

天体力学方法

D. 布劳威尔 著
G. M. 克莱门斯

科学出版社

55.2
164(1.82)

天体力学方法

D. 布劳威尔 G. M. 克莱门斯. 著

刘林丁华译

易照华校



863019

内 容 简 介

本书是一部天体力学方面的基础论著。书中对天体力学的基本课题,诸如椭圆运动、引力理论、轨道数值积分、月球运动理论、摄动函数、正则变换等,均作了全面阐述;同时对有关的数学、天文知识作了扼要介绍,如有限差分计算、最小二乘法、光行差等。本书叙述严谨、系统性强,可供大学天文系高年级学生、研究生以及有关科研人员阅读参考。

D. Brouwer, G. M. Clemence

METHODS OF CELESTIAL MECHANICS

Academic Press, New York and London, 1961

天 体 力 学 方 法

D. 布劳威尔 G. M. 克莱门斯 著

刘 林 丁 华 译

易照华 校

责任编辑 夏墨英

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年1月第一版 开本: 787×1092 1/32

1986年1月第一次印刷 印张: 42 1/8

印数: 0001—1,250 字数: 515,000

统一书号: 1302·3050

本社书号: 4374·13—5

定 价: 5.35 元

译 者 的 话

本书是阐述天体力学基本知识的一部重要著作，是主要作者布劳威尔教授在美国耶鲁大学多年研究和讲授天体力学经验的结晶，也是天体力学工作者的主要参考书之一。尽管本书已出版二十多年，至今仍为人们广为引用。

正如作者在序言中所说，本书主要目的是为了实际应用。在人造地球卫星上天以后，大量数学和力学工作者以及工程技术人员，迫切要求尽快了解天体力学的基本知识和处理有关问题的方法，本书就是根据这种要求而编写的。因此，本书有下列特点：一、起点低，凡具有普通高等数学基础知识的读者都能阅读；二、着重讲述基本方法，便于读者应用；三、不系统讲述天体力学的基础理论，但对所讲述方法的原理作了有启发性的较深入的介绍。为此，本书可作为从事天体力学应用工作（如历算，航天，大地测量等）和其他天文研究工作人员的参考书，也可作为有关专业研究生或高年级大学生的教材。

布劳威尔教授是国际上著名的天体力学家，在研究工作上具有重要贡献，同时他也是天体力学的一代宗师，当代美洲、欧洲和日本的主要著名天体力学家，大多数出其门下。他在世时，耶鲁大学长期成为天体力学的国际研究中心。1966年他不幸去世后，美国天文学会为纪念他设立了“布劳威尔奖金”。到现在已有四人因研究天体力学有较大贡献而获奖。

另一作者克莱门斯也是布劳威尔的学生，现在是美国海军天文台业务负责人，主要从事天文年历工作。

本书第4,5,6,7,8,15共六章由丁华同志翻译，其余内容

序 言

这部天体力学旨在为实际应用提供广泛基础。本书既适用于高年级大学生和研究生，也适用于工程师们和其他想要获得某些天体力学应用知识的读者。本书还可作为专家们的参考书。内容的介绍和编排尽可能地便于计算工作，但我们的目的不止是一部计算手册。我们从基本原理出发对研究课题作了逻辑推导，并试图阐明采用这些过程的动机，从而为人们进一步独立研究打下基础。

天体力学是天文学的一个分支，致力于研究天体的运动。支配这些天体运动(至少在我们所处的星系内)的主要作用力是万有引力，它是这部书中所涉及到的唯一的力。几乎在所有情况下都可以确信，被观测到的各种运动，不必借助于非引力现象就可以完全描述清楚，而且观测与理论之间的各种偏差，大部分都是由于现有理论发展的不完善所引起的；在过去的两个世纪中，一般来说，观测精度的提高比计算精度的提高要快些。但是，从严格的实用观点来看，这种信仰所依据的，不过是处理当时所得到的比较粗糙的观测资料的成功。对这一课题的比较严密的检验需要大量的计算工作，为此曾阻碍了人们继续对它进行研究。但近年来计算机的发展，又促使这个领域重新活跃起来；在这一领域中，无疑地将继续有一些令人兴奋的发现，而正是为了推进这一研究的愿望，成了我们写这部书的主要动机。

