

徐

清

泉

程

受

浩

编

著

近炸引信 测试技术

北京理工大学出版社

前 言

测试技术在近炸引信的科研与生产中占有十分重要的地位。尤其是对保证引信的质量及性能一致性更是必不可少的环节。正因为如此,《近炸引信测试技术》是近感引信与检测技术专业的必修课程之一。

近炸引信测试技术涉及到广泛的自然科学领域,是一门多学科技术的综合。所以本教材是引信概论、近炸引信总体设计、线路设计等课程的后续教材。本教材是以近炸引信为对象而编著的,但一些测试技术的基本原理同样适合于其它近程目标探测装置。

本书是在四届学生试用的教材基础上,经过两次修改并补充增加了作者和近炸引信工作者在近期科研工作中取得的最新成果而写成的。本书主要包括:近炸引信高频灵敏度的测试、近炸引信目标特性的测试、近炸引信与目标模拟、近炸引信的无线电遥测,计算机在近炸引信测试技术中的应用、测量数据分析。其中第一、三、六章由徐清泉副教授编写;绪论、第二、四、五章由程受浩副教授编写。

全书由南京理工大学张清泰教授审阅并提出了许多宝贵意见。书中引用了许多兄弟单位和个人发表的论文及成果。我们谨以对本书作过支持和帮助的同志们表示衷心感谢。

在编著过程中,虽然我们力图把国内外有关近炸引信测试技术的成熟技术和最新技术尽收其中,但囿于编著者水平有限,故难以如愿。书中难免有不妥或错误之处,恳请读者批评赐教。

编 著 者

1995 年元旦

目 录

绪 论	(1)
第一章 近炸引信高频灵敏度测试	(4)
§ 1 近炸引信灵敏度的测试原则	(4)
1.1 为什么要测近炸引信高频灵敏度	(4)
1.2 表征自差收发机性能常用的几个灵敏度	(5)
1.3 无线电引信测试原则	(6)
§ 2 无回波吸收室	(7)
2.1 引言	(7)
2.2 无回波吸收室的用途	(8)
2.3 无线电波吸收材料	(9)
2.4 米波吸收材料的测试原理和方法	(10)
2.5 无回波吸收室的参数设计	(13)
§ 3 杆试验	(16)
3.1 杆试验原理	(17)
3.2 杆试验装置	(19)
3.3 杆试验场地面积选择	(24)
§ 4 同轴线法测量无线电引信灵敏度	(26)
4.1 同轴线法测试无线电引信灵敏度的原理	(27)
4.2 同轴线测试装置的结构	(29)
4.3 同轴线测试装置的调试	(30)
4.4 无线电引信高频绝对灵敏度测试	(31)
§ 5 屏蔽箱法测试无线电引信灵敏度	(35)
5.1 屏蔽箱法测试无线电引信灵敏度的原理	(35)
5.2 屏蔽箱的结构和等效电路	(36)
5.3 屏蔽箱测试装置	(38)
§ 6 推板法测试引信灵敏度	(38)
6.1 推板法测试原理	(39)
6.2 推板法测试引信灵敏度	(40)
§ 7 环行天线引信灵敏度测试	(40)
7.1 小体积吸收箱理论	(41)
7.2 小体积吸收箱结构	(43)
§ 8 微波无线电引信灵敏度的测试	(43)
8.1 微波无线电引信	(43)
8.2 微波无线电引信的灵敏度	(44)
8.3 微波无线电引信灵敏度自动测试仪	(47)
§ 9 光学引信灵敏度测试	(50)
9.1 光学引信	(50)
9.2 红外引信测试	(51)

9.3 红外引信圆周视场的检测.....	(53)
9.4 电路灵敏度的测试.....	(54)
§ 10 电容近炸引信的测试	(55)
10.1 电容近炸引信	(55)
10.2 目标动态引爆信号静态检测的基本原理	(56)
10.3 电容近炸引信目标动态引爆信号检测	(57)
10.4 电容近炸引信的测试途径	(59)
10.5 电容变化网络偏压曲线设计	(60)
10.6 电容变化网络偏压源	(62)
10.7 目标作用仿真仪	(63)
10.8 电容近炸引信抗干扰性能的测试	(66)
第二章 近炸引信目标特性的测试	(70)
§ 1 概述	(70)
§ 2 目标	(70)
§ 3 目标特性的有关概念	(71)
3.1 无线电波的绕射、散射和反射.....	(71)
3.2 目标的有效反射面积和地(水)面反射系数.....	(73)
3.3 有关概念及公式.....	(75)
§ 4 目标有效散射面积的测量原则与方法	(80)
4.1 无线电引信目标反射特性测量的特点.....	(80)
4.2 目标散射面积的测量原则.....	(81)
4.3 目标有效散射面积的测量方法.....	(82)
§ 5 空中目标散射特性的测量	(86)
5.1 飞机目标散射特性的模拟测量系统.....	(86)
5.2 飞机目标散射特性的实物测量.....	(90)
5.3 测量的误差来源及其解决办法.....	(95)
5.4 测量结果的处理与使用.....	(96)
§ 6 地、海面回波特性的测量.....	(98)
6.1 地面回波及其测量.....	(98)
6.2 海面回波及其测量.....	(104)
第三章 近炸引信与目标的物理模拟	(108)
§ 1 模拟	(108)
1.1 概述.....	(108)
1.2 模拟.....	(109)
§ 2 相似理论	(110)
2.1 相似现象.....	(110)
2.2 相似定理.....	(110)
2.3 单值条件.....	(113)
§ 3 相似判据的确定	(114)
3.1 方程式分析法.....	(114)
3.2 量纲分析法.....	(116)
§ 4 近炸引信物理模拟的内容	(118)
4.1 弹丸毁伤目标整个过程的模拟.....	(118)

