

《武器装备试验分析与评定》系列丛书

丛书主编 唐雪梅

导弹武器 精度分析与评估

唐雪梅 蔡洪 杨华波 曹渊 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

《武器装备试验分析与评定》系列丛书

导弹武器精度分析与评估

唐雪梅 蔡 洪 杨华波 曹 渊 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以导弹武器射击精度指标分析、误差源建模与分离、精度评定方法为主线,系统论述了精度分析与评估中的主要问题,包括导弹的射击精度指标分析、导弹制导误差建模、导弹制导工具误差与初始误差分离、不同试验弹道的折合、基于验前信息的导弹射击精度评估、多源验前信息的融合等。本书内容建立在多年相关领域的科研工作基础之上,覆盖了国内外最新的研究成果和主要的学术思想,是导弹武器精度分析与评估实践经验的总结,对导弹武器试验评估理论领域的研究工作具有较好的借鉴作用。

本书可供从事导弹武器精度分析与评估研究工作的科技人员阅读和参考,也可作为有关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

导弹武器精度分析与评估/唐雪梅等著. —北京:
国防工业出版社,2015. 10
(《武器装备实验分析与评定》系列丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 10297 - 0

I. ①导… II. ①唐… III. ①导弹—精度—评估
IV. ①TJ76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284633 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 21½ 字数 398 千字
2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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

序

导弹武器技术的发展,是现代微电子技术、光电技术、传感器技术、计算机技术、信号处理技术、自动控制技术、精密制造技术等不断发展的集中体现。可以说,现代导弹集多领域的高新技术于一身,是最具代表性的信息化、智能化的高新技术武器。导弹的广泛使用,就像当年的火炮和坦克一样,正促使作战形态发生着重大变化。采用导弹武器可以在数千公里之外对目标实施“外科手术”式的空袭或持续不断的打击,既能快速、突然地达成企图,又避免了直接接触,这也间接促成了“非线式”、“非接触”、“非对称”的“三非”作战样式。当前,许多传统兵器也正在演变为导弹的发射平台,导弹技术不断扩散至现代战场的各个环节,导弹武器已成为信息化条件下局部战争的主战兵器和制胜法宝。

导弹武器的命中精度是其论证、研制、定型和试验使用中最关心的战技指标。命中精度的高低,直接关系到导弹武器的精确打击能力,为此无论论证研制还是使用部门,都极为关注导弹武器的精度指标和命中精度的试验与评估。我国自20世纪五十年代研制导弹伊始,就十分重视导弹武器的精度分析评估工作。尤其是在试验条件受到很大限制的条件下,中远程导弹如何通过有限的、不同状态的试验数据完成精度评估是一项非常困难的任务。从事试验评估工作的科研人员为此付出了大量的心血,研究制定了与之相适应的试验评估大纲标准、保障了多种型号导弹的研制和发展,也催生了误差分离和小子样试验理论等一批极具创新性的理论成果。

当前,随着导航、制导与控制方法的不断发展、试验手段和数据采集技术不断更新、数据挖掘与信息整合理论研究不断深入,导弹武器系统在全寿命周期条件下的命中精度分析与评估可以利用的分析手段和数据资源都出现了前所未有的丰富和深入。因此,在导弹武器高度智能化、信息化和试验评估全寿命周期化的新起点,不仅对现有的精度试验评估流程和方案提出了新挑战,也为精度评估理论方法的创新发展提供了新契机。本书的作者都是在导弹精度分析与评估领

域中从事一线科研的专家学者,他们不仅在本领域具有精深的学术造诣,而且能够深刻把握武器系统精度分析与评估理论的发展方向,本书就是他们根据近年来的精度分析与评估研究和工程实践,适时总结出来的理论成果。

