



弹道测量雷达 及在兵器试验中的应用

DANDAO CELIANG LEIDA JIZAI BINGQI SHIYANZHONG DE YINGYONG



李益民 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

弹道测量雷达及在兵器 试验中的应用

李益民 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

弹道测量雷达及在兵器试验中的应用 / 李益民主编.

—北京: 国防工业出版社, 2010. 12

总装部队军事训练“十一五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 07196 - 2

I. ①弹... II. ①李... III. ①弹道导弹 - 测量雷达 -
教材 IV. ①TN959. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 237691 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)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 10 1/4 字数 293 千字

2010 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 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

总装备部军事训练统编教材 编审委员会

(2008)

主任委员 夏长法

副主任委员 邱爱慈 聂 峰

委 员 于俊民 徐克俊 周朝猛 安敏建

史续生 陈 波 孙宝升 冯书兴

唐清安 单志伟 杨 军 魏震生

张大伟 姜世忠 熊家新 田 禾

秘 书 宋安基 石根柱

本书编审委员会

主 编 李益民

副主编 姜晓东 张志学

主 审 姚志军

副主审 郭文胜 冯 伟

编著者 (以下按姓氏笔画排序)

王义江 吕海东 刘志学 孙 琪

李益民 杨中文 吴上上 冷雪冰

怀武龙 初建海 张志学 陈征祥

岳 锐 胡 成 姜 志 姜天水

姜晓东 宫志华 常华俊 崔 岩

董立涛 董佳新

前 言

通常,把兵器作为武器的同义词,我国多数辞书都采用“兵器即武器”的定义。例如,把轻兵器称为轻武器,把反坦克兵器称为反坦克武器,把步兵兵器称为步兵武器。本书主要针对弹道测量雷达在常规兵器试验中的应用进行论述。常规兵器是对除核、化学、生物、航天等大规模杀伤破坏性武器以外的武器的统称,是以常规手段杀伤敌有生力量、破坏敌作战设施、保护己方人员及设施的器械,是进行常规战争、反恐处突、应对多样化安全威胁、完成多样化军事任务、保卫国家安全的重要物质基础。

常规兵器试验鉴定是常规武器装备发展的关键环节。所谓试验鉴定,是通过试验获取足够有价值的试验数据,并对所获得的数据进行处理、分析与综合、评定,将其结果与武器装备研制总要求中规定的战术技术指标和作战使用要求进行分析比较,对实现武器装备研制目标的情况进行评估,对武器装备的战术技术性能和作战使用性能进行评估的过程。目的是为武器装备的定型工作、部队使用、研制单位验证设计思想和检验生产工艺等提供科学决策依据。

通过试验测量获取武器装备的各种性能数据是常规兵器试验靶场(简称靶场)综合评价武器装备战术技术性能、编制武器弹药射表等的基础。靶场试验测量设备种类繁多,包括雷测、光测、遥测、电测、动测设备等,其中,雷达作为集中体现现代电子科学技术成就的高科技系统,在常规兵器试验鉴定领域占据着举足轻重的地位。

在总结弹道测量雷达在常规兵器试验鉴定中 20 余年应用成果和经验的基础上,本书重点介绍了靶场在用的弹道测量雷达及其在常规兵器试验中的应用。全书共 9 章,分别介绍了:靶场弹道测量雷达的分类、特

点、发展历程;常规单脉冲测量雷达、连续波测量雷达、相控阵测量雷达的系统组成、原理、工作方式及功能性能;雷达的标定原理、方法及精度分析;速度测量技术及初速雷达的组成、工作原理、试验测量;外弹道参数测量、弹道事件特征分析、组网测量及多目标测量;目标 RCS 测量、姿态参数及转速测量;相关测量基础知识、数据统计及误差分析;脉冲测量雷达、连续波测量雷达的数据处理方法;弹道测量雷达性能参数测试等。

