



弹道测量 数据融合技术

DANDAO CELIANG SHUJU RONGHE JISHU



郭军海 主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十一五”统编教材

弹道测量数据融合技术

郭军海 主编

国防工业出版社

北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

弹道测量数据融合技术 / 郭军海主编. —北京:
国防工业出版社, 2012. 6

总装部队军事训练“十一五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 08259 - 3

I. ①弹... II. ①郭... III. ①导弹弹道 - 测量 -
数据融合 - 教材 IV. ①TJ013

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 126216 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 10 $\frac{1}{8}$ 字数 311 千字

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 38.00 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

总装备部军事训练统编教材 编审委员会

(2010)

主任委员 任万德

副主任委员 安敏建 蔡洙虎

委 员 于俊民 王福通 朱双华 石华峰

李恒年 王泽民 唐志共 闫章更

郝光宇 孙宝升 裴承新 谢京稳

姜世忠 穆 山 张 渊

秘 书 石根柱 余敬春

弹道测量数据融合技术

主 编 郭军海

编写人员 钱卫平 张 艳 慈 颖

主 审 李恒年

前 言

1936年,德国在波罗的海什切青湾的乌泽多姆岛北端佩内明德开始兴建导弹靶场,这是世界上第一个导弹试验靶场。第二次世界大战结束后,美国、俄罗斯(苏联)等国为了大力发展导弹武器技术,纷纷建立了各自的导弹试验靶场,包括美国的白沙导弹靶场、空军东靶场、空军西靶场、夸贾林导弹靶场及巡航导弹靶场等,俄罗斯(苏联)的卡普斯丁亚尔和萨雷沙甘靶场、拜克努尔靶场(丘拉坦姆)、普列谢茨克靶场等。导弹武器在靶场开展试验,最重要的是要获取试验数据,为导弹的设计验证、系统改进、鉴定定型以及生产检验等提供依据,而获取数据则必须建立起靶场的测量系统。

靶场测量系统主要由布设在地面、空中、空间的无线电、光学跟踪测量设备组成,用于完成对导弹发射、飞行的景像记录、弹道参数测量、遥测参数接收、目标特性测量、毁伤效应测量等,其中,弹道参数是最基础、也是最重要的测量信息。几十年来,靶场测量设备从简陋的弹道相机、经纬仪发展到大口径光学望远镜、宽带相控阵雷达,从地面设备发展到飞机(飞艇)测量站、导航卫星、中继卫星等,设备数量也从几台套、几十台套发展到上百台套。靶场测量系统的发展,使试验中能够获取的信息内容更多、数量更大、覆盖的空域和时域更广、精度更高,因此,对试验数据的处理技术也提出越来越高的要求。

随着试验需求的不断增加和测量系统的不断发展,靶场试验数据的处理方法也在不断发展,从最初的几何定位、代数解析、最小二乘方法,到后来的 EMBET、(扩展)卡尔曼滤波、小波分析方法等,许多先进的数学方法逐步应用到靶场试验数据处理领域。近十年来,雷达、光学测量技

术、空基与天基测量技术发展十分迅猛,给靶场测量系统带来了革命性的变化。从获取的信息来看,最显著的就是信息种类和信息数量的急剧增加,这就给靶场提出了一个重大问题——如何综合处理这些多源、多类型、多冗余的试验数据,以获得更加可信、精度更高的试验结果。

数据融合(Data Fusion)出现在20世纪70年代,并于80年代发展成一项专门技术。数据融合是对来自多个传感器或多源信息进行综合处理,从而得到更为准确、可靠的结论。从数据融合的定义本质看,它显然正是靶场测量系统发展到目前阶段所需要的一种试验数据处理技术。本书编者几年来一直致力于将数据融合技术应用到靶场弹道测量的数据处理领域,针对弹道测量的具体特点,对方法进行改进、实践、再改进。本书正是编者及其团队在这一领域研究和应用的系统总结,全面介绍了数据融合技术在弹道测量数据实时处理和事后处理中的应用方法和技术,具有针对性强、与实际工程结合紧密的特点。