该书着力于导弹武器“准确的误差分析”和“正确的试验评估决策”,全面深入的分析了导弹武器精度试验评估的理论方法和技术体系,展现了作者们近年来的研究成果。全书涵盖了精度指标分析、制导导航误差分析、误差弹道的推算与折合、多源试验信息的融合以及精度试验评估算法等与导弹武器精度试验与评估相关的大部分内容,理论创新性强,算例翔实丰富。该书既可以作为导弹武器论证研制、试验评估研究人员的重要参考,也可为从事该领域研究的高等学校教师、研究生提供理论帮助,其出版将对我国导弹武器精度分析与评估技术的发展起到重要的推动作用。

余梦伦

前 言

导弹武器系统精度分析与评估是指通过一系列的仿真试验和工程试验,获取足够多的有价值的信息,并对其进行融合处理、逻辑组合和综合分析,然后将结果与导弹论证及研制要求中规定的战技指标进行综合比较,从而对导弹武器装备的技术性能进行全面的分析与评估。导弹武器精度分析与评估是导弹武器综合试验与评估的核心问题之一,同时也是导弹武器系统前期论证、立项研制、定型试验的重要组成部分。导弹武器精度分析与评估和其他武器装备的试验与评估的不同之处在于,导弹武器系统不仅制导精度要求很高,还受到地域、经济、政治等因素的制约,试验次数有限。因此,如何有效利用验前数据、有限的现场试验数据以及特殊试验弹道数据,对导弹武器系统进行精度分析与鉴定是一个非常复杂的问题,同时也是一个关系到导弹武器系统是否可以形成战斗力的重大问题。

作者针对导弹武器精度分析与评估中“准确的制导误差分析”和“正确的评估决策”这两项中心工作,结合多年的国防科研工作积累,撰写了本书。本书在参考国内外相关文献的基础上,融进了作者的大量最新研究结果,既关注理论与方法的完整性,又注重理论与方法的工程实用性。本书主要面向论证单位、研制单位、试验单位的相关人员,同时也希望对于从事该领域研究的高等学校教师、研究生等能有所裨益。

本书共分为6章。第1章为概述。第2章介绍了点目标、面目标等假设下的射击精度指标,并对影响导弹武器系统的误差源进行概述,介绍导弹落点偏差计算的一般方法。第3章系统分析了影响导弹制导精度的各类制导工具误差,讨论了惯导系统、星光制导、卫星制导和雷达制导的误差传播特性,分析了初始定位定向误差、再入干扰误差以及重力异常影响等误差源及其作用机理。第4章介绍了导弹飞行试验制导工具误差分离方法,在总结传统分离方法的基础上,将偏最小二乘方法、支持向量机方法和遗传主成分方法等现代数据处理方法应

用于工具误差分离,并与传统方法进行了比较;此外还介绍了基于状态估计的工具误差分离方法和基于噪声统计特征的自适应滤波,并讨论了多模型假设下的状态参数估计方法和适用于非线性模型的 Unscented Kalman 滤波。第 5 章分析了弹道精度折合的主要对象和方法,结合小射程试验弹道和高弹道的折合问题介绍了基于制导工具误差推算的折合方法,讨论了应用线性回归法实现不同弹道的相互折合,最后补充介绍了一些再入误差、后效误差和组合导航误差折合的策略。第 6 章论述了导弹武器的命中精度评定方法,介绍了命中精度评定的经典统计方法和贝叶斯方法;针对仿真信息的应用问题,详细讨论了仿真信息的合理运用,此外还介绍了命中精度评定中的多源验前信息的融合方法。

本书第 1 章、第 3 章由唐雪梅、蔡洪执笔,第 2 章和第 6 章由唐雪梅、杨华波、曹渊执笔,第 4 章和第 5 章由蔡洪、杨华波、曹渊执笔。全书由唐雪梅拟定编写大纲和统稿。

