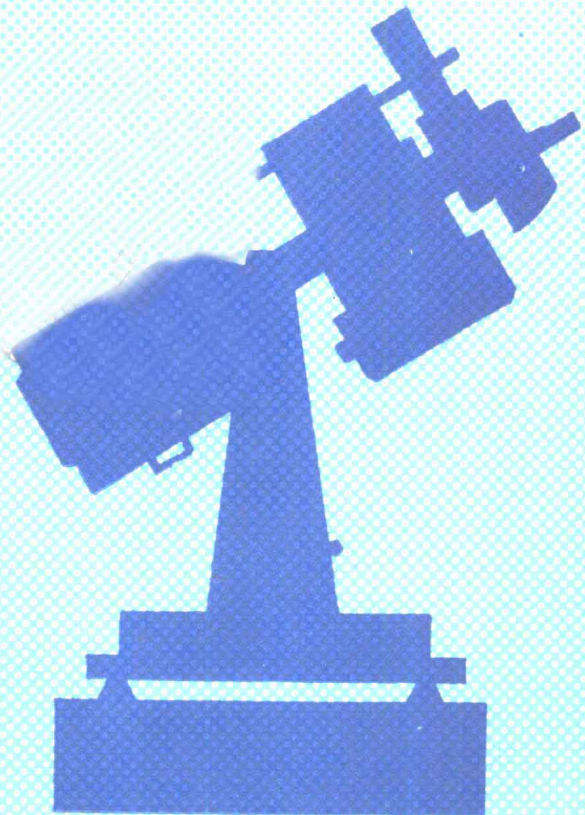


7898 56.2

宇宙大地测量学

[苏] B·H·巴兰诺夫等编

温学龄 张先觉 译



解放军出版社

宇宙大地测量学

【苏】B.H.巴兰诺夫等编著

温学龄 张先觉 译

解放军出版社

1981

出版说明

本书为苏联高教部批准的高等院校宇宙大地测量专业教材。

书中分析研究了宇宙大地测量的问题及其与其它学科的联系；列举了各种坐标及其变换方法以及当代测时系统；叙述了人造地球卫星观测方法和设备；论述了人造地球卫星无摄动运动的理论问题，以求在解决宇宙大地测量的动力学问题中得到进一步应用；论述了各种摄动因素及其对卫星运动的影响。对宇宙大地测量的几何和动力学问题及其解法作了系统的阐述，并对同步法和单独测定点位坐标的方法作了详细说明；最后综合介绍了世界各国在宇宙大地测量方面取得的主要成果，并展望了今后发展的前景。

全书内容丰富、完整、系统，可供我国从事人卫大地测量专业教学、科研和生产的师生及科技工作者阅读参考。

参加本书翻译的有温学龄(前言、绪论、第二篇的§11-20和第五、六篇)，张先觉(第一、三、四、七篇)和刘振骥(第二篇的§7-10)等同志。本书虽经译者反复自校和互校，并同有关专业人员切磋，但限于水平，难免仍有错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

前 言

本书作者从事大地测量专业教学多年，读者手中的这本教材，是作者根据他们在宇宙大地测量专修班施教的讲稿编写而成。自1976年出版宇宙大地测量学教材《《宇宙大地测量学原理》(И.И.克拉斯诺雷洛夫, Ю.В.普拉霍夫)，1976年至今，已时隔数年，教材的内容在某些方面已属陈旧。此外，由于篇幅所限，当时对宇宙大地测量学的一些基本问题未能充分展开叙述。

自60年代至今，苏联和国外一些作者出版了一系列有关宇宙大地测量学及其个别问题的专著，但这些专著无论在叙述的体裁上还是在内容上，都是以科学研究为目的，首先是为满足科研工作者的需要而编写的。因此，用于教学有一定的困难。

大约从70年代中期开始，尽管几何法仍不失为一种重要方法(当时它决定着宇宙大地测量发展的整个进程)，但人们的主要注意力已转向所谓动力法宇宙大地测量。与几何法相比，动力法能对出现的问题得出通解。到目前为止，宇宙大地测量中的观测方法有了质的变化，对一些理论问题的认识也有了明显的提高。

