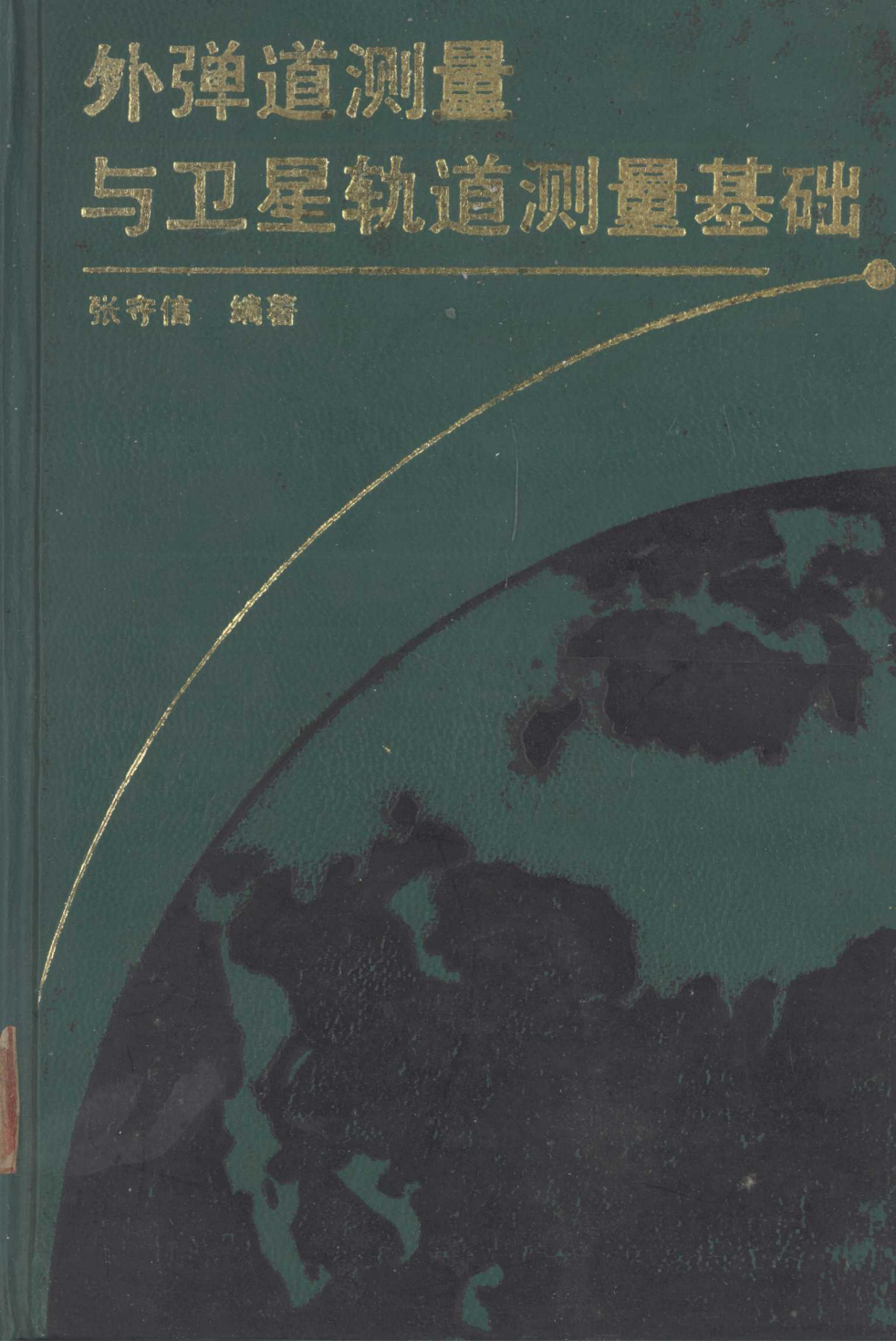


外弹道测量 与卫星轨道测量基础

张守信 编著



V556
-002

V556
1002-1

号301字登

外弹道测量与卫星 轨道测量基础

张守信 编著



星江已星新密等代
脚基星阿拉特
各如 组V流



30716309

查中、密印查组出业工商商

國防工業出版社

ISBN 7-118-00820-4(V·I) 定价: 16.80元

716309

822V
(京)新登字106号

内 容 简 介

本书根据导弹(火箭)飞行试验和人造地球卫星发射、定轨的实际需要,较系统、全面地介绍了外弹道和卫星轨道测量的理论、方法和有关知识。全书主要由三部分组成:一是时间系统、各种坐标系及其相互转换关系;二是弹道与卫星轨道理论,确定弹道、轨道的方法;三是全球定位系统(GPS),导航、定位、测速的理论、方法及其在外弹道与卫星轨道测量的应用。

