

天体力学基础

编著 易照华
南京大学出版社

天体力学基础

易照华

编著

藏书



南京大学出版社

1993·南京

(苏)新登字第 011 号

天体力学基础

易照华 编著

天体力学基础

易照华 编著

*

南京大学出版社出版

(南京大学校内)

江苏省新华书店发行 常熟市印刷二厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 9.75 字数: 245 千

1993 年 8 月第 1 版 1993 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—1000

ISBN-305-02081-8/P·86

定价: 8.50 元

前 言

本书是根据作者在南京大学讲授“天体力学”课程 30 余年的教材,不断修改编辑而成,现在是天文系的专业基础课内容。成稿后又经过两届学生使用,出版前又进行了修订。

天体力学是一门老学科,是天文学的一个分支,但又同数学和力学(现为一般力学)的关系密切。从历史上看,天体力学与数学和力学同步发展,相互促进;现代天体力学又同计算机科学、航天科学和某些理论物理学(特别是引力物理学)以及一些地球科学(如大地测量学、古地质学和气象学等)联系在一起,建立了一些共同研究领域。

本书虽是天体力学的一本入门教材,但尽可能反映出现代天体力学的面貌。与过去的教材比较,加深了基础理论,增加了重大问题的最新情况介绍;为读者进一步学习和研究专门课题打下基础。

全书分为七章。第一章绪论是介绍天体力学的历史和现状;第二章讲述万有引力定律和天体力学的最基本课题——二体问题;第三章讲天体力学的一个重要基础理论——正则变换,其中包含现代新成果;第四章和第五章讲述天体力学的传统基础理论——摄动理论,包括运动方程建立和分析解法过程,并应用于讨论太阳系稳定性问题;第六章讲述三体问题的基础知识,并介绍有用的一些特殊三体问题;第七章讲述天体力学中应用广泛的分支——天体的形状和自转理论,其中章动理论讲述现代采用的结果,即日本木下宙的刚体地球自转理论和莫洛金斯基(S. M. Molodensky)以及瓦尔(J. M. Wahr)的非刚性改正方法。

每章末附有习题。

阅读本书需要有微分方程、理论力学、线性代数、球面天文以及坐标函数方面的基础知识和技能。本书可作为天文学、引力物理学、天文大地测量学、航天轨道设计与跟踪等专业的大学生教材和上述学科工作者的参考书。

在这次定稿过程中，参考了黄天衣和夏一飞同志有关岁差和章动理论的手稿，使得本书第七章内容更完整，特此致谢！

易照华

1992年2月于南京大学

目 录

前言	
第一章 绪论	(1)
第一节 天体力学是天文学的一个分支.....	(1)
第二节 天体力学的诞生和奠基.....	(2)
第三节 19 世纪后半叶的新发展	(4)
第四节 现代天体力学的主要领域.....	(7)
第二章 万有引力定律和二体问题	(11)
第一节 万有引力定律的建立和发展.....	(11)
第二节 万有引力的位函数.....	(16)
第三节 二体问题的运动方程和积分.....	(24)
第四节 二体问题的轨道分类,开普勒方程	(29)
第五节 二体问题的解的常用形式.....	(34)
第六节 星历表基本公式.....	(38)
第七节 初值和轨道根之间的关系.....	(39)
第八节 轨道计算原理.....	(44)
第九节 引力作用范围.....	(48)
第十节 椭圆运动的几个重要展开式.....	(53)
第三章 正则方程组和正则变换	(60)
第一节 数学符号,梯度向量	(60)
第二节 哈密顿正则方程.....	(65)
第三节 正则变换及其充要条件.....	(68)
第四节 隐函数形式的正则变换.....	(76)

第五节	正则扩充	(80)
第六节	解正则方程组的哈密顿-雅可比方法	(82)
第七节	用哈密顿-雅可比方法解二体问题	(89)
第八节	常用的几种正则共轭变量	(95)
第九节	正则变换概念的推广	(99)
第十节	用李氏级数表示的正则变换	(103)
第四章	受摄运动方程	(118)
第一节	摄动和吻切轨道	(118)
第二节	正则形式的受摄运动方程	(120)
第三节	拉格朗日行星运动方程	(122)
第四节	消除奇点后的受摄方程	(128)
第五节	摄动导数	(132)
第六节	用摄动加速度分量表示的受摄方程	(136)
第七节	天体力学中常见的摄动力	(143)
第五章	受摄运动方程的分析解法原理	(149)
第一节	受摄运动方程的级数解形式	(149)
第二节	摄动函数展开的基本方法	(156)
第三节	纽康算子, 摄动函数的展开结果	(163)
第四节	一阶摄动的讨论	(171)
第五节	摄动长期项的计算方法	(177)
第六节	关于太阳系的稳定性问题	(186)
第六章	三体问题	(197)
第一节	多体问题的运动方程和积分	(197)
第二节	雅可比坐标系	(202)
第三节	用雅可比变换降阶	(205)
第四节	三体问题的定型解	(212)
第五节	限制性三体问题	(217)
第六节	圆型限制性三体问题	(221)