本书的编著,得到了中国白城兵器试验中心有关部门和专家的大力支持,在此表示衷心的感谢。同时,在编写过程中参阅了许多参考文献,在此向有关文献作者致谢。

由于编者水平所限,书中难免会有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 5 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 弹道测量雷达分类	2
1.1.1 单脉冲测量雷达	2
1.1.2 连续波测量雷达	5
1.1.3 相控阵测量雷达	8
1.2 弹道测量雷达的特点	10
1.3 弹道测量雷达的应用和发展	11
1.3.1 靶场弹道测量雷达应用与发展历程	12
1.3.2 靶场弹道测量雷达应用特点	13
1.3.3 弹道测量雷达的应用展望	14
第 2 章 跟踪测量雷达系统	17
2.1 弹道测量雷达的主要功能及测量方式	17
2.1.1 弹道测量雷达的主要功能	17
2.1.2 弹道测量雷达的测量方式	18
2.2 单脉冲测量雷达	19
2.2.1 单脉冲测量雷达的工作原理及组成	19
2.2.2 单脉冲测量雷达的特点及功能	27
2.2.3 单脉冲测量雷达的工作方式	31
2.3 连续波测量雷达	33
2.3.1 连续波测量雷达的组成	34
2.3.2 连续波测量雷达的基本原理	40
2.3.3 连续波测量雷达性能分析	48
2.4 相控阵测量雷达	51

2.4.1	相控阵测量雷达的组成	51
2.4.2	相控阵测量雷达的特点及功能	73
2.4.3	相控阵测量雷达测量参数、精度及分辨率	75
2.4.4	相控阵测量雷达的工作模式	79
第3章	弹道测量雷达标定	82
3.1	雷达标定的常用概念及项目	82
3.2	常规标定	84
3.2.1	常规标定的基本内容	84
3.2.2	系统轴系标定	85
3.2.3	系统零值标定	95
3.3	星体标定	99
3.3.1	星体标定系统组成及工作原理	99
3.3.2	软件系统	100
第4章	速度测量技术	105
4.1	雷达测速基本原理	105
4.2	时域测速技术	105
4.2.1	固周测时	106
4.2.2	固时测周	106
4.2.3	基本固时测周	107
4.3	时域测速特点	107
4.4	频域测速技术及特点	108
4.5	初速测量雷达	109
4.5.1	初速测量雷达组成	109
4.5.2	初速测量雷达试验	109
4.5.3	速度测量数据处理	112
第5章	外弹道参数测试	118
5.1	外弹道测量参数及特点	118
5.1.1	外弹道测量参数	118
5.1.2	雷达外弹道测量的特点	118
5.2	目标一般弹道参数测量	120

5.2.1	试验测量方案制定	120
5.2.2	雷达试前准备	124
5.2.3	现场试验	126
5.3	目标特征点参数测量	128
5.3.1	目标特征点特性分析	129
5.3.2	目标特征点测量方法	130
5.3.3	靶场应用情况	136
5.4	雷达组网测量技术	141
5.4.1	引导系统设计	141
5.4.2	高精度引导模型	146
5.4.3	组网测量模式	155
5.4.4	精度分析	162
5.4.5	靶场应用情况	166
5.5	多目标测量技术	169
5.5.1	连续波测量雷达多目标测量技术	169
5.5.2	相控阵测量雷达多目标测量技术	178
第6章	目标特征参数测试	186
6.1	目标 RCS 测量技术	186
6.1.1	RCS 定义	187
6.1.2	RCS 测量方法	188
6.1.3	精度分析	192
6.1.4	靶场应用情况	194
6.2	目标翻滚、进动参数测量技术	197
6.2.1	目标回波调制模型	197
6.2.2	目标微动周期提取	202
6.2.3	靶场应用情况	204
6.3	目标转速测量技术	205
6.3.1	转速信号调制模型	206
6.3.2	转速信号处理方法	208
6.3.3	转速处理精度分析	210