本书可供导弹(火箭)飞行试验、航天测控、靶场试验指挥、数据采集与处理、导航、测绘和卫星应用等专业技术人员及相应的高等院校高年级学生、研究生、教师参考。

外弹道测量与卫星

轨道测量基础

张守信 编著

责任编辑 林秀权

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168毫米 32开本 16³/₈印张 插页2 429千字

1992年10月第一版 1992年10月 第一次印刷 印数: 0001—1,000册

ISBN 7-118-00950-4/V·71 定价: 16.80元

科技新书目 276-059

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。
4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技

图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员：邓佑生

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

言 前

空间科学技术是现代科学技术的结晶，既综合利用各学科的技术，又对现代科学技术的发展起重大促进作用。本书是张守信教授在长期教学、科研实践的基础上撰写的。结合远程火箭试验和人造地球卫星发射、入轨、定轨的实际，系统地论述了外弹道与卫星轨道测量的理论、方法和有关的新技术。此书内容丰富，理论正确，观点明确，方法具体、实用，是一本很有特色的优秀国防科技图书。这对从事远程火箭试验和航天技术的科技人员，是一本很好的参考书。

我国国防科技事业取得了举世瞩目的发展，凝结了现代科学技术的精华和广大科技工作者的心血。在此基础上，撰写和出版优秀国防科技图书，对促进国防科技事业的更大发展，培养更多优秀科技人才，具有深远的意义。借此机会，愿有更多、更好的优秀国防科技图书出版。

沈荣骏

前 言

航天技术是 20 世纪人类认识和改造自然进程中最活跃、最有影响的科学技术领域，也是现代科学技术的结晶，对政治、经济、军事以至人类社会生活都产生了广泛而深远的影响，促进了现代科学技术的进步。

外弹道测量与卫星轨道测量是保证航天技术发展的重要方面。随着火箭（导弹）性能的提高，航天技术的迅速发展，近地空间卫星的开发和利用，对外弹道和卫星轨道测量提出了新的、更高的要求。为适应这种发展的需要，本书在叙述导弹、卫星运动理论的基础上，较系统地介绍了测定外弹道、计算落点位置和确定卫星轨道的原理、方法，分析了关机点参数误差对外弹道的影响。

外弹道与卫星轨道测量涉及天文、大地测量、天体力学、地球形状与地球引力场等学科。为便于系统理解和掌握、应用测量理论、方法，分析精度。本书重点地介绍了地球形状、极移、岁差、章动和垂线偏差等基本概念，较系统地论述了全球地心坐标系、参心坐标系、测量坐标系和真天球坐标系，瞬时平天球坐标系、历元平天球坐标系，推导了它们相互转换的关系式，给出了有关参数。另外，还介绍了几种常用时间系统及其关系。天体力学、地球引力场等知识，则结合轨道理论予以介绍。

全球定位系统（GPS）是美国国防部研制的全球、全天候、连续的卫星导航系统，采用被动式双频伪随机码测距体制。该系统具有广泛的应用价值和发展潜力，它不仅可用于导航，还可应用于精密定位、高精度时间传递、外弹道与卫星轨道测量等方面，因而引起世界各国军事部门和民用部门的广泛关注和研究。本书较系统地介绍了 GPS 系统的组成、信号结构与特性、伪随机码

测距、定位原理；为伪距测量技术、相位测量技术和多普勒测量技术、精度分析和数据处理也作了较全面、系统的讨论；最后，重点介绍了 GPS 外测系统的组成、弹载转发器、精度分析和定位、测速的数据处理。

本书是在国防科技图书出版基金评委会的热情关怀和支持下出版的。评委会的专家们对书稿进行了认真的审阅，提出许多宝贵的意见和建议，特别是柯有安委员给予了具体的帮助和指导。在本书撰写和定稿中，林秀权责任编辑给予了热情支持、指导，并做了大量工作，付出了辛勤的劳动；国防科工委有关单位、指挥技术学院领导和同行们都给了很大支持，提供了宝贵资料。在此，一并表示我最衷心的感谢。

由于作者水平和实践经验有限，书中可能会有错误和不妥之处，敬请读者指正。

编 著 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 外弹道测量和卫星轨道测量	1
§ 1.2 研究的基本问题和主要内容	3
第二章 地球坐标系及其转换	6
§ 2.1 大地水准面与天文坐标	6
§ 2.2 地球椭圆和大地坐标系	11
§ 2.3 垂线偏差和天文坐标与大地坐标的关系	19
§ 2.4 大地坐标与空间直角坐标的换算	25
§ 2.5 极移和起始天文子午线	35
§ 2.6 参心坐标系	41
§ 2.7 地心坐标系	47
§ 2.8 两空间直角坐标系的转换模型	51
§ 2.9 站心坐标系及其转换	59
§ 2.10 高斯-克吕格平面直角坐标系	64
第三章 天球坐标系和时间系统	69
§ 3.1 天球和天球坐标系	69
§ 3.2 站心天球坐标系与地心天球坐标系的转换	77
§ 3.3 站心赤道坐标系与站心地平坐标系	79
§ 3.4 岁差和章动及其影响	81
§ 3.5 两种天球坐标系及其转换	91
§ 3.6 地心坐标系与平天球坐标系的转换	94
§ 3.7 时间系统	98
第四章 卫星的无摄运动	105
§ 4.1 二体问题的运动微分方程	106
§ 4.2 运动微分方程的解	107
§ 4.3 二体问题的卫星星历的计算	122
§ 4.4 二体问题的轨道计算	128

§ 4.5	卫星运动的基本规律	143
第五章	弹道导弹的弹道参数和落点计算	154
§ 5.1	弹道导弹的弹道	155
§ 5.2	外弹道测量的任务和作用	158
§ 5.3	惯性坐标系中关机点参数的计算	162
§ 5.4	弹道参数(根数)的计算	168
§ 5.5	惯性坐标系中被动段射程角和飞行时间的计算	172
§ 5.6	落点和射程的计算	180
§ 5.7	关机点参数误差对弹道的影响	188
第六章	卫星摄动运动方程的分析解	208
§ 6.1	卫星的摄动运动方程	209
§ 6.2	地球引力场和摄动函数	222
§ 6.3	地球引力场摄动函数的分解	231
§ 6.4	摄动运动的级数解法	236
§ 6.5	平根数法的一阶解	248
§ 6.6	大气阻力摄动的解	276
第七章	卫星摄动运动方程的数值解	280
§ 7.1	数值解法概述	282
§ 7.2	卫星所受作用力的计算	284
§ 7.3	微分方程的龙格-库塔解法	295
§ 7.4	有限差分与插值	303
§ 7.5	微分方程的阿达姆斯解法	313
§ 7.6	科威尔法解卫星摄动运动方程	325
§ 7.7	阶数和步长的选取	332
第八章	轨道改进	336
§ 8.1	轨道改进的原理	336
§ 8.2	三类偏导数的表达式	344
§ 8.3	误差方程自由项计算与模型参数的改进	368
第九章	全球定位系统与导航定位原理	383
§ 9.1	全球定位系统的组成	383
§ 9.2	GPS 伪距导航定位原理和坐标系	389
§ 9.3	伪随机码及其特性	393

§ 9.4 GPS 的伪随机码及其特性	408
§ 9.5 伪随机码测距原理与导航接收机工作原理	419
§ 9.6 GPS 卫星的导航电文和卫星位置计算	430
第十章 GPS测量技术与应用	438
§ 10.1 观测量与定位模型	439
§ 10.2 伪距定位解算和主要误差	450
§ 10.3 几何精度递变因子与最佳星座选择	459
§ 10.4 航速测定与时间测定	463
§ 10.5 导航接收机	468
§ 10.6 伪距测量相对定位	473
§ 10.7 载波相位测量的精密相对定位	481
§ 10.8 积分多普勒测量定位	490
§ 10.9 GPS 外弹道测量系统	493
§ 10.10 导弹位置和速度的解算	503
参考文献	508

第一章 绪 论

在导弹试验和人造地球卫星（简称卫星）发射中，外弹道测量起着极其重要的作用；而精密卫星轨道测量则是卫星应用中不可缺少的数据。随着导弹和航天技术的发展及多种用途卫星的发射，对外弹道测量和卫星轨道测量提出更新、更高的要求。因此，从事靶场试验指挥、航天测控和数据处理、精度分析的专业技术人员，掌握必需的导弹弹道和卫星轨道的基本理论、方法是十分必要的。这对于改进测量设备、方法，提高测量精度，正确分析和处理测量成果，取得最佳结果，都是很重要的。

§ 1.1 外弹道测量和卫星轨道测量

弹道导弹是无人驾驶的飞行器，在弹上装有动力装置（火箭）和控制系统。当导弹点火以后，动力装置不断使导弹作加速运动。控制系统包括姿态控制和制导系统两大部分。姿态控制系统控制导弹绕质心运动，使导弹能稳定地沿预定程序弹道飞行；惯性制导系统是不断地测定导弹的运动参数，控制导弹质心运动。当导弹运动参数达到预定值时，发出关机指令，使导弹沿预定弹道自由飞行，精确命中目标点。控制系统的方框图如图 1.1 所示。关机点以前的飞行段称为主动段；关机点以后的飞行段称为被动段。

卫星的发射与导弹发射基本相同。在主动段也是由动力系统加速，由控制系统控制飞行参数，当其达到预定值时，发出关机指令，使卫星入轨沿预定轨道绕地球飞行。它与导弹不同之处在于，关机点的参数不同。导弹关机点的参数是保证精确命中目标点；而卫星的关机点参数则是保证卫星沿预定轨道绕地球飞行。

外弹道测量的目的是精确测定导弹和卫星等的实际运动参

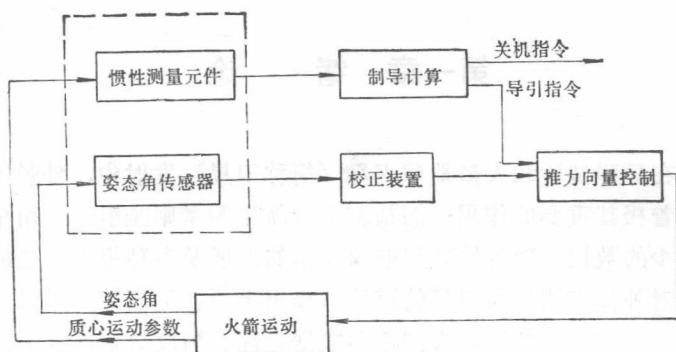


图1.1 飞行控制系统方框图

数，以保障导弹试验、卫星发射和实际应用。

在弹道式导弹的试验中，外弹道测量起着极其重要的作用。我们知道，导弹能否精确命中目标，关键取决于制导的精度，即取决于主动段运动参数的精度，特别是关机点运动参数的精度。因此，在导弹定型、投入作战使用之前，必须经过试验，鉴定制导精度，分析、确定各种误差，予以改进或修正，才能确保武器的良好性能。目前，在导弹试验中，鉴定制导精度、分析和确定各种制导误差的基本手段是外弹道测量。即利用外弹道测量所测定的主动段弹道参数，与惯导测量装置测定的弹道参数进行比对，分离和确定各种制导误差；利用外弹道测量所测定的关机点弹道参数，计算落点位置，其与理论落点位置之差，即为总制导误差；利用外弹道测量测定的再入点弹道参数，计算落点位置，其与实际落点位置之差，即为再入误差。由此可知，外弹道测量结果，是分离、确定各种制导误差，鉴定制导精度和导弹命中精度的标准，它的精度高低，直接关系武器试验的成败。因此，外弹道测量的核心问题是要具有足够高的精度。没有足够精度的测量结果是没有实用价值的，甚至会带来无法估计的损失。所以，高精度的观念，应当成为靶场试验人员的基本观念。

在卫星发射中，主动段外弹道测量结果，是保证卫星进入预

定轨道的关键数据。卫星入轨后，精确测定轨道，是卫星实际应用中必不可少的数据。例如导航卫星、测地卫星和高分辨率对地观测卫星等，都必须测定准确的卫星位置，作为应用数据处理的基准信息。

