

HK45/23

人造地球卫星运动理论

刘 林 等 编著

1974

内 容 简 介

本书是根据十多年来南京大学天文系“星际航行轨道”课程所用讲义改编而成。全书分为五章,即:绪论,轨道计算与轨道改进,人造地球卫星在地球引力场内的运动,各种物理因素的摄动和日、月摄动,人造地球卫星运动理论的某些应用。

本书可供大学天文系师生以及在天体力学、人造卫星等学科有关的科技人员参考。

人造地球卫星运动理论

刘 林 等 编著

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

1974 年 6 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32
1974 年 6 月 第一次印刷 印张: 7 1/2
印数: 0001—14,350 字数: 170,000

统一书号: 13031·231

本社书号: 381·13-5

定 价: 0.72 元

前 言

本书是根据南京大学天文系师生从1958年开始所积累的资料和十多年来“星际航行轨道”专门化课程所用的讲义改编而成。针对当前读者的需要,我们只选编了原讲义中有关人造地球卫星运动问题的部分。

人造地球卫星运动理论包括三方面的内容: 1. 发射轨道理论; 2. 返航轨道理论; 3. 轨道摄动理论。本书从天体力学角度出发,主要论述人造地球卫星运动的轨道摄动理论,即研究卫星进入轨道后在各种力学因素作用下的运动规律。

研究人造地球卫星的运动规律,概括地讲,就是研究任一时刻卫星所在的位置。本书主要围绕着确定卫星空间位置这个中心问题,选择和安排了有关内容,包括初轨的确定、各种摄动的计算以及某些应用(例如利用卫星轨道变化来测定地球引力场和大气层的有关参数),全书重点是第二章、第三章和第四章前两节(有关大气阻力的影响问题),着重地介绍了主要理论和常用方法,为开展这方面工作打下了基础;对一些目前还不成熟或正在探讨的理论和方法,只作了简单的介绍,以供参考。

本书是在天体力学基础上编写的,要求读者具有高等数学、球面坐标系概念和天体力学的基础知识。

本书于1962年写出初稿,1964年作了重大修改,这次出版时又重新改写过。参加编写工作的有刘林、黄天衣、易照华等同志。另外,朱文耀同志也参加了第四章的部分编写工作。

我们编写这方面的书还是第一次,由于水平有限,实际工作经验也很少,同时对国内外有关资料了解得也不够全面,因此在内容选择和章节安排上一定有不少不当之处,甚至也会有错误,希望读者批评指正。

编 者

1973 年 4 月

目 录

前 言	i
第一章 绪论	1
§ 1.1 天体力学的新内容	1
§ 1.2 人造地球卫星运动理论	4
第二章 轨道计算与轨道改进	9
§ 2.1 坐标系的选取与观测资料处理	10
§ 2.2 由大量观测确定轨道半长径	13
§ 2.3 常用的两种轨道计算方法	19
§ 2.4 建立在现代观测技术上的轨道计算方法	29
§ 2.5 牛顿-拉夫森方法	31
§ 2.6 轨道改进	38
第三章 人造地球卫星在地球引力场内的运动	46
§ 3.1 地球引力场的位函数	47
§ 3.2 以椭圆轨道根数为变量的解法	54
§ 3.3 德洛纳-柴倍耳方法	68
§ 3.4 小偏心率和小倾角问题	84
§ 3.5 临界角附近人造地球卫星的运动	94
§ 3.6 地球赤道椭率的影响	106
§ 3.7 周期为 24 ^h 的人造地球卫星	116
§ 3.8 中间轨道	123
第四章 各种物理因素的摄动和日、月摄动	136
§ 4.1 大气阻力对人造地球卫星运动的影响	136

§ 4.2	计算大气阻力摄动的库克和金-海耳方法	153
§ 4.3	地球形状和大气阻力的联合摄动问题	174
§ 4.4	光压摄动对人造地球卫星运动的影响	183
§ 4.5	日、月摄动对人造地球卫星运动的影响	196
§ 4.6	地磁场影响和其他摄动因素	203
第五章	人造地球卫星运动理论的某些应用	207
§ 5.1	测定地球引力场位函数的系数	207
§ 5.2	测定地球高层大气密度的分布	212
§ 5.3	卫星导航	218
结束语		223
附 录		227