4.2	实验研究无线电引信的启动规律	(118)
4.3	目标特性的模拟	(119)
4.4	无线电引信抗干扰性能的模拟实验	(119)
4.5	近炸引信可靠性的模拟研究	(119)
§ 5	物理模拟的原则和途径	(120)
5.1	原型目标低速运动下引信启动区的实验	(121)
5.2	弹目高速相对运动下引信启动区的实验	(123)
§ 6	连续波多普勒无线电引信模拟	(125)
6.1	电磁系统的模拟	(125)
6.2	交会过程的模拟	(128)
6.3	引信各环节的模拟	(129)
§ 7	物理模拟试验举例	(132)
7.1	具体参数范围	(132)
7.2	模拟系统	(137)
第四章	近炸引信的无线电遥测	(137)
§ 1	概述	(137)
1.1	无线电遥测概况	(137)
1.2	无线电遥测系统的组成及分类	(138)
§ 2	频分多路信号遥测系统	(139)
2.1	频分多路传输的工作原理	(139)
2.2	频分制遥测系统已调信号的频谱及带宽	(142)
2.3	频分多路信号的主要特性	(145)
2.4	频分多路系统的第二次调制	(147)
2.5	频分制遥测系统中的汇理设备	(149)
2.6	频分系统的失真及抗干扰性	(161)
2.7	频分制遥测系统中 FM 副载频的信道参数	(168)
§ 3	常规兵器用的 8318 无线电遥测系统	(172)
3.1	8318 无线电遥测系统	(172)
3.2	8318 无线电遥测系统在引信靶场试验中的应用	(176)
§ 4	空空导弹遥测系统	(180)
4.1	空空导弹引信遥测的特点	(180)
4.2	引信遥测参数	(180)
4.3	遥测系统	(180)
4.4	引信遥测弹	(182)
§ 5	弹道监测技术	(182)
5.1	工作原理	(182)
5.2	监测方法	(183)
§ 6	近炸引信遥测技术的发展	(183)
6.1	遥测传感器的研究	(184)
6.2	微波兵器遥测系统	(184)
6.3	存贮测试技术	(184)
6.4	用 CCD 器件进行测试	(185)
6.5	微处理机在遥测中的应用	(185)

6.6 新的遥测系统——沃尔什函数遥测系统	(186)
第五章 计算机在近炸引信测试技术中的应用	(187)
§1 用计算机进行数据拟合	(187)
1.1 求数学模型的初型	(188)
1.2 建立数学模型的数学基础	(188)
1.3 拟合程序流程	(191)
1.4 求非线性参数模型的初值	(191)
1.5 拟合结果	(193)
§2 微机控制的无线电引信低频部件选配调试系统	(194)
2.1 系统组成	(194)
2.2 电路及功能	(195)
2.3 系统软件	(196)
2.4 系统总体设计和调试	(196)
2.5 实际应用	(197)
§3 近炸引信计算机打靶仿真	(197)
3.1 系统组成与功能	(198)
3.2 目标特性测试	(198)
3.3 统一的目标特性的数学模型	(199)
3.4 多输入-多输出半实物打靶仿真系统	(200)
3.5 多功能信号储放仪	(201)
3.6 计算机与多功能仿真信号储放仪间的数据传输	(203)
3.7 仿真系统的工作过程及其控制与管理	(203)
§4 VXI总线在近炸引信测试中的应用	(206)
4.1 VXI模块结构	(207)
4.2 系统结构	(208)
4.3 VXI总线电气自动化测试系统的特点	(209)
4.4 VXI—引信测试系统	(209)
第六章 测量数据分析	(213)
§1 概述	(213)
§2 有关的基本概念	(213)
2.1 误差	(213)
2.2 精度	(214)
§3 误差的随机性	(215)
§4 随机误差的正态分布	(215)
§5 回归分析概念	(223)
§6 一元线性回归	(225)
6.1 一元线性回归的数学模型	(225)
参考文献	(233)

绪 论

近炸引信测试技术，也称之为实验技术，从科研和生产的实际情况来看，这两个名称具有较大的相容性。按照习惯沿用以及本书所含内容，我们仍称之为测试技术。

俄文“НЕКОНТАКТНЫЕ ВЗРЫВАТЕЛИ”通译为“非触发引信”。英文“PROXIMITY FUZE”一般都译为“近炸引信”。考虑到通用性与习惯用法，故本书仍定为“近炸引信测试技术”。

测量是人类认识自然和改造自然的重要手段之一。通过测量试验，人类对客观事物获得了量的概念以及质的结论。从大量的测试中总结出一般规律，再指导新的实验。从这一意义上来说，测试是打开自然科学“未知”宝库的一把钥匙。

哲人说：“作为规律，高度发达的科学和技术，总是伴随着高级的测量；简陋的科学是与初级的测量技术并存。”可以这样说，评估一个国家的科学和技术态势的最快方法是考察它所进行的测量和测量所积累的数据利用状况。测量学本身也在科学技术的发展中，逐步地形成了一门完整，精密及理论与实践密切结合的学科。

近炸引信与其它产品相比有其独特的规律。其中以高速、瞬态、实时为特点，以“一次性”为之“最”。正是这些特点，使得近炸引信测试工作比一般的测试工作要复杂、困难一些；也正是上述的特点，决定了近炸引信的测量往往是伴随着试验来进行的，这也是近炸引信测试技术区别于测量技术的原因所在；也正是，上述特点使得该项测试技术逐步发展日趋完善，成为一项名符其实的现代测试技术。

随着科学技术的发展，近炸引信测试技术具备了现代测试技术的所有特点，它已经逐步从过去的那种静态的、慢速的测量发展为动态的、实时、在线、遥测、多信息地对高速运动系统的动态过程的测量。

动态测量：指被测的量是多变的，测量过程要求时刻跟踪被测量的变化。例如测试引信在弹目交会过程中频率、幅度、相位的变化等。

实时处理：指在测量过程中要求立刻得到测量结果。意思是不舍弃观察信号，其处理时间能跟上信号变化的需要，或者说信号处理的速度能跟上信号变化的速度。在近炸引信的动态测试中，尤其在靶场测试中，几乎各项目测试都要满足实时处理的要求。