6.3.4 靶场应用情况	211
第7章 外弹道测量数据处理基础知识	213
7.1 测量与测量误差	213
7.1.1 测量的分类	213
7.1.2 测量误差和分类	214
7.1.3 测量值的准确度和精密度	215
7.2 概率论与数理统计知识	216
7.2.1 概率论基础知识	216
7.2.2 数理统计基础知识	221
7.3 随机误差分析与统计	223
7.3.1 变量差分法	224
7.3.2 最小二乘拟合残差法	226
7.4 系统误差分析	228
7.4.1 系统误差产生的主要原因	228
7.4.2 常见系统误差的主要特征	229
7.4.3 消除或减小系统误差的主要方法	231
7.5 常用坐标系	232
7.5.1 地球椭球	233
7.5.2 常用坐标系介绍	234
7.5.3 我国当前采用的主要坐标系	240
7.5.4 其他常用坐标系及坐标系间的转换	242
7.6 靶场应用情况	248
第8章 外弹道测量雷达数据处理	250
8.1 雷达数据处理目的及内容	250
8.2 脉冲测量雷达数据处理	251
8.2.1 数据处理流程	251
8.2.2 数据处理修正方法	252
8.2.3 数据处理精度分析	261
8.3 连续波测量雷达数据处理	262
8.3.1 连续波测量雷达信号处理	263

8.3.2	连续波测量雷达数据处理方法	267
8.3.3	连续波测量雷达精度分析	270
第9章	弹道测量雷达性能参数测试	273
9.1	雷达性能参数测试方案制定	273
9.1.1	参数测试内容及所需武器弹药和比对设备的 选择	274
9.1.2	精度和威力考核	277
9.1.3	数据处理	278
9.2	雷达静态技术参数测试	278
9.2.1	发射系统参数测试	279
9.2.2	接收系统参数测试	284
9.2.3	天馈系统参数测试	291
9.2.4	天控系统参数测试	294
9.3	雷达动态试验	303
9.3.1	试验方法与技术问题的解决	304
9.3.2	雷达动态试验实施	307
9.4	雷达试验数据处理	309
9.4.1	距离及角度测量数据的处理	309
9.4.2	速度测量数据处理	312
参考文献		313

第1章 概 论

现代弹道学将全弹道分为5个相互联系但又存在显著差异的弹道段,即起始弹道、内弹道、中间弹道、外弹道和终点弹道。弹道测量雷达主要是利用电磁波反射式工作原理完成对目标的跟踪、测量及后续相关信息处理提取等功能。应用于常规武器试验场(简称靶场)的弹道测量雷达主要完成目标内弹道和外弹道参数的测量,担负着常规兵器试验中的炮(枪)弹、战术火箭弹、防空和反坦克导弹、航空炸弹等目标的弹道参数测量以及飞机、航模靶机等目标的航迹测量任务。

火炮射击后,从弹丸起动到飞行至目标并完成对目标毁伤任务的过程称为弹道过程。弹丸起动至弹丸尾端面飞离炮口端面的过程为内弹道;火药后效期结束至弹丸到达目标的过程为外弹道。

测量弹丸的初速是内弹道参数测量的主要任务之一。严格地说,弹丸初速是指弹丸在出炮口的一瞬间所具有的瞬时速度。而在工程实践中,雷达测量得到的弹丸初速是一个数据拟合回推速度或等效速度,它是弹、炮、药综合作用的结果,是需要测定后效期之后的一个或一系列速度值,利用弹道方程或外弹道测量数据拟合回推至炮口,计算求得的初速值。

外弹道是弹丸受发射药气体作用结束后(即后效期终了),弹丸在空气阻力、地球引力和惯性力作用下,不断改变其运动速度、方向和飞行姿态,直至作用于目标前的一段弹道。

外弹道测试内容主要包括炮弹弹道诸元、空爆(炸)点、目标脱靶量测试;火箭弹主动段和被动段弹道诸元测试(如速度、转速、空间坐标、飞行时间等);航空炸弹投弹点、爆点、落下时间、弹道诸元测试;导弹攻击目标(靶机、靶弹、拖靶)脱靶量的测试;子母弹开仓及二次弹道测试等。

