



# 无线电遥测系统 及在兵器试验中的应用

WUXIANDIAN YAOCE XITONG JIZAI BINGQI SHIYANZHONG DE YINGYONG



张军 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



# 无线电遥测系统及 在兵器试验中的应用

张 军 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

**图书在版编目 ( CIP ) 数据**

无线电遥测系统及在兵器试验中的应用 / 张军主编.  
—北京: 国防工业出版社, 2011. 1  
总装部队军事训练“十一五”统编教材  
ISBN 978 - 7 - 118 - 07221 - 1

I. ①无... II. ①张... III. ①无线电遥测术 - 应用 -  
武器试验 - 教材 IV. ①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 000562 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 8 1/4 字数 234 千字

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 22.00 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

(2009)

主任委员 夏长法

副主任委员 乐嘉陵 赵洪利

委 员 于俊民 李 钢 黄水潮

安敏建 陈长贵 姚志军

杨开忠 白凤凯 裴承新

姜世忠 张 渊 陈正兴

秘 书 石根柱 余敬春

## 本书编审委员会

主 编 张 军

副主编 姜晓东 杨中文

主 审 李益民

副主审 姚志军 郭文胜

编著者 姜晓东 杨中文 彭利浩 王英智

宋文利 张 娜 李大伟 王健全

冯 伟 付庆勇 姜 志 张 军

吕彦东 綦笑微 赵 芮 阳 萍

高 原 张潇潇

# 前 言

本书中的兵器是除核、化学、生物等大规模杀伤破坏性武器以外的武器的统称,包括火炮、火箭弹、近程导弹、航空炸弹、战车、坦克及轻武器等。在兵器的设计和生产定型过程中,需要通过试验对兵器进行考核。试验方法有很多,其中,利用无线电遥测手段进行的测试,简称为兵器试验遥测。

兵器试验遥测经过 40 余年的发展,逐步形成了比较完善的体系,在我国兵器试验工作中发挥了重要作用。为全面系统地总结以往的实践经验,促进兵器试验遥测技术的发展,我们编写了本书,供从事兵器试验遥测工作的人员参考。

本书首先从无线电遥测系统基础理论入手,介绍了弹上遥测设备、遥测信息传输、遥测地面站等内容,然后结合编者多年来实际工作的经验,翔实地阐述了兵器试验遥测、遥测数据处理等内容,最后对遥测新技术及应用进行了展望。全书内容丰富、条理清晰、贴合实际。

本书包括 7 章。第 1 章概论,由彭利浩、杨中文编写;第 2 章弹上遥测设备,由王英智、宋文利编写;第 3 章遥测信息传输,由张娜、李大伟编写;第 4 章遥测地面站,由王健全、冯伟编写;第 5 章兵器试验遥测,由付庆勇、姜晓东、姜志编写;第 6 章遥测数据处理,由张军、吕彦东、綦笑微、彭利浩编写;第 7 章遥测新技术及应用展望,由赵芮、阳萍、高原编写。全书由张军、姜晓东、杨中文、张潇潇完成统稿。

本书的编写工作是在白城兵器试验中心的领导下进行的,得到了总装备部司令部、作试局、军训局等单位的大力支持。白城兵器试验中心李益民高工、姚志军高工、郭文胜高工对全书进行了审稿,单广华、王磊等同

志给予了热情帮助,中国航天科技集团公司二八九厂、中国电子科技集团公司第三十九研究所、中国航天科技集团公司第七〇四研究所和中国兵器集团公司第二一二研究所等单位也给予了友情支持,在此一并表示感谢!

本书部分章节中,参考了刘蕴才、陈以恩等专家著作中的有关内容,由于条件所限,不能一一联系致谢,在此深表敬意!