以上情况，再加上宇宙大地测量学已成为大地测量专业学生的必修课(宇宙大地测量学列入教学计划已有15年多了)，这就是作者编写本教材的动因。作为当代的大地测量工作者，不熟悉宇宙大地测量学及其所要解决的问题，

那是不可思议的。

作者在此向列宁勋章获得者莫斯科测绘工程学院天文和宇宙大地测量教研室的全体同志致谢，感谢他们对教材的编写所给予的积极协助。

参加本教材编写的有：技术科学博士M.C. 乌尔马耶夫教授——绪论和第一篇；技术科学候补博士B.H. 巴兰诺夫副教授——第二篇；技术科学博士C.H. 雅什金副教授——第三篇和§78-79；技术科学博士Ю.Б. 普拉霍夫教授——第四篇和§73-77；技术科学博士E.Γ. 博依科教授——第五篇；技术科学博士M.M. 马什莫夫教授——§80-96；技术科学候补博士И.И. 克拉斯诺雷洛夫副教授——第七篇。

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 宇宙大地测量的坐标系统和 时间系统

第一章 宇宙大地测量中的坐标系统	9
§ 1. 惯性参考系	9
§ 2. 与地球一同旋转的地心坐标系	22
§ 3. 站心坐标系和轨道坐标系	33
第二章 宇宙大地测量中的时间系统	41
§ 4. 恒星时系统和世界时系统	41
§ 5. 历书时	44
§ 6. 原子时	46

第二篇 人卫观测仪器和方法

第三章 人卫观测方法	50
§ 7. 人卫观测的特点	50
§ 8. 人卫观测方法的分类及其简要说明	52
第四章 摄影观测法	53
§ 9. 使用人卫摄影观测法的特点	53
§ 10. 摄影观测仪器	62
§ 11. 量测像坐标及量测结果的数学处理	79
§ 12. 卫星站心方向的计算	87
第五章 电视观测法	90

§ 13. 利用电视技术观测人造地球卫星和宇宙目标的可能性	90
§ 14. 观测设备、方法和成果的处理	93
§ 15. 测定坐标的综合系统	100
第六章 激光技术在人卫观测中的应用	103
§ 16. 激光测距的特点和可能性	103
§ 17. 人卫激光观测装置	105
第七章 无线电观测方法	111
§ 18. 人造卫星的无线电观测	111
§ 19. 多普勒人卫观测系统	113
§ 20. 射电干涉测量法	121
第三篇 卫星的无摄动运动	
第八章 无摄动运动的微分方程及其积分与探讨	127
§ 21. 无摄动运动微分方程的推导	127
§ 22. 无摄动运动微分方程的积分	131
§ 23. 对无摄动运动的探讨 开普勒定律	135
第九章 轨道根数及其与积分常数、坐标和卫星速度分量的关系	141
§ 24. 轨道根数及其与积分常数的关系	141
§ 25. 动力积分 开普勒第三定律	144
§ 26. 无摄动运动的基本公式	148
第十章 由观测结果求轨道根数	151
§ 27. 由观测结果求卫星的概略轨道根数	151
§ 28. 关于卫星轨道改进法的概念	157

第四篇 卫星的摄动运动

第十一章 卫星摄动运动的微分方程	160
§ 29. 问题的提出	160
§ 30. 摄动理论的分析原理	163
§ 31. 哈密顿正则方程	167
§ 32. 用坐标表示的卫星摄动运动方程	170
§ 33. 密切轨道根数的拉格朗日方程	175
§ 34. 密切轨道根数的牛顿方程	179
§ 35. 拉格朗日方程和牛顿方程的奇异点	182
第十二章 卫星摄动运动微分方程的近似积分法	184
§ 36. 卫星运动方程近似分析积分的基本方法	184
§ 37. 正则运动方程的积分	190
§ 38. 摄动运动方程数值积分的基本方法	194
第十三章 卫星地心坐标及其函数的级数展开式	199
§ 39. 问题的提出	199
§ 40. 用三角函数表示的展开式	201
§ 41. 汉森系数的展开式	204
§ 42. 展开式的收敛性	208
第十四章 摄动函数和作用于卫星的摄动加速度	211
§ 43. 问题的提出	211
§ 44. 地球位的摄动函数	212
§ 45. 地球位摄动函数的展开	215
§ 46. 宇宙大地测量中表示地球位的其他一些形式	218