弹丸的弹道飞行速度是编拟射表、研究弹丸飞行性能等所必不可少的基本数据,在靶场试验中,弹丸弹道速度测量是极其重要的。目标的空间位置信息(目标相对雷达的径向距离和角度)是重要的外弹道信息。靶场用于弹道参数测量的雷达主要有脉冲测量雷达和连续波测量雷达,其中脉冲测量雷达包括单脉冲测量雷达和相控阵测量雷达,连续波测量雷达包括连续波测速雷达和连续波测距雷达。在常规兵器试验中被测目标绝大多数是体积小、速度快、过载大的武器弹药,在目标上加装合作目标比较困难,因而靶场测量雷达主要是利用电磁波反射式工作方式实现对目标的跟踪测量,在对飞机等空中发射平台和靶机等测量任务中,有时也使用应答机采用二次雷达工作方式。

随着现代雷达技术的飞速发展,靶场弹道测量雷达已经从初速雷达发展到连续波体制测量雷达和单脉冲体制测量雷达,不仅能完成对目标的距离、角度、速度和时间参数的测量任务,还能从目标回波信号中提取更多有用信息,如目标的 RCS、转速、弹道特征点及一些运动姿态参数等。目前,靶场具备了较完善的雷达组网测量能力,弹道测量雷达在兵器试验鉴定领域将发挥越来越重要的作用。

1.1 弹道测量雷达分类

靶场弹道测量雷达从体制上分主要有两种类型,一是脉冲测量雷达(单脉冲测量雷达及相控阵测量雷达),二是连续波测量雷达。下面针对目前靶场应用的几种弹道测量雷达进行简要介绍。

1.1.1 单脉冲测量雷达

顾名思义,脉冲测量雷达的原理就是在脉冲信号中调制高频载波能量辐射出去,利用电磁波的反射特性,来测量目标在空间的位置、速度等参数。目前靶场脉冲测量雷达主要有单脉冲测量雷达和相控阵测量雷达,这两种雷达都属于单脉冲体制的弹道测量雷达。

1. 单脉冲测量雷达之单脉冲

继 20 世纪 40 年代出现圆锥扫描体制的跟踪雷达之后,于 50 年代又

出现了单脉冲体制的跟踪雷达,由于它具有比圆锥扫描约高一个数量级的角跟踪精度及其他一些优点,到了 60 年代被广泛使用。

单脉冲雷达采用同时波瓣法测角。这种雷达只需要比较各馈源波束接收的同一个回波脉冲,就可以获得目标位置的全部信息。这也就是“单脉冲”这一术语的来源。当然这里并不是指只发射一个脉冲,仍然是发射一串脉冲,但距离信息和角误差信息只需要接收一个回波脉冲就能提取。与圆锥扫描雷达相比,单脉冲雷达获得角误差信息的时间可以很短,测角精度高,抗干扰能力强。

2. 目标斜距的测量

雷达工作时,发射机经天线向空间发射一串重复周期一定的高频脉冲,如果在电磁波传播的途径上有目标存在,雷达就可以接收到由目标反射回来的回波(或经应答机转发的应答信号)。由于回波信号往返于目标和雷达之间,它将滞后发射脉冲一个时间 t_r ,如图 1-1 所示。