在线测量：不停机，在系统运行过程中监视或测量某些动态参数。这多用在专业厂的生产线上。

遥测：指接收端通过信息传递介质接收测量端所测信息的间接测量。例如要测量近炸引信在弹道上的工作状态，遥测是一种最有效的手段。

多信息测量：从信号中同时提取多个信息量的测量。例如在无线电引信测试中经常同时测试频率、幅度、相位等，有时还要同时测量高频部件和低频部件等若干个物理量。实际上，近炸引信对目标的探测过程，就是一个多信息测量及处理的过程。

由此可见，近炸引信的测试工作，已远远不是一个简单的比较测量，而是包括了信号采集、信号变换与传输、信号处理分析与识别、记录和显示、存贮的综合技术。

由于近炸引信的体制繁多，工作环境的独特，被测信号的奇特，背景环境的影响，静动

态的区别以及安全性等,除了少数必要的破坏性试验外,大多数测试都要求在安全的前提下实行无损检测,这就决定了近炸引信测试设备的非标性、复杂性。有时研制一台测试设备无论是从技术难度上还是经费上都不亚于引信的研制,这绝非妄言。一切重设计轻测试的看法都是极其有害的。因为引信性能的优劣,直接影响整个武器系统的最终效能。在现代化的大生产过程中,产品性能好坏的判断及取舍,只有靠测试。所以其中某一细小的考虑不周或失误,都会给测试带来很大误差,甚至产生谬误,有时带来的严重后果是不堪设想的;一些大型的综合性测试(如绕飞、火箭撬等)中的疏忽大意可能导致大量人力、物力、财力的浪费乃至给人员生命的安全带来威胁。

测试技术在近炸引信的基础理论研究、目标特性分析、电子对抗、仿真技术、试验技术等研究中占有十分重要的地位。它贯穿于近炸引信的研究、设计、试验、试制、生产、改进、使用的全过程。一个新的引信技术的诞生总是伴随着一套新的测试技术的出现。所以引信技术的发展,促进测试技术的研究;而测试技术的发展,又进一步推动引信技术的日臻完善。

近炸引信测试技术是各种学科和现代技术的综合结晶。它涉及广泛的自然科学领域。如电磁场理论,特别是小天线和近场区电磁波的传播,绕射、散射以及半导体复杂平面的反射理论及其测试技术。还有相似理论和模拟理论、遥测遥控技术、数据采集与处理技术以及电子计算机技术、电量和非电量的测量技术;空气动力学、物理光学、自动控制、仿真技术、传输线理论、微波技术、毫米波技术、专业数学等各种学科和专门技术。声、光、磁、电、机械等无所不包。除了涉及的科学技术领域广泛性外,触及到各个知识领域的深度也是每个专业工作者有目共睹的。

随着科学技术的发展,近炸引信测试技术也愈来愈向其高级阶段发展。一些新技术的出现,往往很快就被应用到测试技术上来。可以断言,近炸引信测试技术必将向自动化、数字化、计算机化方向发展,其测试结果越来越精确、直观,可信度越来越高,和实际情况越来越吻合。

根据目前我国近炸引信测试技术的现状以及国际上的趋势,本书拟包括下面几方面内容。

第一章:近炸引信灵敏度测试。灵敏度是近炸引信的主要技术指标之一。灵敏度测试是保证产品性能以及产品性能的一致性的一项重要手段。由于引信体制不同,灵敏度定义也各异,测试方法、测试设备也不尽相同。本章着重论述了无线电引信灵敏度的定义以及测试方法及原理。其中包括世界上通用的杆试验法以及同轴线法、屏蔽箱法、推板法等。同时也论述了微波引信、光学引信的灵敏度测试以及电容近炸引信灵敏度测试。

第二章:近炸引信目标特性的测试。目标特性研究是引信技术研究所关注的重要课题,也是引信设计的主要依据。引信就是要通过目标来获取信息,并利用这些信息选择空域和时域,适时地起爆战斗部。而目标特性的研究除了理论分析计算外,目前主要手段还是通过测试来获得。本章主要论述无线电波的有关散射理论,讨论了目标有效散射面积的测量方法和原则。并着重论述了飞机目标散射特性的模拟测量系论、实物测量及其测量结果处理,同时还讨论了海面回波特性的测量。

第三章:近炸引信与目标的物理模拟。近炸引信由于其一次性使用不可再生以及高速等特点,决定了其测试工作的困难。例如启动规律、可靠性、毁伤目标的过程等测试,如果采取实际测试,且不说测试工作难度,就其测试本身而言,就是一次毁坏过程。而物理模拟就是解决这类问题的有效手段。本章除介绍了相似理论等一些必备的知识外,着重讨论了无线

电引信启动规律、近炸引信可靠性、弹丸毁伤目标过程的模拟测试。介绍了目标模型保持原尺寸低速运动、引信弹体保持不动；目标模型保持原尺寸静止不动、引信及弹体作低速运动；目标模型保持原尺寸不动，而引信及弹体作高速运动或相反，以及缩比测试等。

第四章：近炸引信的无线电遥测。遥测技术在近炸引信技术的发展中占有重要地位。由于导弹和炮弹通常在试验后便毁坏了。为了取得引信在弹道上及弹目交会时的参数，遥测是必不可少的。根据近炸引信信号速变的特点以及近炸引信对遥测的需求，本章着重介绍了目前近炸引信常用的频分制遥测系统。为了加深对遥测的理解与认识，本章还介绍了地炮无线电引信的遥测系统实例以及空空导弹遥测系统，微波兵器遥测系统。同时还介绍了存贮测试技术、沃尔什函数遥测系统以及微机在遥测中的应用等。

