



外弹道测量数据误差 影响分析技术及应用

王 敏 胡绍林 安振军 著



国防工业出版社

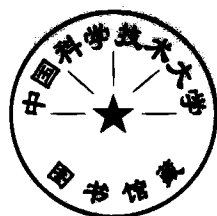
National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十五”统编教材

科研试验系列

外弹道测量数据误差 影响分析及应用

王 敏 胡绍林 安振军 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

外弹道测量数据误差影响分析技术及应用 / 王敏, 胡绍林, 安振军著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 1

总装部队军事训练“十五”统编教材. 科研试验系列
ISBN 978 - 7 - 118 - 05218 - 3

I. 外... II. ①王...②胡...③安... III. 导弹弹道—外弹道—测量误差—教材 IV. TJ013.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 087922 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 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 7¼ 字数 202 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 20.00 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

内 容 简 介

测控网中外测跟踪测量设备以光学测量和无线电测量为骨干,组成了导弹与航天试验高精度测量带,实现了局部航区、多设备、广域覆盖,提供了安全、无缝链式的跟踪测量融合体系。

本书的内容以火箭(导弹)飞行主动段光电经纬仪、脉冲雷达和连续波干涉仪系统误差残差为主要研究对象,系统研究了设备零值、轴系误差、时间零值、折射误差等十多项典型误差残差对定位参数、速度参数、加速度参数等弹道参数的影响;采用有限变分技术,建立了光电经纬仪和脉冲雷达、连续波干涉仪等外测设备单站跟踪体制下误差残差对弹道参数的影响函数关系,实现了不同源误差残差合影响的线性解耦,得出一些对外测数据事后处理以及测量设备标校、弹道精度分析与评估以及制导误差分离等工作有广泛的参考与借鉴价值的建议和结论。

本书可作为从事航天测控、导弹飞行试验、测量数据误差分析、数据处理工程技术人员的参考书及相关专业的本科生和研究生教学用书。

第三届总装备部军事训练教材 编辑工作委员会

主任委员 张建启

副主任委员 曹保榆 夏长法 侯贺华 郭文敏

委员 (按姓氏笔画排序)

于俊民 王宜标 王泽民 尤广志

冯 章 朱双华 朱忠刚 刘树军

刘瑞成 安敏建 李方洲 李治三

肖力田 迟宝山 张忠华 张海东

陈永光 胡利民 侯 鹰 姜世忠

聂 皞 倪红星 徐 航 郭 勇

黄伟强 彭华良 裴承新 潘贤伦

秘书长 聂 皞

办公室主任 田 禾

办公室副主任 石根柱 郝 刚

办公室成员 李国华 李立法 郑晓娜

第三届总装备部军事训练教材 导弹航天测量控制系统编委会

主任委员 余同杰

副主任委员 张 渊

委 员 (按姓氏笔画排序)

孙宝升 杜小宁 杨再禹 张丽艳

周朝猛 施治元 康建勇 魏洪波

秘 书 石根柱

序

军事训练教材是部队开展军事训练和培养高素质科研试验与管理人才的重要基础。“十五”期间是我军加速武器装备现代化建设的关键时期,随着科学技术不断发展,新武器、新装备大量投入部队使用,急需编写相应的配套教材,来满足部队军事训练和人才培养的需求。为此,总装司令部印发了《总装部队军事训练教材建设“十五”计划》,并组织部分专家、学者编著了这套总装部队军事训练“十五”统编教材。

编著这套总装部队军事训练“十五”统编教材是国防科研试验事业继往开来的大事,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它以新时期军事战略方针为统揽,以军委和总装首长关于加强军事训练工作的一系列重要指示为指导,以《军事训练与考核大纲》、《继续教育科目指南》为依据,坚持科学性、前瞻性和实用性相结合,不断满足军事训练和人才培养对教材的需求,为圆满完成武器装备科研试验和管理保障任务提供了有力的技术支持。

“十五”统编教材共计 69 部,内容涉及科研试验、陆军装备科研订购、通用装备保障和试验后勤等 4 个系列的 28 个系统。这套教材既总结升华了武器装备科研试验和管理保障经验,又反映了国内外最新动态和发展方向,是对国防科研试验工程技术系列教材建设的进一步延续和扩展,是一批高质量的精品教材。其使用对象主要是部队具有大专以上学历的科技人员和管理干部,也可供院校有关专业师生使用或参考。

期望这套教材能够有益于部队高素质人才的培养,有益于武器装备科研试验和管理保障任务的完成,有益于国防科技事业的进步。

总装备部军事训练教材

编辑工作委员会

二〇〇五年十二月

前 言

外弹道测量数据事后处理是一门涉及统计学、飞行力学、大地测量学、应用光学、计算数学、计算机技术、数字信号与数字图像处理技术等多学科知识的综合技术。测控网中跟踪测量设备以光学测量和无线电测量为骨干,组成了导弹与航天试验高精度测量带,它实现了局部航区多设备、广域覆盖,为航天工程提供了安全、无缝的链式跟踪测量融合体系。