第七节	双不动中心问题	(234)
第七章	天体的形状和自转理论	(242)
第一节	自转流体平衡形状的研究方法	(243)
第二节	马克洛林体和雅可比体	(247)
第三节	洛熙极限	(255)
第四节	不均匀流体的平衡形状问题	(259)
第五节	欧拉角和昂多瓦叶变量	(260)
第六节	刚体地球的运动方程	(268)
第七节	自由刚体的运动	(274)
第八节	岁差章动方程解法原理	(277)
第九节	摄动函数的展开	(279)
第十节	章动	(283)
第十一节	岁差	(286)
第十二节	地球非刚性改正问题	(290)
第十三节	数值表示和新进展	(293)
附录一	IAU 1976 天文常数系统	(297)
附录二	IAU 1984 采用的瓦尔章动公式	(299)
	主要参考文献	(304)

第一章 绪 论

第一节 天体力学是天文学的一个分支

天体力学是研究天体的运动和形状的学科。天体力学中所指的天体范围是在不断发展,牛顿时代是局限在地,月和金木水火土五大行星;19世纪增加了太阳系中的大量小行星,天然卫星,彗星等小天体;现代天体力学中又增加了大量人造天体以及各级恒星系统。

但是天体力学中只研究天体的一个方面,即运动和形状。所谓运动是指力学运动(即机械运动),包括天体质心在空间的移动以及天体绕其质心的转动(自转)。形状包括内部密度分布结构,对非刚性天体而言,与自转有密切关系。现代力学已证明,天体的空间移动同转动之间有相互影响,对很多类型天体已不能忽视。

讨论天体的力学运动,要用到力学理论。影响天体运动的力主要是引力,包括天体之间的相互引力和天体内部各质点的自引力。人们对引力的认识和相应的理论在不断发展。三百年以来,都是用牛顿力学(包括运动三大定律和万有引力定律以及时空观点)作为研究天体运动的基础,因而称天体力学为牛顿力学的一部份。很多书中直接在天体力学定义中写明是用牛顿力学研究天体的运动。现在已证明牛顿力学在天体运动研究中有偏差,但多数课题在牛顿力学精度下已能解决,故天体力学目前仍以牛顿力学为基础。对于少数高精度课题,现用爱因斯坦广义相对论或其他新引

力理论的一阶近似方法，改进牛顿力学的结果。这个领域称为后牛顿天体力学，属于相对论天体物理学。较严格地在相对论框架下建立天体的运动理论，现称为相对论天体力学，还在进行中，尚未成熟，只作为天文学和引力物理学的一个共同研究领域。

天体的运动和形状的课题中，除少量研究平衡形状课题以静力学为主外，绝大多数都是研究动力学课题。研究对象又逐渐牵涉到天文学中的几乎所有天体，故有的国家称为“动力天文学”（如美国）。

天体力学是基础科学天文学的一个老分支，为二级基础学科，但有较广泛的应用。现代天体力学除传统的编历并用于航海航空外，人造天体的运动已成为航天科学，大地测量学的重要组成部分，大量应用于军事和经济建设。

第二节 天体力学的诞生和奠基

在牛顿以前，天文学主要研究天体在星空中的视位置和视运动规律，是经典的天体测量学领域。长期对大行星的视运动研究，肯定了行星和地球是在绕太阳运动。开普勒（J. Kepler, 1571—1630）提出的行星运动三大定律，是对行星运动很准确的描述。但是为什么行星要这样绕太阳运动，当时只有一些猜想。

另外，中世纪结束后出现了力学萌芽。达·芬奇（Leonardo da Vinci, 1452—1519）在机械研究中肯定了力的存在，伽里略（G. Galileo, 1564—1642）在自由落体及其他试验中提出了力学的一些基本量（如速度，加速度，动量等）以及一些重要实验结果，为力学正式诞生创造了条件。惠更斯（C. Huygens, 1629—1695）更进一步研究了曲线运动，特别在圆周运动研究中发现了离心力，并给出了表达公式，为万有引力定律的发现作出贡献。