第五章：计算机在近炸引信测试技术中的应用。随着计算机技术的发展，计算机在近炸引信测试技术中越来越得到广泛的应用。特别是测试技术向自动化、智能化方向发展，离开计算机是不可思议的。计算机作为控制与管理、数据处理、图形显示等方面的高超功能是其他仪器所无法比拟的。本章主要想通过几个实例，论述计算机在数据拟合、无线电引信在线测量、近炸引信打靶仿真等方面的应用。本章还对新近出现的 VXI 总线测试技术作了简要介绍，并试以 VXI—导弹引信测试系统作了有关论述。

第六章：测量数据分析。近炸引信的测试同其它测试一样，都有一个测量数据分析和利用的问题。测试的目的，就是要取得或再现真值。由于客观条件的限制，真值只是一个理想化概念。只要进行测试，就会有误差。可以说数据处理分析的好坏，直接决定数据的利用好坏甚至于数据的能否利用。本章就误差、精度等概念作了一般介绍外，还对误差的随机性、误差的分布以及回归分析进行了讨论。

无线电引信是近炸引信中使用最为广泛的一种引信。有些测试技术的基本原理、方法同样可以适用于其它工作原理的引信。本书论述了各种体制的近炸引信测试技术，其中无线电引信占了较多的篇幅。另外，本书也只是包容近炸引信测试技术的六个大方面，显然不能将近炸引信测试技术的方方面面尽收其中。就象近炸引信测试技术发展状况一样，永无止境，绝无终点。让读者和我们一道，为近炸引信测试技术的发展、丰富，相对完善作一些有益的工作。

第一章 近炸引信高频灵敏度测试

§ 1 近炸引信灵敏度的测试原则

近炸引信灵敏度一般定义是表征近炸引信感受目标存在的敏感程度。通常以引信启动时接收系统所接收的最小可检信号电平表示。其值越低灵敏度越高。

1.1 为什么要测近炸引信高频灵敏度

米波连续波多普勒无线电引信的组成,如图1.1所示。

对于米波多普勒无线电引信而言,自差收发机就是这种引信的敏感装置,自差收发机产生高频振荡,并通过它的天线向周围空间辐射电磁波,当引信辐射场内出现目标时,引信天线所辐射的电磁波有一部分被目标反射回来,并被自差收发机的同一天线所接收。由于战斗部和目标之间的相对运动,回波信号与发射信号间将产生一个连续变化的相位差,这相位差的变化频率为多普勒频率。在回波信号的作用

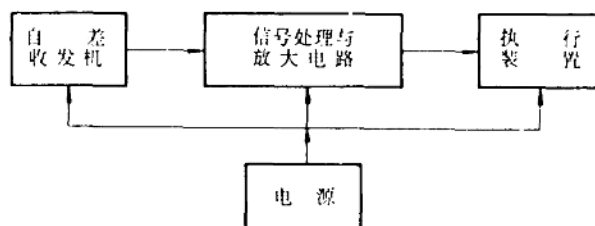


图 1.1

下,自差收发机产生了差拍振荡,这一差拍振荡通过检波器进行检波之后,即在自差收发机的输出端出现一个多普勒信号,它的频率是多普勒频率,其幅度和目标回波信号大小成正比。可见,这种低频信号的性质反映了弹丸和目标间的相对位置。

自差收发机目前有米波连续波多普勒体制,脉冲多普勒体制,调频体制等。

低频信号处理和放大电路。它只能对自差收发机输出端输出的低频信号,依照所规定的战术技术指标进行处理和放大。并使它能够适时控制引信执行装置中的执行开关,以保证无线电引信取得最佳炸点和提高引信的抗干扰能力。低频信号处理和放大电路,依照战术技术要求不同而组成也不同。一般情况下都必须具备选择电路;包括频率选择,增幅速度选择,作用时间选择、振幅选择等。其次是远距离解除保险线路,例如远距离接电电路,远解机构的定时线路,起爆电容器延时充电电路。再次是电源噪音抑制电路,包括稳压电源和滤波电路等。

执行装置的作用是当前级输出并达到一定幅值的信号作用下,执行装置适时闭合,并使储能器以足够的能量供给电点火管点火,进而通过传爆系列引爆战斗部。

电源是保证以上各电路正常工作时,所需的能源。

图1.1,从无线电引信组成的观点来看,这种引信可以分为四个部分来分析和进行测试,这四个部分便是自差收发机,低频信号处理和放大电路,执行装置和电源。显然,只有这些部件有机组合起来才能共同保证引信适时输出引爆信号起爆战斗部。但是为完成适时起爆弹

丸的目的，应该使各个部件本身，严格地达到各种性能指标。当然这些性能指标的要求是按照预定的战术技术要求所规定的。因此在研究无线电引信性能测试时，可以对它们单独进行考虑而不顾及其它部分的影响。至于这些部件性能的协调和部件间的匹配问题，则要通过对整个引信进行综合测试来解决。

从图1.1可以看出，各种原理的近炸引信的组成框图中都具有信号处理与放大电路，执行装置和电源。只有自差收发机是这种引信所特有的。因此可以得到结论，研究多普勒无线电引信性能测试的中心问题是研究自差收发机的性能测试。

图1.2是箭引一与引信自差收发机的电路原理图。该引信是利用弹体作为自差收发机的发射天线和接收天线。

自差收发机在线路上的特点是，它是一个带有检波负载的自激振荡器。由于天线和振荡器直接耦合，因此天线成了振荡器的负载。天线的输入阻抗成了自差收发机振荡器回路的一个组成部分。

