	Ultimate Approaching for 3 – Axis Stabilized Target	155
6.4.2	Ultimate Approaching for Attitude Uncontrolled Target	158
6.4.3	Simulation	161
6.5	Summary	163
Chapter 7	The Theory and Design Method of Responsive Orbit	164
7.1	The Concept of Responsive Orbit	164
7.2	Round Fast Circumnavigation Orbit	167
7.2.1	Design of Round Fast Circumnavigation Orbit	167
7.2.2	Defination of Target Forbidden Zone	170
7.2.3	Security Analysis	173
7.3	Fast Access Orbit	180
7.3.1	Design of the LEO fast access orbit	181
7.3.2	Design of the cobra orbit	182
7.4	Summary	184
Chapter 8	The Theory and Design Method of Earth Pole – Sitter Orbit	185
8.1	The Concept of Earth Pole – Sitter	185
8.2	Design Method of Earth Pole – Sitter Orbit	186
8.2.1	Dynamics Model	186
8.2.2	Pole – sitter Orbit Design with Constant Distance from the Earth.	188
8.2.3	Pole – sitter Orbit Design with Alterable Distance from the Earth.	189
8.3	Orbit Optimization Design	192
8.4	Summary	194
Appendix	Multi – target Rendezvous Orbit Design with Matlab	195
Reference		200

第 1 章 典型轨道概述

航天器的运行轨道直接决定了空间任务的观测几何、运行环境,往往也决定了有效载荷的性能。自 1957 年第一颗人造卫星上天以后,人类不断探索航天任务与航天器轨道之间的关系,回归轨道、太阳同步轨道、冻结轨道、逗留轨道等轨道概念不断被提出,并应用于通信、导航、侦察、气象探测等航天任务中。这些轨道独特的优势与应用经过诸多航天任务的考验,已经在世界范围内得到了认可,一般可称之为典型轨道。

本章对回归轨道、太阳同步轨道、冻结轨道、逗留轨道 4 种典型轨道的概念、特点及其应用领域进行简单论述。

1.1 回归轨道

在诸多航天器中,侦察遥感卫星和导弹预警卫星担负着对热点地区的探测、预警,通信卫星需要完成对特定区域的通信支持,这些使得回归轨道成为航天任务中最常用到的轨道类型。地球同步轨道则是一种约束条件更为严格的特殊的回归轨道。在回归轨道上运行的卫星,每经过一个回归周期,卫星重新依次经过各地上空,这样就可以对覆盖区域进行动态监视,借以发现这段时间内目标的变化。

1.1.1 回归轨道的定义

回归轨道是指星下点轨迹周期性重复的航天器轨道,重复的时间间隔称为回归周期,而航天器沿轨道运行一圈的时间称为轨道周期。

地球自转和轨道平面受摄情况下的进动使得航天器轨道平面相对于地球上特定经度线在不断旋转。其中,地球自转使得航天器轨道平面相对于地球有 ω_e 的进动角速度;地球摄动,尤其是地球非球形摄动的影响,使得航天器轨道平面产生角

速度为 $\dot{\Omega}$ 的进动。两项相加,可以得到航天器轨道平面相对于地球的运动角速度为 $\omega_e + \dot{\Omega}$,则轨道平面相对于地球上特定经度线旋转一周的时间间隔为

$$T_e = \frac{2\pi}{|\omega_e + \dot{\Omega}|} \quad (1.1)$$

在一个恒星日中,地球自转一圈,即 360° ;假设航天器轨道周期为 T 小时,若存在互质正整数 D 与 N 满足

$$NT = DT_e \quad (1.2)$$

则航天器经过 D 天,正好运行 N 圈后,其地面轨迹开始重复,这样的轨道即为回归轨道。 N 和 D 分别为实现星下点轨迹重复所需要的最少圈数和天数。若 $D=1$,则星下点轨迹逐日重复,轨迹圈号自东向西依次排列。在一天内升轨和降轨分别平分赤道一次,典型的如图 1.1 所示。若 $D>1$,则星下点轨迹不逐日重复,而是每隔 D 天重复一次。

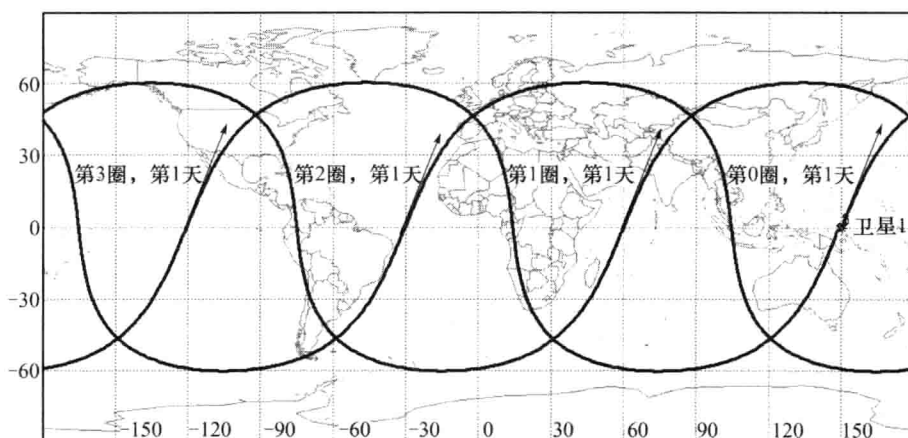


图 1.1 $N/D=4$ 对应的星下点轨迹排序

1.1.2 不同的轨道周期

在各种摄动的作用下,航天器轨道不断发生变化,对应瞬时轨道的周期亦随时间不断变化。航天器在任一时刻确定的密切轨道的周期称为密切周期,密切周期是无法直接测定的一种时间间隔。实际工作中,经常用到的是可测定的交点周期和近地点周期,分别定义为

交点周期:卫星连续两次经过升交点的时间间隔。

近地点周期:卫星连续两次经过近地点的时间间隔。