



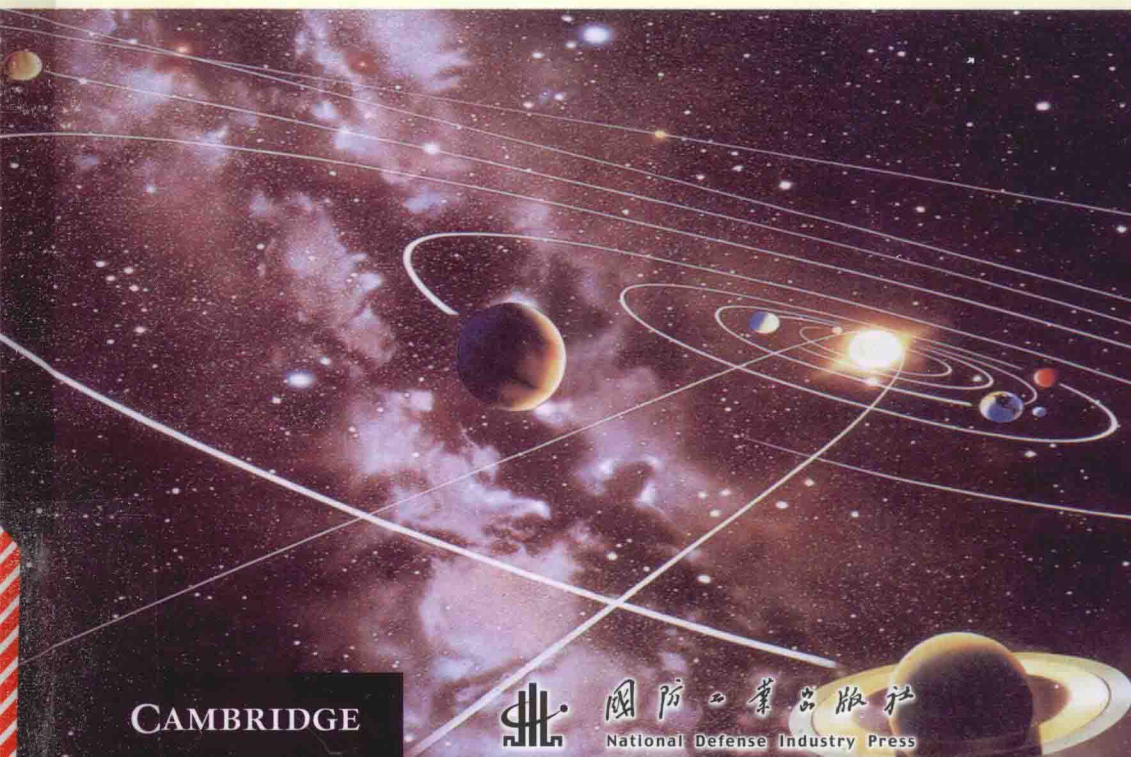
国防科技著作精品译丛

Theory of Orbit Determination

定轨理论

[意] Andrea Milani Giovanni F. Gronchi 著

张艳 石晟玮 郝世锋 译



CAMBRIDGE



国防工业出版社

National Defense Industry Press

定轨理论

Theory of Orbit Determination

[意] Andrea Milani Giovanni F. Gronchi 著
张 艳 石晟玮 郝世锋 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2012 -237 号

图书在版编目 (CIP) 数据

定轨理论 / (意) 安德列·米兰妮 (Andrea Milani),
(意) 格洛万尼·F·格龙基 (Giovanni F. Gronchi) 著;
张艳, 石晟玮, 郝世锋译. — 北京: 国防工业出版社, 2016. 7
(国防科技著作精品译丛)
书名原文: Theory of Orbit Determination
ISBN 978-7-118-10749-4

I. ①定… II. ①安… ②格… ③张… ④石… ⑤郝… III.
①卫星定轨 IV. ①P123.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 188581 号

This is a simplified Chinese of the following title published by Cambridge University Press:
Theory of Orbit Determination by Andrea Milani and Giovanni F. Gronchi
ISBN 978-0-521-87389-5

© Cambridge University Press 2010

This simplified Chinese for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan)
is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge,
United Kingdom.

© Cambridge University Press and National Defense Industry Press, 2016

This simplified Chinese is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong,
Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this simplified Chinese is a violation of the Copyright
Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database
or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and National
Defense Industry Press.