从自差收发机作为这种引信的敏感装置这一基本事实出发，主动型米波多普勒无线电引信自差收发机的性能，应当完全满足战术技术要求。通常这些战术技术指标是要求自

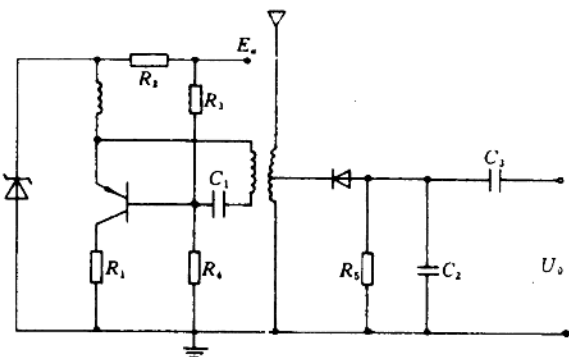


图 1.2

差收发机应有一定的灵敏度，一定的发射功率，一定的工作频率以及抗干扰性能等。因此和这些要求相应的就有四个测试项目。对于自差收发机的发射功率，工作频率以及抗干扰能力的测试方法和一般无线电电量测量方法是相同的，而且是易测的。众所周知，这些项目的测试还没有直接牵涉到自差机作为引信敏感装置的性能，即自差机对目标的灵敏度。对自差收发机灵敏度的测试不仅是在生产中用以鉴定引信产品性能，而且也是为了在引信研究阶段中能正确地确定自差收发机的最佳工作状态。

1.2 表征自差收发机性能常用的几个灵敏度

根据自差收发机灵敏度的定义，它可用公式 (1.1) 表示。

$$S_s = \frac{U_{\omega}}{\Delta R_A / R_A} \quad (1.1)$$

式中： U_{ω} ——自差收发机输出的低频信号电压，单位：伏 (V)

R_A ——表征弹体天线输入阻抗的实数部分，单位：欧姆 (Ω)

ΔR_A ——由于目标作用而引起天线输入阻抗的实数部分变化量，单位：欧姆 (Ω)。

人们通常把根据自差收发机灵敏度的定义，所定义的灵敏度 S_s 称为自差收发机的高频绝对灵敏度。

高频绝对灵敏度 S_s ，对于衡量自差收发机的性能和设计自差收发机都是一项极重要的指标，然而为获得这项指标的测试确是具有一定的困难。因为在实验室无法实现带有无线电引信的战斗部和目标高速运动时的真实的交会条件。尽管如此，许多从事引信测试的技术人员，

经过深入分析自差机的工作原理,借助于日益成熟的仿真理论。灵活地运用线性和非线性元器件配合,设计了高频绝对灵敏度的测试装置,并运用这些装置检测了引信。然而,运用这些测试装置测试高频绝对灵敏度时,操作相当繁琐,只适用于无线电引信研制阶段。事实是无线电引信要大批量生产,为满足在批量生产中对引信性能快速检测是利用相对比较法。从自差收发机的定义式(1.1)可见,若在实验室条件下能够把目标对引信的作用相对固定,也就是把 $\Delta R_A/R_A$ 值固定的情况下,每发无线电引信自差收发机的检波输出 $\Delta U_{\Omega m}$ 值是可以测得到的。引信的高频绝对灵敏度 S_A 是与 $\Delta U_{\Omega m}$ 值成正比的,因此在相同 $\Delta R_A/R_A$ 值条件下,自差收发机输出的检波电压信号 $\Delta U_{\Omega m}$ 值可以相对地反映引信自差收发机的性能,工程上一般把这种条件下所测得 $U_{\Omega m}$ 值称为自差收发机的高频相对灵敏度。同样,如果在实验室条件下,使得每发引信的自差收发机输出的检波电压信号 $U_{\Omega m}$ 值相同,那么,自差收发机的高频绝对灵敏度 S_A 值与 $\Delta R_A/R_A$ 值成反比。显然在相同的 $U_{\Omega m}$ 值条件下,同样可以利用 $\Delta R_A/R_A$ 值的大小表征自差收发机的性能。但是 $\Delta R_A/R_A$ 值是很难测得到的,因此在科研和生产中采用引信执行级动作瞬间某一个特征量来代替 $\Delta R_A/R_A$ 值。从这种测试过程可知这个特征量表征了引信的总体性能,故工程上把这个特征量称无线电引信相对总体灵敏度。

无线电引信的高频相对灵敏度和相对总体灵敏度,在实验室条件下,利用物理模拟的方法,这两个量是很容易测得的。因此无论在科研阶段还是在批量生产中都是采用这两个灵敏度值来度量无线电引信的性能。

1.3 无线电引信测试原则

一般来说,某些机电产品,在生产检测中,要鉴定产品性能,只要使该产品处在正常使用条件下,可根据对产品的性能指标进行检测即可鉴定产品的性能。但对于自差收发机而言,它是弹载无线电装置,依靠弹丸在高速飞行过程中,弹丸和目标之间相对运动时产生的多普勒效应来进行工作的。假设辐射系统置于自由空间中,且自差收发机天线输入端的电压 u_i 及电流 I_i 。可以依据图1.3所示的自差机天线的等效电路,根据克希霍夫定律,当辐射场内没有目标时,则 e_x 等于零。并可写出下面的关系式

$$u_i = u_{r0} e^{j\omega_0 t} \quad (1.2)$$

$$I_i = I_{r0} e^{j\omega_0 t} \quad (1.3)$$

式中: u_{r0} —— 天线电压的幅值;

I_{r0} —— 天线电流的幅值;

ω_0 —— 自差机发射信号的角频率。

如果天线处于调谐状态,则

$$Z_{r0} = \frac{u_{r0}}{I_{r0}} = \text{const}$$

当自差收发机天线的辐射场内出现目标时,则在天线上增加的电动势 e_x 为

$$e_x = E_{x0} e^{j(\omega_0 t - \phi)} \quad (1.4)$$

式中: $\phi = \phi_m + \phi_y$;

ϕ_m —— 目标反射电磁波时引起的相移;

ϕ_y —— 电磁波到目标的往返时间 ($\tau = 2R/C$) 所引起的相移。

依据图1.3,利用克希霍夫定律可得

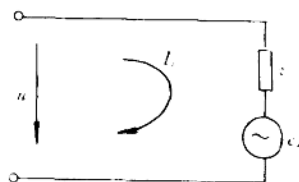


图 1.3

$$u_i = u_{i0} + e_x = (u_{i0} + E_{x0}e^{-j\theta})e^{j\omega_0 t} \quad (1.5)$$