由于编者水平有限,书中缺点及错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2010年5月

# 目 录

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第1章 概论            | 1  |
| 1.1 遥测系统组成        | 1  |
| 1.2 遥测系统关键技术      | 3  |
| 1.2.1 弹上遥测天线设计技术  | 3  |
| 1.2.2 弹上遥测设备小型化技术 | 3  |
| 1.2.3 遥测信号调制技术    | 4  |
| 1.2.4 地面遥测天线跟踪技术  | 4  |
| 1.2.5 遥测数据实时处理技术  | 6  |
| 1.2.6 GPS 应用技术    | 6  |
| 1.2.7 遥测电磁兼容技术    | 6  |
| 1.3 遥测在兵器试验中的作用   | 7  |
| 1.4 兵器试验遥测的特点     | 8  |
| 1.5 兵器试验遥测发展历程    | 9  |
| 第2章 弹上遥测设备        | 11 |
| 2.1 概述            | 11 |
| 2.1.1 弹上遥测设备组成    | 11 |
| 2.1.2 弹上遥测设备各部分作用 | 12 |
| 2.1.3 弹上遥测设备工作原理  | 12 |
| 2.2 信息采集设备        | 14 |
| 2.2.1 传感器         | 14 |
| 2.2.2 信号调节器       | 19 |
| 2.2.3 信息采集系统      | 23 |
| 2.3 PCM 采编器       | 25 |

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 2.4   | 信息传输设备 .....       | 29 |
| 2.4.1 | 遥测发射机 .....        | 29 |
| 2.4.2 | 遥测发射天线 .....       | 34 |
| 第3章   | 遥测信息传输 .....       | 39 |
| 3.1   | 基本调制与多路复用体制 .....  | 39 |
| 3.1.1 | 角度调制 .....         | 39 |
| 3.1.2 | 脉冲调制 .....         | 43 |
| 3.1.3 | 多路复用体制 .....       | 47 |
| 3.2   | 基本数字调制体制 .....     | 48 |
| 3.2.1 | 二进制频移键控体制 .....    | 48 |
| 3.2.2 | 二进制相移键控体制 .....    | 49 |
| 3.2.3 | 多进制相移键控体制 .....    | 51 |
| 3.3   | 数字基带信号传输 .....     | 54 |
| 3.3.1 | 数字基带信号码型 .....     | 54 |
| 3.3.2 | 数字基带信号传输模型 .....   | 55 |
| 3.4   | 数字遥测同步技术 .....     | 56 |
| 3.4.1 | 载波同步 .....         | 56 |
| 3.4.2 | 码元同步 .....         | 57 |
| 3.4.3 | 帧同步 .....          | 58 |
| 第4章   | 遥测地面站 .....        | 61 |
| 4.1   | 概述 .....           | 61 |
| 4.1.1 | 遥测地面站的种类和组成 .....  | 61 |
| 4.1.2 | 遥测地面站的总体设计要求 ..... | 62 |
| 4.2   | 天伺馈系统 .....        | 63 |
| 4.2.1 | 遥测接收天线 .....       | 63 |
| 4.2.2 | 馈源 .....           | 67 |
| 4.2.3 | 自跟踪分系统 .....       | 69 |
| 4.2.4 | 伺服分系统 .....        | 74 |
| 4.3   | 信道系统 .....         | 76 |
| 4.3.1 | 低噪声放大器 .....       | 76 |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| 4.3.2      | 分路器和下变频器 .....      | 78         |
| 4.3.3      | 遥测接收机 .....         | 81         |
| 4.4        | 解调系统 .....          | 97         |
| 4.4.1      | 遥测同步解调处理设备 .....    | 97         |
| 4.4.2      | 时码信息处理设备 .....      | 99         |
| 4.5        | 软件系统 .....          | 100        |
| 4.5.1      | 遥测系统主控软件 .....      | 100        |
| 4.5.2      | 遥测系统附属软件 .....      | 103        |
| 4.6        | 检校系统 .....          | 103        |
| 4.7        | 记录设备 .....          | 104        |
| <b>第5章</b> | <b>兵器试验遥测 .....</b> | <b>107</b> |
| 5.1        | 遥测任务接收 .....        | 107        |
| 5.1.1      | 任务类型 .....          | 107        |
| 5.1.2      | 遥测条件的确定 .....       | 108        |
| 5.1.3      | 责任划分 .....          | 109        |
| 5.2        | 遥测方案制定 .....        | 110        |
| 5.2.1      | 布站方案的确定 .....       | 110        |
| 5.2.2      | 通信方案的确定 .....       | 116        |
| 5.2.3      | 跟踪方案的确定 .....       | 117        |
| 5.3        | 遥测准备 .....          | 122        |
| 5.3.1      | 试验人员准备 .....        | 122        |
| 5.3.2      | 试验设备准备 .....        | 122        |
| 5.4        | 遥测实施 .....          | 124        |
| 5.4.1      | 试前对接 .....          | 124        |
| 5.4.2      | 试验设备的运输及展开 .....    | 125        |
| 5.4.3      | 系统联调 .....          | 128        |
| 5.4.4      | 正式试验 .....          | 131        |
| 5.5        | 遥测总结 .....          | 132        |
| 5.5.1      | 遥测弹回收 .....         | 132        |
| 5.5.2      | 数据处理 .....          | 133        |

