

航天器海上测量数据的 误差辨识与统计分析

李晓勇 张忠华 杨磊 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

航天器海上测量数据的 误差辨识与统计分析

李晓勇 张忠华 杨磊 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航天器海上测量数据的误差辨识与统计分析 / 李晓勇,
张忠华, 杨磊著. —北京: 国防工业出版社, 2013. 3

ISBN 978 - 7 - 118 - 08902 - 8

I. ①航... II. ①李... ②张... ③杨... III. ①海上
测量 - 航天测控 - 测量误差 - 误差分析 IV. ①V556

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 140596 号

※

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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8 1/8 字数 231 千字

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

《航天器海上测量数据的误差辨识与统计分析》 审查委员会

主审 刘利生

审查 席震东 张海洋 周锦标 赵文华

程宇锋 叶建平

前 言

航天测量船海上动态测量的特性决定了海上航天测控系统比陆基测控系统要复杂很多,由此带来测量环境恶劣、系统结构复杂、信息误差源多等一系列技术问题,做好航天测控船数据处理的前提是对海上航天测量数据特点的全面深刻认识,对海上测量数据的误差辨识与统计分析是航天测量船外弹道测量数据处理的一项重要内容,也是航天测量船在现有测量设备条件下进一步提高海基外弹道测量精度的一个重要途径。本书围绕这一问题,在2009年出版的“航天测量船海上测控技术丛书”的基础上,从误差辨识与统计分析的数学理论基础、数据测量机制、海上测量数据误差辨识与统计分析及应用等各个方面,进行全面深入地研究与探讨,完整、系统地论述了误差辨识与统计分析的理论、方法和技术,是对国内当前该领域研究工作的全面总结。

全书共8章。第1章为概论,主要介绍了我国航天测控网与航天测量船的基本情况,海上测量精度与测量船的主要误差源等。第2章为基础理论知识部分,这一部分内容是误差辨识与统计分析的重要基础,介绍了海上测量数据误差辨识与统计分析中经常用到的误差传播、数据合检、误差统计、数值计算方法和参数估计等基础知识,并给出了测量船在跟踪、数据处理、弹道计算和定轨等过程中使用到的常用坐标系。第3章至第5章为海上测量数据误差辨识与统计分析中常用的技术方法,其中:第3章提出了海上测量数据船摇修正和变形修正方法;第4章介绍了海上测量数据平滑和时域、频域滤波方法;第5章给出了海上测量数据随机误差分析和系统误差辨识方法。第6章至第8章根据不同的海上测量数据介绍了测量船误差辨识与分析的方法和结果,这一部分内容是全书的重点,其中:第6章介绍了海上测量数据误差分

离、建模与特性分析的方法;第7章介绍了海上测量数据弹道数据计算与误差辨识技术;第8章介绍了航天测量船特有的海上精度校飞数据误差辨识、特性分析和检验。

本书主要适用于具有大学本科以上学历的从事数据处理与精度分析工作的科研及工程技术人员阅读,也可供其他相关人员参考。

在本书编著过程中,得到了中国卫星海上测控部及所属技术部领导、机关的关心和支持,北京测量与跟踪技术研究所刘利生研究员作为本书主审,对书稿进行了仔细的审阅并提出了许多宝贵意见和建议,在此一并深表感谢!本书是作者多年从事误差辨识与统计分析研究的总结,是作者及其同事们长期从事数据处理和精度分析工作的经验总结,是集体劳动的结晶,在此也向作者的同事们以及为本书的编著、出版提供帮助、做出贡献的所有人们表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不少缺点、错误,恳请读者批评指正。

作者

2013年2月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 测量测控网与航天测量船	1
1.1.1 航天飞行试验与测控技术	1
1.1.2 测量船在测控网中的作用	2
1.2 海上测量与精度	3
1.3 海上测量与误差	5
1.3.1 角度跟踪测量误差	6
1.3.2 距离跟踪测量误差	8
第 2 章 基础理论知识	10
2.1 误差理论	10
2.1.1 误差的分类	10
2.1.2 误差的表示方法	12
2.1.3 标准误差的简便算法	14
2.1.4 误差的正态分布	16
2.1.5 高斯误差定律	17
2.1.6 误差传播	18
2.1.7 数据合理性检验	20
2.2 数值计算方法	21
2.2.1 数据插值	21
2.2.2 平方逼近	27
2.2.3 数值微分	32
2.3 参数估计	35
2.3.1 随机变量的数字特征	35
2.3.2 估计理论	39