则天线输入阻抗为

$$Z_i = \frac{u_i}{I_i} = \frac{u_{i0} + E_{x0}e^{-j\theta}}{I_{i0}} = Z_{i0} + \frac{E_{x0}}{I_{i0}}e^{-j\theta} \quad (1.6)$$

令 $B = E_{x0}/I_{i0}$ 则

$$Z_i = Z_{i0} + Be^{-j(\phi_m + \phi_y)} \quad (1.7)$$

通常可以认为 $\phi_m = \text{const}$, 而 $\phi_y = \omega_0 \tau_0 = \omega_0 2R/C$, 所以

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{d(\phi_m + \phi_y)}{dt} = \frac{d\phi_y}{dt} = \omega_0 \frac{2}{C} \cdot \frac{dR}{dt} \\ &= \omega_0 \frac{2Vr}{C} = \Omega_d \end{aligned}$$

式中: Ω_d ——多普勒信号角频率。则

$$Z_i = Z_{i0} + Be^{-j(\phi_m + \int_0^t \Omega_d(x) dx)} \quad (1.8)$$

$$\Delta Z_i = Be^{-j(\phi_m + \int_0^t \Omega_d(x) dx)} \quad (1.9)$$

式 (1.8) 表示在天线辐射场中有目标存在时, 天线输入阻抗的表示式。式 (1.9) 表示是天线输入阻抗由于目标的出现而引起的阻抗变化量。

上述就是多普勒体制的无线电引信工作原理, 可见要在实验室条件下或在生产条件下实现对引信产品的性能测试是十分困难的。例如实现弹目的高速运动 (300m~500m/s) 是不可能的, 更加困难的是弹药产品的一次性使用。假若在实验室条件下实现对无线电引信产品进行有效的性能测试, 无论是采用物理模拟, 还是计算机仿真都必须满足以下两点:

(1) 模拟无线电引信的自由空间状态, 即人为地制造一个局部自由空间。

(2) 模拟目标对无线电引信的作用, 即人为地制造一个目标模拟装置。

根据以上两项原则, 工程人员研究出各种各样原理的而且广泛地运用在科研和批量生产中的无线电引信性能测试装置。其中部分检测装置仅用于检测无线电引信高频相对灵敏度或相对总体灵敏度。

§ 2 无回波吸收室

2.1 引言

根据无线电引信性能测试原则, 首先要在实验室条件下人为地制造一个自由空间条件。本节将具体地讲述这一问题。

目前在科研和生产中, 无线电引信产品性能测试以及单个部件的测试, 有的项目在室内进行, 有的项目在室外进行。然而无论是在室外还是在室内进行产品检测都不可避免地带来一系列误差。其中最主要的原因是检测环境所造成的电磁波反射干扰。例如测量天线性能, 为了减少电磁波干扰将全部设备拖到室外去, 在自由空间条件下测量其各项性能。也就是说, 在一个没有从周围物体反射回来的电磁波干扰的空旷地方进行测量。这在一定条件下是允许的。这里所说的一定条件是指第一有没有这样的空旷场所。第二被测产品的数量要少。但是这些试验环境无论如何也满足不了无线电引信工作的自由空间环境的要求, 况且要受到天气条件

的限制。比如夏季的风和雨，温度，湿度，冬季的冰雪等。

无线电引信测试技术人员极力寻求一个无线电引信辐射的电磁波，它可以自由地向四面八方辐射而没有任何反射干扰。换句话说就是极力寻求一个在实验室条件下，能够提供一个为无线电引信工作的自由空间。为达到这个目的，正是本节要讲述的无回波吸收室。

无回波吸收室（又称电波暗室，电波无反射室）是指用无线电波吸收材料构成内壁的房间，利用这种特殊的墙壁，使得入射的电磁波达到最大限度地吸收，最小限度地反射。且在室内的某一部分空间形成一个接近“自由空间条件”的无回波区域。这样把带有近炸引信的弹体放置在接近“自由空间条件”的区域内，其电磁波将象在自由空间内一样向周围无反射地辐射。为了防止外来电磁干扰，在无回波吸收室的外壁全部罩上电波隔离层。比如铜网和金属板等。

早在 30 年代，首先是荷兰制成了谐振型吸收材料，第二次世界大战的爆发，出于战争的需要，德、美、苏等国相继研制反雷达用的吸收材料。早在 50 年代，美国就建立了世界上第一个无回波吸收室。它的问世，受到各国的重视。尽管无回波吸收室造价昂贵，由于无回波吸收室用途很广泛，另外可以大大缩短产品研制周期，节省大量的科研经费，大大提高工作效率。所以很多国家都建造了相当数量适用于不同目的的各种各样的无回波吸收室。例如美国、苏联，德国，日本等国家。美国最大的无回波室为 $53.3\text{m} \times 15.8\text{m} \times 15.8\text{m}$ ，应用频率范围是 $30\text{MHz} \sim 100\text{GHz}$ ，静区性能均在 -40dB 以下。我们国家也先后成功地建造了对应各种波段的无回波吸收室。

2.2 无回波吸收室的用途

无回波吸收室可以提供“自由空间条件”，若把无线电引信发射机放在“自由空间条件”内，使其入射波到各内壁上的电磁波尽可能地吸收，产品就相当于在自由空间工作一样。这就是说，无回波吸收室能达到用一个有限的空间来模拟无限大的自由空间的目的。从而使很多需要在野外去做的各种测试工作，可以在无回波吸收室内来进行，克服了受气候和周围环境的影响，并增强了保密性。