§ 47. 非地球位的摄动函数	225
§ 48. 由大气阻力引起的摄动加速度分量	233
§ 49. 几种小的摄动因素	237
第十五章 卫星运动中的摄动	238
§ 50. 位因素引起的摄动分类	238
§ 51. 由位因素引起的卫星运动的摄动	241
§ 52. 卫星在大气阻力作用下的轨道变化	251
第五篇 宇宙大地测量的几何问题及 其求解方法	
第十六章 人卫三角网的构网方案和基本方 程	255
§ 53. 利用人造地球卫星确定地面点坐标 的一般原理	255
§ 54. 同步面方程和弦线方程	263
§ 55. 人卫三角网某些基本图形顶点的坐 标计算公式	266
第十七章 人卫大地网平差	271
§ 56. 人卫三角测量中的各种条件	271
§ 57. 人卫三角网的改正数方程	285
§ 58. 人卫三角网参数法平差	289
§ 59. 人卫三角网相关法平差	294
§ 60. 用轨道法建立的大地网的平差概念	297
§ 61. 人卫网各种建网法的比较	307
第十八章 人卫三角网的基本图形和网中点 位的测定精度	310
§ 62. 精度预估的任务和方法	310

§ 63. 人卫三角网各要素的测定误差	313
§ 64. 空间角交会顶点的位置误差	318
§ 65. 平面交会顶点的位置误差	320
§ 66. 边交会、距离差交会和综合交会中 交会顶点的位置误差	323
§ 67. 空间三角锁终点的位置误差	325
§ 68. 人卫三角连续网中点位精度的近似 估算公式	329
第十九章 人卫三角网的设计	333
§ 69. 人卫三角网的设计原理	333
§ 70. 人卫三角网单个图形的理想形状	335
§ 71. 人卫三角连续网中的最优观测组合	342
§ 72. 关于设计人卫三角网的设想	347

第六篇 宇宙大地测量的动力学问题 及其求解方法

第二十章 宇宙大地测量的一般动力学问题	350
§ 73. 问题的提出	350
§ 74. 轨道法和一般动力法中改正数方程 自由项的计算	353
§ 75. 轨道法和一般动力法中改正数方程 系数的计算	356
§ 76. 关于一般动力法和轨道法改正数方 程的解算问题	360
§ 77. 根据卫星轨道摄动确定地球位参数	362
§ 78. 关于共振摄动本质的补充说明	367
§ 79. 根据共振摄动确定地球位经度谐函	

数系数的补充说明	372
第二十一章 卫星水准测量	374
§ 80. 卫星水准测量的实质	374
§ 81. 卫星水准测量平差	377
§ 82. 卫星水准测量在完成大地测量任务 中的作用	379
第二十二章 月球激光定位和宇宙目标的射 电干涉测量	381
§ 83. 月球激光定位的一般概念	381
§ 84. 地——月系方程	382
§ 85. 月球激光定位方程的解算原理	385
§ 86. 甚长基线射电干涉测量	388
§ 87. 宇宙目标射电干涉测量的几个特例	392
第二十三章 地球动力学问题的解法	393
§ 88. 大地测量中的地球动力学问题	393
§ 89. 地球动力学形状参数的测定	411
§ 90. 地球极移的研究	422
§ 91. 大地水准面高的测定以及海和世界 大洋起伏的研究	426
第二十四章 地球基本参数的测定	431
§ 92. 标准地球的参数和相关公式	431
§ 93. 地心引力常数的测定	436
§ 94. 根据卫星轨道根数的摄动确定地球 引力位的二阶谐函数系数	440
§ 95. 旋转地球椭球参数的确定	442
§ 96. 三轴地球椭球参数的确定	445