另外，外弹道测量数据，还是编制武器射表、爆表的实际依据；是安全控制、试验指挥的基本信息源。

§ 1.2 研究的基本问题和主要内容

本书的目的是，研究导弹和卫星的基本运动规律，根据外弹道测量数据，计算导弹运动参数和卫星运动参数的基本原理和方法。

航天器作为一个刚体在空间飞行时，其运动有六个自由度，要描述其运动状态，则需建立描述其运动规律的微分方程组，并研究其解算方法。建立运动微分方程组是根据牛顿第二定律，即

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (1.1)$$

式中 $\ddot{\mathbf{r}}$ ——航天器运动加速度矢量；

$\mathbf{F}$ ——航天器所受的作用力矢量；

m ——航天器的质量。

要建立运动微分方程，首先必须解决两个问题：一是选择坐标系；二是研究、确定所受的作用力。

牛顿第二定律只适用于惯性坐标系，因此，方程 (1.1) 必须建立在惯性坐标系中。对于卫星来说，由于卫星是绕地球质心运动的，所以，该惯性坐标系的原点应选择在地球质心（以后简称地心）上，才能使运动微分方程最简单。

卫星绕地球运动是一个复杂的受力系统。它除受地球引力作用外，还受大气阻力、日月引力、光辐射压力等作用力。因此，这样的受力系统所建立的运动微分方程，将是十分复杂的，且目前尚无法求其严密解。为使问题简化，求出其解。首先，将地球

视为一个均质球，其全部质量集中于地心；将卫星视为一个质点，建立运动微分方程，求其严密解。这称为二体问题，此时地球的引力称为中心引力，卫星的轨道称为正常轨道。然后，在二体问题的基础上，考虑地球非均质球引力、大气阻力、日月引力等小的作用力的影响，求出它们对正常轨道引起的变化，确定卫星的瞬时轨道。这些小的作用力统称为摄动力。

研究导弹被动段飞行弹道，计算导弹射程、飞行时间和落点位置的理论、方法也与此相类似；其不同之处是要考虑地球自转的影响。

综上所述，本书将主要论述以下内容。

1. 坐标系的选择和不同坐标系的转换

建立导弹和卫星的运动微分方程，需选用以地心为原点的惯性坐标系，该坐标系的三个坐标轴应指向空间固定方向。为建立该坐标系，需论述有关天球、岁差和章动等基本概念。

外弹道测量的地面测控站，是以地球坐标系为基准的。为建立地球坐标系，需论述大地水准面、椭球体、垂线偏差和极移等内容。

根据地面测控站的测量数据，计算导弹弹道和卫星轨道，就必须研究解决惯性坐标系与地球坐标系的转换，地球坐标系内地心坐标系、测量坐标系和发射坐标系间的相互转换。

2. 时间系统

导弹和卫星都是高速运动的物体，其运动参数与时间系统有着密切关系。因此，时间系统是外弹道测量的重要环节。为此，本书将论述几种常用时间系统和它们的相互关系。

3. 二体问题和初始轨道计算

根据二体问题的基本条件，建立运动微分方程，求出其严密解。在此基础上，研究卫星运动的基本规律；根据观测数据计算卫星初始轨道的基本方法。

4. 导弹外弹道和落点参数计算

依据二体问题椭圆轨道理论，计算椭圆弹道参数、关机点参

数、导弹射程角、飞行时间和落点位置的公式和方法。同时，简要介绍地球扁率摄动对射程角、飞行时间的影响，给出摄动改正的计算公式和方法。

另外，分析关机点弹道参数误差对射程角、飞行时间和落点位置的影响，导出相应误差的估算公式。

5. 摄动力和卫星摄动运动的解

分析、研究卫星所受的各种摄动力，确定其具体表达式；建立卫星摄动运动的微分方程；研究卫星摄动运动的两种解法——解析法和数值法。

6. 全球定位系统 (GPS) 及其应用

这是一项新的定位技术，在外弹道测量中将得到广泛应用，因此，本书予以简要介绍。主要内容有：全球定位系统的组成，导航定位原理，GPS系统的信号结构，导航解算方法，主要误差和定位精度，GPS在外弹道测量的应用。