第一章 绪 论

§ 1.1 天体力学的新内容

二十世纪五十年代开始, 两项重大科学技术成就促使天体力学迅速发展。一是计算技术现代化。由于天体力学研究应用了高速电子计算机, 使很多实际问题能够很快得到具体结果。原来认为很困难的一些问题, 例如外行星位置和小行星摄动等, 因为采用了现代计算技术, 几年内就用数值方法算出了较完善的结果, 对天体力学的发展起了重大的推动作用, 数值方法也就成为天体力学的重要研究方法之一。另一是人造天体的出现, 给天体力学研究工作增加了新的重要研究对象。人造天体是根据不同要求发射上去的, 情况比自然天体复杂, 影响它运动的力学因素也和自然天体的有所不同, 而且由于实际需要, 常常要求人们迅速掌握它们的轨道和运动规律。因此研究人造天体的运动就成为天体力学的一项新的迫切任务。近十多年来的事实表明, 研究人造天体的运动已成为现代天体力学的重要内容, 它丰富了并且发展了经典天体力学。

从 1957 年 10 月第一个人造地球卫星上天以来, 到目前为止, 各国总共发射成功的人造天体已超过 6000 个。根据不同的研究目的, 人造天体大致可分成三种类型:

(1) 人造地球卫星——如我国发射的两个卫星, 苏联的第一个人造卫星 (Спутник) 以及美国的探险者 (Explorer) 卫

星等；

(2) 月球火箭(包括月球卫星)——如苏联的月球号(Луник), 美国的阿波罗(Apollo)飞船等；

(3) 行星际火箭——如苏联的金星号(Венер), 美国的水手号(Mariner)等。

人造地球卫星又因用途的不同而分成各种类型, 例如:

(1) 研究地球附近空间状况(包括高层大气、太阳辐射等地球物理因素)的卫星, 如苏联卫星号[从第11个开始改称宇宙号(Космос)], 美国探险者号和OGO型等卫星；

(2) 气象卫星, 如苏联流星号(Метеор), 美国泰罗斯(Tiros)和雨云号(Nimbus)等卫星；

(3) 研究太阳活动的卫星, 如美国OSO型卫星等；

(4) 通讯卫星, 如苏联闪电号(Молния), 美国回声号(Echo)和辛卡姆(Syncom)等卫星；

(5) 导航卫星, 如美国子午仪号(Transit)等卫星；

(6) 大地测量卫星, 如美国安那号(Anna)等卫星。

另外还有专测宇宙线的卫星、资源卫星、生物卫星、载人飞船和大量的秘密卫星(主要是间谍卫星)等。

近年来, 由于空间科学的发展, 人造天体轨道的研究形成了天体力学的一个新分支——星际航行轨道。根据研究对象的不同, 它可以分为三个部分, 即: 人造地球卫星运动理论, 月球火箭运动理论和行星际火箭运动理论。

1. 人造地球卫星运动理论

早在五十年代初期, 就有人研究过这一问题。但是直到1957年, 人造地球卫星上天以后才真正建立起较实际的理论和方法。十多年来, 虽然时间不长, 但是这方面的工作已取得了非常丰富的成果。根据不同内容, 人造地球卫星运动理论

可以分为三个方面：1. 卫星发射轨道理论；2. 卫星返航轨道理论；3. 卫星轨道摄动理论。

2. 月球火箭运动理论

月球是星际航行的第一个目标，1959年1月，第一个击中月球的火箭发射成功，1969年7月，第一艘载人飞船阿波罗11号登上月球，说明对月球火箭轨道的研究得到了新的成果。由于月球火箭要接近地球和月球，受到这两个天体的吸引都很强烈，不便于应用以二体问题为基础的摄动理论来研究。到目前为止，实用的轨道都是用数值方法具体计算的，初值的选择和轨道设计则采用近似的所谓双二体问题方法。一般理论主要用限制性三体问题来讨论，但这个问题到目前为止还没有解决，故月球火箭的完整理论还有待继续深入研究。另外，根据苏联第三个月球火箭的情况看来，太阳的吸引也不能忽视，因此，可能还需要用四体问题来讨论。尽管目前这些理论问题还没有解决，但由于火箭技术和电子学的发展，可以在飞行途中用自动控制来修正轨道，弥补这一不足之处。

3. 行星际火箭运动理论

在二十年代就已有人开始研究过这一问题，但限于当时的科学技术水平，发展不快。目前研究行星际火箭运动理论，主要是从二体问题出发，研究近似的行星际航行轨道的设计方案，而行星的摄动可利用数值方法进行估计。这部分工作随着空间科学的发展，将使火箭飞行力学同天体力学结合起来，形成一门新的学科——天文动力学 (Astrodynamics)，轨道过渡的研究即属于这一内容。

美帝和苏修不顾广大劳动人民的生活，花了大量经费从事空间研究，其目的是要利用空间为反动统治集团瓜分全球

的战略服务。这两个超级大国的间谍卫星经常在各国土空飞行,窃取国防和经济建设等方面的情报,以达到他们不可告人的罪恶目的。我国人民在伟大领袖毛主席和党中央的英明领导下,自力更生,发奋图强,于1970年4月24日成功地发射了第一颗人造地球卫星“东方红”号。从技术指标来看,这颗卫星超过了苏联和美国发射的第一颗卫星。1971年3月3日我国又成功地发射了第二颗人造地球卫星,在技术上又有了新的进展。我国和其他一些国家在空间技术方面的发展,彻底打破了美帝、苏修对空间技术的垄断。

§ 1.2 人造地球卫星运动理论

人造地球卫星发射轨道理论,主要研究从地面用多级火箭把卫星射入轨道的过程。基本问题是研究火箭推力的变化方案,使卫星能有效地进入预定轨道。卫星返航轨道理论,主要研究卫星式飞船安全降落到地面的轨道设计问题。这两部分内容基本上属于火箭飞行力学范围,涉及地心引力、空气动力学和火箭推力(即反冲力),和天体力学联系较少,故不予讨论(有关内容可参阅钱学森同志著的《星际航行概论》,1963年科学出版社出版)。

人造地球卫星的轨道摄动理论,主要研究卫星进入轨道后在各种力学因素作用下的轨道变化规律。这是一个天体力学问题,是本书讨论的主要内容。

由于人造地球卫星运动很快,又受到各种力学因素的影响,轨道变化也很快,所以不能简单地采用经典天体力学方法,必须针对各种具体特点作深入的探讨。近年来,从大量研究工作中已获得了一些比较成熟的方法。

表1列出几种不同类型卫星轨道根数和有关参量,其中

卫星编号,例如 1957 α_1 ,第一个数字 1957 代表发射年代,第二个字母 α 代表该年发射的顺序,脚注 1 表示一次发射几个卫星中的第一个. 1963 年后,对编号作了修改,例如 1963-31A,发射年代表示和前相同,第二个数字 31 相当于前面的字母 α ,第三个字母 A 相当于前面的脚注 1. 卫星椭圆轨道的六个根数 $a, e, i, \Omega, \omega, \tau$ (或 M) 的意义和经典天体力学中行星、小行星的椭圆轨道根数的意义类似,所不同的是这里采用地心赤道坐标系(见 § 2.1). a 和 e 分别为椭圆的半长径和偏心率; i 为轨道倾角,它是轨道面与赤道面的交角(如果卫星绕地球转动的方向与地球自转方向“相同”,则 i 在 $0-90^\circ$ 之间,否则在 $90-180^\circ$ 之间); Ω 是卫星轨道升交点(卫星通过该点是由赤道以南飞向赤道以北)的赤经; ω 是由升交点到轨道近地点的角距,沿卫星运动方向计量; τ 是卫星过近地点的时刻. τ 往往用某时刻 t 的平近点角 M 代替, $M = n(t - \tau)$, n 是卫星运动的平均角速度.

表 1 列出的 10 个卫星,有离地面近的,也有远的;有轨道倾角小的,也有大的(甚至超过 90°);有小偏心率的,也有大偏心率的;有面积质量(重量)比小的,也有面积质量比大的(这里讲的面积一般指卫星沿运动方向的截面积)等等.对于不同的卫星,各种力学因素的影响就有差别,根据实际情况,研究人造地球卫星运动时,常常考虑下列几种力学因素的摄动:1. 地球形状(包括地球内部密度分布的不均匀性),2. 大气阻力,3. 太阳光压,4. 日、月的作用.此外,还有地磁场对带电卫星的作用,磁流体力学效应,地球辐射和卫星本身的高速自转等.

若以地球引力的大小为 1, 则

对于离地面高度为 500—6000 公里的一般卫星,地球形状摄动为 10^{-3} , 大气阻力摄动为 10^{-6} , 太阳光压摄动小于 10^{-7} , 日、月摄动亦是如此;

表 1 一 些 卫 星

卫星编号	名 称	发射日期	形 状, 尺 寸 (米)
	“东方红”号	1970, 4, 24	
	科学实验卫星	1971, 3, 3	
1957 α_1	卫星-1 (Спутник-1)	1957, 10, 4	球, 直径 0.575
1960L ₁	回声-1 (Echo-1)	1960, 8, 12	气球, 直径 30.48
1964-4A	回声-2 (Echo-2)	1964, 1, 25	气球, 直径 41
1962 βr_1	探险者-14 (Explorer-14)	1962, 10, 2	八边形十四轮叶, 长 1.275, 直径 0.725
1964-5A	土星-5 (Saturn-5)	1964, 1, 29	圆桶, 长 25.6, 直径 65
1963-31A	辛卡姆-2 (Syncom-2)	1963, 7, 26	圆桶, 长 0.39, 直径 0.79
1964-47A	辛卡姆-3 (Syncom-3)	1964, 8, 19	圆桶, 长 0.39, 直径 0.71
1969-37A	雨云-3 (Nimbus-3)	1969, 4, 14	由三个部件组成: 直径 1.53 的传 感部分, 六角形的上面部分和两 个太阳能电池翼, 翼 3.36, 卫星 高 3.05