由于学识水平有限、经验不足,疏漏之处在所难免,诚恳希望同行专家和读者不吝赐教。

在撰写过程中,参考了引用文献中的相关成果,并得到单位领导和同事们的支持和帮助,在此一并表示谢意。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导弹武器精度分析与评估的基本概念	1
1.2 导弹武器精度分析与评估的研究现状	2
1.2.1 导弹武器精度分析与评估技术发展概况	2
1.2.2 导弹精度评定方法研究现状概述	4
1.3 内容梗概	11
第 2 章 武器系统精度指标分析	12
2.1 点目标假设下的精度指标分析	12
2.1.1 二维精度指标及相互关系	12
2.1.2 三维精度指标及相互关系	15
2.2 非点目标的精度评定指标分析	17
2.2.1 面目标命中概率计算的一般方法	17
2.2.2 命中区域的圆概率偏差指标分析	19
2.3 导弹武器系统误差源概述及落点偏差计算的一般方法	28
2.3.1 导弹武器误差源概述	28
2.3.2 导弹误差源分析示例	29
2.3.3 落点误差计算的一般方法	32
第 3 章 导弹武器制导误差建模分析	39
3.1 惯导系统误差模型	39
3.1.1 惯性仪表误差模型	39
3.1.2 平台式惯导系统误差模型	42
3.2 惯导工具误差分离建模	68
3.2.1 平台式系统工具误差分离建模	68
3.2.2 捷联式系统工具误差分离建模	73
3.3 组合导航误差模型	80
3.3.1 星光制导误差模型	80

3.3.2	卫星制导误差模型	86
3.3.3	雷达制导误差模型	93
3.4	机动导弹初始误差分离建模	98
3.4.1	初始误差的影响机理	99
3.4.2	初始定位、定向误差的引入	100
3.4.3	初始定向误差与平台调平、对准误差的关系	101
3.4.4	外测信息初步分析	102
3.4.5	初始误差分离模型	104
3.4.6	初始误差分离模型的验证	112
3.4.7	工具误差与初始误差的联合分离模型	114
3.5	再入段误差建模分析	117
3.5.1	弹头再入段空间弹道方程	117
3.5.2	再入段干扰因素分析	126
3.6	重力异常对导弹落点精度的影响分析	136
3.6.1	重力异常对落点偏差的作用机理分析	136
3.6.2	重力异常引起的落点偏差的计算	139
第4章	制导工具误差分离方法研究	145
4.1	基于环境函数矩阵的工具误差分离常用方法	145
4.1.1	最小二乘方法	146
4.1.2	主成分方法	146
4.1.3	约束主成分方法	147
4.1.4	几种方法的总结	147
4.2	基于环境函数矩阵的工具误差分离改进方法	148
4.2.1	衍生特征根主成分方法	148
4.2.2	偏最小二乘方法	149
4.2.3	几种方法的比较	150
4.3	工具误差分离与折合的支持向量机方法	155
4.3.1	统计学习理论基本思想	155
4.3.2	SVM 应用于工具误差分离	156
4.3.3	最小二乘支持向量机方法	159
4.3.4	仿真算例	160
4.4	工具误差系数分离的遗传主成分方法	167
4.4.1	奇异值分解法	169
4.4.2	基于遗传算法的最佳主成分选取	169

4.4.3	工具误差系数分离的仿真验证分析	174
4.4.4	关于工具误差分离的一些其他方法	179
4.4.5	小结	180
4.5	贝叶斯统计滤波的一般表示及噪声统计特性处理方法	180
4.5.1	贝叶斯统计滤波的一般表示	181
4.5.2	线性系统滤波	182
4.5.3	噪声统计特性的 Bayes 极大验后估计	183
4.6	Bayes 自适应滤波及多线性化模型融合滤波	203
4.6.1	Bayes 自适应滤波的一般表示	204
4.6.2	噪声统计特性全部未知情况下的 Bayes 自适应滤波	205
4.6.3	噪声统计特性部分已知情况下的 Bayes 自适应滤波	211
4.6.4	自适应滤波仿真实例	212
4.6.5	非线性系统的多线性化模型融合滤波	213
4.7	非线性系统的 Unscented Kalman 滤波	221
4.7.1	递推滤波分析	222
4.7.2	Unscented 变换	223
4.7.3	Unscented Kalman 滤波	224
4.7.4	仿真实验	225
第 5 章	不同试验弹道精度折合方法	228
5.1	弹道精度折合概述	228
5.2	由小射程试验弹道向全程弹道进行制导工具误差的推算	229
5.2.1	工具误差传播的基本方程	229
5.2.2	工具误差外推的依据	233
5.2.3	工具误差外推方法	235
5.3	由高弹道试验结果向全程弹道进行制导工具误差的推算	237
5.3.1	垂直段分离误差系数 D_1	237
5.3.2	转弯段分离误差系数 D_1	238
5.4	制导工具误差对不同弹道影响的相互推算方法	239
5.4.1	直接推算的依据和前提	240
5.4.2	线性回归模型的建立	241
5.4.3	线性回归模型中自变元选择及回归计算方法	242
5.4.4	由试验弹道的参数 $\delta X_s(t)$ 推算全程的落点偏差	244
5.5	再入误差和后效误差的折合	244
5.5.1	再入误差折合	244