2.3.3	线性模型参数估计	45
2.4	坐标系	54
2.4.1	大地坐标系	54
2.4.2	我国常用参心大地坐标系	57
2.4.3	地心坐标系	58
2.4.4	发射坐标系	62
2.4.5	测站坐标系	62
2.4.6	测量船专用坐标系	64
第3章	海上测量数据船姿修正	68
3.1	海上测量数据变形修正	68
3.1.1	船体变形测量技术	68
3.1.2	船体变形修正方法	70
3.2	海上测量数据船摇修正	70
3.2.1	等效船摇角的计算方法	70
3.2.2	惯导甲板系与惯导地平系的转换	75
3.2.3	设备测量坐标系与惯导 I (惯导 II) 地平坐 标系的转换	76
第4章	海上测量数据平滑与滤波方法	77
4.1	测量数据的时域平滑与滤波	77
4.1.1	最小二乘滤波方法	77
4.1.2	卡尔曼滤波方法	85
4.2	测量数据的频域滤波	92
4.2.1	小波滤波基本原理	93
4.2.2	小波滤波的基本方法	95
第5章	海上测量数据误差辨识与精度评估	105
5.1	随机误差分析	105
5.1.1	正态性和平稳性检验	105
5.1.2	ARMA 模型统计方法	107
5.1.3	非平稳时间序列	109
5.2	系统误差辨识方法	124
5.2.1	小波信号分析方法	124

5.2.2	匹配测元诊断	131
5.2.3	EMBET 方法	134
5.3	精度评估方法	137
5.3.1	误差分析	137
5.3.2	数据处理结果评价	141
第 6 章	测量数据的误差分析	147
6.1	测量数据误差分析原理	147
6.1.1	误差诊断理论	147
6.1.2	误差的复杂特性	148
6.1.3	误差的复杂性与数据处理精度	151
6.2	测量数据误差分离及建模方法	154
6.2.1	测量数据的成分	154
6.2.2	轨道模型	154
6.2.3	样条拟合参数估计	158
6.2.4	利用残差数据估计随机误差的原理	159
6.2.5	船载设备外测数据的建模和参数估计	161
6.2.6	船载设备外测数据的相关性分析	164
6.3	船载设备外测数据误差特性分析	164
6.3.1	外测数据误差的概率分布特性	165
6.3.2	外测数据误差的相关性分析	168
6.4	基于小波方法的混合误差分频	170
6.4.1	船摇数据对外测数据影响的分析	170
6.4.2	混合误差的小波分频	174
第 7 章	弹(轨)道数据的误差辨识	180
7.1	运动方程的建立	180
7.1.1	航天器外测弹道与轨道	180
7.1.2	弹道动力学模型	182
7.1.3	航天器受摄运动	186
7.2	节省参数模型	199
7.2.1	弹道参数的线性模型	200
7.2.2	测元真实信号的线性模型	201

7.2.3	多测元真实信号的非线性模型	201
7.2.4	随机误差模型	202
7.2.5	系统误差模型	202
7.2.6	联合模型的测元构成	203
7.3	样条约束的 EMBET 方法	203
7.3.1	火箭运动方程的描述	204
7.3.2	观测方程描述	205
7.3.3	参数估计方法	207
7.4	轨道约束的 EMBET 方法	207
7.4.1	轨道约束自校准技术原理	207
7.4.2	测元 R, A, E 自校准公式	213
7.4.3	测元 R, A, E, \dot{R} 自校准公式	219
第 8 章	精度鉴定数据的误差辨识	224
8.1	系统误差模型辨识	224
8.1.1	系统误差模型辨识方法	224
8.1.2	多元线性回归方法	228
8.2	校飞试验数据误差分析	233
8.2.1	校飞数据误差模型辨识结果	233
8.2.2	动态滞后误差及其测量	238
8.2.3	动态滞后误差对外测数据的影响	239
8.2.4	动态滞后误差修正新方法	240
8.3	动态滞后误差模型检验	241
8.3.1	模型拟合有效性检验	241
8.3.2	模型参数一致性检验	242
参考文献	245

第 1 章 概 论

1.1 测量测控网与航天测量船

1.1.1 航天飞行试验与测控技术

航天技术是一项涉及众多科学技术领域、众多工程技术系统的综合性高技术产业,是国家经济、科技水平的集中体现,反映了一个国家的综合国力,世界上一些大国都很重视发展航天技术。