本书共分8章。第1章介绍了弹道测量数据处理方法的作用、发展历程和数据融合技术的基本概念、模型和基本方法。第2章介绍了靶场弹道测量系统的基本组成以及弹道测量的误差及其数学模型。第3章介绍了弹道测量数据处理的基本方法,包括坐标系、误差检测分析与修正、弹道参数的估计方法等。第4章介绍了常用坐标系和弹道参数估计方法。第5章介绍了弹道模型的三种表示方式,包括弹道的动力学模型、运动学模型和参数回归模型。第6章介绍了弹道测量的实时数据融合方法,包括实时数据融合模型、实时滤波方法,以及实时数据融合的稳健估计方法等。第7章介绍了弹道测量的事后数据融合方法,包括弹道测量的事后数据融合模型、融合处理方法,并介绍了“多测速”体制的基本原理和弹道测量方法。第8章介绍了弹道的精度评估方法,包括实时融合弹道的精度评估方法和事后融合弹道的精度评估方法。

全书由郭军海统稿。第1、2章由钱卫平撰写,第3、6章由郭军海撰写,第4、5章由慈颖撰写,第7、8章由张艳撰写。

在本书撰写过程中,得到了李恒年研究员、谢京稳研究员、康建勇研究员、刘利生研究员、李波研究员的热心指导、审阅和帮助,以及国防工业出版社的大力支持,在此一并表示衷心感谢!

虽然在编著本书时做出了不懈努力,但由于水平和经验的限制,缺点和错误在所难免,诚挚希望相关领域的专家和读者批评指正。

编者

2012年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 弹道测量数据处理的作用及技术现状	2
1.2.1 弹道测量数据处理的作用	2
1.2.2 弹道测量数据处理方法的发展历程	4
1.3 数据融合技术及应用现状	7
1.3.1 数据融合的定义和作用	7
1.3.2 数据融合的过程模型	9
1.3.3 数据融合的功能和结构模型	12
1.3.4 数据融合的技术和方法	17
第 2 章 弹道测量系统	24
2.1 光学测量系统	24
2.1.1 光电经纬仪的组成与功能	25
2.1.2 光电经纬仪的工作原理	26
2.2 脉冲跟踪测量雷达	29
2.2.1 脉冲跟踪测量雷达的组成与功能	30
2.2.2 脉冲跟踪测量雷达的工作原理	34
2.3 连续波测量系统	39
2.3.1 连续波测量系统的分类	39
2.3.2 连续波测量系统的工作原理	42
2.4 GPS 跟踪与测量系统	46
2.4.1 GPS 的组成	46
2.4.2 GPS 测量技术及应用	48

第3章 测量误差及其处理方法	55
3.1 测量误差与分类	55
3.1.1 测量误差的分类	55
3.1.2 外弹道测量的误差源	57
3.2 测量数据特性分析与建模	59
3.2.1 测量系统误差模型	59
3.2.2 测量随机误差模型	66
3.2.3 随机误差统计分析方法	71
3.2.4 异常数据的检测与修正方法	75
3.3 电波折射修正方法	82
3.3.1 常用的大气模型	83
3.3.2 电波折射修正常用方法	84
3.3.3 电波折射修正新技术	92
第4章 弹道参数估计基本方法	101
4.1 常用坐标系	101
4.1.1 常用坐标系的定义	101
4.1.2 常用的坐标转换	107
4.2 弹道参数估计方法	112
4.2.1 数据处理流程	112
4.2.2 解析估算方法	114
4.2.3 弹道滤波方法	124
4.2.4 最小二乘估计	127
4.2.5 误差模型的参数估计	131
第5章 弹道模型	135
5.1 弹道的动力学模型	135
5.1.1 主动段弹道的动力学建模	137
5.1.2 自由段弹道的动力学建模	140
5.1.3 再入段动力学模型	142
5.2 弹道的运动学模型	144
5.2.1 时序独立机动模型	145