5.5.2	后效误差折合	245
5.6	组合导航误差的折合	246
第6章	导弹武器精度评定方法	249
6.1	概述	249
6.2	命中精度评定的经典统计方法	250
6.2.1	射击密集度评定的经典 χ^2 检验	250
6.2.2	命中精度评定的概率圆检验	252
6.2.3	CEP 的经典估计方法	255
6.3	命中精度的自助评定方法	258
6.3.1	Bootstrap 自助估计方法	258
6.3.2	随机加权估计方法	260
6.4	命中精度评定的 Bayes 方法	263
6.4.1	Bayes 检验的风险分析	264
6.4.2	命中精度纵横向联合 Bayes 检验	266
6.4.3	命中精度的 Bayes 估计	268
6.5	基于序贯 Bayes 分析的命中精度评定方法	271
6.5.1	Bayes 双子样序贯估计	271
6.5.2	依赖于 Bayes 序贯检验的序贯估计	273
6.5.3	随机落点散布的序贯截尾检验和估计	275
6.6	基于最佳试验数决策分析的命中精度评定方法	277
6.6.1	Bayes 决策理论和落点密集度分析	278
6.6.2	导弹落点密集度评估的最优试验数确定方法	281
6.7	命中精度评定中的仿真信息的合理运用方法	287
6.7.1	限制样本容量的方法	287
6.7.2	考虑验前信息可信度的方法	290
6.7.3	幂验前分布方法	298
6.8	命中精度评定中的多源信息融合方法	305
6.8.1	基于可信度的加权融合方法及第二类极大似然估计 (ML-II) 融合方法	305
6.8.2	基于相对熵的多源信息融合方法	308
6.8.3	基于 Bayes 网络的验前信息加权融合方法	313
6.8.4	验前信息的整体推断方法	318
参考文献	329

第 1 章 绪 论

1.1 导弹武器精度分析与评估的基本概念

导弹武器精度分析与评估是导弹武器综合试验与评估的核心问题之一,同时也是导弹武器系统前期论证、立项研制、定型试验的重要组成部分。导弹武器系统精度分析与评估是指通过一系列的仿真试验和工程试验,获取足够多的有价值的信息,并对其进行融合处理、逻辑组合和综合分析,将结果与导弹论证及研制要求中规定的战技指标进行分析比较,对导弹武器装备的技术性能进行全面的分析与评估,其目的在于考核导弹武器装备满足设计指标的程度,为导弹的定型工作、部队使用、研制单位验证设计思想和检验生产工艺提供科学依据。

导弹武器精度分析与评估和其他武器装备的试验与评估的不同之处在于,导弹武器系统不仅制导精度要求很高,还受到地域、经济、政治等因素的制约,试验次数有限。因此如何有效利用有限的现场试验数据以及特殊试验弹道数据,对导弹武器系统、测控系统进行精度分析与鉴定是一个非常复杂的问题,同时也是关系到导弹武器系统是否可以形成战斗力的重大问题,世界各军事强国都十分重视。美国把武器装备的试验鉴定以独立的科研工作列入国防部的“管理与支援计划”。苏联称合理的精度鉴定方法应是“用理论计算和试验来检测某些特性相结合的方法”,其主要思想是按照精度分析的特点和规律,把先验信息有机地结合并加以利用,获得较为完备的先验估计,并通过少量的全程飞行试验实现导弹等武器装备的定型。