本书原版由 Cambridge University Press 出版, 并经其授权国防工业出版社翻译出版中文版。
版权所有, 侵权必究。

定轨理论

[意] Andrea Milani Giovanni F. Gronchi 著
张 艳 石晟玮 郝世锋 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 23 1/2

字 数 365 千字

版 印 次 2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 118.00 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

译者序

随着人类科学研究的深入和活动空间的不断拓展,需要跟踪、测量和定轨的各类自然天体和人造天体的数量急剧增加。但是,大量天文观测和航天器跟踪带来的批量信息产生了经典算法所不能解决的问题,急需新的理论支撑定轨理论的发展。本书正是在这样的背景下产生的。该书由剑桥大学出版社在 2009 年首次出版发行。作者 Andrea Milani 是比萨大学数学系的数理学教授,他在多体问题、空间动力学、定轨预报以及空间碰撞预警等多个方面均有深入的研究。全书共分为四个部分,17 个章节,针对近年来在天文观测、碎片探测、航天任务等工作中出现的传统算法无法实现的精密定轨问题,系统地提出了一系列新的算法和模型。同时书中还通过列举大量的实际空间探测任务实例,帮助读者更好地理解书中提出的定轨模型和方法。

本书四个部分的具体内容如下:① 定轨问题的基本概念,主要介绍定轨问题中动力学、观测量和误差模型等三个基本要素的定义,并对定轨问题进行分类;② 定轨问题中的基本理论,主要介绍最小二乘、矩阵计算等方面的相关知识和理论;③ 群轨道理论,主要介绍不同轨道的识别、关联、测量以及监视等相关问题;④ 协同定轨问题,主要介绍在定轨问题中涉及的行星引力、非引力摄动以及多弧度测量等因素的详细建模与分析。

本书的翻译工作主要由北京跟踪与通信技术研究所张艳、石晟玮、郝世锋等同志完成,最后请南京大学汤靖师教授和译者共同完成了译校。本书的翻译工作还得到了北京跟踪与通信技术研究所刘利生、李

波、柳仲贵、赵鹏等人的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

在翻译过程中,我们力求保留原著风格、把握原著含义,但由于译者水平所限,书中难免有错误和不准确之处,恳请广大读者批评指正。

译者

2016年5月

序

在探索和认知太阳系的过程中,对自然天体和人造天体进行定轨是一项基本的工作。随着近年来在天文观测和航天器跟踪任务中数据质量和数量的不断积累提高,产生了一些经典定轨算法所不能解决的问题。本书提出的新算法能够处理下一代巡天测量所能观测到的几百万个天体,并且能够将这些超高精度水平的观测数据进行充分利用。

本书首先介绍了一些通用数学基础和经典算法,随后阐述了基于最新的数学工具和研究结论的新算法,其中本书作者在这些新算法的研究中也做了大量工作。同时,本书还提供了基于实际天文观测和空间任务的新方法应用案例。本书不仅适用于应用数学、物理学、天文学和航天工程等专业的研究生和研究人员,同时也适用于非专业的天文学爱好者。

本书作者 Andrea Milani 是比萨大学数学系的数学物理学专职教授。他的研究领域包括 N 体问题、太阳系稳定性、小行星动力学及小行星群、卫星测地学、行星探测、定轨和小行星碰撞危险等。

本书另一作者 Giovanni F. Gronchi 是比萨大学数学系的数学物理学研究人员。他的研究领域包括太阳系物体动力学、摄动理论、定轨、奇异问题和 N 体问题的周期轨道等。

封面插图: 八个有潜在危险的小行星 (PHA) 轨道, 它们和地球轨道之间的最小相对距离小于 0.05 个天文单位 (AU)。它们与其他众多小目标一起形成了一个包围我们行星轨道的集群 (示意图, 其中绿色表示地球, 黄色表示其运行轨道)。这些目标均可用望远镜或雷达进行跟踪观

测,从而为研究定轨问题提供了很好的样本。图中显示的目标均为直径大于 2 km 的超亮型 PHA,一旦它们与地球发生碰撞,将引起全球性的灾难。近年来,在定轨理论方面取得了显著的进步,逐步发展了一些新的算法用以计算并排除上述 PHA 在未来至少 100 年内撞击地球的可能性。相同的方法也可应用于其他一些小型 PHA 碰撞风险计算,但是对于已知的更小天体或者还未被发现的天体,其碰撞风险计算仍然存在难度,因此还需进一步推进定轨能力的发展。图中的轨道曲线在实际的空间图像中是相互重叠的,同时,在空间图像中还标注了 A. Boattini 在 2008 年发现的一颗太阳系彗星,并展示了其星云状发光效果。

前言

本书的编撰不仅是自身开展教学活动提供参考的需要,同时也可为我们重新思考和整理已经获取的研究成果提供一个契机。基于以下两点原因,我们认为本书对于行业内其他相关人员也是非常有用的。