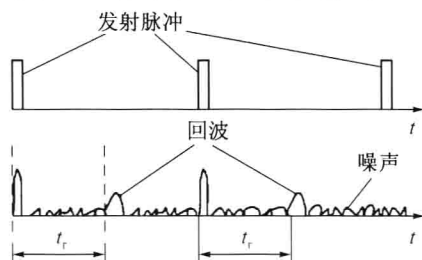


图 1-1 雷达测距原理示意图

电磁波的能量是以光速传播的,设目标的距离为 R ,则传播的距离等于光速乘上时间间隔,即

$$2R = ct \text{ 或 } R = \frac{c}{2}t_r \quad (1-1)$$

式中 R ——目标到雷达站的单程距离(m);

t_r ——电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔(s);

c ——光速,约为 3×10^8 m/s。

当雷达接收到的回波脉冲滞后于发射脉冲为 $1\mu\text{s}$ 时,所对应的目标

斜距 $R = 150\text{m}$ 。

雷达测距的精度和分辨力与发射信号带宽或处理后的脉冲宽度有关。脉冲越窄,性能越好。

3. 目标角位置的测量

目标角位置是指在某个坐标系中目标相对于雷达的方位角或俯仰角。在雷达技术中,测量这两个角位置是利用天线的方向性来实现的。一个基本的方法是雷达天线将电磁能量汇集在窄波束内,当天线波束轴对准目标时,回波信号最强。目标角位置测量如图 1-2 所示。

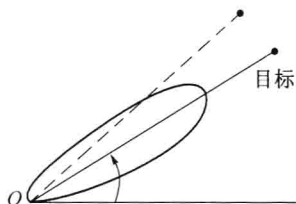


图 1-2 角坐标测量图

当目标偏离天线波束轴时,回波信号减弱,如图 1-2 中虚线所示。根据接收回波最强时的天线波束指向,就可确定目标的方向,这就是角位置测量的基本原理。

4. 目标相对速度的测量

有些雷达除确定目标的位置外,还测定运动目标的速度,如飞机或导弹的飞行速度。当目标与雷达站之间存在相对运动时,雷达接收到的目标回波信号的载频相对于发射信号的载频产生一个频移,这个频移在物理学上称为多普勒频移,表达式为

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (1-2)$$

式中 f_d ——多普勒频移(Hz);

v_r ——雷达与目标之间的径向速度(m/s);

λ ——载波波长(m)。

当目标向着雷达站运动时,回波载频提高;反之,回波载频降低。雷达只要测出回波信号的多普勒频移,就可以确定目标与雷达站之间的相

对速度,即目标的径向速度。

径向速度也可以用距离的变化率来求得,此时精度不高,但不会产生速度模糊。

多普勒频移除用作测速外,更广泛应用于动目标显示(MTI)、脉冲多普勒(PD)等体制雷达中以提高从杂波中检测运动目标回波的能力。

1.1.2 连续波测量雷达

通常,连续波测量雷达系统发射的高频信号是连续的射频正弦波振荡信号,它借助于回波信号所产生的多普勒频移,探测与雷达有相对运动的目标,并测定其径向速度。随着多频、调频测距技术和相位阵列天线技术的应用,连续波测量雷达亦可以完成目标距离、角度等参数测量。靶场连续波测量雷达主要有连续波测速雷达、连续波多频测距雷达。

1. 连续波测量雷达组成

简单的连续波测量雷达组成(零中频混频)如图1-3所示。

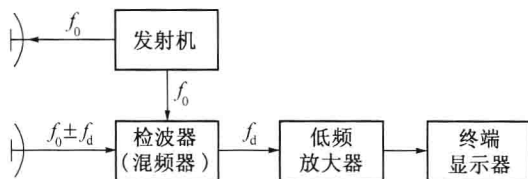


图 1-3 简单连续波雷达框图

发射机产生频率为 f_0 的非调制连续振荡,由天线辐射出去。接收回波信号(频率为 $f_0 \pm f_d$)经天线进入雷达,与频率为 f_0 的发射信号在检波器中进行混频,产生频率为 f_d 的多普勒差拍信号。该信号经低频放大器放大后送至显示器。这种将接收信号和发射信号直接进行差拍的接收机,称为零差拍或零中频接收机。

这种接收机原理比较简单,雷达设备尺寸可以做得很小,便于移动使用。它的缺点是在多普勒信号频段内,噪声电平比较高,大大降低了接收机的灵敏度。