导弹武器精度分析与评估的研究就是围绕“准确的制导误差分析”和“正确的评估决策”这两项中心工作展开的。对于中远程导弹而言,按飞行轨道阶段的特征可以分为主动段、自由飞行段和再入段,引起落点偏差的主要因素就是制导系统误差,因此分析制导精度,并对工具误差系数进行分离,是一项非常重要的工作;此外,考虑到无法进行大量全程飞行试验,基于经典大子样下的统计推断方法就遇到了困难,因此必须综合利用不同状态下的试验数据,在不同试验弹道折合、多源试验信息融合以及最佳试验方案选择设计的基础上建立正确合理的导弹精度评估决策方案。

1.2 导弹武器精度分析与评估的研究现状

自从导弹作为精确攻击武器系统进入现代战场火力体系,其战技指标就备受研制、鉴定和使用部门的关注。命中精度作为导弹的重要战技指标,得到了广泛而深入的研究。与命中精度相关的研究方向主要集中在影响命中精度的误差因素分析、建模与分离,命中精度指标的评定以及相关的数学方法,如 Bayes 方法、统计滤波、多源信息融合等。本节简要介绍相关内容的研究现状。

1.2.1 导弹武器精度分析与评估技术发展概况

导弹武器系统精度分析与评估就是通过统计分析各种类型的地面试验和各种弹道飞行试验结果,检验落点精度是否达到战术技术指标,找出造成落点偏差的主要误差源,为改进设计、修正系统误差、提高导弹的命中精度提供理论依据。影响导弹命中精度的因素有很多,如制导工具误差、制导方法误差、大气扰动误差、引力异常、后效冲量、再入误差等。由于受政治、经济及其他条件的限制,仅采用大量的全程飞行试验进行导弹武器系统精度分析与评估不仅难以承受经济成本,而且单一的试验方式也难以全方位考核导弹武器的性能,也难以适应精度分析与评估的需求,因而从 20 世纪五六十年代起美、苏美等国都开始探索导弹精度评估的途径,其主要特征概述如下。

1. 拓展多元化试验途径

以美国为例,主要从下列几个方面拓展远程弹道导弹的精度评定试验途径:

(1) 努力提高靶场测量设备精度。

洲际弹道导弹精度主要依靠高精度的外弹道测量数据来评估,美国先后利用不同体制的雷达、光学设备、GPS 等手段获取试验信息。

(2) 充分的地面试验与特定飞行试验。

大量的、接近实际环境条件的、不同方式的试验是精度评估所必需的。其主要试验包括:

① 实验室试验。

用精密倾斜台、精密振动台、精密离心机等设备来测量加速度表的灵敏度、比例系数等;用翻转试验、伺服试验、振动试验等方法来获得陀螺的各项漂移误差系统;用温度箱、湿度箱、低气压箱、振动台、冲击机等模拟高低温、低气压、振动、冲击等各种环境,对惯性制导设备进行环境试验。

② 火箭撬试验。

火箭撬试验是介于实验室试验和飞行试验之间的一种“地面飞行试验”,是现有地面试验中模拟恶劣环境下最为逼真的导弹推进试验,美国将火箭撬试验

列入制导系统试验大纲,作为地面试验的最后阶段。

③ 特定的飞行试验。

在外测精度不够的情况下,美国为了分离制导系统的各项误差,曾先后探索过多种试验方案,如制导鉴定弹(GEM)、改变飞行弹道、改变惯性测量装置的定向、乘坐公共汽车方案(“搭乘”方案)等,其目的都是为了利用有利的跟踪几何或弹道形状以实现惯性元件误差的分离,以鉴定制导系统精度。