无回波吸收室用途是相当广泛的，几乎所有无线电参数的测试工作都可在无回波吸收室内进行测试。在天线的研究中，一般要测量天线辐射方向图、极化特性、天线的增益、天线的辐射电阻、天线的互换性。在雷达截面研究中，需测量目标的有效反射面积，目标特性的测试。在整机和综合无线电工程研制中，测量整机系统灵敏度，测量跟踪特性，有效辐射功率，火箭控制或导弹制导等各种各样的模拟试验。各种飞机，导弹，人造卫星上的无线电设备，宇宙飞船上的无线电通讯设备等都可以在无回波吸收室内进行综合性试验。无回波吸收室的示意结构剖面图如图 1.4 所示。

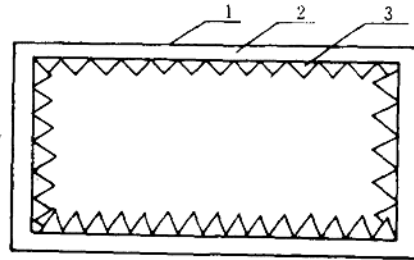


图 1.4

- 1. 金属屏蔽层；2. 土建层；
- 3. 无线电波吸收材料

2.3 无线电波吸收材料

无线电波吸收材料，顾名思义，就是用来吸收电磁波能量的，极像黑色颜料吸收光线一样。一般要产生明显的吸收作用时，吸收体最少需要有 $1/4$ 波长厚。

吸收体的吸收性能可以这样理解，当一个电磁波碰到某物体表面上时，电磁波的一部分能量要反射回去，一部分能量要穿过边界传到第二媒质里。进入物质表面的某些电磁波以各种途径穿过去并在物质表面的另一边变成辐射能。当然，电磁波的强度变弱了，没有穿过去的那部分电磁波能量就被吸收了。因此要达到理想吸收电磁波，首先无线电波吸收材料应能保证把入射到材料表面的电磁波全部透入。即进入到无线电波吸收材料里边去，使其电磁波反射极小。其次，若使电磁波全部进入吸收材料内，要求电磁波入射线要垂直吸收材料的表面。再次，透入到吸收材料里的电磁波能量应能有效地把射入的电磁能量全部吸收。

无线电波吸收材料根据吸收材料所用的不同原理，可将无线电波吸收材料分成以下几类：

1. 窄频带干涉型吸收材料

这类吸收材料是装在金属板上四分之一波长吸收层。多用铅粉、炭粉、石墨粉、铁粉、铁氧体等加适宜的粘合剂塑制成平板材料。电磁波通过四分之一波长层从金属板面反射回来，再通过四分之一波长层，其相位改变了 180° 。在入射波与反射波相互干涉时，彼此减弱，使得从材料里反射回来的电磁波电平就很小了。可见，当入射波的波长和入射角发生变化时，反射波和入射波的相位差就不是 180° 了，于是反射波的电平明显增大，显然这类材料不太适宜宽频段工作的吸收室采用。

2. 宽频带多层型无线电波吸收材料

为了使无线电波吸收材料在宽频带大入射角下吸收电磁波，而且反射电平要小。必须满足两个条件，首先使投射到分界面上入射波最大限度地进入吸收材料。其次是使已进入吸收材料中的电磁波能量被损耗掉。换句话说就是要解决阻抗匹配问题和解决能量转换问题。

多层型无线电波吸收材料的电磁波吸收原理图如图1.5所示。

这种材料是按阶梯过渡阻抗匹配形式制作的。利用层数增多，达到相邻两层的波阻抗差越小，则阻抗匹配越好，这样反射波的电平就大大减小了。频带就可以展宽，这种材料可由聚苯乙烯泡沫塑料渗入损耗物质（如炭黑）而制成。在工艺上，制造吸收材料时，按厚度增加而逐渐增加电损耗物质的含量。为了增大吸收效果，在最后一层表面设置波纹状金属板或金属箔层，以便

使通过吸收材料的余波经金属板反射后将出现的反射余波再次吸收以达到更好地吸收效果。

3. 尖劈型无线电波吸收材料

尖劈型吸收材料从外型上分有角锥型、楔型、台锥型等。角锥型无线电波吸收材料如图1.6所示。

尖劈型无线电波吸收材料的吸收原理，当相邻锥尖间距为 a ，工作波长为 λ 时。若 $a \leq \lambda$ 时，

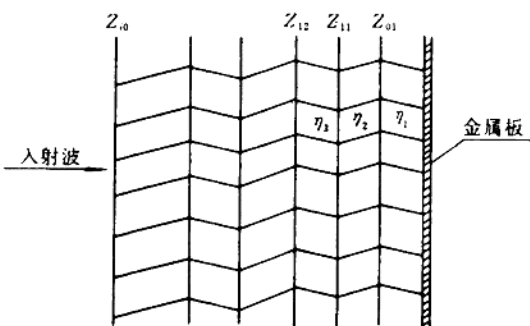


图1.5

这属于长波段，基本上服从传输线理论，因此可以利用传输线理论去分析。当 $a \geq \lambda$ 时，这种情况属于短波段。吸收原理可按几何光学多次反射吸收来说明。角锥型吸收材料在几何外形上从锥尖到锥底构成倾斜的渐变线过程。当波前到达锥尖后，开始“察觉”还不明显而继续前进。所以锥尖越尖，起始反射越弱。随着波前进一步深入，电磁波对吸收材料存在“察觉”越感明显，产生更多的反射，从而逐次被吸收。最后反射出的电磁波能量已大大减弱了。应当指出当电磁波的入射角增大时，意味着吸收材料的锥角增大，反射次数相应地减少。所以角锥型无线电波吸收材料要求电磁波入射角不得超过 60 度。若电磁波的入射角超过 60 度以后，此时角锥型无回波吸收材料的吸收性能变坏。为消除或克服角锥型吸收材料的缺点，出现了带斜度的角锥型无线电波吸收材料，一般是把具有带斜度角的角锥型吸收材料安置在无回波吸收室的墙壁上，并保证它们的轴线指向发射天线。