单站测量体制下跟踪测量数据的残差影响分析是高精度测量数据事后处理的关键技术手段之一。高精度外测数据事后处理结果主要作用,一是分析和评估飞行器试验是否成功的重要依据;二是改进飞行器控制系统设计、定型,提高制导精度的关键;三是为测控系统总体设计、设备研制、精度鉴定和使用提供反馈信息,改进和提高测控设备的测量精度重要途径。

考虑到问题的实际工程背景,并结合多年来从事外测事后处理的实践,本书重点考虑光电经纬仪和脉冲雷达、连续波系统等外测设备单站跟踪体制下系统误差残差对弹道计算结果的影响,并在理论分析和仿真计算的基础上,得出一些对外测数据事后处理、测量设备标校、弹道精度分析与评估以及制导误差分离等工作有广泛的参考与借鉴价值的建议和结论。

本书对单站跟踪测量体制下系统误差残差的分析方法有较系统的研究,理论上有一定的难度,取得的研究结果和分析方法,在航天外测数据处理领域中有较强的适用性和推广价值。

全书共分10章。第1章概论;第2章外测体制及几何定位方法;第3章测量数据误差分析技术;第4章误差模型的建立;第5章分项误差对定位的影响分析;第6章分项误差对测速分量的影响分析;第7章分项误差对合速度的影响分析;第8章分项误差对弹道倾角与偏角的影响分析;第

9 章分项误差对分加速度的影响分析;第 10 章系统误差残差评估技术与应用。

本书第 1 章由安振军、胡绍林共同撰写,第 2 章、第 3 章由安振军、王敏共同撰写,第 4 章~第 10 章由王敏、胡绍林共同撰写。全书由安振军同志统稿。

本书编著工作得到总装备部军事训练教材编委会的大力支持,在此表示感谢。同时,特别感谢西安卫星测控中心各级领导与机关在本书编写过程中给予的指导和帮助,感谢国家自然科学基金项目(90305007)和中国博士后科学基金项目(2005037732)的支持。

由于本书内容涉及面广泛,加之作者水平有限,难免有不妥或者错误之处,敬请读者指正。

著 者

2007 年 2 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 误差分析的内容	2
1.3 误差分析的基本步骤	4
1.4 本书的主要特点	5
第 2 章 外测体制及几何定位方法	7
2.1 外弹道测量体制	7
2.2 外弹道测量设备	9
2.2.1 光学测量系统	9
2.2.2 脉冲雷达系统	11
2.2.3 连续波干涉仪系统	12
2.2.4 S 频段统一测控系统	12
2.2.5 全球定位系统	13
2.3 空间几何定位方法	13
2.3.1 基本测量元素	14
2.3.2 几种典型的几何定位方法	17
参考文献	28
第 3 章 测量数据误差分析技术	29
3.1 测量数据误差简介	29
3.1.1 测量数据误差的概念	29
3.1.2 测量数据误差的分类	30
3.1.3 测量数据的主要误差源	32
3.2 测量数据误差分析技术	35

3.2.1 测量数据误差统计指标的数学表示	36
3.2.2 测量数据的随机误差统计	37
3.2.3 系统误差残差分析	40
3.3 测量数据采集和预处理技术	42
参考文献	47
第4章 误差模型的建立	49
4.1 问题的提出	49
4.2 误差源分析	50
4.3 变分原理	56
4.3.1 泛函	56
4.3.2 变分和微分关系	57
4.3.3 函数的变分	57
4.3.4 泛函的一次变分	58
4.3.5 变分原理	58
4.4 光电经纬仪误差分解模型	58
4.4.1 光电经纬仪测量原理	59
4.4.2 测量误差的分解模型	59
4.4.3 光电经纬仪误差变分表示	61
4.5 脉冲雷达误差分解模型	62
4.5.1 脉冲雷达测量原理	62
4.5.2 测量误差的分解模型	63
4.5.3 脉冲雷达误差变分表示	66
4.6 连续波干涉仪误差分解模型	67
4.6.1 连续波干涉仪测量原理	67
4.6.2 测量误差的分解模型	68
4.6.3 连续波干涉仪误差变分表示	68
参考文献	69
第5章 分项误差对定位的影响分析	70
5.1 光电经纬仪和脉冲雷达分项误差对定位的影响分析	70
5.1.1 定位坐标的变分关系	71