对于离地面高度在 200 公里左右或大部分时间在这样的
高度飞行的近地卫星, 大气阻力摄动可达 10^{-4} — 10^{-3} ;

对于远地卫星(地心距达 40000 公里), 地球形状摄动约
为 10^{-4} , 而日、月摄动增大到 10^{-5} , 太阳光压摄动约为 10^{-6} , 大
气阻力摄动却变得很不重要(比 10^{-10} 还要小得多)。

以上所列出的各种摄动大小¹⁾, 只是对一般卫星, 即面积

1) 这里讲的摄动大小都是指摄动力的大小, 而不是摄动效果。

的主要参数

重量 (公斤)	倾角 (度)	偏心率 (e)	周期 (分)	半长径 (公里)	近地点高度 (公里)	远地点高度 (公里)
173	68.5	0.125	114	7790	439	2384
221	69.9	0.111	106	7424	266	1826
83.54	65.10	0.052	96.20	6954	213	939
71.25	47.22	0.010	118.22	7983	1523	1686
265	81.50	0.019	108.95	7551	1029	1316
40.41	32.95	0.881	2185.0	55781	282	98524
17100	31.34	0.036	94.60	6890	264	760
39	33.05	0.013	1454.0	40512	35584	36693
30	0.10	0.025	1407.8	41609	34191	36271
574.86	99.9	0.004	107.3	7384	1070	1131.1

质量比不太大亦不太小的卫星而言，例如一个直径为 5 米的球，重 1000 公斤。因此，通常认为地球形状摄动为一阶小量，而其他摄动看作二阶或更高阶小量；只是在两种极端情况下，即面积质量比较大而离地面又很近的或离地球非常远的远地卫星，大气阻力和日、月摄动才分别显得特别重要。对每个卫星要作具体分析，才会得出正确结论。

至于地磁场的影响，则与卫星质量的大小和带电量多少有关，例如一个 1000 公斤重的卫星带 1 库仑电量 (3×10^9 静

电单位),其摄动大小约为 10^{-6} . 而一般情况下带电量很小或根本不带电,因此往往不去考虑它.

本书主要内容包括初轨的确定(即轨道计算),计算各种摄动的分析方法以及人造地球卫星运动理论的某些应用(如测定地球引力场位函数的系数,高层大气密度分布等). 计算摄动的数值方法可参阅有关天体力学和计算方法等书籍,这里不再重复.

第二章 轨道计算与轨道改进

计算小行星轨道的经典方法原则上都可用来计算人造地球卫星的轨道,例如高斯(Gauss)方法和拉普拉斯(Laplace)方法。我们应用这些方法也作过一些计算,结果还是不错的。但是,由于下面所列出的一些原因,需要对经典方法作某些改进,并提出相应的新方法。这些原因是:

1. 摄动计算的高精度要求,最好是给出瞬时轨道,因此要用小弧段(地心角在 $10-20^\circ$ 左右)来定轨道,若用大弧段需作摄动改正。在这种情况下,原有的方法不能保证足够的精度(主要是有效数字的损失),而且这些方法本身又比较烦琐,高斯方法尤其如此。

2. 人造地球卫星的特点之一是离地球较近,确定轨道平面的两个根数 i 和 Ω 就显得很重要,而原有的方法难以定准它们。

3. 卫星的另一个特点是运动速度很快,一般每天可绕地球飞行十多圈,因此有条件根据观测直接定出运动周期,从而算出轨道半长径 a ,其精度比由各种轨道计算方法算出的为高,而根数 a 对摄动计算起着相当重要的作用。

4. 新观测技术的出现,如雷达、激光测距、多普勒测速、干涉仪测角等。

5. 计算技术的发展,高速电子计算机的应用,使得一些复杂的迭代运算得以实现。

这一章我们将介绍目前常用的几种比较有效的方法。

§ 2.1 坐标系的选取与观测资料处理

1. 坐标系的选取

为了研究长时间内卫星轨道变化规律,最好采用与时间无关的固定坐标系¹⁾,如 1950.0 的平坐标系,即以 1950.0 的平春分点和平赤道作为坐标系的基本点和基本圈(平面)。但是另一方面,由于地球形状通常是假定相对真赤道面为对称的(确是一个很好的近似),即使不采用这一假定,地球引力场位函数的一切有关量也都是相对真赤道面而言的(见 § 3.1),所以若采用上述平坐标系,则问题将复杂化。考虑到上述两个原因,有人建议采用一种“混合坐标系”,即以 1950.0 的平春分点和观测时刻的真赤道作为该坐标系的基本点和基本平面。但必须注意,这里讲的 1950.0 的平春分点是固定在瞬时赤道上的假想点,如何实现,见改正方法(2.5)——(2.8)式。采用混合坐标系就消除了岁差章动改正中与春分点移动有关的系统项,但这种坐标系是一种运动坐标系。

不过在一般工作(如预报等)中,涉及到的时间间隔不太长,岁差章动的影响几乎显示不出来,还是采用瞬时真赤道坐标系比较方便。

2. 观测资料的处理——岁差章动改正

根据目前观测技术情况,对卫星运动的观测,一般得到的是观测时刻 t 卫星的赤经、赤纬 (α, δ) 或地平坐标 (A, z) , 卫星到观测站的距离 ρ 和视向速度 $\dot{\rho}$ 等。这些量中的 α, δ (或 A, z)²⁾ 以及计算地面观测站位置用到的恒星时 S 和地心

1) 这里的坐标系都是指地心赤道坐标系,以后不再说明。

2) α, δ (或 A, z) 有时还要进行大气折射改正,这里就不详谈了。

纬度 φ' 都是随着不同的坐标系而变化的,因而涉及到岁差章动改正问题。

一般的章动改正公式如下:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{真}} - \alpha_{\text{平}} &= \Delta\psi \cos \varepsilon + \Delta\psi \sin \varepsilon \sin \alpha \operatorname{tg} \delta - \Delta\varepsilon \cos \alpha \operatorname{tg} \delta, \\ \delta_{\text{真}} - \delta_{\text{平}} &= \Delta\psi \sin \varepsilon \cos \alpha + \Delta\varepsilon \sin \alpha,\end{aligned}\quad (2.1)$$

其中 $\alpha_{\text{真}}$, $\delta_{\text{真}}$ 和 $\alpha_{\text{平}}$, $\delta_{\text{平}}$ 分别表示观测时刻的真坐标和平坐标,而 $\Delta\psi \sin \varepsilon$ 和 $\Delta\varepsilon$ 由下式表达:

$$\left. \begin{aligned}\Delta\psi \sin \varepsilon &= (-6''.857 - 0''.007T) \sin \varOmega + 0''.083 \sin 2\varOmega \\ &\quad - 0''.506 \sin 2L - 0''.081 \sin 2\mathcal{D} + \cdots, \\ \Delta\varepsilon &= (9''.210 - 0''.001T) \cos \varOmega - 0''.090 \cos 2\varOmega \\ &\quad + 0''.551 \cos 2L + 0''.088 \cos 2\mathcal{D} + \cdots,\end{aligned}\right\} \quad (2.2)$$

式中 $\varOmega$ 是月球轨道升交点的平黄经, L 是太阳的平黄经, $\mathcal{D}$ 是月球的平黄经, ε 是黄赤交角, T 是由 1900.0 起算的时间,以回归世纪为单位。(2.2) 式右端还有长短周期项,但系数更小,通常用不上。

一般的岁差改正公式是

$$\begin{aligned}\alpha - \alpha_0 &= m\Delta t + n\Delta t \sin \alpha_m \operatorname{tg} \delta_m, \\ \delta - \delta_0 &= n\Delta t \cos \alpha_m,\end{aligned}\quad (2.3)$$

其中 (α, δ) 和 (α_0, δ_0) 分别表示对应 t 和 t_0 的平坐标; (α_m, δ_m) 通常取上述两个时刻坐标的平均值, $\Delta t = t - t_0$, 单位是回归年,而 m, n 由下式表达:

$$\begin{aligned}m &= 46''.08506 + 0''.027945T + 0''.00012T^2, \\ n &= 20''.04685 - 0''.008533T - 0''.00037T^2,\end{aligned}\quad (2.4)$$

式中 T 的意义同前。

(2.1) 式和 (2.3) 式两组改正公式对 δ 接近 90° 是不适用的,它有另外的改正公式(详见天文年历)。

下面根据目前的观测情况给出对应混合坐标系的岁差章动改正公式,在该坐标系中记赤经、赤纬为 α, δ 。