首先,空间飞行器不再是少数超级大国的专利,它已被越来越多的国家和机构所研究和应用。而定轨是开展任务规划、空间操作等工作的基础。因此本书所介绍的相关数学工具可得到广泛应用。

其次,无论是对自然天体还是人造天体,定轨中的相关知识与技巧以往只在一个小范围的专业队伍中得到应用。以往的主流观点认为:相关理论和软件应当通过正规版权或者保密机制得到保护。然而对于纯数学理论问题,这种保护方式最终都是无效的。在三四十年前,当时全球正处于谁将率先进入太空的关键竞争阶段,因此上述观点在当时的环境下应该说是合理的。现在的国际环境已完全不同于当年,有必要公开和传播定轨理论来使其为更多的相关专业领域人员所用。

尽管本书中的许多经验法则和实际操作建议对于领域内专家而言可能是众所周知的,但即使是众所周知的结论也可以以一种更加合理的、严谨的并且容易理解的新方法加以呈现,同时也可结合最新的研究成果加以介绍。另一方面,受篇幅限制,本书也无意对定轨领域内的所有问题进行全面介绍。本书主要是介绍作者研究团队多年的研究成果,以便使其得到广泛的应用。内容主要包括一些经过严格数学证明的方法,这些方法已经过我们研究团队充分测试,其有效性得到充分验证。在过去的15年中,在定轨领域取得了巨大的进步,其他的一些研究

团队在此领域内也做出了重要的贡献,对其研究方法的有效性我们无权评论。在本书中仅列举一些我们认为有效的方法。

上述观点可能不能得到定轨领域内所有人的认同,但我们确信,通过建立定轨所需的基本数学基础和规则,消除一些技术上的模糊性,对于现有从事该领域研究的人员也是有益的。当前,有大量空间任务和大型天文项目可供选择,在如此激烈的竞争环境下,定轨专家们往往迫于压力仅凭有限的手段便声称已取得很好的结果,这些结论往往没有得到实际任务的应用检验。为此,如果有一本书能够通过实际应用明确指出哪些结论是可信的,哪些结论是不可信的,那么也许能够缓解当前这种状况。

本书是我和比萨大学数学系前空间力学组(现天体力学组)的同事们在过去30年的研究经验与成果的基础上组织编写的。除了基本的数学理论和教学案例以外,在本书中还列举了一些基于实际研究项目的案例研究。这些案例主要与空间探测任务和自然天体研究相关。列举这些案例的主要原因有两个:一是为了突出展示基础数学理论在实际卫星大地测量学与天体动力学方面的应用;二是通过这些案例能够直观地给出在上述两个领域中的应用差别。

本书的编撰工作主要由我和我的同事 F. Gronchi 博士合作完成。除了经典理论和作者的独创研究成果以外,本书还包括了我们研究团队中其他成员的研究成果,以及具有协作关系的其他外部研究人员的成果。具体人员包括: L. Anselmo、O. Arratia、S. Baccili、A. Boattini、C. Bonanno、M. Carpino、G. Catastini、L. Cattaneo、S. R. Chesley、S. Cicalò、L. Denneau、L. Dimare、P. Farinella、D. Farnocchia、Z. Knežević、L. Iess、R. Jedicke、A. La Spina、M. de' Michieli Vitturi、A. M. Nobili、A. Rossi、M. E. Sansaturio、G. Tommei、G. B. Valsecchi、D. Villani、D. Vokrouhlický。上述名单可能并不完整,在此对其他相关的研究人员也一并表示感谢。

谨以此书献给我的两位好友及同事: Paolo Farinella 和 Steve Chesley。他们本来应该作为本书的共同作者,但是在2000年本书编撰立项尚未成熟时,他们都离开了我们的研究团队。Steve 回到了他的祖国,在那里他仍然对我们的项目提出建议。Paolo 则去了我们无法联系到的地方。在此,对于他们所给予的帮助表示感谢。

目录

第一部分 问题描述与需求

第 1 章 定轨问题.....	3
1.1 轨道和观测	3
1.2 极小值原理	5
1.3 两种解读	5
1.4 问题分类	6
1.4.1 跟踪	7
1.4.2 编目	9
1.4.3 行星系统	10
1.5 如何阅读此书	11
第 2 章 动力学系统	13
2.1 运动方程	13
2.2 方程的解	14
2.2.1 解的存在性和唯一性	14
2.2.2 最大解	15
2.2.3 流的李普希茨连续性	15
2.3 变分方程	16
2.3.1 动力学参数的变分方程	17
2.3.2 二阶方程的变分方程	17