5.1.2	在测站系下分项误差对定位坐标的影响函数	74
5.1.3	在发射系下分项误差对定位坐标的影响函数	80
5.1.4	仿真计算	89
5.2	连续波干涉仪分项误差对定位的影响分析	92
5.2.1	定位坐标的变分关系	93
5.2.2	误差对定位坐标的影响函数	95
5.2.3	仿真计算	97
	参考文献	98
第6章	分项误差对测速分量的影响分析	100
6.1	光电经纬仪和脉冲雷达分项误差对测速分量的影响分析	100
6.1.1	测速分量的变分关系	100
6.1.2	在测站系下分项误差对测速分量的影响函数	105
6.1.3	在发射系下分项误差对测速分量的影响函数	109
6.1.4	仿真计算	117
6.2	连续波干涉仪分项误差对测速分量的影响分析	119
6.2.1	测速分量的变分关系	119
6.2.2	误差对测速分量的影响函数	122
6.2.3	仿真计算	123
	参考文献	125
第7章	分项误差对合速度的影响分析	126
7.1	光电经纬仪和脉冲雷达分项误差对合速度的影响分析	126
7.1.1	合速度的变分关系	126
7.1.2	在测站系下分项误差对合速度的影响函数	130
7.1.3	在发射系下分项误差对合速度的影响函数	131
7.1.4	仿真计算	138
7.2	连续波干涉仪分项误差对合速度的影响分析	139
7.2.1	合速度的变分关系	139
7.2.2	误差对合速度的影响函数	140
7.2.3	仿真计算	140

参考文献	141
第 8 章 分项误差对弹道倾角与偏角的影响分析	142
8.1 光电经纬仪和脉冲雷达分项误差对倾角与偏角的影响分析	143
8.1.1 倾角与偏角的变分关系	143
8.1.2 在测站系下分项误差对倾角与偏角的影响函数	144
8.1.3 在发射系下分项误差对倾角与偏角的影响函数	147
8.1.4 仿真计算	152
8.2 连续波干涉仪分项误差对倾角与偏角的影响分析	154
8.2.1 倾角与偏角的变分关系	154
8.2.2 误差对倾角与偏角的影响函数	155
8.2.3 仿真计算	156
参考文献	157
第 9 章 分项误差对分加速度的影响分析	158
9.1 光电经纬仪和脉冲雷达分项误差对分加速度的影响分析	158
9.1.1 在测站系下分项误差的影响函数	158
9.1.2 在发射系下分项误差的影响函数	176
9.1.3 仿真计算	186
9.2 连续波干涉仪分项误差对分加速度的影响分析	189
9.2.1 切向加速度的影响函数	189
9.2.2 法向加速度的影响函数	191
9.2.3 侧向加速度的影响函数	193
参考文献	195
第 10 章 系统误差残差评估技术与应用	196
10.1 系统误差残差对弹道影响灵敏度分析	196
10.1.1 残差影响灵敏度的定义和算法	196
10.1.2 不同源误差残差的影响灵敏度曲线	198
10.1.3 残差影响灵敏度对弹道影响分析	200
10.2 系统误差残差修正系数确定的有效性	203

10.3	系统误差残差定性分析与定量评估	205
10.3.1	定性分析	205
10.3.2	定量评估	207
10.4	不同源测量数据的一致性分析	209
10.4.1	比对分析	209
10.4.2	残差平稳性检验	211
10.4.3	非平稳残差序列的趋势项分离	212
10.4.4	比对差值序列与比较标准的相依关系分析	213
10.5	多项误差残差的综合影响分析	214
10.6	结束语	215
	参考文献	216

第1章 概 论

1.1 概 述

随着导弹与航天技术的发展,我国的外弹道跟踪测量(简称外测)系统,走过了从无到有的发展过程,它由中精度发展到高精度,由单一功能设备发展到多功能综合系统,由单一航区发展到多射向、全航区测控覆盖。目前,我国已建立了以光学测量、无线电中、长基线干涉仪为骨干设备的导弹与航天试验高精度测量带,基本满足了我国发射导弹、卫星、飞船及航天器对测控系统的要求,标志着我国导弹、航天测控网的外弹道跟踪测量系统已日臻完善。

外弹道跟踪测量系统是对火箭、导弹、飞船等航天飞行器的各个阶段进行跟踪、测量和控制的大规模复杂系统。系统跟踪测量对象主要分为三大类:一是对火箭/导弹跟踪测控,外测跟踪测量设备主要布置在靶场首区、航区和落区,其作用是对火箭、导弹试验进行安全控制,采集试验过程中的原始信息,进行数据事后处理,高精度估算飞行器弹道参数,如坐标、速度、加速度等,用于导弹的战术性能分析、总体方案的设计、导弹定型、设备研制、精度鉴定等信息反馈。二是对卫星跟踪测控,在卫星发射、运行以及回收过程中完成各种跟踪测量、控制任务,其作用除了在整个飞行过程中进行安全控制和采集试验过程中的原始信息外,还要对卫星进行姿态控制和各种必要的机动控制,诸如轨道数据注入、星上设备动作、姿态发动机点火等;三是对飞船跟踪测量控制。飞船是一种特定的天地往返飞行器,需要进行变轨、交会、对接和停靠等控制,其控制过程复杂,对飞船跟踪测量控制的覆盖范围大、测量精度要求高。