(3) 制导系统的研制具有继承性、天地一致性,并经过实际飞行考验。

美国研制的惯性测量制导系统具有以下特点:惯性测量装置继承性强;惯性测量装置的性能、精度基本上做到天地一致;惯性测量装置经过充分的地面试验或飞行试验后才能上型号。

(4) 注重实弹考核飞行试验。

2. 实弹考核飞行试验

对导弹武器系统最全面、最严格的考核最终还要靠实弹飞行试验。美国特别强调这一点,每研制一种新的型号都要发射几十发甚至几百发之多。

充分利用全寿命周期试验信息从最新的试验与鉴定技术的发展趋势来看,试验鉴定的模式已由传统的试验—改进—再试验转变为建模—仿真—试验,即仿真、试验评价过程(Simulation Test Evaluation Process, STEP)。STEP使得试验鉴定尽早开始,并且在建造物理原型之前可以对系统的性能进行预测以评价系统的军事价值。因此,利用全寿命周期中的模型、仿真结果和试验数据,充分结合信息融合技术、Bayes小样本理论、原型试验系统,是导弹武器装备试验与鉴定技术的发展方向。

以苏联为例,他们关于导弹精度评估的一致看法是:对导弹制导系统精度评估和落点命中精度评估只依靠飞行试验分析是不行的,合理的方法应该是理论计算和试验检验相结合,加强统计分析,加强统计理论的研究。在研制过程中应拟制综合试验大纲的方案,从元件检查开始,到单元测试、综合测试直到飞行试验全面安排计划、积累验前数据,把理论计算、地面试验、同类仪表飞行试验数据综合利用。根据验前信息的完备程度,在给定置信度之下求出为评估系统性能所必需的飞行试验发数。他们所使用的方法多为Bayes方法和极大似然法等。为了获取全程飞行试验的验前数据,还应用了统计试验法,在计算机上进行模拟打靶,然后以少量全程飞行试验予以验证,达到精度评估的目的。

俄罗斯部署的“白杨”-M导弹的试验与鉴定工作体现了现代武器试验工作的新方向。“白杨”-M导弹的工程研制只用了不到5年,部署前只进行了4次研制飞行试验,其工程研制时间之短,部署前飞行试验次数之少,在国外主要战略型号中是很少见的。从“白杨”-M导弹的研制过程可以看出,全寿命周期的概念在武器系统试验与鉴定中具有重大意义。“白杨”-M导弹的定型依赖

的信息主要包括:成熟的技术应用(预先研究奠定了基础)、研制阶段大量地面试验和检测、良好的继承性(和“白杨”导弹大致相同的设计)、“白杨”导弹大量的作战试验信息以及少量的“白杨”-M 导弹定型试验信息。同样,“白杨”-M 导弹的作战试验信息可以用于进一步的性能鉴定或为下一个型号的研制积累试验信息。因此,武器系统的试验鉴定并非单纯依赖少量的定型试验,而是依赖于武器系统全寿命周期的多源信息。

3. 推广应用基于小子样统计推断、多源信息融合等理论的精度评估方法

导弹武器装备试验是典型的“小子样、异总体、高性能”,小子样是指每一阶段特别是定型阶段的试验信息比较少,但整个试验过程由不同的试验阶段组成,各个试验阶段的试验信息是异总体,同时先进武器装备的精度等性能指标都很高。在这种情况下,如何有效运用异总体信息来分析研究导弹武器精度确实是一个比较棘手的难题。

一方面,对于武器系统研制人员和使用人员而言,他们在长期的实践中积累了关于武器系统的丰富经验,另一方面,在导弹武器系统全寿命周期内储备了大量的相关试验信息,这为 Bayes 统计决策方法的运用提供了得天独厚的土壤。通过运用 Bayes 小子样统计推断理论,把试验之前的各类信息作为验前信息,利用现场试验信息对验前信息进行修正,最后得到的结果既利用了验前信息,又利用了现场试验信息。从信息论的角度来看,这种方法利用了多源试验信息,在试验次数较少的情况下,可以得到合理的结论。