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 5.5.3 | 编写遥测报告 .....         | 133 |
| 5.5.4 | 编写试验总结 .....         | 134 |
| 第6章   | 遥测数据处理 .....         | 136 |
| 6.1   | 概述 .....             | 136 |
| 6.1.1 | 遥测数据处理的目的 .....      | 136 |
| 6.1.2 | 遥测数据处理的特点 .....      | 136 |
| 6.1.3 | 遥测数据处理的分类 .....      | 137 |
| 6.2   | 基础知识 .....           | 139 |
| 6.2.1 | 遥测数据处理基本概念 .....     | 139 |
| 6.2.2 | 遥测参数种类 .....         | 146 |
| 6.2.3 | 坐标系及其变换 .....        | 146 |
| 6.3   | 原始数据预处理 .....        | 148 |
| 6.3.1 | 原始数据文件格式 .....       | 148 |
| 6.3.2 | 时间加工与纠错 .....        | 150 |
| 6.3.3 | 数据拼接 .....           | 151 |
| 6.4   | 参数提取与处理 .....        | 152 |
| 6.4.1 | 参数提取 .....           | 152 |
| 6.4.2 | 缓变参数处理 .....         | 155 |
| 6.4.3 | 速变参数处理 .....         | 165 |
| 6.5   | 数据输出与管理 .....        | 175 |
| 6.5.1 | 结果数据输出 .....         | 175 |
| 6.5.2 | 遥测数据库 .....          | 181 |
| 6.5.3 | MATLAB 应用 .....      | 186 |
| 6.6   | 数据实时处理方法 .....       | 197 |
| 6.6.1 | 数据挑路 .....           | 198 |
| 6.6.2 | 参数提取 .....           | 201 |
| 6.6.3 | 数据修正 .....           | 205 |
| 6.6.4 | 实时输出 .....           | 207 |
| 6.7   | 遥测数据实时显示 .....       | 211 |
| 6.7.1 | 遥测数据实时显示的要求与目的 ..... | 211 |

---

---

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 6.7.2 基于 OpenGL 的可视化技术·····      | 212        |
| 6.7.3 遥测数据实时显示方法 ·····           | 214        |
| <b>第 7 章 遥测新技术及应用展望</b> ·····    | <b>217</b> |
| 7.1 兵器试验遥测新技术 ·····              | 217        |
| 7.2 兵器试验遥测应用展望 ·····             | 220        |
| <b>附录 A 遥测地面站常见故障分析与排除</b> ····· | <b>225</b> |
| A.1 天伺馈部分故障分析与排除方法 ·····         | 225        |
| A.2 信道部分故障分析与排除方法 ·····          | 231        |
| A.3 解调部分故障分析与排除方法 ·····          | 239        |
| A.4 检校部分故障分析与排除方法 ·····          | 244        |
| A.5 其它设备故障分析与排除方法 ·····          | 248        |
| <b>参考文献</b> ·····                | <b>250</b> |

# 第1章 概 论

“遥测”，顾名思义是远距离测量，是将一定距离外被测对象的各种参数，经过传感器近距离采集，通过传输媒介传送到接收设备并进行解调、记录和处理的一种测量过程。遥测可以分为有线电遥测和无线电遥测。工业遥测通常使用有线电遥测，而无线电遥测广泛应用于空间目标各种物理参数的测量，如时间、位置、速度、姿态、振动、冲击、温度、湿度、压力和电压等。兵器试验中的遥测一般是无线电遥测。在本书中，如无特殊说明，所述“遥测”均指兵器试验领域内的无线电遥测。

## 1.1 遥测系统组成

完成遥测功能的设备组合称为遥测系统。遥测系统是对远距离被测对象的某些参数进行测量、传输和处理的一整套设备，是集传感器技术、数据采集技术、通信技术和计算机技术于一体的无线电测量系统。

在兵器试验领域，遥测系统是导弹、火箭弹、航空炸弹等武器研制过程中的重要组成部分。根据兵器试验特点，遥测系统可以分为弹上遥测设备和地面遥测设备两大部分，同时通信设备、时间校准设备和模拟检测设备等都是遥测系统必不可少的一部分。兵器试验遥测系统组成如图1-1所示。