第七篇 宇宙大地测量的主要成果及其发展前景

第二十五章 在解大地测量和地球形状理论问题时由人卫观测获得的主要

成果450

§ 97. 人卫大地测量的国际计划和国家计划450

§ 98. 用几何法获得的成果455

§ 99. 用动力法获得的成果458

§ 100. 大地坐标系相对于地心坐标系的定向468

§ 101. 气球三角测量的经验471

§ 102. 地球同步卫星的观测472

第二十六章 根据地球物理与天文测量中对卫星和其他宇宙飞行器进行观

测获得的成果473

§ 103. 有关基本大地常数的测量资料473

§ 104. 有关地球自转的数据475

§ 105. 根据对卫星和其他宇宙飞行器的观测结果得出的地球物理结论479

第二十七章 宇宙大地测量的新手段及其发展前景

.....484

§ 106. 新手段在解大地测量、地球动力学和天文学问题中的作用484

§ 107. 宇宙大地测量的发展前景492

参考文献495

绪 论

宇宙大地测量学是大地测量科学的分支学科，它研究用地球和行星的人造卫星和天然卫星的观测结果来解决大地测量学的科学和科学技术问题。在这种条件下，宇宙大地测量学既采用在行星上获得的卫星观测结果，又采用直接在卫星上获得的观测结果。

宇宙大地测量学是大地测量学中最新，同时又是发展得最快的一个分支学科。它运用现代物理和技术提供的全部测量手段。由于现代测量手段提供的信息量特别大，所以观测成果只能用每秒运算近百万次、外存和内存大的大功率高速电子计算机进行计算处理。

1957年10月4日，苏联发射的第一颗地球人造卫星(ИСЗ)开辟了人类史上的宇宙新纪元，这一天也可以看作是宇宙大地测量学的誕生日。因为，苏联的人造地球卫星拍摄的以星空为背景的第一批像片，已被用来解决大地测量中的问题。

就整体来说，宇宙大地测量学和大地测量学所要解决的问题是一致的，但与传统的方法相比，宇宙大地测量能在短期内以高得多的精度使问题得到解决。此外，有许多问题离开了人造卫星根本不可能解决，或者需要的时间长，设备繁多，以致实际无法完成。

宇宙大地测量的首要的和基本的任务是确定表示地球、月球和行星形状、大小和自转的基本常数，以及确定

这些常数随时间的变化。

同上述基本任务密切相关的第二个任务，是建立地心坐标系和星心坐标系。为此，要按地球(或行星)统一坐标系建立控制网，该坐标系的原点在质心，坐标轴的方向则按不同的历元以一定的方式确定。

如果不知道待研究的行星的外部引力场，上述两项任务是无法完成的。表明引力场特性的各个参数是在研究人造卫星轨道根数随时间变化的基础上确定的。根据高精度观测结果，确定以较小的时间间隔划分的各历元的轨道根数，并用反映行星内部质量分布规律的引力场参数函数来表示这些轨道根数。

宇宙大地测量能解决一系列对国民经济有着重要意义的实际问题。比如，为考察自然资源和进行宇宙制图所开展的地球和宇宙测图成果的坐标——时间联测就是其中之一。

用宇宙大地测量方法所获得的成果，对解决地球物理问题，首先是地球动力学问题也有着极其重要的意义。随着宇宙大地测量精度的提高和数学处理方法的不断完善，以后可以获得有关地球形状和引力场随时间演变的定量数据，从而能确定大陆漂移的性质和特点、构造过程的规律，获得预报矿藏和超前预报包括强震在内的地震预报资料。

必须指出的是，为对地球动力学现象的特性作出准确的定量判断，需要大大提高观测精度。因为，地球动力学的年变化约为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ ，也就是说，必须以 $0.6 \sim 6$ 厘米的精度记录线性位移，以 $0.002 \sim 0.0002''$ 的精度记录角度变化，以 10^{-9} 米/秒²(10微伽)的精度记录重力的变化。但是，

对一些短周期地球动力学过程，如极移、潮汐变形和地球自转的不均匀性等，现在就应加以考虑。

如按宇宙大地测量方法的发展顺序来考察，应首推几何法。这一方法是以至少在两个地面站以星空为背景对卫星进行同步摄影为基础的。这样一种观测组织方法可以确定联结这些点的矢量方向，由众多的矢量方向构成空间矢量网——宇宙三角形。然后，通过网的平差计算，可以求出新的点在控制点坐标系中的坐标。

在这种条件下，当然还必须用某种方法确定网的长度比，因为根据摄影观测的结果只能确定网的方向。利用激光测距仪在同一时刻测出像机至卫星的距离之后，便可得出网的长度比。点与点之间的距离(弦长)可用普通大地测量方法测定，但在宇宙三角网的边很长的情况下，这还是一个技术难题。

几何法的研究成功给大地测量带来了新的质的飞跃。由于被测卫星的高度很大，这就有可能建立起边长1500~2000公里的宇宙三角网，从而又可以用统一的大地网把陆地和海岛连接起来，亦即建立起全球大地网。

几何法宇宙大地测量的优点是，不必去探讨卫星运动理论，以及与此有关的一些难以顾及的因素，比如行星引力异常场、大气阻力、月球和太阳对卫星的引力等等因素引起的轨道摄动。

可见，在几何法中是把卫星当作一个非常高的、快速(每秒若干度)移动的照准目标，因此只能得出新点的相对位置，也就是说起始坐标系中的位置。这时，宇宙三角网与地心的连测是一个明显的问题。

由此看来，动力法应该说是宇宙大地测量中最通用的

方法,它与几何法不同,是以研究卫星轨道随时间的演变为基础的一种方法。动力法的实际运用,必须拥有符合卫星运动的模型。卫星在惯性直角坐标系中运动的数学模型是由三个二阶非线性微分方程组成的方程组,方程的右边是作用于轨道卫星的各种外力的加速度项。可见,动力法所获结果的精度,在很大程度上取决于计算作用于卫星的各种力所引起的摄动加速度的精度。作用于卫星的力有:重力,大气阻力,月球、太阳和行星对卫星的引力,太阳辐射压和其他一些很少考虑的力。提出动力法最一般的要求是同时确定地面点坐标,卫星轨道根数以及精化摄动力模型参数。在这种条件下,仿佛是一种闭合循环:为精确地对运动的微分方程求积分,必须预先知道摄动力的模型参数。同时,又要用动力法精化这些参数。具体办法是采用逐次趋近法。在逐次趋近的过程中,将已经确定的参数组肯定下来,对下一步要肯定的其他参数进行订正,在此基础上再对前一步已肯定的参数加以订正,余此类推。这一过程必然能获得待订正的参数的真值,因为轨道观测的精度在不断提高,观测内容也在不断增加。

动力法宇宙大地测量可以得出点在以地球质心为原点的行星统一坐标系中的位置,确定地球在这一坐标系中的外部引力场。可见,动力法的不断完善和发展,今后定能使大地测量和地球动力学的一些主要问题得到顺利的解决。

但是,动力法宇宙大地测量比几何法复杂得多。因为它涉及到一些模型的建立,比如卫星运动模型,观测模型,轨道卫星受力模型等,而这些模型的建立并非易事。

动力法的实际应用,必须拥有与最现代化的电子计算

机相配套的完善的算法和成套的程序，算法的研究和程序的编制需要专职教学人员和程序编制人员付出大量的劳动。

随着轨道卫星受力模型不断得到精化，轨道法的意义也随之增大。轨道法可以说是动力法应用的一个特例。比如，在已经建立起卫星受力模型且具有所必须的精度，但在求解的过程中受力模型得不到精化时，就得求助于轨道法了。

在轨道法中，根据在地面点或直接从卫星上得出的观测结果，可以同时确定点的坐标和轨道根数。此外，观测时刻的轨道根数常常假设为已知，这时的未知数就只剩下点的坐标了，可用后方空间交会来确定。

这种处置方法叫简易轨道法，可用来解决导航问题。

下面我们再简单回顾一下宇宙大地测量的主要发展阶段。

在人造地球卫星出现之前的很长时间内，大地测量和天文观测人员曾一直企图将周日视差大的自然天体用于大地测量目的。唯一适用的天体，当然是月球，因为它的周日视差有 $61.5'$ 。然而，即使掌握了月球地心运动的现代理论，如果月心的方向观测误差为 $0.2''$ ，通过测月求得的地面点位误差为1公里。很明显，要使月心观测方向达到这样的精度，是一个极为复杂的科学技术问题。曾经研究出了以星空为背景直接对月球进行摄影来确定月球站心方向的专用方法。但因月球的亮度比其他恒星大得多，且相对恒量来说运动速度也快。因此，要在同一张底片上拍摄高质量的恒星和月球的影像困难很大。后来又研究出了专用像机，它的设计结构可允许对月球的运动进行补偿，降