随之而来的是大量验前信息的处理问题。针对异质多源信息,首先需要确定其在验前信息的权重。信息熵、可信度、证据理论等相关的多源信息融合理论都被逐步引入验前信息的融合算法。同时,考虑先验信息的最小二乘、统计滤波等方法也广泛应用于导弹制导误差的分析。此外,由于仿真技术的不断完善,为进一步减少试验次数提供了可能。通过对武器系统进行详细分析,建立仿真模型,然后进行仿真试验,以获得大量的仿真数据。如果所建立的仿真模型对武器系统的模拟精度足够高,那么这些仿真信息便可以作为验前信息,进行 Bayes 统计决策分析。利用仿真信息进行导弹精度评估是目前的一种通行做法,有助于缩短研制周期,减少研制经费。仿真技术的应用必须解决两个关键问题:一是仿真模型的确认,对于精度评定而言,仿真模型非常复杂,涉及许多方面;二是仿真信息合理应用的问题,由于仿真子样容量较大而现场子样容量较小,必须避免仿真子样“淹没”现场子样的问题。这方面的工作目前仍在不断发展之中。

1.2.2 导弹精度评定方法研究现状概述

1. 导弹误差分析

影响导弹命中精度的因素有很多,如制导工具误差、制导方法误差、引力异

常、后效冲量、再入误差等,在这些因素中,惯导工具误差影响最大,约占整个命中精度的60%~80%^[1],所以惯性测量系统的标定与补偿在提高战略导弹打击精度中显得非常重要。从统计学意义上来说,应该有尽可能多的导弹全程飞行试验落点数据,以便评定导弹命中精度。由于受政治、经济及其他条件的限制,战略导弹飞行试验通常是特殊弹道,并不是需要评定的全程弹道,而且即使是特殊弹道飞行试验,试验次数通常很少。由于飞行试验目的不同,飞行程序也与全程弹道截然不同,飞行环境发生了变化,因此,这些特殊弹道的落点信息不能直接作为全程弹道的落点信息对待,实际中通常是将试验弹道中惯导系统误差系数通过测量数据估计出来,然后折合到全程弹道,形成全程弹道落点信息,这就是工具误差的分离与折合问题。

战略弹道导弹对惯导系统精度要求较高,一般使用平台式惯导系统,但是平台式系统成本比捷联式系统昂贵得多,而导弹飞行试验属于破坏性试验,所以飞行试验的成本是必须考虑的问题。随着技术的发展,捷联式惯导系统精度得到很大提高,为节省导弹成本,捷联惯导系统逐渐被应用于中、近程弹道导弹。平台式系统在飞行过程中其平台坐标系是不变的(忽略陀螺仪漂移),弹道跟踪数据可以直接转换到该坐标系下,其分离模型较为简单^[1]。而捷联系统惯性测量器件直接与载体固连,其敏感到的遥测信息是在瞬时坐标系中表示的,必须实时计算姿态矩阵才能进行坐标转换,而姿态矩阵算法的精确性与快速性一直都是研究的重点问题^[2]。禹维绩^[3]讨论了战术导弹捷联系统误差分离问题,但是该文没有给出具体的分离过程。Joos^[4]介绍了某型捷联系统各类误差参数的测试标定方法与参数估计方法,杨萍^[5]等人将两次遥测数据之间的姿态变化看成小量,利用线性化方法对环境函数矩阵进行递推计算,这种方法在计算过程中引入了舍入误差,随着积分时间的增加,舍入误差将会被放大。目前,对于弹道导弹捷联惯导系统误差分离问题的讨论还没有见到公开文献。