现在我们已知的主要的非引力的力的几个突出例子，是那些引起地球自转速度不规则变化和季节变化的力，和影响

地球大气层中卫星运动以及彗星和密近双星系统中伴星运动的力。在这本书里只有一节涉及到这些课题之一，即大气阻力对人造卫星运动的影响(第十七章第 14 节)。

我们只局限于牛顿万有引力定律的探讨。大家知道，它在下述情况中是不完全适用的，即内行星的拱线移动，而这些问题按广义相对论原理加进一小改正即可很简单地处理。关于这个内容，读者可参阅任何一本普通的相对论著作。

天体力学的研究既可以作为一种思维训练，从而获得对原理和形式关系的普遍了解；它也可以从实用角度进行研究，而后者正是我们特别重视的。书中将给出数值计算中所有最常用的主要方法，而与我们的目的不相符的则一律不予论及。

阅读这本书，必须具备较好的微积分运算知识。此外，为了对某些推导能够彻底理解，还需要掌握一些高等代数、方程论和常微分方程的知识；但是这些知识的不足，将不会妨碍实际应用书中所介绍的各种方法。

这本书的结构不是按逻辑顺序排列的，而或多或少地按照独立章节来编排，因而不必从头读到尾；各章顺序可以按不同方式重新排列，而不会妨碍正常理解。第一、二两章例外，它们应放在第十一至十七章之前。另外，第四章从逻辑上说应放在第五章之前，而第六章至第九章是相互联系的。第三章以及第十至十七章实际上是各自独立的。因此，学习过程的重大改变可由合理选择适当章节来实现。

第四章是作为第五章的必备条件放在前面的，这是为了使读者在缺乏完整的有限差分知识的情况下，也能理解第五章的内容，同时也是为了构成一个容易采用的内插表。第六至九章包括了球面天文和实用天文的部分内容，它们是处理天文观测的基础。光行差比其它部分阐明得完整些，这是由于非常规方法常被其他一些作者所忽略。

前人的方法都在第十一至十七章中阐明。为了给出天体力学问题的定量解，最后一章将侧重于正则变量的应用。我们已采用目前唯一的统一方法（舍去所有的不是特别需要的内容）来尽可能好地达到这个目的。或许引人注意的是缺少了哈密顿-雅可比（Hamilton-Jacobi）偏微分方程的常用形式，它对可分离变量问题的解具有特殊的作用。但我们宁愿强调更一般形式方程的优点，该形式经蔡佩尔（von Zeipel）的特殊处理，已成为摄动理论中一个相当有效的方法的基础。德洛内（Delaunay）方法就是该方法的一个特例。对这一课题在其它方面感兴趣的读者，可以在惠特克（E. T. Whittaker）的分析动力学和另一些著作中找到大量补充材料。

天体力学中各种量的表示方法出现了许多困难，这主要是因为需要大量的符号所造成的。在不引进新记号的前提下，要避免用同一符号表示两个或更多不同的量常常是不可能的；而新记号又往往是极其复杂的，与人们已经熟悉的一些记号混淆不清。我们通常偏重于采用在各个具体问题中人们最常用的记号；即使在不同章节中有时会出现用两个符号分别表示同一个量的情况，我们还是宁愿这样做。然而，对于最常用的量有一个例外，如平近点角，始终采用同一个符号。我们希望所采用的符号尽可能便于读者查阅原始文献，又不致于把不适当的负担强加给那些仅仅阅读这本书的读者。

让我们衷心地感谢日本东京大学天文系的堀源一郎博士，他旅居耶鲁（Yale）天文台的第一年，适逢我们的手稿正要完成。他仔细阅读了全部手稿，提出了许多改正和改进意见，在阅读校样中也同样给了我们很多帮助。

D. 布劳威尔
G. M. 克莱门斯

目 录

译者的话

序言

第一章 椭圆运动.....	1
1. 历史的介绍.....	1
2. 运动定律和万有引力定律.....	3
3. 二体问题的运动方程.....	6
4. 质量中心的运动	7
5. 绕质心运动的方程	10
6. 相对运动方程	12
7. 面积积分	12
8. 活力积分	17
9. 轨道平面内的运动	18
10. 开普勒第三定律	21
11. 偏近点角	22
12. 平近点角	23
13. 轨道平面上确定位置的公式	24
14. 绕质心的运动	26
15. 能量积分	27
16. 位能	29
17. 坐标系的原点移至质心	29
18. 面积积分	32
19. 黄道坐标	33
20. 赤道坐标	36
21. 矩阵介绍	39
22. 矩阵乘积中次序的改变	41