2.3.3 解的可微性	18
2.4 李雅普洛夫指数	18
2.5 动力学模型问题	19
第 3 章 误差模型	21
3.1 连续随机变量	21
3.1.1 联合分布随机变量	23
3.1.2 独立、边缘、条件概率	24
3.2 高斯随机变量	25
3.2.1 转置不变性	25
3.2.2 二维高斯变量	26
3.2.3 回归线	27
3.2.4 多维高斯变量	28
3.3 期望和变换	29
3.3.1 高斯变量的线性变换	29
3.3.2 线性子空间的条件概率密度	30
第 4 章 N 体问题	32
4.1 运动方程和积分	32
4.1.1 对称性和可积性	33
4.2 坐标转换	35
4.2.1 二体问题的简化	36
4.2.2 二体问题的解	37
4.3 质心和日心坐标	38
4.3.1 质心坐标	39
4.3.2 日心坐标系	40
4.4 雅可比坐标	41
4.4.1 雅可比坐标的存在性和条件唯一性	42
4.4.2 行星和典型双星系统	44
4.5 小参数摄动	45
4.5.1 摄动方程	45
4.5.2 球谐展开	46
4.5.3 雅可比坐标表示的摄动	47

4.5.4	四体问题.....	48
4.5.5	日心坐标系下的摄动.....	49
4.6	太阳系动力学模型.....	51
4.6.1	多少个物体.....	51
4.6.2	非引力摄动.....	52

第二部分 基础理论

第 5 章	最小二乘.....	57
5.1	线性最小二乘.....	57
5.1.1	模型问题.....	58
5.2	非线性最小二乘问题.....	60
5.2.1	牛顿法.....	60
5.2.2	微分改正法.....	61
5.2.3	收敛性及其与线性最小二乘的比较.....	62
5.3	残差的权重.....	64
5.4	置信椭球.....	65
5.4.1	标称值的条件置信椭球.....	66
5.4.2	边缘置信椭球.....	67
5.4.3	非标称值的条件椭球.....	68
5.5	协方差的传递.....	69
5.5.1	非线性来源.....	70
5.6	模型问题.....	71
5.6.1	角度观测量.....	73
5.7	概率解释.....	74
5.7.1	概率密度的归一化.....	76
5.8	高斯误差模型和野值剔除.....	76
5.8.1	弱拟合的野值剔除.....	78
5.8.2	集合和局部高斯模型.....	80
5.8.3	相关性.....	80
第 6 章	秩亏.....	83
6.1	完全秩亏.....	83
6.1.1	秩亏处理方法.....	84

6.1.2	退化的模型问题.....	86
6.2	精确对称.....	86
6.2.1	缩放的模型问题.....	88
6.3	近似秩亏和对称性.....	88
6.3.1	$d > 1$ 情况下的近似秩亏.....	89
6.3.2	近似对称性.....	90
6.4	缩比和近似秩亏.....	91
6.4.1	验后缩放.....	91
6.4.2	先验缩放.....	92
6.5	行星系统: 太阳系以外的行星.....	93
6.5.1	一颗行星.....	93
6.5.2	近圆假设.....	95
6.5.3	偏心率一阶项.....	96
6.5.4	外行星问题的秩亏.....	97
6.5.5	外行星系统.....	98
6.6	行星系统: 太阳系.....	99
6.6.1	对称性.....	99
6.6.2	相对论效应.....	99

第三部分 群目标轨道确定

第 7 章	数据 — 目标关联问题.....	107
7.1	问题的分类.....	107
7.1.1	轨道识别.....	108
7.1.2	归属问题.....	108
7.1.3	重现与复原.....	108
7.1.4	关联.....	109
7.2	线性轨道识别.....	109
7.2.1	线性理论.....	110
7.2.2	概率解释.....	112
7.3	半线性轨道识别.....	113
7.3.1	非线性.....	113
7.3.2	限制性轨道识别.....	114
7.3.3	多步骤辨识过程.....	115

7.4	非线性轨道识别	116
7.4.1	模式识别问题	116
7.4.2	周跳估计	120
7.4.3	限制性轨道辨识	122
7.5	恢复和“预发现恢复”	122
7.5.1	置信椭圆	122
7.5.2	半线性预报	124
7.6	归属	125
7.6.1	属性	126
7.6.2	属性的预报	127
7.6.3	属性的罚值	127
7.6.4	归属程序	128
第 8 章	关联	129
8.1	容许区域	129
8.1.1	星际轨道区域	129
8.1.2	内边界	133
8.1.3	地球卫星的排除	133
8.1.4	内边界的形状	134
8.1.5	微小物体边界	135
8.1.6	容许区域的定义	136
8.2	容许区间的采样	136
8.2.1	德洛内三角剖分	136
8.3	可归属的轨道根数	139
8.3.1	距离相关修正	139
8.3.2	置信区间的结构	140
8.3.3	准乘积结构	142
8.3.4	置信区间采样	143
8.4	根据“归属”因子进行预测	143
8.4.1	三角星历	145
8.5	通过采样容许区域进行关联	146
8.6	根据二体积分常数关联	148
8.6.1	角动量和能量	148

