

# 外弹道测量精度 分析与评定

Accuracy Analysis and Evaluation for  
Exterior Ballistic Measurement

刘利生 吴斌 吴正容 孙刚 杨萍 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 外弹道测量精度 分析与评定

Accuracy Analysis and Evaluation  
for Exterior Ballistic Measurement

刘利生 吴斌 吴正容 孙刚 杨萍 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

外弹道测量精度分析与评定 / 刘利生等著. —北京:  
国防工业出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-118-06559-6

I. ①外... II. ①刘... III. ①导弹弹道 - 外弹道 - 测  
量 - 精度②航天器 - 外弹道 - 测量 - 精度 IV. ①TJ013.2  
②V556.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 013424 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 $\frac{7}{8}$  字数 328 千字

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 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

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**  
评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(以下按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 吴有生 吴宏鑫

何新贵 张信威 陈良惠 陈冀胜

周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

本书主审委员 李德仁

# 序

外弹道测量是导弹、航天器飞行试验的一项基本任务,也是导弹、航天器试验工程的重要组成部分。外弹道测量是利用天基、地基光学和无线电测量系统跟踪测量并确定导弹或运载火箭的飞行轨迹,以此考核、评定导弹或运载火箭的技术性能和精度,为型号的定型和改进提供重要的依据。半个世纪以来,由于我国导弹和航天事业的巨大进步,使得其测控工程也得到了飞速的发展,并已建成了能够满足不同类型导弹、航天器飞行试验任务的多种测控网。

随着导弹和航天器技术的发展,不同用途和类型的导弹、航天器试验越来越多,其试验内容越来越丰富,试验要求也越来越高,这大大增加了外弹道测量技术的难度和复杂性。为此,必须进一步提高外弹道测量的技术水平才能满足新的试验任务的要求。本书系统地总结了我国数十年来外弹道测量精度分析和评定技术,详细地论述了以测量精度为核心的试验精度评定技术、外弹道测量精度要求的论证方法;外弹道测量体制、各种解算弹道参数的方法与相应的精度估算方法;外弹道测量系统测量精度评定技术和方法等有关内容;这些技术是导弹航天测控系统总体方案论证、设计和制定工作的重要的基础性研究工作,对于提高外弹道测量技术水平具有很大的促进作用。

为了适应新的试验任务和要求,本书还充分应用数理统计的参数估计、数字滤波、函数逼近等理论,紧密地结合多测量源的自校准与自鉴定、数据融合处理等技术,提出了关于导弹和运载火箭的精度评定、外弹道测量弹道精确解算和外弹道测量系统精度评定等方面的新的技术途径和方法,对于提高外弹道测量精度、改进

导弹及外弹道测量系统精度评定技术及增加其评定结果的准确性和可信度,都具有明显的效果和作用。

本书内容丰富,紧密结合我国导弹航天测控工程实践,是作者多年科研工作的结晶,具有较高的学术水平和应用价值,对于导弹航天测控系统总体设计工作具有很好的指导作用,对于提高外弹道测量的技术水平起着积极的促进作用。期望该书的出版,能够为从事导弹航天工程测控以及相关领域的科研人员提供有价值的参考,并在科学研究和工程应用中起到很好的借鉴和促进作用。

沈学俊

二〇〇九年九月一日



# 前 言

外弹道测量指利用光学和无线电外测系统跟踪测量并提供导弹或运载火箭飞行试验弹道参数的过程。它是导弹、航天器飞行试验的一项基本任务,也是导弹、航天器试验工程的重要组成部分。外弹道测量的主要目的是评定、改进导弹或运载火箭的技术性能和精度,为安全控制系统实时提供安全信息、为航天器系统提供运载火箭入轨参数等,这对于保障导弹、航天器试验任务的完成并促进其技术的发展具有重要的意义。

随着导弹和航天器技术的发展,各种用途的导弹和航天器类型越来越多,其试验内容越来越丰富,测量要求越来越精确。系统和完整地总结我国近半个世纪以来的外弹道测量精度分析和评定技术,对于导弹、航天器试验工程测控系统总体方案的论证、设计和制定,对于促进和发展外弹道测量技术和试验场建设都具有重要的作用。

本书是作者根据近几年来工程任务需要和总结几十年外测系统总体工作经验的成果,特别是作者紧密联系工程实际,系统地论述了外弹道测量精度分析和评定的方法和计算公式,并提出一些新的外弹道测量精度评定技术和方法,这对于合理地论证、设计和制定外弹道测量系统总体方案和提高其设计能力,对于满足新一代外弹道测量系统测量精度评定需要和提高其技术水平,都是极为有益的。

全书共分 10 章,第 1 章绪论,第 2 章测量与测量误差,第 3 章地球参数椭球体和常用坐标系,第 4 章外弹道测量精度要求,第 5 章外弹道测量体制,第 6 章外弹道测量系统,第 7 章外测数据解算弹道的方法,第 8 章测量误差传播的精度估算方法,第 9 章测量精

度仿真估计方法,第10章外测系统测量精度评定。其中吴斌研究员参与撰写了第1、2、5章,刘利生研究员参与撰写了第2、3和第7至10章,杨萍工程师参与撰写了第3、4章,吴正容高级工程师参与撰写了第5、6章,孙刚工程师参与撰写了第6、7章,全书由刘利生研究员统稿。

本书的编写得到所在单位北京跟踪与通信技术研究所的领导和机关的大力支持和帮助。钱卫平研究员、谢京稳研究员对本书的编写和出版给予了极大的关注和支持,李波、郭军海研究员除了积极支持和关心本书的编写和出版外,还为编著人员创造了良好的环境,杨潇、张彪、王爽等同志为本书的编写、翻译、打印和组织等做了大量极为繁琐而有意义的工作;此外,孙宝升、樊世伟研究员为本书的编写提出了许多宝贵而中肯的意见和建议;特别是两院院士、武汉大学李德仁教授和航天工程专家沈荣骏院士在百忙之中对本书进行了认真和细致的审阅,提出了许多具有指导意义的建议;在此,对他们的辛勤劳动和热情帮助一并表示衷心的感谢。除此,本书还得益于国防科技图书出版基金及基金评审委员会的肯定、支持和赞助,为本书顺利出版创造了有利条件,谨向国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社表示诚挚的感谢。

编者本着专著的特点和要求,力求突出思想新颖、具有创见的知识和内容,以促进测控专业技术水平的提高和发展。本书可供从事本专业的研究人员学习和参考,也可以供相关专业的高等院校师生阅读和参考。由于编者的理论和学术水平有限,难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

编者

二〇〇九年十月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 外弹道测量的作用和技术发展	1
1.1.1 外弹道测量的作用	1
1.1.2 外弹道测量技术发展	2
1.2 外弹道测量精度分析与评定	3
1.2.1 外弹道测量精度分析	3
1.2.2 外弹道测量系统精度评定	5
第 2 章 测量与测量误差	7
2.1 测量与分类	7
2.1.1 测量的概念	7
2.1.2 测量的分类	7
2.2 测量误差与分类	8
2.2.1 测量误差	8
2.2.2 测量误差分类	8
2.2.3 测量误差度量	10
2.2.4 外弹道测量的误差源	11
第 3 章 地球参考椭球体和常用坐标系	15
3.1 地球参考椭球体	15
3.1.1 大地水准面	15
3.1.2 地球参考椭球体	16
3.1.3 子午面和卯酉面	17

<b>第 4 章</b>	<b>外弹道测量精度要求</b>	<b>33</b>
4.1	弹道式导弹飞行弹道特性及误差因素	33
4.1.1	弹道式导弹的飞行弹道	33
4.1.2	导弹落点偏差和精度	35
4.1.3	导弹精度指标	37
4.2	导弹落点的干扰因素和制导工具误差	38
4.2.1	导弹飞行的干扰因素	38
4.2.2	制导原理及工具误差模型	39
4.3	导弹和运载火箭精度评定技术和方法	57
4.3.1	精度评定中应用的估计方法	57
4.3.2	导弹精度的评定技术和方法	70
4.3.3	外弹道测量精度指标论证	80
<b>第 5 章</b>	<b>外弹道测量体制</b>	<b>84</b>
5.1	外测体制分类	84
5.1.1	测角体制	85
5.1.2	测距测角体制	86
5.1.3	测距体制	87
5.1.4	距离及距离差体制	88
5.1.5	距离和测量体制	92
5.2	外测体制与布站设计	95
5.2.1	最优测量几何	96
5.2.2	测量覆盖要求	97
5.2.3	设备跟踪性能	98
5.2.4	火箭喷焰影响	98
5.2.5	其他条件	99
<b>第 6 章</b>	<b>外弹道测量系统</b>	<b>100</b>
6.1	光学测量系统	100

6.1.1	光电经纬仪(电影经纬仪)	101
6.1.2	弹道相机	106
6.2	无线电测量系统	109
6.2.1	连续波测量系统	109
6.2.2	脉冲雷达	115
6.2.3	GPS 测量系统	115
6.2.4	无线电测量系统跟踪与 测量基本技术	117
<b>第7章</b>	<b>外测数据解算弹道的方法</b>	<b>123</b>
7.1	多台测角体制解算弹道方法	123
7.1.1	“L”、“K”和“M”公式	124
7.1.2	方向余弦法	127
7.1.3	最小二乘估计法	130
7.1.4	递推最小二乘估计方法	131
7.1.5	弹道速度和加速度的解算方法	133
7.2	测距测角体制解算弹道方法	135
7.2.1	单站测量的弹道位置参数 解算方法	135
7.2.2	多站交会测量的弹道位置 参数解算方法	136
7.2.3	速度和加速度参数解算方法	138
7.2.4	加速度参数计算公式	140
7.2.5	其他参数计算公式	140
7.3	多 $RR$ 体制解算弹道方法	140
7.3.1	$3RR$ 测量元素解算弹道方法	140
7.3.2	多 $RR$ 测量元素解算方法	147
7.4	连续波测量系统解算弹道方法	150
7.4.1	干涉仪体制解算方法	150

7.4.2	多站 $S\dot{S}$ 体制解算方法	157
7.5	连续波测量系统联测解算弹道方法	157
7.5.1	两套干涉仪联测解算方法	158
7.5.2	单套干涉仪与单套多站连续波 系统联测解算方法	162
7.5.3	多套连续波测量系统联测解算方法	166
7.6	多套连续波测量系统的融合解算方法	169
7.6.1	“EMBT”自校准技术	170
7.6.2	基于残差方程解算的“EMBT”方法	177
7.6.3	“EMBT”的主成分估计方法	180
7.6.4	弹道样条约束的“EMBT”方法	182
7.6.5	系统误差模型检验和辨识	187
<b>第8章</b>	<b>测量误差传播的精度估算方法</b>	<b>189</b>
8.1	测量误差传播	190
8.1.1	测量误差传播原理	190
8.1.2	外弹道测量误差传播的理论公式	192
8.2	各种测量体制的精度估算公式	195
8.2.1	$nA、E$ 体制精度估算公式	195
8.2.2	$R、A、E$ 体制的精度估算公式	203
8.2.3	$nR\dot{R}$ 测量体制的精度估算公式	208
8.2.4	$R、A、E$ 和 $3\dot{R}$ 体制的精度估算公式	221
8.2.5	干涉仪测量体制的精度估算公式	230
8.2.6	$n\dot{S}$ 测量体制的精度估算公式	240
8.3	多种测量体制组合的精度估算公式	244
8.3.1	两套干涉仪联用精度估算公式	245
8.3.2	单台干涉仪与多站连续波系统联用 精度估算公式	260
8.3.3	两套干涉仪和两套多站连续波系统联用	

精度估算公式 .....	277
<b>第 9 章 测量精度仿真估计方法</b> .....	<b>298</b>
9.1 测量量仿真模拟方法 .....	298
9.1.1 系统误差模型 .....	299
9.1.2 测量量仿真模拟和测量精度估计 .....	305
9.2 几种解算方法的测量精度公式 .....	306
9.2.1 “EMBT”测量精度估算公式 .....	306
9.2.2 样条约束“EMBT”测量精度估算公式 .....	318
<b>第 10 章 外测系统测量精度评定</b> .....	<b>332</b>
10.1 外测系统测量精度评定的原理和方法 .....	332
10.1.1 外测系统测量精度评定的目的和任务 .....	332
10.1.2 外测系统精度评定原理 .....	333
10.1.3 外测系统测量精度评定 .....	335
10.1.4 外测精度评定的比较标准 .....	336
10.1.5 外测系统精度评定的方法 .....	340
10.2 外测系统的系统测量精度评定方法 .....	344
10.2.1 变量差分法 .....	344
10.2.2 最小二乘拟合残差法 .....	349
10.2.3 样条多项式拟合残差法 .....	355
10.2.4 卡尔曼自适应统计方法 .....	358
10.3 外测系统测量精度自我鉴定技术 .....	361
10.3.1 “EMBT”自我鉴定技术 .....	362
10.3.2 样条约束“EMBT”自我鉴定技术 .....	363
10.3.3 轨道约束“EMBT”自我鉴定技术 .....	364
10.3.4 轨道约束“EMBT”技术递推方法 .....	375
<b>参考文献</b> .....	<b>383</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>General</b>	1
1.1	The Importance and Technique Development of Exterior Ballistic Measurements	1
1.1.1	The Importance of Exterior Ballistic Measurements	1
1.1.2	The Technique Development of Exterior Ballistic Measurement	2
1.2	The Accuracy Analysis and Evaluation of Exterior Ballistic Measurement	3
1.2.1	The Accuracy Analysis of Exterior Ballistic Measurement	3
1.2.2	The Accuracy Evaluation of Exterior Ballistic Measuring System	5
<b>Chapter 2</b>	<b>Measurements and Errors</b>	7
2.1	Measurements and Its Classification	7
2.1.1	The Concept of Measurements	7
2.1.2	Classification of Measurement	7
2.2	The Measurement Error and Its Classification	8
2.2.1	The Measurement Error	8
2.2.2	The Classification of Measurement Error	8
2.2.3	The Scalar of Measurement Error	10
2.2.4	The Error Source of Exterior Ballistic	



	Measurement .....	11
<b>Chapter 3</b>	<b>Reference Spheroid of Earth and Coordinates in Common Use .....</b>	<b>15</b>
3.1	Reference Spheroid of Earth .....	15
3.1.1	Geoid .....	15
3.1.2	Reference Spheroid .....	16
3.1.3	Meridian Plane and Prime Vertical Plane .....	17
3.2	Coordinates System in Common Use .....	17
3.2.1	Geocentric Rectangular Coordinate System .....	17
3.2.2	Geodetic Coordinate System and Astronomical Coordinate System .....	18
3.2.3	Launch Coordinate System .....	20
3.2.4	Measurement Coordinate System .....	21
3.2.5	Launch Inertial Coordinate System .....	21
3.2.6	Launch Inertial Coordinate System .....	22
3.3	Transformation of the Coordinate Systems .....	22
3.3.1	The Relation between the Geocentric Geodetic Coordinate System and Geocentric Rectangular Coordinate System...	23
3.3.2	The Relation between the Geocentric Rectangular Coordinate System and Launch Coordinate System .....	24
3.3.3	The Relation between the Geocentric Rectangular Coordinate System and the Normal Measurement Coordinate System...	25
3.3.4	The Relation between the Normal Measurement Coordinate System and the	