跟踪测量数据系统误差的残差分析与外弹道测量数据处理息息相关,它是一门集飞行力学、制导与控制理论、测控技术及设备、探索性数据分析(EDA)与计算数学理论、天文大地测量知识、数值仿真技术、计算机应用技术等于一体的综合性学科。随着导弹、航天试验要求的变化,外测跟踪测量数据处理技术也随任务需求的变化而不断取得进展:

20世纪50年代后期到60年代,完成了我国近程、中近程导弹靶场试验外弹道光学测量数据的处理;

20世纪60年代末到70年代中,完成了我国中远程和远程导弹测量数据的光学测量和无线电测量系统的数据处理;

20世纪70年代后期到80年代初,完成了我国远程导弹的高弹道试验和全程试验的外测数据事后处理;

20世纪80年代初到90年代末,完成了我国新一代战略导弹和各类航天器飞行试验的数据事后处理任务。

数据处理方案和方法以及数据处理手段,从不成熟到成熟,建立和储备了一系列达到国内先进水平的数据处理方法和数据误差分析技术。

近几年来,针对载人航天工程和第二代导弹试验的精度要求,外弹道测量数据处理围绕着外测误差残差影响分析这一关键性的课题,在测量数据误差分析、误差建模、分项误差对位置和速度等弹道参数的影响分析、连续波干涉仪自定位、靶场外测数据野值点诊断、采样时间序列的滑动递推滤波、探索性数据分析、动态测量系统抗干扰滤波、状态向量有界影响滤波、外弹道测量数据容错平滑与微分平滑等方面都有了创新和突破,数据处理的精度也大大提高,靶场试验结果与数据事后处理结果分析也越来越被航天型号研制部门所关注。

1.2 误差分析的内容

按照国军标(GJB 585A—1998)中惯性技术术语的定义,把随机误差与不可修正的系统误差之和合称为残差(residual error)。跟踪测量

数据系统误差残差是指跟踪测量控制过程中,真实测量行为和基于误差模型的预期行为之间不一致性或差异,误差残差直接影响外测弹道性能和效果。系统误差残差影响分析是外弹道测量数据处理技术研究的重要组成部分。它既是分析和评估飞行器试验是否成功的依据,又是改进飞行器控制系统设计、定型和提高测控设备测量精度的重要途径,因此,系统误差残差分析是高精度测量数据处理的关键环节。

跟踪测量数据误差残差分析是数据处理领域的主要研究方向之一,在探索性数据分析、数据处理、空间目标识别与信息处理、数字图像处理、飞行试验结果分析,过程监控与故障诊断等相关学科都有着广泛理论研究和应用价值。

跟踪测量数据系统误差残差影响分析的目的是通过数据处理和误差残差建模,对影响测量数据精度的各类系统误差残差进行修正效果分析、估计,为型号研制部门提供高精度数据处理结果。

应用统计理论和数据处理方法,综合利用多台(套)设备跟踪测量数据,计算出一条从起飞开始到星箭分离为止的完整、连续、光滑(除特征点外)的火箭飞行弹道,包括火箭三维坐标 (x, y, z) 、飞行速度 $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, v, \theta, \sigma)$ 、加速度 $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \dot{v}, v\dot{\theta}, v\dot{\sigma})$ 等,是外测事后处理的根本任务。从理论上说,如果每台设备跟踪测量数据无误差,或者误差项能够利用战前、战后提供的误差常数进行彻底消除,则计算这样一条弹道是一件并不复杂的数学问题。但是,问题是误差是不可避免的,也不以人的意志为转移地存在于外测设备跟踪测量过程中,无论是光学、脉冲雷达,还是连续波干涉仪系统(多站相参系统)测量设备,在其跟踪测量过程中都不可避免地会引入误差,测量数据中也不可避免地包含有误差。例如,设备零值误差、设备轴系误差、光/电波折射误差、时统误差、动态滞后、信标延迟、光速误差、振荡器的频率误差、目标闪烁热噪声、设备不稳干扰、重力下垂等。

在跟踪测量过程引入的众多误差中,只有一部分是可以标校测定和按模型修正的,测量误差修正仅仅是对这些可标校并有经典修正模型的部分进行了修正。换句话说,还有相当数量的误差是不可修正或无法修正的。就是在“可修正”部分中,也存在修正的可靠性、修正的有效性以