### 1. 弹上遥测设备

弹上遥测设备指武器内部的遥测设备，包含传感器、采编电路、发射机和天线等，主要负责将武器飞行过程中的内部参数经过处理后向外发射。采编电路接收传感器采集的模拟信号和武器数据信号，经过信号调理后送给弹上遥测调制电路，由发射机对高频载波进行调制后通过天线

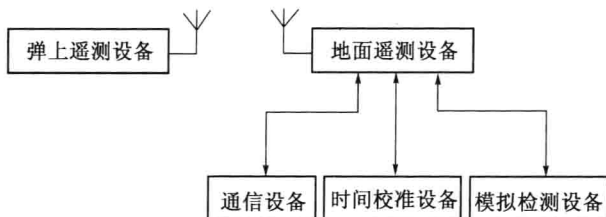


图 1-1 遥测系统组成框图

向空间辐射出去。

## 2. 地面遥测设备

地面遥测设备指各种类型的遥测地面站,主要负责空间遥测信号的接收与处理。遥测地面站天线接收弹上遥测发送的遥测射频信号,由遥测接收机进行混频、中放和解调恢复后获得视频遥测信号,视频遥测信号送到视频解调器,完成码同步、帧同步、副帧同步、时码合并和串并转换,最后由遥测计算机进行数据采集、存储、实时显示和数据处理。

## 3. 通信设备

遥测系统参加武器测试时,为了试验步骤协调一致,必须保证遥测系统与指挥中心之间的通信畅通。遥测数据不仅仅是事后分析的依据,同时也是指挥员实时掌握武器工作情况并做出正确决策的重要参考,为此,通信设备要负责遥测地面站与指挥中心之间的数据传输任务。

## 4. 时间校准设备

为确保多台(套)遥测设备动作协调、配合准确,且各设备测试数据在时间上能精确对接,需要时间校准设备。时间校准设备主要负责接收统一时间信号,并将时间值逐一嵌入到遥测数据里,保证每帧遥测数据都具有准确的时间信号,用于数据的综合分析。

## 5. 模拟检测设备

模拟检测设备可以完成遥测信道指标、天线运动能力、遥测地面站整体工作性能等方面的检测工作。模拟检测设备由视频信号模拟源、高频信号源及检验用天线等组成,视频信号模拟源可按实际使用的帧格式产生视频信号,经高频信号源调制后,由自检天线向外辐射无线电遥测信

号,供遥测地面站全系统功能检查使用。

## 1.2 遥测系统关键技术

本节简要介绍遥测系统在兵器试验应用中的关键技术。

### 1.2.1 弹上遥测天线设计技术

由于兵器具有体积小、弹体细等特点,弹上遥测天线常采用微带天线和直立天线形式。微带天线是在带有导体接地板的介质基片上,贴上或环绕导体薄片而形成的天线,它利用微带线或同轴线馈电,在导体贴片与接地板之间激励起射频电磁场,并通过贴片四周与接地板之间的缝隙向外辐射。通常介质基片的厚度与波长相比是很小的,属低剖面型天线。微带天线在结构和物理性能方面有剖面小、体积小、重量轻、易与弹体表面形成共形等优点;缺点是工作频带窄,带宽仅为中心频率的1%~6%,且功率容量小、导体和介质损耗大。直立天线适用于有限尺寸金属面,当电波沿地表传播时,水平极化波的衰减很大,因此要求天线辐射垂直极化波,这就要使用垂直于地面的直立天线。

遥测天线的电参数主要有工作频率、带宽、输入功率、阻抗、增益系数、驻波比、极化方式和方向图等。设计遥测天线时主要根据增益系数、方向图、工作频率和阻抗等参数来选取天线形式。

### 1.2.2 弹上遥测设备小型化技术

兵器体积小、弹内空间有限,因此在设计弹上遥测总体方案时要做到小型化。软件无线电技术的出现使弹上遥测设备小型化程度进一步提高,它具有操作灵活、扩展性强、软件升级方便等特点。基于软件无线电技术的弹上遥测设备,可以实现测速、测距、测压、测温、GPS信息解算、视频信号处理等功能,可以对模拟信号进行采样、量化、编码并形成标准的PCM串行数据流,还能完成信号控制、载波调制和功率放大等功能,这样就由单个芯片代替了多个分立器件的全部功能,极大地缩小了弹上遥测设备的体积,为在兵器上安装遥测设备提供了条件。