23. 旋转矩阵	41
24. 坐标系的一般旋转	44
25. 极坐标的引用	48
26. 黄道订正	50
27. 从给定时刻的位置和速度分量计算轨道根数	51
28. 根数的精度	54
29. 赤道常数	55
30. 用初始坐标和速度分量表达的式子	56
31. 高斯常数	63
附注和参考文献	65
第二章 椭圆运动的展开式	67
1. 引言	67
2. 傅里叶级数展开式	67
3. 用偏近点角表达真近点角	69
4. 用真近点角表达平近点角	71
5. 贝塞耳函数简介	73
6. 贝塞耳函数的应用	79
7. 贝塞耳函数的计算	91
8. 开普勒方程的解	94
9. 用平近点角表达运动方程的解	97
10. 旋转坐标系	105
11. 复数直角坐标	118
12. 用调和分析的展开式	122
附注和参考文献	129
第三章 有限大小物体之间的引力作用	131
1. 引言	131
2. 质点受有限大小并有任意质量分布的物体的吸引	131
3. 勒让德多项式	135
4. U 的主要部分	138
5. 极坐标的引进	142

6. U_3 的表达式	143
7. U_4 的表达式	144
8. 旋转椭球体的位函数	147
9. 关于两个有限大小物体的位函数	149
附注和参考文献	153
第四章 有限差分法	154
1. 函数的表示法	154
2. 差分	155
3. 偶然误差的检测	158
4. 内插	161
5. 埃弗雷特公式和贝塞耳公式	164
6. 牛顿公式	166
7. 中点插值的拉格朗日公式	167
8. 反内插	167
9. 内插量的误差	168
10. 数值微分	169
11. 几个特殊公式	171
12. 数值积分	172
13. 数值积分中误差的累积	178
14. 符号算子	180
附注和参考文献	189
第五章 轨道的数值积分	190
1. 引言	190
2. 考韦尔方法采用的方程	192
3. 考韦尔方法的数值应用	194
4. 恩克方法采用的方程	198
5. 恩克方法的数值应用	203
6. 以质量中心为坐标原点的方程	206
7. 增加太阳质量的积分法	209
8. 考韦尔方法和恩克方法优点的比较	210

附注和参考文献	211
第六章 光行差	212
1. 引言	212
2. 恒星光行差	214
3. 行星光行差	216
4. 周日光行差	218
5. 周年光行差的计算	220
6. 星历表	224
7. 光行差的特例	226
附注和参考文献	227
第七章 观测和理论的比较	228
1. 引言	228
2. 参考平面的运动	229
3. 岁差	230
4. 章动	231
5. 地心视差	233
6. 注意事项	235
附注和参考文献	236
第八章 最小二乘法	237
1. 引言	237
2. 观测误差的频率分布	237
3. 测定量的最或然值	240
4. 观测的权重	243
5. 间接量度	243
6. 条件方程	245
7. 方程的权重	246
8. 正态方程的构成	247
9. 正态方程	249
10. 形式解	251
11. 数值例子	255

12.未知量的组合	258
13.相关	259
14.标准点	261
附注和参考文献	261
第九章 轨道的微分改进	263
1.引言	263
2.赤道直角坐标的引用	266
附注和参考文献	281
第十章 一般积分,平衡解	283
1.质心积分	283
2.面积积分和能量积分	286
3.限制性三体问题	288
4.蒂塞朗判据	290
5.零速度面和零速度线	292
6.拉格朗日特解	295
7.平衡解附近的小振动	298
8.运动方程的不同形式	304
附注和参考文献	309
第十一章 常数变易法	310
1.方法的基本原理	310
2.拉格朗日括号	314
3.拉格朗日括号的时间独立性	316
4.计算拉格朗日括号的惠特克方法	317
5.开普勒根数的导数	323
6.避免在三角函数的幅角外出现 i 的改进	325
7.小偏心率或小倾角情况所选择的形式	327
8. $a, e, i, \sigma, \omega, \Omega$ 根数组	330
9.正则根数组	331
10.一阶摄动,长期项和周期项	333
11.二阶摄动	337

12. 小分母	339
13. 方程的高斯形式	342
14. 高斯型方程的直接推导	346
附注和参考文献	351
第十二章 月球运动理论	353
1. 问题的陈述	353
2. 运动方程	353
3. 摄动函数展开成椭圆根数的形式	356
4. 摄动函数的性质	365
5. 用任意常数变易法积分主项	368
6. 长期项	369
7. 主要周期项	372
8. 二均差	373
9. 出差	377
10. 周年差	379
11. 月角差	379
12. 纬度的主要摄动	381
13. 对于卫星轨道的开普勒第三定律的应用	382
14. 不含因子 m 的摄动项	383
15. 进一步的近似	385
16. 关于德洛内和汉森理论的评论	387
17. 关于希耳的“月球运动理论研究”的绪言	388
18. 月球运动的希耳方程	389
19. u 和 s 的引进	393
20. u 和 s 以 m 的幂表达的解	396
21. 二均轨道的结果	399
22. 尺度因子 a	405
23. 方程的变换	406
24. 函数 Θ	413
25. 近地点的运动	418