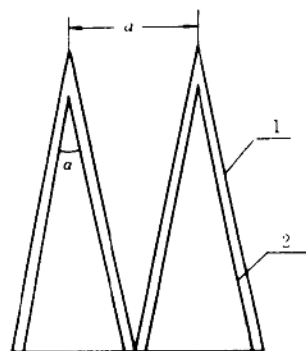


图 1.6

1. 涂层；2. 基体；a. 锥尖间距；
α. 锥角

还应指出吸收材料在入射波电场的作用下，也会产生二次辐射，它的辐射场是所有反射、散射场的矢量和。无线电引信工作频域很宽，应当选用较大尺寸的角锥。例如，国产 MA—1200 型角锥吸收材料的实测性能如图 1.7 所示。

从图 1.7 中曲线可以看出，这种吸收材料只能满足在 200MHz 以上的要求。

4. 铁氧体材料

这是一种很有前途的半导体吸收材料。这种材料使用的频带宽，可由 40MHz 到 3000MHz，但厚度不大，只有 6.3mm 到 12.7mm。它的缺点是重量大，功率反射系数较大，由 1% 到 7% 即 -20~-11.5dB。美国 M732 无线电引信调试时的引信负载箱，就是用铁氧体箱制成的，实际上是一种局部的吸收隔离室。

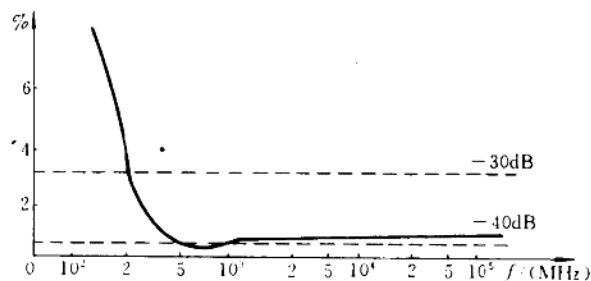


图 1.7

无线电波吸收材料是一种能够大量吸收入射到它上面的电磁波辐射能量，而反射、散射和透射都很小的新型电子材料。因此无回波吸收材料获得了广泛地应用。除主要用于无回波吸收室的吸收材料外，还有无论是在实验室内还是在实验室外对无线电引信性能和部件性能进行检测时，为减少局部地区的电磁波反射的影响，可以在局部地区铺设无回波吸收材料。还有在防务系统中，对卫星、导弹、飞机、雷达、坦克、大炮等各种空中或地面目标的不同部位按装上吸收材料，来吸收无线电波，起到了减小有效反射面积的作用，从而防止或减少了敌方的干扰、攻击。

2.4 米波吸收材料的测试原理和方法

衡量吸收材料的一个很重要的参数，就是材料的反射系数。假设把反射波与入射波电场强度的振幅之比，称为材料的电压反射系数。即

$$\Gamma_v = \frac{E_R}{E_A} \quad (1.10)$$

式中: Γ_v ——材料的电压反射系数;

E_R, E_A ——分别表示反射波和入射波电场强度的振幅值。

反射波与入射波功率之比, 称为材料的功率反射系数。即

$$\Gamma_w = \Gamma_v^2 = \frac{E_R^2}{E_A^2} = \frac{P_R}{P_A} \quad (1.11)$$

式中: Γ_w ——材料的功率反射系数;

P_R, P_A ——是反射功率和入射功率。

就米波吸收材料而言, 反射系数测试方法, 可分为两类:

①自由空间测量法 利用测量自由空间驻波系数或反射电平, 来求得材料的反射系数。

②展宽波导法 利用测量传输线系统的驻波系数, 求得材料的反射系数。

下面着重介绍一下自由空间测量法——空间驻波法。

此法用来测量材料垂直入射时的反射系数, 场地布置如图1.8所示。

测试时, 发射天线, 接收天线

和样品中心的三点要调整在同一电轴线上。显而易见, 若材料和周围环境无反射时, 则接收天线只收到从发射天线来的行波。若材料和环境等有反射, 则反射波与发射天线来的入射波在空间形成驻波, 接收天线收到的是一合成场强。通过缓慢地前后移动样品小车, 可测出空间驻波的大小, 由驻波系数即可计算出样品材料的反射系数。令

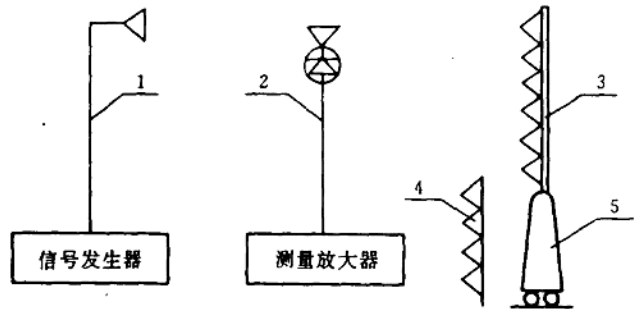


图 1.8

1. 发射天线; 2. 接收天线及检波器; 3. 被测样品材料和金属板;

4. 屏蔽吸收材料; 5. 样品小车

E_R ——接收天线收到的入射场强;

E_A ——接收天线收到样品的反射场强;

E_D ——接收天线收到环境的反射和散射总场强。

当样品移动时, E_R, E_A, E_D 三者在空间叠加, 其最大最小场强值分别为

$$E_{\max} = |E_R + E_D| + E_A = E_R + E_D + E_A \quad (1.12)$$

$$E_{\min} = E_R + E_D - E_A \quad (1.13)$$

(1.12)、(1.13) 两式相加, 相减, 可得

$$E_R + E_D = \frac{1}{2}(E_{\max} + E_{\min}) \quad (1.14)$$

$$E_A = \frac{1}{2}(E_{\max} - E_{\min}) \quad (1.15)$$

由于环境的反射和散射场强远小于入射场强, 即 $E_D \ll E_R$, 则 $E_R + E_D \approx E_R$ 。所以样品材料的电压反射系数 Γ_v 可由 (1.14) 式和 (1.15) 式求出: