



航天测量船海上测控技术丛书

航天测量船 船姿数据处理方法

主编 张忠华



国防工业出版社
National Defense Industry Press

航天测量船海上测控技术丛书

航天测量船 船姿数据处理方法

主编 张忠华

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天测量船船姿数据处理方法/张忠华主编. —北京:
国防工业出版社, 2009. 1

(航天测量船海上测控技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05922 - 9

I. 航... II. 张... III. 航天—测量船—数据处理 IV.
V556

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 130189 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 10½ 字数 299 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

《航天测量船海上测控技术丛书》 编审委员会

主任委员	简仕龙				
副主任委员	郭裕芳	张忠华			
委 员	周朝猛	陈一兵	席震东	费加兵	
	程宇锋	朱伟康	姜 良	董 杰	
	赵文华				
秘 书	徐一新	陈小进	张 伟		

《航天测量船船姿数据处理方法》

编 写 组

主 编 张忠华

副主编 李晓勇

编著者 张忠华 李晓勇 杨 磊 李辉芬
周朝猛

序

在我国航天事业走过半个世纪、取得举世瞩目的巨大成就之际，我国的航天远洋测控事业也经历了 30 年的风风雨雨。

30 年来，从事航天远洋测控事业的广大科技人员，自力更生，严谨求实，开拓创新，团结奋斗，自行设计、研制建造了 6 艘“远望”号测量船，先后 50 多次远征太平洋、印度洋、大西洋，圆满完成了 60 余次各类航天器发射的海上测控任务，为我国航天事业的发展做出了重大贡献，成为我国航天测控网不可缺少的重要组成部分。

回顾 30 年来走过的建设与发展道路，我国航天远洋测控技术水平逐步提高，试验能力不断增强，在圆满完成各类航天器发射海上测控任务的同时，取得了一个又一个的跨越；几代工程技术人员投入毕生的精力与智慧，付出辛勤的劳动与汗水，积累了丰富的实践经验，建立了比较完善的航天远洋测控试验体系，并取得了丰硕的科技成果。为了系统、全面地总结航天远洋测控理论和实践成果，培养和造就年轻人才，巩固和推进航天远洋测控事业又好又快发展，值此 30 周年之际，编写一套《航天测量船海上测控技术丛书》，具有十分重要的意义。

这套丛书共 8 册，包括《航天测量船海上测控技术概论》、《航天测量船测控通信设备船摇稳定技术》、《航天测量船船姿船位测量技术》、《航天器轨道确定的单位矢量法》、《航天测量船船姿数据处理方法》、《航天测量船气象保障技术》、《航天测量船航海保障技术》和《航天测量船测控通信设备标校与校飞技术》。丛书系统、全面地介绍了航天测量船海上测控通信和航海气象保障的理论基础、相关技术和最

新成果,注重分析测量船完成航天远洋测控任务特有的技术体制、技术途径和技术环节,既概略介绍了一般基础理论和航天远洋测控全貌,又着重讨论了具有海上测控特色的技术内容,具有系统全面、侧重技术、体现特色、注重实用的特点。

丛书的使用对象是从事各类航天器测控包括海上测控事业的广大工程技术人员和科技管理人员。希望这套丛书能够对广大读者了解和掌握航天海上测控技术起到实际的指导作用,不断提高海上测控科研试验技术水平,促进航天远洋测控事业人才培养工作,为推进我国航天事业又好又快发展发挥有益的作用。

沈奇骏

二〇〇八年二月十八日

前 言

航天测量船船体姿态测量是海上航天测量的一个重要特点,是海基测量区别于陆基测量的最重要的因素;船体姿态数据的处理与分析,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,从船姿数据处理的数学理论基础、船姿数据测量机制、船摇数据误差特性分析、船摇数据处理方法及其应用等各个方面,进行全面深入地研究与探讨,完整、系统地论述了船姿数据处理的理论、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9章。第1章、第2章、第3章介绍船姿数据处理的数学基础知识,这些知识对于从事船姿数据处理者是必备的;第4章、第5章介绍船姿数据的测量机制及船姿数据预处理,对船姿数据产生的背景及坐标转换过程做了详细的描述;第6章介绍船摇运动数学模型,对船摇数据的误差特性如船摇数据隐周期辨识、船摇数据相关性分析等,进行了较深入的分析,这一部分内容是船摇数据处理的重要基础;第7章、第8章详尽介绍各种船摇数据的处理方法,如最小二乘滤波方法、卡尔曼滤波方法、维纳滤波方法、小波滤波方法、指数递推预报方法、极大似然预报方法、时间序列滤波及预报方法等,并通过仿真数据及实测数据对其中部分方法进行了分析与比较,这一部分内容是全书的重点所在。最后,第9章介绍船姿数据的各种应用,包括外测数据的船姿修正及引导数据的船姿反修正等。

本书主要适用于具有大学本科以上学历的从事数据处理工作的

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,国防科技大学吴孟达教授作为本书主审,对书稿进行了仔细的审阅并提出了许多宝贵意见和建议,在此深表感谢!本书是作者多年来从事船姿数据处理方法研究的总结,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表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免有错误之处,恳请读者批评指正。

编著者

2008年5月

目 录

第 1 章 基础知识	1
1.1 误差基本概念	1
1.1.1 误差的来源	1
1.1.2 误差的分类	2
1.1.3 误差的表示方法	5
1.1.4 标准误差的简便算法	7
1.1.5 误差的正态分布	9
1.1.6 高斯误差定律	11
1.1.7 误差传播	12
1.1.8 测量误差的相关性与相关性统计	13
1.2 矩阵与矢量	15
1.2.1 矩阵	15
1.2.2 行列式	26
1.2.3 矢量	30
1.2.4 二次型	33
1.2.5 矩阵和矢量的微分	41
第 2 章 参数估计	47
2.1 随机变量	47
2.1.1 随机变量及其分布	47
2.1.2 随机变量的数字特征	53
2.2 估计理论	57
2.2.1 总体与样本	57
2.2.2 样本特征数与总体数字特征	57
2.2.3 总体参数的点估计	59

2.3	线性模型参数估计	64
2.3.1	线性模型	64
2.3.2	最小二乘法估计	66
2.3.3	具有线性约束的参数估计	69
2.3.4	线性模型未知参数的贝叶斯估计	71
2.3.5	压缩估计方法	74
2.3.6	岭估计	80
2.3.7	主成分估计	81
2.4	几种估计方法之间的关系	86
2.4.1	贝叶斯估计与 James - Stein 估计的关系	86
2.4.2	岭估计与最小二乘法估计的关系	87
2.4.3	岭估计与约束估计、贝叶斯估计的关系	88
第3章	状态矢量和状态矢量方程	90
3.1	状态空间与状态方程	90
3.1.1	状态空间模型	91
3.1.2	状态空间表达式的标准形式	94
3.2	状态转移矩阵	97
3.3	离散事件线性状态方程	99
3.3.1	离散状态方程的建立	99
3.3.2	离散状态方程的求解	100
第4章	航天测量船船姿船位测量系统与船用坐标系	105
4.1	航天测量船惯性导航系统概述	106
4.1.1	惯性导航系统组成	106
4.1.2	惯性导航系统使用特点	107
4.1.3	惯导测量元素	108
4.2	航天测量船船体变形测量设备概述	108
4.2.1	船体变形测量技术简介	109
4.2.2	变形测量元素	111
4.3	船用坐标系	112
4.3.1	测量坐标系 $O-X_cY_cZ_c$	113

4.3.2	惯导甲板坐标系 $O-X_jY_jZ_j$	113
4.3.3	惯导地平坐标系 $O-X_gY_gZ_g$	113
4.4	船用坐标系之间的关系	114
4.4.1	测量坐标系与惯导甲板坐标系之间的关系	115
4.4.2	惯导地平坐标系和惯导甲板坐标系之间的关系 ...	115
4.4.3	测量坐标系与惯导地平坐标系之间的关系	115
第5章	船姿数据预处理	117
5.1	船摇数据与外测数据	117
5.1.1	船摇数据	119
5.1.2	船摇对外弹道测量数据的影响	121
5.1.3	船摇修正效果	121
5.2	船摇数据连续化处理	123
5.3	船姿数据合理性检验	124
5.3.1	最小二乘法	124
5.3.2	时间序列分析法	125
5.4	船姿数据平滑处理	126
5.4.1	平均法	126
5.4.2	五点三次平滑法	129
5.4.3	数据平滑方法的实质	132
第6章	船摇运动数学模型	134
6.1	数据的分类和特性	134
6.1.1	确定性数据的频谱特性	134
6.1.2	随机数据的基本特性	136
6.2	测量误差的概率特性分析	142
6.2.1	测量误差概率特性的估计	142
6.2.2	高频测量误差分量的统计相关函数	143
6.2.3	多次测量数据低频测量误差分量的概率特性	145
6.2.4	统计相关函数的逼近	145
6.3	船摇数据误差特性分析	146
6.3.1	平稳序列的周期图	146

6.3.2	船摇数据隐周期辨识方法	152
6.3.3	船摇数据频谱分析	159
6.3.4	船摇数据测量噪声误差估计	162
6.4	船摇运动的微分方程	165
6.4.1	船摇运动微分方程	165
6.4.2	船摇运动微分方程的离散化	166
第7章	船摇数据处理的状态方程法	169
7.1	极大似然方法	169
7.1.1	极大似然参数识别方法	170
7.1.2	船摇运动微分方程的简化	172
7.1.3	指数递推滤波器	178
7.1.4	极大似然方法与几种数字滤波方法的比较	179
7.2	最小二乘滤波方法	185
7.2.1	增长记忆最小二乘滤波方法	185
7.2.2	加权最小二乘滤波方法	186
7.3	卡尔曼滤波方法	187
7.3.1	维纳滤波	187
7.3.2	卡尔曼滤波方法	192
7.4	小波滤波	204
7.4.1	小波变换及小波滤波基本原理	205
7.4.2	小波滤波的基本方法	208
第8章	船摇数据处理的时间序列分析方法	218
8.1	时间序列模型	218
8.1.1	AR 模型及其参数估计	221
8.1.2	MA 模型及其参数估计	224
8.1.3	ARMA 模型及其参数估计	228
8.1.4	时序数据的检验	235
8.1.5	平稳时间序列建模	239
8.1.6	非平稳时间序列	243
8.2	船摇数据的统计模型	260

8.2.1	船摇数据时间序列模型	260
8.2.2	船摇数据时间序列模型的定阶	262
8.2.3	模型参数识别	283
8.3	船摇数据的滤波与预报方法	285
8.3.1	船摇数据的滤波方法	285
8.3.2	船摇数据的预报方法	287
8.4	船摇数据处理时序法与极大似然方法的比较	293
8.4.1	船摇滤波结果	293
8.4.2	船摇预报结果	295
8.4.3	两种船摇数据处理结果比较分析	296
第9章	船姿数据应用	298
9.1	船姿数据修正	298
9.1.1	测量坐标系与惯导甲板坐标系的转换	299
9.1.2	惯导甲板坐标系与惯导地平坐标系的转换	301
9.1.3	举例	302
9.2	等效船摇角的计算	305
9.2.1	等效船摇角的计算方法	305
9.2.2	等效船摇角计算举例	310
9.3	船摇与目标前馈量计算	312
9.3.1	船载跟踪测量设备的视轴稳定	312
9.3.2	光学测量设备的船摇前馈计算方法	314
9.3.3	无线电跟踪测量设备船摇与目标前馈量 计算方法	316
参考文献		320

第1章 基础知识

1.1 误差基本概念

1.1.1 误差的来源

数据是研究客观事物的性质、运动规律及事物间相互联系的基本素材,是进行科学研究的基础。在科学实验和生产实践中,为了掌握事物发展的规律性,人们利用仪器设备对物体进行测验和试验,从测量仪器中得到的数据称为测量数据。

测量实践表明,多次测量同一物理量所获的数据,不可避免地一定范围内出现数值上的波动,这种现象是由测量的不确定性造成的。由于测量设备的精度限制、测量设备性能的不稳定性、测量的环境条件及测量者的主观因素等造成的测量数据与客观真值的不一致部分称为测量误差。

测量误差的来源是多方面的,主要包括测量方法、测量设备、测量环境和测量人员等几方面。

1.1.1.1 方法误差

方法误差是指所选用的测量方法造成的误差,其中也包括在测量原理上采用的近似计算公式。

如测钢球体积,用游标卡尺测钢球的直径,由公式:

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3$$

算得钢球体积。在上面的公式中因 $\pi/6$ 只能取近似值,由此产生的体积测量误差就是(计算)方法误差。

1.1.1.2 设备误差

设备误差包括基准器件误差和测量装置误差。

基准器件误差指测量中作为比较标准的物理量的误差,如天平的砝码误差。

测量装置误差包括工作原理误差、设备的制造误差、设备的安装误差和设备附件误差等。

1.1.1.3 环境误差

由于测量所处的环境条件,包括温度、湿度、气压、振动、磁场干扰等,不符合测量设备理想或正常工作要求,由此导致的测量误差称为环境误差。

例如,在长度的测量中,温度偏离规定的 20°C 标准温度,会引起测量误差。又如,在航天飞行器的轨道测量中,大气不均匀引起的电波折射也会引起测量误差。

1.1.1.4 测量人员误差

不同的测量人员在同一条件下,用同一设备对同一被测物理量进行测量,也可能得出不同的结果,这种差别是测量人员误差。这种误差产生的原因是多方面的,生理感官、心理因素、工作状态、测量习惯、熟练程度等都可能引起测量人员误差。

值得指出的是,误差来源是多方面的。对测量数据进行分析时,首先要比较清楚其中的主要误差源及其相应的表现形式。只有这样,才能保证数据建模的针对性和准确性。

1.1.2 误差的分类

测量设备的测量数据与真值总存在偏差,即测量误差。按误差特性来分,测量误差一般可分为随机误差和系统误差。

按照数学处理方法的不同,测量误差可以分为过失误差(Gross Error)、随机误差(Random Error)和系统误差(System Error)。三类不同的误差的数学建模和数学处理方法是不同的。

1.1.2.1 随机误差

在一定观测条件下进行多次重复测量或在时间序列上测量时,总存

在一种量值和符号都不固定、也无任何变化规律,但从总体上来说又服从一定统计特性的误差,称为随机误差。

从概率论的角度讲,称 e 是随机误差,是指 e 为服从某一分布的随机量。典型的随机误差有设备的热噪声、刻度尺的判读误差等。在静态目标测量中,若测量条件完全相同,那么各次测量误差可以说是来自同一母体。对于动态目标的测量,随机误差 $\{e_i\}$ 是一个时间过程;在很多情况下,动态目标测量的随机误差可以视为平稳时间序列。随机误差的相关特性在1.1.5小节详细介绍。

随机误差尽管从表面上和个体来看是无规律和不可预测的,因而也不能消除;但根据大量的测量和分析,可以得到它的统计特性。目前对随机误差逐渐有新的认识,即对于部分相关随机噪声,可以用自回归模型对它进行预测,得到它在时间序列上的变化规律。随机误差虽然不能扣除,但可以设法减弱它对测量结果的影响。

1.1.2.2 系统误差

与随机误差相反,测量数据中量值和符号保持常值或按一定规律变化的误差,称为系统误差。其特点是在测量过程中,误差的表现形式呈现明显的规律性。

例如,用若干台同样规格的天平和同一套砝码测量同一物体的质量时,砝码质量的偏差就是一种(常值)系统误差。

误差值不变的称为常值系统误差或系统恒差,误差值按确定规律变化的叫变值系统误差或系统变差。它产生的原因多为测量仪器不准或测量环境变化所造成。按误差的变化特性,系统误差具体的分类主要有不变(常值)系统误差、线性变化的系统误差、周期变化的系统误差、其他规律变化的系统误差和不定系统误差等。需要指出的是,在实际应用中,这五类不同的系统误差都是可能出现的。

应该说明的是,对测量结果影响显著的系统误差,只能针对具体情况采取处理措施。可以采用试验和分析的方法确定其变化规律,设法消除它,或者从测量结果中加以修正。

在测量中,要想彻底清除系统误差实际上是不可能的,而只能是把系统误差减弱到可忽略不计的程度,就认为系统误差已消除。有如下系统