26. 交点运动	429
27. 布朗的微分改正法	434
28. 布朗的月球运动理论	437
附注和参考文献	439
第十三章 坐标摄动	441
1. 引言	411
2. 微分方程	442
3. 积分	446
4. 汉森方法	449
5. 因子 q_1 和 q_2	450
6. 多余的常数	454
7. 一阶摄动	456
8. 长期摄动	460
9. 布劳威尔方法介绍	469
10. 运动方程	469
11. 积分	473
12. 形式解	476
13. 明显解	478
14. 摄动表达式	481
15. 方括号	484
16. 积分常数	485
17. 摄动函数和它的导数	488
附注和参考文献	490
第十四章 汉森方法	491
1. 引言	491
2. 方法的原理	492
3. 坐标系	493
4. v 和 r 的方程	502
5. W_0 的表达式	511
6. u 方程	515

7. 时间作为自变量	517
8. 时间作为自变量所对应的积分常数	524
9. 偏近点角作为自变量	531
10. 偏近点角作为自变量所对应的积分常数	534
11. 摄动函数和它的导数	535
12. 二阶摄动	548
附注和参考文献	554
第十五章 摄动函数	555
1. 引言	555
2. 数值方法	559
3. 采用拉普拉斯系数的数值方法	562
4. 文字展开方法	568
5. 间接部分	585
6. 文字展开	587
7. 拉普拉斯系数	595
8. 拉普拉斯系数的导数	604
附注和参考文献	609
第十六章 长期摄动	611
1. 引言	611
2. 摄动函数的长期部分	612
3. 两个行星情况的解	615
4. 多于两个行星情况下解的推广	620
5. 积分常数的计算	624
6. 行列式方程的雅可比解	626
7. 小行星的长期摄动	630
附注和参考文献	635
第十七章 正则变换	637
1. 一般原理	637
2. 正则变换	638
3. 雅可比行列式	641

4. 无穷小接触变换	643
5. 例	647
6. 生成函数	650
7. 德洛内方法	650
8. 德洛内变换的研究	653
9. 用寻找生成函数的方法建立德洛内问题的解	659
10. 德洛内变换的例子	664
11. 借助于生成函数给出上一问题的解	671
12. 人造卫星的运动	675
13. 关于两个固定中心问题	689
14. 人造卫星运动中的大气阻力效应	691
15. 应用于小行星在木星摄动下的运动	700
16. 用德洛内变量表达的一般行星运动问题的方程	707
附注和参考文献	711

第一章 椭圆运动

1. 历史的介绍

天体力学这门学科可以认为诞生于 1687 年牛顿 (Newton) 发表《自然哲学的数学原理》一书 (通常称为《原理》) 之时。在这部光辉的著作里, 牛顿阐明了运动定律和万有引力定律, 并且导出了行星和卫星运动的一些最主要的特征。

早在牛顿著作发表前很多年, 著名的开普勒三大定律就已出现, 因此, 这些定律就被牛顿用来作为天体力学入门的历史方法; 他在第一卷的第 2 和第 3 节里, 分析了作用于行星上的力的信息可由开普勒定律导出, 这些定律陈述如下:

(1) 行星的轨道在通过太阳的一个平面内, 行星与太阳的连线扫过的面积与经过的时间成正比。

(2) 行星的轨道是椭圆, 太阳在此椭圆的一个焦点上。

(3) 对于所有绕日公转的行星, 绕太阳公转周期的平方与椭圆轨道半长径的立方之比都是相同的。

根据行星轨道在通过太阳的一个平面内, 行星与太阳的连线扫过的面积与时间成正比这一叙述, 可以断定作用在行星上的力必须在行星与太阳的连线方向上。这个力应该是引力而不是排斥力, 因为行星的轨迹是凹向太阳方向的。根据行星轨道是以太阳为其一个焦点的椭圆可知, 使行星保持在它的轨道上的作用力必须与行星到太阳的距离平方成反比。最后, 发现开普勒第三定律要求作用在不同行星上的力必须与行星质量成正比。实际上, 由于大行星的轨道都接近同一个平面, 这些理由并不能充分证明引力是各向同性的特