5.2.2	马尔可夫机动模型	146
5.3	弹道的参数回归模型	149
5.3.1	样条函数模型	150
5.3.2	滑动多项式模型	162
第6章	弹道测量实时数据融合方法	165
6.1	实时数据融合模型	165
6.2	实时滤波方法	167
6.2.1	窗口平滑滤波	167
6.2.2	扩展卡尔曼滤波	169
6.2.3	无迹卡尔曼滤波	170
6.2.4	多级组合 $\alpha - \beta - \gamma$ 跟踪滤波	174
6.3	单目标实时数据融合方法	177
6.3.1	弹道级数据融合方法	177
6.3.2	测元级数据融合方法	183
6.3.3	基于“当前”统计模型和 UKF 的主动段实时融合 方法	188
6.3.4	算例分析	196
6.4	多目标实时数据融合方法	203
6.4.1	基本理论	203
6.4.2	跟踪门	204
6.4.3	数据关联与跟踪维持	208
6.4.4	航迹起始与航迹终结	215
6.5	实时测量数据融合的稳健方法	217
6.5.1	测元数据自检择	217
6.5.2	测元数据互检择	219
6.5.3	基于 UKF 滤波器的 M - M 抗差估计	222
6.5.4	算例分析	225
第7章	弹道测量事后数据融合方法	233
7.1	测量数据的事后融合模型	233
7.1.1	事后融合模型	233

7.1.2	事后融合处理流程	235
7.2	事后融合处理方法	240
7.2.1	基于样条约束的事后融合处理方法	240
7.2.2	基于动力学约束的事后融合处理方法	246
7.2.3	基于残差分析的事后抗差融合处理方法	248
7.3	连续波测速系统事后融合处理方法	262
7.3.1	多测速元素弹道确定的基本原理	263
7.3.2	样条约束 EMBET 方法的工程化改进	271
7.3.3	信标模式与应答模式融合处理方法	275
第 8 章	弹道计算精度评估方法	282
8.1	弹道精度评估方法	283
8.1.1	测量误差传播方法	283
8.1.2	弹道解算精度检验方法	291
8.2	实时弹道的精度评估	292
8.2.1	测量误差传播公式	292
8.2.2	实时弹道外符合评估	324
8.3	事后弹道的精度评估	325
8.3.1	测量误差传播公式	325
8.3.2	事后弹道内符合精度评估	329
参考文献	331

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

导弹武器在设计、研制、改进、定型等过程中,需要开展大量的试验,通过试验数据对各器件、分系统、全系统进行设计验证、指标评定。这些试验包括仿真试验、地面试验和飞行试验等,其中,飞行试验是最接近实战、对导弹各项性能考核最全面的试验,其试验数据是导弹设计、研制、改进和定型最具有说服力的依据。

世界各先进国家为了发展导弹技术,均建设了规模庞大的导弹试验靶场和测控系统。1936年8月,德国在波罗的海什切青湾的乌泽多姆岛北端佩内明德开始兴建火箭靶场,这是世界上第一个导弹试验靶场。在该靶场配套建设了 Campania 多普勒跟踪系统、Messinia 1 型遥测系统(三信道、调幅/调幅型)、Askania 电影经纬仪等。第二次世界大战结束后,美、苏等为争夺世界霸权,纷纷投巨资加速研制弹道导弹和巡航导弹,建立了各自的导弹靶场及其测控系统。美国建设的导弹靶场主要有白沙导弹靶场、空军东靶场、空军西靶场、夸贾林导弹靶场及巡航导弹靶场等;俄罗斯(苏联)建设的导弹靶场主要有卡普斯丁亚尔和萨雷沙甘靶场、拜克努尔靶场(丘拉坦姆)、普列谢茨克靶场等。各靶场均配备了大量的无线电、光学跟踪测量设备和遥测设备等,这些设备组成靶场测控系统,用于完成对导弹发射与飞行的景像记录、弹道参数测量、遥测参数接收、目标特性测量和安全控制等。其中,弹道参数是靶场测控系统最基础、也是最重要的测量要素。

在飞行试验过程中,弹道参数是任务指挥监视、安全控制的重要信息来源。利用弹道参数,可以监视导弹飞行状况,为任务决策提供信息支持;

利用弹道参数,可以判断导弹飞行是否正常,导弹故障是否会对发射场和飞行航区内的生命财产产生威胁,是否会飞出国境等,从而实现对飞行试验的安全控制。在飞行试验后,弹道参数还将发挥更大的作用,可用于导弹制导系统工具误差分离、再入散布和气动特性分析、射击精度评定,以及导弹全弹和各分系统性能的分析、评定等。因此,弹道参数是飞行试验数据非常重要的组成部分。

弹道测量一般为间接测量,雷达、光学经纬仪等测量设备测量导弹目标至测站的距离、距离变化率、方位角、仰角等信息,经过数据处理,计算获得弹道参数。从测量数据到弹道参数的数据处理过程是一个非常关键的过程,采用不同的方法,可以得到不同质量和精度的弹道参数。因此,先进的数据处理技术一直是靶场不断追求和探索的目标。

广义上讲,数据融合也是一种数据处理技术。随着导弹靶场弹道测量设备(传感器)的种类和数量的不断增加,采用传统的数据处理方法已经很难充分发挥多类型、大量测量数据的综合效应,因此,将数据融合技术引入弹道测量数据处理领域是一件顺其自然的事情。但弹道测量有其特殊性,需要将数据融合的一般性理论和方法,针对弹道测量的特殊性开展具体的应用研究。本书是编者及其团队多年来在导弹试验靶场弹道测量领域开展数据融合技术研究和应用的成果总结,主要包括弹道测量的误差模型,弹道模型,弹道测量数据的实时融合处理方法、事后融合处理方法,以及数据融合处理的精度评估方法等。本书研究对象主要是导弹试验测量,其内容都是在导弹试验弹道测量领域实际应用过的数据处理新方法,可直接应用于弹道导弹、巡航导弹等各类型导弹试验,也可应用于相关领域如常规兵器试验、航天发射任务等的弹道、轨道测量数据处理。

1.2 弹道测量数据处理的作用及技术现状

1.2.1 弹道测量数据处理的作用

根据数据处理的时间要求,通常将导弹飞行试验弹道测量数据处理

分为实时数据处理和事后数据处理。

1. 实时数据处理

在导弹飞行试验过程中,对弹道测量系统获取的数据进行即时处理,称为实时数据处理。

实时数据处理的主要作用是为试验任务指挥显示、安全控制、设备引导等提供信息支持。通过对弹道测量系统的测量信息进行实时处理,获取导弹目标的弹道参数,与遥测参数一起,描述导弹飞行状态,为指挥决策、安全控制提供数据依据;同时,为各测量设备提供位置引导,使各测量设备能够快速捕获、跟踪目标。

根据实时数据处理的任务和目的可知,实时数据处理的最基本要求是要快,处理延时要小,处理过程要稳定可靠。因此,一般要求实时数据处理方法要实用、稳健,处理环节不宜过多,处理方法不宜太复杂。在早期,实时数据处理仅采用几何或代数等解析算法,随着安全控制和设备引导对弹道参数精度要求的逐步提高,以及计算机水平的不断发展,实时数据处理方法也发生了较大变化,从多项式滤波、 $\alpha - \beta - \gamma$ 滤波等简单滤波器逐步发展到卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波等先进滤波器,处理信息也从少量的、单台套设备的测量信息发展到大量的、多台套设备测量信息的融合处理。

2. 事后数据处理

在导弹飞行试验结束后,对各测量设备获取的测量数据进行精细处理,综合计算出高精度弹道参数,并对飞行试验关键事件进行深入分析的过程,称为事后数据处理。目前,为了尽快开展飞行试验任务分析、评估,对事后数据处理的时间要求也越来越短。根据处理时间要求和处理精细程度的不同,有时也可将事后数据处理分为准实时快速处理、快速处理和精细处理等几种类型。

事后数据处理的主要作用是为试验任务完成情况评估、故障分析、导弹性能评估、导弹各分系统性能分析、射击精度评估等提供数据依据。事后数据处理报告是试验结果的综合体现,也是整个试验目的的综合体现,因此具有非常重要的作用。

对于导弹飞行试验而言,弹道测量参数最重要的用途是对导弹制导

系统工具误差进行分离,对制导精度、再入气动特性、弹道机动性能等进行分析评估。在这些用途中,弹道测量参数都是作为鉴定比对的标准数据,因此,要求弹道测量参数必须具有一定的精确度,特别是制导系统工具误差分离,对弹道参数的精确度要求非常高。随着现代新型导弹的制导精度越来越高,在飞行试验中,为了鉴定评估高精度的制导系统,对弹道测量精度的要求也越来越高。而事后数据处理是获取高精度弹道参数的一个关键环节,故事后数据处理的最大特点就是最大限度地处理计算出高精度的弹道参数。

1.2.2 弹道测量数据处理方法的发展历程^[1]

随着导弹技术、计算机技术、弹道测量技术及相关专业技术的发展,弹道测量数据处理方法也不断得到相应的发展和提高。

20世纪50年代后期到60年代初期,我国主要试验近程、中近程导弹,靶场的弹道测量设备主要是从苏联引进的光学经纬仪、弹道相机。由于测量设备有限,精度要求也不高,因此数据处理方法很简单。弹道参数的计算方法基本沿用了前苏联的方法,例如利用L公式或K公式等几何方法计算两台经纬仪交会测量的导弹位置参数。20世纪60年代中期,我国自行研制了大型光学经纬仪,用于中程导弹试验的测量,随着测量设备的增多,简单的几何解算公式不能处理冗余测量信息,因此,最小二乘估计方法开始用于多台设备交会测量弹道的数据处理,进而应用多项式最小二乘拟合方法对位置参数序列进行微分获取弹道速度参数,初步解决了导弹飞行速度的测量问题。

20世纪60年代末到70年代中期,我国开始进行中远程和远程导弹试验,为此研制了测量精度高、跟踪距离远的无线电弹道测量系统。为了完成无线电设备的测量数据处理,开展了无线电设备的数据处理方法研究,开发了连续波雷达和单脉冲雷达的数据处理方法。70年代初,我国开展了卡尔曼滤波技术的应用研究,并将卡尔曼滤波器固定增益形式 $\alpha - \beta$ 、 $\alpha - \beta - \gamma$ 滤波器用于某些任务的实时数据处理任务中。同时,将卡尔曼滤波器的另一种特殊形式——递推最小二乘估计应用于事后数据处理。

20 世纪 70 年代后期到 80 年代初,我国开始了远程导弹的高弹道试验和全程试验,对弹道测量精度提出了更高的要求,并要求对整个主动段弹道进行高精度测量,为此,我国研制建设了多套高精度连续波测量系统,对主动段弹道进行联合测量。连续波雷达的系统误差模型复杂,而且精度要求高,多台套设备联合测量也是首次,因此针对高精度测量,靶场专门组织人员,开展了数据处理方法研究,借鉴美国导弹靶场数据处理的先进方法,首次应用 EMBET(基于误差模型的最佳弹道估计方法)和马尔可夫估计(加权最小二乘估计)解算弹道参数,有效地提高了数据处理结果的精度。

20 世纪 80 年代,数据处理方法的发展主要集中于一些先进的统计、估计方法的应用,例如应用统计检验方法辨识测量系统固定误差模型技术、EMMET 自校准的主成分估计方法、岭估计方法及统计检验特征根筛选方法等,在实时数据处理方法中开始将卡尔曼滤波技术应用于再入弹道测量。

20 世纪 90 年代,我国进行新一代战略导弹试验,其制导系统精度更高,所需的主动段弹道测量精度比以往型号的导弹高很多,对再入段弹道测量也提出了很高的精度要求。要完成这样的任务要求,除了要增加弹道测量设备、提高弹道测量设备的精度外,还需要先进有效的数据处理方法。为此,靶场开展了专项的数据处理方法研究。通过专项研究,取得了一系列的成果,使靶场弹道测量数据处理技术水平上了一个新的台阶。这些成果中,包括利用 ARIMA 模型检验观测数据异常值方法,利用逆序检验和游程检验方法检验观测数据平稳性方法,应用周期图辨识隐周期方法,应用 AR 模型统计和预报观测数据随机误差特性的方法,应用频域滤波技术和小波方法抑制观测数据随机误差,采用三维大气模型修正电波大气折射的方法等。特别是研究提出了基于样条约束的 EMBET 方法,该方法在 EMBET 方法的基础上,提出了采用样条函数表示弹道,从而大大降低弹道参数待估数量,间接地大幅增加了观测数据的冗余度,从而可高精度地校准观测数据的系统性误差,显著提高弹道参数的估计精度。这一方法对弹道测量数据处理方法产生了革命性的变化,也是目前开展弹道测量事后数据融合处理的基本方法。