### 1.2.3 遥测信号调制技术

PCM - FM(脉冲编码调制—调频)是遥测领域内广泛采用的一种编码调制方式,具有频谱利用率高、抗多径和抗衰落能力强等特点。兵器试验中的遥测也多采用 PCM - FM 体制,地面遥测采用正交相干解调、差分检波等方法解调遥测信号。在 PCM - FM 系统中采用多符号检测技术和 Turbo 乘积码等技术,可以提升遥测系统的性能。

采用扩频技术实现码分多址的遥测系统具有抗截获、抗干扰能力强的优点,该体制有相干和非相干两种扩频模式,经过近几年的技术研究、设备研制和系统建设,扩频遥测体制日益成熟。

### 1.2.4 地面遥测天线跟踪技术

在被测目标飞行过程中,必须保证地面遥测天线有效地指向目标,以接收到良好的射频信号,因此地面遥测天线跟踪技术也是遥测系统关键技术之一。常用的天线跟踪方式有以下几种。

#### 1. 手动跟踪

由操作人员用操作杆进行手动控制跟踪。这种方式适用于天线转速不大的情况,优点是跟踪过程由操作人员控制,可以灵活处理各种情况;缺点是对操作人员要求较高,且目标丢失后不易捕获。

#### 2. 程序跟踪

根据目标理论弹道数据计算出遥测天线每个时刻的运转角度,将角度数据传送给天线控制单元,由目标起飞信号启动程序跟踪。该方式适用于弹道稳定的武器飞行试验,优点是跟踪准确、延时小;缺点是需要高精度的起飞信号,且目标飞行偏离理论弹道时会影响接收效果。

#### 3. 记忆跟踪

地面遥测可以获得目标在空间飞行时的速度、高度、方位、俯仰等各种参数,根据这些参数可以预测未来时刻目标所在的位置,计算出天线的角度后直接驱动天线在预测位置捕获目标。该方式适用于航迹稳定的飞行试验,如武器空投试验、火箭射表试验等,优点是在遥测信号较弱时能继续跟踪目标;缺点是计算过程复杂、延时大,且存在较大的不确定性。

#### 4. 天线自跟踪

遥测天线自跟踪技术一般采用单通道单脉冲体制或圆锥扫描体制,利用弹上遥测射频信号来获得目标偏离接收天线轴线的角误差信息,从而引导伺服系统对角误差进行修正,实现对目标的自跟踪。以圆锥扫描体制为例,其原理是将天线波束中心线偏离天线轴线一个适当的角度,通过波束旋转装置使天线波束绕天线轴旋转,于是在空间形成一个连续旋转的波束。该波束在空间构成一个圆锥面,当带有遥测信号的目标进入波束时,如果目标正好位于旋转波束的轴线上,则接收机收到的信号是未受调制的等幅波信号;如果目标偏离波束轴线一个角度,则接收机将收到一个幅度受到调制的连续波信号,其调制深度与偏离角度相关,控制天线转动的误差信号就是该调幅信号的包络。经过解调后获得方位及俯仰误差信号,控制伺服电机带动天线向减小误差的方向运动,从而完成对目标的自动跟踪。该方式适用于目标在稳定飞行段的自跟踪,优点是跟踪精度高、天线工作稳定;缺点是在主动段或转弯时易丢失目标。

#### 5. 雷达引导跟踪

采用雷达测试获得的武器空间坐标,经过处理后转换为遥测地面站天线的指向角度,可以很好地跟踪目标。该方式适用于目标截面较大的武器飞行试验,优点是工作过程简单、跟踪性能稳定;缺点是需要通信保障,且有一定延时。

#### 6. 光测数据同址引导跟踪

光学测试设备具有测试精度高、可靠性强等特点,但是单台光测设备并不具备输出武器空间坐标的能力。在遥测地面站附近布置一台光测设备,可以达到“同址”的效果。遥测地面站接收光测设备传输过来的角度数据,就能实现对目标的跟踪测量。该方式适用于短射程武器试验,优点是捕获目标灵活;缺点是指向误差较大。

#### 7. 遥测自引导跟踪

利用实时解算出的弹上遥测数据中的目标定位信息引导遥测天线跟踪。该方式适用于遥测数据中有可用定位信息的情况,优点是跟踪精度高、不需要额外设备;缺点是解算方法复杂,且有较大延时。