17世纪中已有不少人在牛顿以前把力学概念与行星运动联系起来。开普勒在《火星论》中就提出“两个孤立物体要彼此相向运动，像两块磁铁相互结合一样，……；地球潮汐是月球引力造成……”。笛卡尔(R. Descartes, 1596—1650)提出微粒旋涡论，太阳在大旋涡中心，带动行星绕太阳转。胡克(R. Hooke, 1635—1703)认为在行星轨道上的运动是抛出它的原始力与太阳引力组合的结果。这样历史条件下，万有引力定律和天体力学的出现成为必然。

牛顿(I. Newton, 1642—1727)完成这个历史任务。他在1666年回乡躲避瘟疫时，就对引力认真研究，并得到了行星在圆轨道上所受太阳的引力和运动的离心力平衡时，引力大小应与距离的平方成反比。他在具体研究中用了开普勒三定律，因而就解释了行星绕太阳按此三定律运动的原因。但是有两个问题未解决：一个是行星轨道不是圆而是椭圆；二是天体不是质点，有一定形状大小，当时地球半径尚未测准，对月球运动解释尚有较大偏差。故牛顿没有公布结果，直到1685年，牛顿用更新的数学力学方法证明了椭圆运动也符合反平方引力定律；球对称密度分布的物体的引力与质量集中于质心的质点引力相同。同时用更准的地球半径值更好地解释了月球运动。在惠更斯鼓励下，并在哈雷(E. Halley, 1656—1742)资助下，于1687年出版了历史性名著《自然哲学的数学原理》。牛顿力学正式诞生，用它来研究天体运动和形状的天体力学也同时诞生。

但是牛顿并没有提出天体力学这个学科名称。他局限在二体问题范围内研究出圆锥曲线的普遍轨道，并用于解释行星和彗星的运动；从地球的自转肯定了扁球体形状；从月球轨道不是固定椭圆而萌发了摄动的概念。这些内容已标志着天文学已从过去只研究天体的视运动而深入到研究真运动。这是天文学发展史中的第一次巨大飞跃。

《自然哲学的数学原理》出版后的 50 年内,天体运动的研究进展不大,这与数学和力学的发展有关。另外,这部里程碑价值的伟大著作中的观点和理论,真正被人们接受是需要一段时间。随着数学分析和力学的迅速发展,天体力学也加速了奠基过程。

18 世纪中叶到 19 世纪初是天体力学的奠基时期,奠基者们都是当时的数学分析和分析力学的开拓者。主要代表为欧拉(L. Euler, 1707—1783), 克莱洛(A. C. Clairaut, 1713—1765), 达朗贝尔(J. D'Alembert, 1717—1783), 拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736—1813)和拉普拉斯(P. S. Laplace, 1749—1827)。最后由拉普拉斯集其大成,建立了经典天体力学的主要内容——摄动理论,并对当时已发现的各类天体分别建立了运动理论和历表。精度符合当时的观测水平。

拉普拉斯在 1798 年出版的一本著作中,第一次提出了天体力学这个学科名称。他在书中写道:“用万有引力定律研究太阳系及宇宙里类似系统中的固体和流体的平衡和运动理论,组成了天体力学”。他在 1799—1825 年出版的历史性巨著“天体力学(Mécanique Céleste)”,共五卷 16 册,就是经典天体力学的代表作。到此为止,天体力学才正式建成,不久由勒威耶(U. Leverrier, 1811—1877)用天体力学理论计算预言而发现了海王星,表明这个学科已初步成熟,成为当时天文学的主流。

第三节 19 世纪后半叶的新发展

到 19 世纪后半,有三个因素促使天文学形成发展高潮。首先是照相和分光方法用于天文观测,使天文学不仅能研究天体的力学运动,并能研究天体的物理本质,诞生了新分支天体物理学,是天文学发展史中的第二次飞跃;天体运动的有些资料,可用物理方法

获得。其次是发现了大量小行星,彗星和卫星,传统摄动理论不大适用,要求改进研究方法。还有航海和大地测量精度要求提高,需要更准确的历表。在大批数学和力学名家参加下,天体力学发展也形成高潮。

这次高潮从19世纪中到20世纪初。主要代表人物有德洛内(C.-E. Delaunay, 1816—1872), 汉森(P. A. Hansen, 1795—1874), 希耳(G. W. Hill, 1838—1914), 纽康(S. Newcomb, 1835—1909)和邦加雷(H. Poincare, 1854—1912)。内容主要有:

1. 建立了适用于各种天体,精度更高的摄动新方法。由于观测精度提高和太阳系大量小天体的发现,传统的拉格朗日-拉普拉斯-勒威耶摄动方法已不适应要求。针对月球和小行星运动,出现了很多不同的摄动方法。其中有代表性而且至今仍有生命力的为下面三种:

① 德洛内的正则变换方法。这是以当时新发展的分析力学为基础,德洛内用一系列正则变换来解天体运动的正则方程组。进行一次变换,相应的解就精确一步。这种方法不仅是天体力学中能用,而且成为正则方程组的一种原则解法。到19世纪末和20世纪中又得到后人继续发展,在人造卫星运动中取得了巨大成功。

② 汉森的坐标摄动方法。在他提出的理想坐标基础上,把问题化为求三个摄动量。并在摄动函数展开过程中采用调和分析方法,使得求解精度提高。当时提出后在月球和小行星运动中都比较成功,受到普遍重视。20世纪以来又在继续发展。

③ 希耳的中间轨道方法。希耳在月球运动的简化模型中得到一种周期轨道,在它基础上再加摄动改进,得到月球运动较好的解。所用的周期轨道称为中间轨道,并公认这种方法为一种普遍的中间轨道方法,后来有不少人采用。希耳的月球运动理论后经布朗(E. W. Brown, 1866—1938)改进和实用化成为国际上通用的月球历表依据,一直使用到1984年。

2. 建立了历书天文学。纽康在担任美国海军天文台领导人以后,致力于提高历书精度。通过改进摄动方法,建立大行星和月球的运动理论以及相应的运动表(其中木星和土星的运动由希耳完成,月球运动用希耳-布朗方法);并根据全世界的观测资料改进有关常数,并提出天文常数系统和相应的参考系。这就形成了天体力学和天体测量学的共同分支,历书天文学,在理论和应用上都有重大贡献。

3. 开创了天体力学定性理论。以邦加雷和李亚普诺夫(A. M. Ляпунов, 1857—1918)创立的数学定性理论为基础,用于天体运动和形状课题,就开创了一个新分支,天体力学定性理论。当时包含内容有:

① 天体自转(流体)时的平衡形状及其稳定性。邦加雷得到一些新的平衡形状,由李亚普诺夫研究了稳定性。

② 天体运动的周期轨道及其稳定性研究。这也是由庞卡莱创立,后达尔文(G. H. Darwin, 1845—1912)等发展而形成活跃领域。

③ 天体运动的稳定性和终结轨道的研究。这是讨论时间趋于无穷后,运动和轨道的性质。

定性理论出现是天体力学发展史中的重大突破,这就形成了与传统天体力学以摄动理论(分析方法)不同的研究方向。

4. 形成了天体力学数值方法。用数值方法解天体运动的微分方程,在19世纪初期就已出现,但未受到重视。20世纪初期,由科威耳(P. H. Cowell, 1870—1949)和克洛梅林(A. O. Crommelin, 1865—1939)创立的数值方法,用于研究哈雷彗星的运动,并准确预报了此彗星的回归。因此受到重视而形成天体力学的一个分支,与传统分析方法以及新建立的定性方法并列为第三类方法。

这个时期结束时,正好是爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)

提出广义相对论,也是一种新的引力理论。天文学家们预感到会对天体运动研究有重大突破。但因观测精度限制和用广义相对论严格建立天体运动理论上的困难,在相当长一段时间内进展不大。

第四节 现代天体力学的主要领域

20世纪50年代开始,有三个因素促使天文学(包括天体力学)又形成发展新高潮。

一是人造天体的出现,不仅为天体增加了大量新成员,更主要是用航天技术可探测到研究天体运动和物理本质的更新更精确的资料。由此可观测到天体各种波段的辐射,在60和70年代有大量重大发现。这是天文学发展史中的第三次飞跃。对天体力学而言,研究人造天体的轨道设计和运动理论是一项新任务。为此大批数学,物理以及工程方面的专家参加进来,形成了研究高潮。通过人造卫星研究又为天体力学开拓了更广泛的应用,由此建立了新分支——天文动力学。推动了摄动理论和数值方法迅速发展。

