



靶场外测设备精度鉴定

刘丙申 刘春魁 杜海涛 编著



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

靶场外测设备精度鉴定

刘丙申 刘春魁 杜海涛 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

靶场外测设备精度鉴定 / 刘丙申, 刘春魁, 杜海涛编著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 3

总装部队军事训练“十五”统编教材. 科研试验系列

ISBN 978 - 7 - 118 - 05455 - 2

I. 靶... II. ①刘... ②刘... ③杜... III. 靶场 - 观测设备 - 精度 - 鉴定 - 教材 IV. TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177601 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)

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 12¼ 字数 350 千字

2008 年 3 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

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 电子装备试验系统编委会

主任委员 陈永光

副主任委员 黄惠明

委 员 (按姓氏笔画排序)

叶 伟 刘光军 李 军

汪连栋 郝光宇 程乃平

秘 书 李志友 唐文红

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

靶场外测设备精度鉴定是靶场测控总体工作的重要组成部分,是导弹、卫星、航天发射、常规武器和电子装备试验场区必要的一项经常性工作。

随着靶场测控事业的不断发展,对外测设备精度鉴定工作提出了新的更高要求。为适应新装备鉴定任务的需要,确保空间位置定得准、靶场环境看得透,提高靶场整体测控试验水平,我们编著了《靶场外测设备精度鉴定》教材。本书在多次征求有关单位和专家意见、总结几十年靶场外测设备精度鉴定任务实践经验的基础上,增加了自鉴定技术在精度鉴定中的应用。

本书由总装备部司令部测控局、总装备部第三十三试验训练基地共同编著。主要编著人员有刘丙申、刘春魁、杜海涛、丁洪喜、王文、陈良友、韦庆洲、苏玉瑞、段小明和王伟。刘丙申、刘春魁、杜海涛负责全稿的统编工作,苏玉瑞负责本书的编辑、插图绘制等工作。全书由刘利生研究员主审。在编著过程中,得到了总装备部司令部、总装备部第三十三试验训练基地和总装备部测量通信总体研究所等单位的大力支持,在此深表感谢。

本书力求做到理论与实践相结合,反映当前的新技术和应用,但由于作者水平有限,书中难免有不足和错误之处,恳请读者批评指正。

目 录

第1章 概论	1
1.1 概述	1
1.1.1 外弹道测量和外测设备	1
1.1.2 靶场外测设备的精度鉴定	3
1.1.3 精度鉴定试验在靶场测控系统建设中的 作用和意义	6
1.1.4 靶场外测设备精度鉴定的目的	7
1.2 靶场外测设备精度鉴定试验的主要方法与特点	8
1.2.1 靶场外测设备精度鉴定方法	8
1.2.2 靶场外测设备精度鉴定方法的特点	13
1.2.3 现阶段我国靶场外测设备精度鉴定方法	15
1.3 我国航天测控网建设中主要应用的精度鉴定设备	16
1.3.1 弹道相机系统	16
1.3.2 电影经纬仪	16
1.3.3 GPS 精度鉴定系统	17
1.4 我国航天测控网建设中精度鉴定的发展概况和展望	17
1.4.1 我国靶场外测设备精度鉴定工作的发展概况	17
1.4.2 我国靶场外测设备精度鉴定工作展望	20
参考文献	22
第2章 靶场外测设备精度鉴定	23
2.1 外弹道测量及其描述	23
2.1.1 坐标系	24
2.1.2 时间系统	33

2.2 测量误差及其处理方法	40
2.2.1 测量误差基本概念	40
2.2.2 外测设备的误差模型	42
2.2.3 误差理论	43
2.2.4 系统误差的处理和修正	46
2.2.5 随机误差的分析与统计	49
2.2.6 异常值的检验与处理	60
2.2.7 误差的合成与分配	62
2.3 外测设备的精度分析方法	67
2.3.1 外测设备的精度	67
2.3.2 外测系统的误差传播分析	69
2.4 外测设备精度鉴定的基本原理	77
2.4.1 测量标准设备比对评定法概述	77
2.4.2 测量标准设备比对评定法对试验数据的要求	78
2.4.3 测量标准设备比对评定法的数据处理过程	79
参考文献	87
第3章 靶场外测设备精度鉴定试验的总体技术工作	88
3.1 精度鉴定试验方案的总体设计	88
3.1.1 精度鉴定试验总体设计的基本要求	88
3.1.2 精度鉴定试验总体方案的初步设计	90
3.1.3 精度鉴定试验总体方案的优化与确定	95
3.2 精度鉴定试验基本参试系统的作用和要求	98
3.2.1 比较标准测量系统的基本要求	98
3.2.2 被鉴定系统的基本要求	99
3.2.3 时间统一系统的作用与基本要求	100
3.2.4 通信系统的作用与基本要求	100
3.2.5 气象勤务系统预报及大地测量的作用与基本要求	100
3.2.6 测量目标的基本要求	101
3.3 精度鉴定试验的数据处理	103
3.3.1 精度鉴定试验数据处理的主要内容	103

3.3.2 精度鉴定试验数据精度分析评定	107
参考文献	115
第4章 弹道相机系统在精度鉴定试验中的应用	116
4.1 弹道相机系统介绍	116
4.1.1 弹道相机系统简介	116
4.1.2 弹道相机系统基本组成及各部分作用	117
4.2 弹道相机系统工作原理	118
4.2.1 弹道相机系统工作原理	118
4.2.2 弹道相机电控系统	119
4.3 弹道相机测量数据处理	127
4.3.1 弹道相机测量数据处理工作流程	127
4.3.2 弹道相机干板处理程序	128
4.4 弹道相机测量数据精度分析	152
4.4.1 弹道相机测角均方总误差	152
4.4.2 弹道相机测角精度的误差源	153
4.4.3 弹道相机的定向误差	158
4.4.4 目标像点量度误差	162
4.4.5 大气抖动引起的测角误差	163
4.4.6 快门误差	164
4.4.7 像点位移引起的测角误差	164
4.5 弹道相机系统主要技术指标检测	164
4.5.1 弹道相机系统的拍摄能力	164
4.5.2 弹道相机的测角精度	168
4.5.3 快门对中与同步精度检测和调整	173
4.5.4 系统记时精度测试	175
4.5.5 系统畸变测试	177
4.6 弹道相机系统实施精度鉴定试验的性能特点	181
4.6.1 弹道相机系统精度鉴定试验的优点	182
4.6.2 弹道相机系统精度鉴定试验的不足	182
4.7 弹道相机在精度鉴定试验中需要关注的问题	183

参考文献	184
第5章 光电经纬仪在精度鉴定试验中的应用	185
5.1 光电经纬仪系统介绍	185
5.1.1 光电经纬仪用途	185
5.1.2 光电经纬仪结构组成	186
5.1.3 光电经纬仪系统组成与基本工作原理	186
5.1.4 光电经纬仪的微型机和单板机	190
5.2 光电经纬仪测量基础	191
5.2.1 光电经纬仪轴系	191
5.2.2 光电经纬仪测量坐标系	192
5.2.3 光电经纬仪测量元素	193
5.2.4 摄影画幅的点阵信息和脱靶量	194
5.3 光电经纬仪的测量方法和基本原理	194
5.3.1 光电经纬仪单台定位测量	194
5.3.2 光电经纬仪交会测量	195
5.4 光电经纬仪脱靶量分析与修正	203
5.5 光电经纬仪系统误差修正	207
5.5.1 光电经纬仪轴系误差修正	207
5.5.2 光电经纬仪定向误差分析	212
5.5.3 轴系误差与定向误差修正	212
5.6 光电经纬仪测角与测距精度	213
5.6.1 光电经纬仪测角精度	213
5.6.2 光电经纬仪测距精度	219
5.7 光电波折射误差修正	220
5.7.1 光波折射基本概念	221
5.7.2 光电经纬仪光电波折射修正量计算	224
5.8 光电经纬仪测角精度测试方法	226
5.8.1 测角精度测试原理	226
5.8.2 星体弧长法	227
5.8.3 星体角度法	231

5.8.4 测量仪器比较法	238
参考文献	241
第6章 GPS 测量在精度鉴定试验中的应用	242
6.1 GPS 系统概述	242
6.1.1 GPS 的空间系统	243
6.1.2 GPS 地面支撑系统	243
6.1.3 GPS 的用户系统	243
6.1.4 GPS 测量的坐标系	245
6.2 GPS 信号	245
6.2.1 GPS 导航电文	246
6.2.2 GPS 伪随机码	248
6.3 GPS 观测量和观测模型	250
6.3.1 伪距观测量及观测模型	250
6.3.2 载波相位观测量及观测模型	251
6.3.3 积分多普勒观测量	253
6.3.4 线性组合观测量	253
6.4 GPS 测量的误差源和改正模型	258
6.4.1 对流层折射	258
6.4.2 电离层折射	259
6.4.3 多路径效应	261
6.4.4 相对论效应	261
6.4.5 钟差	262
6.4.6 卫星轨道偏差	263
6.4.7 天线相位中心误差	264
6.4.8 其他误差	265
6.5 GPS 单点测量的基本原理	265
6.6 GPS 相对测量的基本原理	267
6.6.1 位置差分	269
6.6.2 伪距差分	269
6.6.3 载波相位差分	273

6.7	实时动态差分	275
6.7.1	LADGPS 实时动态测量技术	275
6.7.2	广域差分实时测量技术	287
6.8	实时差分 GPS 的数据通信	287
6.8.1	实时差分 GPS 数据通信类型和手段	288
6.8.2	差分 GPS 数据通信的类型和电文格式	289
6.8.3	差分改正数更新率对实时定位精度的影响	289
6.9	利用 GPS 测量载体的运动速度	290
6.9.1	单点测速法	290
6.9.2	差分测速法	291
6.9.3	位置微分平滑测速法	293
6.9.4	GPS 测速精度分析	294
6.10	用 GPS 载波相位测定运动载体的姿态	297
6.10.1	载体姿态的坐标系及相互关系	298
6.10.2	GPS 测姿的基本原理	299
6.11	GPS 载波相位测量中的关键技术	301
6.11.1	整周模糊度的确定	301
6.11.2	周跳的检测与修复	307
6.12	GPS 动态测量的参数估计	310
6.12.1	离散线性系统卡尔曼滤波的基本原理	311
6.12.2	自适应卡尔曼滤波	314
6.12.3	卡尔曼滤波应用举例	316
6.13	GPS 精度鉴定系统	318
6.13.1	GPS 用于精度鉴定试验的基本原理	318
6.13.2	GPS 精度鉴定系统的设备组成及功能	319
6.13.3	测量数据的事后处理	322
6.13.4	其他需要说明的问题	333
	参考文献	336
第 7 章	自鉴定技术在外测系统精度鉴定中的应用	338
7.1	概述	338

7.2	EMBET 自校准技术原理及特点	339
7.2.1	EMBET 自校准技术数学原理	339
7.2.2	EMBET 自校准技术的公式	339
7.2.3	EMBET 自校准技术的特点和使用条件	345
7.3	系统误差模型的辨识	346
7.3.1	系统误差模型	346
7.3.2	系统误差模型的辨识	350
7.4	EMBET 自校准技术的改进	357
7.4.1	样条约束 EMBET 自校准技术	357
7.4.2	轨道约束 EMBET 自校准技术	359
7.5	轨道约束自校准技术在外测系统精度鉴定中的应用	361
7.5.1	自校准系统误差的观测方程	361
7.5.2	轨道约束自校准技术的批处理公式	366
7.5.3	轨道约束自校准技术的递推处理公式	369
7.5.4	多台设备和多圈轨道自校准公式	372
7.5.5	自鉴定测量精度公式	374
7.6	EMBET 自鉴定的工作流程	375
	参考文献	376

第 1 章 概 论

1.1 概 述

在导弹、航天器发射试验过程中,火箭的飞行弹道和卫星的轨道根数等反映试验情况的数据,大多数是由无线电和光学外测设备通过测量获得的。这些外测设备的测量精度,标志着我国导弹、卫星等航天器试验的测控水平。精度是外测设备的生命和归宿,由于测量数据及其精度分析对导弹、卫星等航天器研制、定型和改进密切相关,因此型号研制部门、发射试验场和测控部门对外测设备的精度鉴定工作历来都十分重视。另外,精度是评价外测设备的研制是否成功,能否达到航天测控应用要求的核心问题,不论是外测设备的研制单位还是使用单位,都将精度鉴定试验作为设备验收的综合考核手段,并将试验结果作为评定设备是否合格的重要标准。因此,外测设备的精度鉴定工作是航天测控系统建设中不可缺少的重要环节,也是发射试验场和跟踪测量单位一项必要和经常性的工作。

1.1.1 外弹道测量和外测设备

1.1.1.1 外弹道测量

弹道测量是指在导弹和航天器的飞行过程中,对其测量并确定它们的位置、速度和加速度等运动参数的过程。

外弹道测量简称外测,是指利用外测设备获取导弹或运载火箭等航天器飞行过程中的运动轨迹参数(如位置、速度和加速度等)而进行的跟踪测量活动。外弹道测量的目的是为了评定导弹或运载火箭等航天器的技术性能和精度,为改进设计和定型提供数据,为飞行安全控制系统实时

提供安全信息,为各级指挥系统提供监视、显示信息,为应用系统提供有关数据等。

外弹道测量可以利用遥测、光学、雷达、卫星定位等技术手段来实施。

1.1.1.2 外测设备

测控系统中用来跟踪和测量导弹与航天器在空间的飞行轨道参数(如位置、速度、加速度等)的设备,被称为外弹道测量设备,简称外测设备。获取导弹和航天器精确的速度和位置数据以确定它们的飞行轨道是外测设备的主要任务。

1.1.1.3 外测设备的分类和特点

目前,我国靶场常用的外测设备根据测量使用的手段基本上可以划分为两类:一类是光学测量系统(包括可见光设备、红外光设备和激光设备),如各种光电经纬仪、弹道相机、宽角相机、跟踪望远镜、高速摄影机、激光雷达等;另一类是无线电测量系统、如单脉冲雷达、连续波雷达、连续波干涉仪、相控阵雷达、卫星导航定位系统、多普勒测速仪、微波统一系统等。

1. 光学测量设备及其特点

(1) 光学测量设备。光学测量系统主要是指以光学成像原理对飞行目标进行轨迹参数测量、状态图像记录和物理特性测量的专用测量系统。

(2) 光学测量设备的优势。光学测量设备的优势是:测量精度高;无须在测量目标上设置复杂的转发器;可测量飞行目标的光辐射特性参数;可获得飞行目标影像,直观性强,并可事后复现;不易受“黑障”和地面杂波干扰的影响。

(3) 光学测量设备的不足。光学测量设备的不足之处是:作用距离较近,受天气影响较大,不能全天候工作,不易实现精确测速等。因此,它经常被用于跟踪测量导弹发射任务中起飞段和弹头再入段弹道参数和鉴定无线电测量设备的精度。

2. 无线电测量设备及其特点

(1) 无线电测量设备。无线电跟踪测量设备是利用无线电波对导弹、运载火箭等航天器进行跟踪测量以确定其弹道或轨道、目标特性等参数的测量系统。其主要任务就是完成导弹和运载火箭在发射任务中,从

起飞到落地全过程的跟踪、测量与监视任务,包括:

① 提供导弹和运载火箭的外测参数,为它们的故障分析和系统改进提供科学依据;

② 为试验任务中的安控系统提供安全判决条件;

③ 提供航天器入轨点参数,包括轨道根数和航天器姿态参数。

(2) 无线电测量设备的优势。无线电跟踪测量设备的优势是:作用距离远,实时性强,可以进行高精度的实时测量,实时输出测量数据和多种信息;测量数据精度高,便于自动化处理;受天候的影响小;综合性强,既能跟踪、测距、测角,又能精确测速。而近年由无线电测量设备发展的微波统一系统,由于采用了统一载波综合信道技术,则可同时实现上行话音与遥控指令的调制发送,下行遥测信号的接收、解调,以及下行多载波数传和电视图像信号的接收解调等多种功能。

(3) 无线电测量设备的不足。无线电跟踪测量设备的不足之处在于:① 需要在被跟踪测量的目标上安装较为复杂的合作目标与地面系统相配合,增加了系统的复杂性;② 该系统易受电磁干扰,尤其是设备低仰角工作干扰严重;③ 被测目标再入大气层时产生的等离子鞘套会造成中断系统正常工作的“黑障”等。

根据上述两类外测设备自身的特点,无线电测量设备一般被用作完成外测任务的主要测量手段,光学跟踪测量设备作为辅助测量手段。但需要指出的是,光学测量设备在我国靶场建设中仍是重要和不可缺少的,在靶场测量系统中占有很重要的地位。由于它是目前测量精度很高的测量设备,所以经常用它鉴定和校正无线电测量设备精度和误差。

1.1.2 靶场外测设备的精度鉴定

1.1.2.1 精度试验的常见概念

通常情况下,精度包含两个方面的含义,即准确度和精密度。准确度是指测量值与实际值的接近程度,反映了系统误差的影响,系统误差越小,准确度越高。精密度是指测量值对其数学期望(平均值)的散布程度(重现性),反映了随机误差的影响,在测量条件相同时,多次测量数值越接近,精密度就越高。可见,“精度”一词既反映了测量的系统