20 世纪 50 年代初,苏联和美国都致力于研制、试验战略武器。在中程导弹试验成功后,一方面研制试验射程更远的洲际导弹,同时研制人造地球卫星,并将中程导弹进行改装,作为发射卫星的运载工具。1957 年 10 月 4 日,苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星,宣告了人类探索太空的开始;1961 年 4 月 12 日,苏联发射了第一艘载人宇宙飞船,开创了人类太空飞行的新时代。美国也在 1958 年 1 月 31 日和 1962 年 2 月 20 日先后发射了人造地球卫星和载人宇宙飞船。此后,航天事业迅速发展,卫星技术进入了应用阶段。美国完成了人类航天史上最壮观的“阿波罗”登月计划,研制了天地往返运输飞行器——航天飞机;苏联研制了“联盟号”载人飞船和“进步号”运货飞船,发射了“空间站”。至今,人类已向太空发射各类航天器 5000 多个,航天技术已经产业化,成为增长国民经济的一个重要部分。

测控系统是航天工程的一个重要组成部分。从卫星工程而言,它包括卫星系统、运载火箭系统、发射场系统、测控系统和应用系统五大部分;从载人航天工程而言,它包括载人航天器系统、航天员系统、运载火箭系统、发射场系统、着陆场系统、测控系统和应用系统七大部分。测控系统都是不可缺少的部分。

在卫星发射时,需要由地面测控系统负责测量并监视运载火箭的飞行状况,判断卫星是否进入预定轨道。卫星入轨后,需要用测控系统对其进行测量、监视与控制。对于需要变换轨道(简称变轨)的卫星,其轨道的变换和保持,更需要地面测控系统进行测量与控制。测控系统是卫星发射和运行不可缺少的支持系统。

对于载人航天飞行,需要由地面测控系统负责测量并监视运载火箭的飞行状况,判断飞船是否进入预定轨道,对飞船运行、变轨及返回提供测控支持,监视乘员座舱内的生活环境及航天员的生理状况。在发射、飞行不正常时,对航天员的应急救生提供测控支持,确保航天员的生命安全,保证航天员与地面通信。

测控系统的作用归纳如下:

(1) 对运载火箭进行跟踪测量,获取有关数据;在飞行不正常时,实施安全控制,保证发射场及航区安全,防止误入邻国。

(2) 对卫星、载人航天器进行跟踪测量和控制,确保按预定轨道和正确姿态运行、返回;对航天器内的仪器、设备进行控制,使其完成规定的操作;监视乘员座舱的环境及航天员的生理状况。

(3) 载人航天飞行出现异常情况时,对航天员的应急救生提供测控支持,确保航天员的生命安全。

(4) 为航天员与航天指控中心提供电报、话音通信保障及传输电视信号。

(5) 为各级指挥系统提供显示、监视信息。

(6) 为评价和分析卫星和载人航天器的技术性能和改进设计及定型提供数据。

(7) 为应用系统提供有关数据。

1.1.2 测量船在测控网中的作用

为满足发射卫星、载人飞船等需要,测控网需要向海上延伸,航天飞行要求有足够的测控通信覆盖率,一些特征段必须由地面提供测控支持,即便是考虑在全球陆地上布站,也不一定能选到合理的站点位置,人们自然就想到占地球面积 70% 的海洋。很显然,测量船作为海上活动测量站,可以在海上灵活、合理地布置,甚至可以在一次航天飞

行中,先后在两个点或多个点位完成任务。因此,美国、苏联两个航天大国曾大量使用过测量船。美国前后使用过 22 艘测量船,都是用旧船改造的,在著名的“阿波罗”登月计划中,使用了 5 艘测量船;苏联先后使用过 19 艘测量船,前 3 艘船用旧船改造,以后都是建造的新船,每次载人航天飞行,都有 6 艘船参加。所以,测量船在航天测控网发展过程中起到了不可替代的作用。

根据美国、苏联和我国测量船的使用情况,测量船的作用可以归纳如下:

(1) 发射卫星时,跟踪测量三级运载火箭,确定卫星的轨道,监视和控制卫星内部设备工作和卫星变轨。

(2) 发射载人航天器时,除跟踪测量末级运载火箭外,对航天器入轨、变轨及轨道维持、轨道机动、交会对接及返回再入等一些关键段落提供测控支持,增加测控通信覆盖率,对海上降落的航天器及海上应急救援提供测控支持。