二是快速电子计算机的广泛应用,不仅较好地解决了时间短的实际问题,还对运动的长时期行为进行数值探索,甚至分析方法的推导都可用计算机来实现。故可称计算机为天体力学的实验室,促进了摄动理论,数值方法同定性理论的进一步发展。

三是观测新技术的出现,提高了天体运动的实测资料精度,反过来促进理论精度要相应提高。除航天技术外,新技术还有多卜勒(Doppler)测速,激光测距,甚长基线干涉(VLBI)等,分别比传统光学定位观测提高1—3量级。原有历表都不符合要求,同时也扩大了天体力学的应用范围。

按现有的学科内容,天体力学有下列研究领域(一般可称为三级学科)。

1. 摄动理论。这是经典天体力学主要内容,现代天体力学中有重大发展。它是二体问题的解作为基本解,把一切使天体偏离二体问题的因素都称为摄动,并用分析方法讨论天体受到摄动时的运动方程的解法。其中包括变量的选择,运动方程的形式,用分析方法解方程的途径,求积过程以及积分常数的确定和改进等。少数课题不用二体问题的解作基本解,而采用另外已知轨道(即中间轨道),再讨论摄动。还有一些是分析同数值结合的半分析方法,也在这个领域中。不同类型的天体受摄运动有不同的摄动理论。

2. 天体力学定性理论。近30年来有重大发展。60年代的KAM理论提出是重大贡献之一;动力系统的数值方法建立为天体力学定性理论开拓出新的途径,并有迅速发展;70年代中的三体问题定性研究,特别是运动区域和拓扑结构也有重大成果。

3. 天体力学数值方法。在快速电子计算机广泛用于天体运动课题后,发展更快。一方面对原有科威耳方法等进行改进,又提出了很多新计算方法。针对奇点附近情况又有正规化方法。由于计算时间长,又出现误差传播累积问题和稳定性问题,以及语言系统问题的研究。

4. 天体的形状和自转理论。由于空间探测和人造天体运动研究的不断改进,对天体形状和自转方面也有大量更准确的资料。除了地球形状,内部结构及自转理论不断精确外,对行星形状和自转模型和演化也提到日程。近十年来用天体力学方法对环状天体和星系形状结构的研究也活跃起来。

5. 天文动力学。是人造天体出现以后的新研究领域。按人造天体类型又分为:

① 人造地球卫星动力学。其中分为三段:发射段,轨道航行段和返航段。轨道航行段以地球引力为主,加上日月引力及大气阻力等摄动,是纯天体力学课题。发射段和返航段中要加上火箭飞行动力学。

② 月球火箭动力学:内容有各种类型(击中,航测,月球卫星和软着陆等)轨道的设计,轨道飞行动力学等。也分发射段,飞行段,着陆或定轨段;其中发射和着陆段以火箭推力为主。

③ 行星际航行动力学,包括各种类型行星际飞行器的轨道设计和飞行动力学。类型很多:只到达一个行星附近的飞行器已发射上百次,也分为发射段,轨道飞行段(主要考虑太阳引力)和进入目标行星作用范围段;近年发射了能一次探测多个行星的飞行器(如旅行者1,2号),轨道设计很复杂。由于行星际航行时间长,故除共同考虑节能轨道外,还要考虑缩短时间,而且还有导航问题。

6. 历书天文学。60年代后有重大进展。为了提高历表精度,投入了大量人力。如美国为建立DE历表花费20年,于1982年完成DE200/LE200;虽已在1984年国际上采用,但仍在继续改进。西欧长期建立太阳系天体的分析历表,现在月球的半分析历表ALE2000已采用,行星历表VSOP 82也实用化。由于精度高,不仅考虑多体问题和行状摄动,还要考虑相对论效应和参考系问题以及天文常数系统。

7. 多体问题。这是天体力学同一般力学和应用数学之间的共同研究领域,也就是质点组动力学。近20多年来在数值方法和定性研究上有重大进展。多体数值模拟已广泛用于星系动力学,三体问题定性研究有突破,都成为活跃领域。另外在限制性问题上,近年有新的开拓,把传统的限制性三体问题(二大一小),推广到 n 大 k 小的 $n+k$ 体问题,适用于小行星和天然卫星情况。

8. 恒星系统动力学。为天体力学和天体物理学的共同研究领域。对象为双星,聚星,星团,星系。天体力学只讨论动力学,而且不用统计方法。近20年来数值模拟方法广泛应用后有很大进展。

9. 动力演化。也是天体演化学的一个研究领域。由于很多天体系统都在相当长时期内是以力学作用为主(如太阳系及一些