战略弹道导弹为增加生存能力与打击能力,常采用机动发射方法,如公路机动发射、潜艇水下发射等方式,国外的几种主要弹道导弹型号都装备有机动发射,如俄罗斯的“白杨”及“白杨”-M导弹装备有公路机动发射型号,美国的PeaceKeeper导弹则装备有潜射型号。在机动发射情况下,特别是潜艇发射,确定导弹发射时的初始发射参数,包括导弹发射瞬时定位参数、定向参数以及载体运动速度,常常存在较大的偏差。对于陆基机动发射导弹,发射点的大地坐标一般通过阵地控制测量^[6]方法得到,而天文定向参数一般通过天文测量方法得到^[7,8]。但现有方法的快速性尚不能完全满足要求,因此利用GPS、GLONASS、北斗双星等导航卫星进行定位定向的方法受到了重视^[9-11]。但该方法只能确定大地坐标和大地方位角,天文定向参数需要基于已知的垂线偏差求解。对于海基发射导弹而言,发射时潜艇的位置由艇上导航设备给出,垂线偏差由艇上计

算机根据扰动引力场数据计算得到,而方位角测量由艇上瞄准系统给出。高明坤^[12,13]介绍了海上导弹瞄准系统的误差特性并进行了试验鉴定,王悦勇^[14]等人介绍了舰船初始瞄准方位角外测岸标的标定方法、原理和方位角的解算问题,虽然如此,方位角的测量仍然存在很大的误差。

机动发射导弹的初始发射参数误差对导弹落点产生很大的影响,这一问题已有很多人讨论过^[15-18]。机动发射导弹、特别是潜射导弹由于发射环境恶劣,发射载体受到海浪、洋流、振动等的影响,初始发射参数的测量都存在误差,导致导弹诸元装订中的初始发射参数存在误差,理论分析与仿真计算表明,它与惯导工具误差的量级是相当的^[19,20]。但是在导弹精度评定中,一般是针对制导工具误差的评定,而机动发射导弹初始发射参数误差引起的导弹落点偏差与制导工具误差引起的落点偏差耦合在一起,所以机动发射导弹工具误差分离中必须考虑初始发射参数误差的影响,从弹道遥测、外测数据中分离出初始发射参数误差与制导工具误差。关于平台系统制导工具误差的分离模型及方法,已有很多讨论,但是对于初始发射参数误差分离的讨论,公开文献很少,姚静^[19]等人仅从初始发射参数误差对落点的几何偏移、初值偏差入手讨论该问题,而实际上,初始发射参数误差对落点的影响不仅有几何偏移、初值偏差,还包括受力偏差,在很多情况下受力偏差是不可忽略的,该文中的仿真结果也指出方位角误差估计不准,而方位角误差是初始发射参数误差中最主要的误差源^[20,21]。初始发射参数误差分离是机动发射弹道导弹制导精度评定中的重要问题,也是一个难点问题。

2. 制导工具误差分离方法

从数学模型上来说,不论是平台式系统,还是捷联式系统的工具误差分离,抑或初始发射参数误差分离,都是高维线性估计问题,特别是工具误差分离问题,因为弹道特性与测量误差等因素的影响,许多情况下环境函数矩阵具有严重的复共线性(病态),给参数估计带来很大困难。这个问题主要从两个方面解决。一是设计能够充分激励所有误差源的飞行试验弹道,如自旋弹道、偏航弹道等,降低环境函数矩阵的病态。美国为了分离制导系统的各项误差,曾先后探索过多种试验方案,先后研制了制导鉴定弹(Guidance Evaluation Missile, GEM)和制导误差分析飞行器(Guidance Error Analysis Vehicle, GEAV)^[22],以充分了解惯性系统的误差模型,同时还进行了改变飞行弹道、改变惯性测量装置定向、汽车搭乘等方案的试验,目的是改善观测条件,减小环境函数矩阵的病态。但这需要花费大量的人力、物力与财力,以我国目前的情况看,实施大量的特殊弹道试验还不大现实。二是通过采取有效的参数估计技术,在现有基础上获取较高精度的误差分离结果。目前工具误差分离常用的方法包括最小二乘法^[23-25]、岭估计方法^[26]、主成分方法^[27,28]等各种压缩估计方法,但是这些方法仍然没有很好地解决误差分离问题。王正明^[29]等将制导工具误差与外测系统的系统误差