8.6.2	等价积分常数	149
8.6.3	曲线之间的交点	150
8.7	空间碎片问题	152
8.7.1	地球轨道的容许区域	153
8.7.2	采样	155
8.7.3	光学测量的二体积分常数法	155
8.7.4	雷达归属及容许区域	156
8.7.5	雷达测量的二体积分常数法	158
第 9 章	拉普拉斯和高斯法	160
9.1	属性及曲率	160
9.1.1	计算曲率	160
9.2	拉普拉斯方法	162
9.3	高斯方法	163
9.4	站心高斯 - 拉普拉斯法	166
9.4.1	高斯 - 拉普拉斯等价	166
9.4.2	站心拉普拉斯法	167
9.4.3	站心高斯 - 拉普拉斯等价	169
9.4.4	站心拉普拉斯法的问题	169
9.5	解的个数	171
9.5.1	交点问题	171
9.6	Charlier 理论	173
9.7	Charlier 理论推广	175
9.7.1	水平曲线的拓扑结构	176
9.7.2	奇异曲线	178
9.7.3	奇数或偶数解	179
9.7.4	限制曲线	180
第 10 章	弱轨道确定	185
10.1	变化线	185
10.1.1	椭球的长轴和弱方向	186
10.1.2	弱方向矢量场	186
10.1.3	约束的微分改正	187

10.1.4	LOV 的参数化和采样.....	188
10.2	约束解的应用.....	190
10.2.1	轨道确定.....	190
10.2.2	多重星历和复原.....	191
10.2.3	多轨道识别.....	192
10.2.4	递归属性.....	193
10.2.5	定性分析.....	194
10.3	度量的选择.....	195
10.3.1	用以表示初始条件的坐标系.....	196
10.3.2	不同 LOV 间的比较.....	196
10.3.3	曲率的不确定性.....	198
10.3.4	无限距离的限制.....	201
10.4	变化曲面.....	202
10.5	发现的定义.....	204
10.5.1	测试各种定义.....	205
第 11 章	巡天观测.....	206
11.1	太阳系巡天观测的操作约束.....	206
11.2	识别及定轨程序.....	208
11.2.1	从检测到分组.....	208
11.2.2	从分组到轨迹.....	208
11.2.3	从轨迹到识别.....	209
11.3	计算复杂度的控制.....	209
11.3.1	二叉树法.....	210
11.3.2	递归归属法.....	210
11.4	识别管理.....	211
11.4.1	正规化过程.....	212
11.4.2	不一致的识别.....	213
11.4.3	例子.....	213
11.4.4	控制计算复杂度.....	214
11.4.5	合并不一致的识别.....	215
11.4.6	轨道识别.....	215
11.4.7	分组管理.....	216

11.5 精度测试.....	217
11.5.1 质量控制度量.....	217
11.5.2 仿真结果.....	218
11.6 低置信度检测的恢复.....	219
11.6.1 恢复仿真.....	220
第 12 章 碰撞监测.....	222
12.1 靶平面.....	223
12.1.1 靶平面的线性预报.....	225
12.2 最小轨道交会距离.....	226
12.2.1 开普勒距离函数的驻点.....	226
12.2.2 共焦开普勒轨道的交互几何.....	227
12.2.3 MOID 的不确定性.....	227
12.2.4 最小距离及奇点.....	228
12.2.5 d_h 和 $d_{\min}$ 的不确定性计算.....	228
12.2.6 最小距离映射的正规化.....	229
12.2.7 正则化的几何定义.....	229
12.2.8 潜在危险小行星.....	230
12.3 虚拟小行星.....	231
12.3.1 采用变化线作为几何采样.....	232
12.3.2 靶平面上的 LOV 轨迹.....	233
12.4 靶平面的点串.....	234
12.4.1 最简单几何原理.....	234
12.4.2 接近过程的回归.....	236
12.4.3 最小接近距离算法.....	237
12.5 碰撞监测的可靠性和完备性.....	238
12.5.1 一般意义的搜索完成.....	238
12.6 当前的监测系统.....	239
第四部分 协同定轨	
第 13 章 地球重力.....	243
13.1 重力场.....	243
13.1.1 质点重力.....	243