1.2 海上测量与精度

测量精度是衡量弹道测量效果的重要指标,所以从跟踪测量设备设计研制一直到使用的整个过程中都很重视。影响测量精度的因素主要是站址误差、电波(光波)传播折射修正误差、测量元素误差、时间不同步误差、光速测不准误差。在这 5 项误差中,电波传播折射修正误差、时间不同步误差及光速测不准误差,其海上测量与陆上测量没有多大差别,且时间不同步误差和光速测不准误差量值都很小,可以忽略,所以下面主要比较海上测量与陆上测量在站址误差和测量元素误差方面的差别。

1. 站址误差

站址误差是测量坐标系中的测量数据转换到发射坐标时引入的,陆上的测站坐标可以通过大地测量精确测定,但海上的船位是实时测量值,目前是用 GPS 的 C/A 码测量船位。在有 SA 的情况下,精度在 100m 量级,这是海上测量的一个主要误差源。在误差传播上,站址误差对目标误差的影响是一种平移偏倚误差,因地球曲率而被放大,可以

用下面的近似公式来估计

$$\frac{D}{d} = 1 + \frac{h}{r} \quad (1-1)$$

式中： d 为站址误差； D 为站址误差引起的目标误差； r 为地球半径； h 为目标高度。

2. 测量元素误差

测量船跟踪测量设备采用的是单站定位体制，测量元素为斜距 R 、方位角 A 、俯仰角 E ，定位原理如图 1-1 所示。

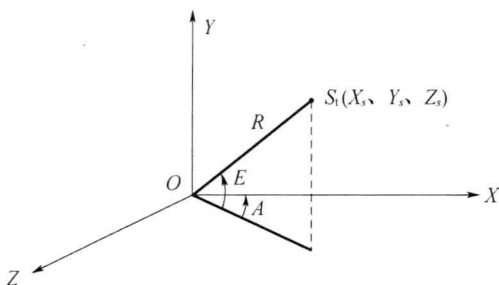


图 1-1 单站定位原理图

t 时刻目标在测量坐标系中的位置，是将极坐标投影到直角坐标中的三个分量。函数关系为

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos E \cos A \\ R \sin E \\ R \cos E \sin A \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

假设测量元素的误差分别为 σ_R 、 σ_E 、 σ_A ，根据误差传播规律，可以得到目标的位置误差（均方差） σ_{X_s} 、 σ_{Y_s} 、 σ_{Z_s} 如下

$$\begin{bmatrix} \sigma_{X_s}^2 \\ \sigma_{Y_s}^2 \\ \sigma_{Z_s}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 E \cos^2 A \sigma_R^2 + R^2 \sin^2 E \cos^2 A \sigma_E^2 + R^2 \cos^2 E \sin^2 A \sigma_A^2 \\ \sin^2 E \sigma_R^2 + R^2 \cos^2 E \sigma_E^2 \\ \cos^2 E \sin^2 A \sigma_R^2 + R^2 \sin^2 E \sin^2 A \sigma_E^2 + R^2 \cos^2 E \cos^2 A \sigma_A^2 \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

从误差传播的关系式可以看出,角度误差对位置误差的影响,随着距离的增加而增加,这是由于这种测量体制所决定的。而且海上测量中的测角误差,除跟踪测量设备本身的测角误差外,还要加船体姿态(基座的姿态)测量误差。

从以上分析可见,提高海上测量精度比较困难,一是船位误差比较大;二是单站定位体制中的角度误差对远距离目标影响大,而且海上测量的测角误差比陆站大,提高测角精度很困难。

1.3 海上测量与误差

对于高精度的航天测控来讲,雷达目标参数测量精度分析与设计是跟踪雷达系统设计的核心任务。雷达系统的精度设计任务:第一,要列出规定的雷达任务中要测量的目标参数,如目标的斜距、方位、俯仰和速度等;第二,要分析雷达测量中影响每一个参数测量误差的各种因素,如雷达本身的因素、热噪声的影响、电波传播影响、目标形状及其运动引起的误差因素等;第三,要建立每个参数测量误差与各种影响因素之间的数学模型,如系统热噪声引起的测量误差与雷达参数和目标回波之间的定量关系式;第四,根据用户规定的每一个测量参数的精度范围和建立的模型,对各影响因素造成的误差大小进行合理地分配;第五,在权衡确定雷达各技术参数和规定的使用条件下,再进行系统误差的综合。

雷达测量中的主要参数为信号延迟(目标距离)、信号到达角(目标角坐标)、信号多普勒频率(目标径向速度)和信号幅度(目标 RCS)。在现代目标特性测量雷达中,还包括某些其他参数。测量误差的基本来源是在雷达接收机中存在的随机噪声而产生的雷达测量过程中随机不确定性。在通常情况下,测量误差可表示成时间或目标坐标的函数。根据目标—雷达测量回路,航天测量船外测数据的误差可分为与目标有关的误差、传播误差、雷达引起的误差及与测量船船姿船位等有关的误差。从被测量参数的观点分析,可分为多普勒误差、角度误差、距离误差和 RCS 误差等。

1.3.1 角度跟踪测量误差

角度跟踪测量误差是指航天测量船甲板测量坐标系或惯导地平坐标系中角度测元测量中的误差。角度误差源主要包括跟踪误差、转换误差、传播误差和船姿、船位引起的误差。跟踪误差使雷达天线轴偏离目标角,而转换误差使轴角报告不准确。

1. 电轴漂移误差

雷达天线电轴指向目标,在目标不动时电轴也会出现缓慢的漂移,这种现象称为电轴漂移。其产生的主要原因如下:

(1) 相移误差:单脉冲雷达相移误差由馈源、馈线和接收机中和、差支路相移的不一致引起,是光电轴不匹配的重要原因。相移误差又分为固定相移误差和随机相移误差两类。固定相移误差使电轴产生固定偏移,成为光电轴不匹配的原因之一。随机相移误差经常变化,它引起的相移误差无法消除。产生固定相移误差的主要原因:馈源及馈线各路元件电长度和驻波不一致,接收机各种调谐不一致,各元件特性不一致等。产生随机相移误差的原因:信号频率的改变,接受回波极化的改变,接收机自动频率微调的剩余及其变化,自动增益控制电压的改变等。

(2) 耦合变化引起的误差:接收机通道间耦合,主要是和支路对差支路的耦合,在频率或其他状态变化时,产生电轴或零点偏移。

(3) 频率漂移或受调制:工作频率的变化会影响极化误差、振幅不平衡误差、相移误差、耦合误差,因而产生电轴漂移。

(4) 零点漂移:相位检波器的零点漂移,伺服系统直流放大器和积分器的零点漂移,都会产生跟踪误差。温度对这种漂移的影响也很大,另外还与电路本身的稳定性有关。

2. 稳态风和风力变形误差

自重、额外载重(冰雪等)、风力和温度变化等原因会引起反射体变形,从而产生电轴偏移。一般而言,这种变形在大型天线中比较严重,小型天线较小。变形的大小也与反射体的结构设计和选用的材料有关。

变形结构误差还分为静态和动态两种情况。静态的偏移是固定误

差,可以通过标定、校准消除;动态或可变的偏移与天线的运动和环境条件的变化有关,这种偏移是变量,其影响根据不同的要求和变化的快慢而异。

3. 零点对准误差

零点对准误差是指天线的机械轴向对准角度零值(如方位的正北)时,角传感器输出值的偏差量。

在现代雷达技术中,使用先进的校标手段(如星体标校)可使零点对准误差减小到忽略不计。

4. 天线座方位转台不水平误差

天线座的不水平指方位旋转轴不垂直于地平面。产生方位轴不垂直的原因:基础面不水平或基础不均匀下沉,外界的振动(如射击的振动),水平调整不当,日晒引起天线座基础的变形,天线转动时轴承的跳动,风负载产生的轴和轴承弹性变形等。

5. 轴系正交误差

(1) 方位、俯仰轴不正交,即俯仰轴不垂直于方位轴,常称为正交性误差。在有些精度不高的雷达中,轴的刚度较差,动态变形较严重,受风、高速转动或其他振动时会产生较大的抖动,成为不正交角的主要误差源。

(2) 光电不垂直和光电轴不匹配。当电轴与俯仰角轴不垂直时,会产生方位误差,因此不论方位还是俯仰角坐标,电轴必须准确标定。通常在安装设备时尽量使光轴和电轴相一致,并和俯仰角轴相垂直,使用时只需对光轴进行标定。

6. 动态滞后误差

动态滞后误差是指跟踪系统在雷达坐标中未跟上目标的速度、加速度或更高阶导数而形成的误差。

在航天测量船测控中,由于雷达安装的基座随着船摇和船体变形扭动,会导致雷达天线方向发生改变,有时与跟踪目标移动方向相反,而使动态滞后误差增大。目前解决的办法是通过船摇前馈量进行适当的修正。

7. 对流层折射误差

电波在对流层传播时产生两种误差:一种是对流层折射产生的误