



王伟策 方向 张卫平 等著

智能封锁弹药中的 智能探测技术



国防工业出版社
National Defense Industry Press

智能封锁弹药中的 智能探测技术

王伟策 方 向 张卫平 马光彦 蒋新胜
刘 强 孙 峥 罗 珊 邳熙彪 著

國防工業出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书全面地论述了智能封锁弹药的基本知识、结构原理、作用特点及发展趋势,分别对目标声学 and 地震动的基本理论、外场测试技术、目标物理场特性分析等专业基础理论进行了系统深入的介绍,重点论述了智能封锁弹药中的目标预警技术、信号分离技术、阵列优化技术。对智能封锁弹药中最关键的定向、定距等技术从理论分析、外场试验和数值仿真相结合方面做了深入分析和应用,提供了有实用价值的关键技术。

本书可作为高等学校弹药类及相关专业的研究生教学用书,也可供从事智能封锁弹药研究、设计人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能封锁弹药中的智能探测技术/王伟策等著. —北京:
国防工业出版社, 2016.6

ISBN 978-7-118-10807-1

I. ①智… II. ①王… III. ①智能技术—应用—探雷
IV. ①E951.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 071128 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10 字数 200 千字

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 80.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

智能封锁弹药是一种新型的封锁弹药装备,是现代封锁弹药的主要发展方向之一。智能封锁弹药在战场条件下,可自动远距离探测目标信息,对地面坦克、装甲车辆、低空飞行的直升机、巡航导弹等技术兵器进行识别,并对目标进行跟踪,在弹药威力最佳作用范围对目标实施攻击并毁伤目标,有些智能封锁弹药还可识别敌我。在现代战争中,智能封锁弹药将发挥其他高技术兵器不可替代的作用,20世纪80年代以来,外军十分重视智能封锁弹药的研究发展,把智能封锁弹药作为智能兵器研究的突破口。20世纪90年代末,美军和俄军相继研制出防坦克和防直升机智能封锁弹药。外军把初级阶段的智能封锁弹药称作“灵巧地雷”(Smart mine),如美军M93“大黄蜂”地雷就是一种防坦克智能封锁弹药。

我国也十分重视智能封锁弹药的研究发展,国家高技术“863”计划把封锁弹药智能系统列为重点课题,解放军理工大学野战工程学院承担此项重点课题的研究。其在智能封锁弹药理论与技术,包括目标信息探测、智能分析与处理、目标识别与跟踪定位、智能控制等方面研究取得突破,获得重要成果,为装备型号研制打下了坚实基础。

本书依托装备预研课题研究,采用理论、靶场试验和数值仿真相结合的研究方法,讲述了智能封锁弹药智能探测及应用技术。解放军理工大学封锁弹药研究中心已安排编写出版智能封锁弹药的系列丛书,将对智能封锁弹药涉及到的关键技术进行整理、归纳,用以供有关人员教学和研究参考。

本书全面地论述了智能封锁弹药的基本知识、结构原理、作用特点及发展趋势;分别对目标声学 and 地震动的基本理论、外场测试技术、目标物理场特性分析等专业基础理论进行了系统深入的介绍;重点论述了智能封锁弹药目标预警技术、信号分离技术、阵列优化技术。对智能地雷最关键的定向、定距等技术从理论分析、外场试验和数值仿真相结合方面做了深入分析和应用,不仅填补了国内此类专著空白,而且提供了有实用价值的关键技术。本书在编著过程中,注意吸收了近年来本领域的最新文献资料,特别是融入了作者的科研成果。本书内容自2000年开始在研究生教学中使用,满足了教学需要,提高了教学质量。

本书共分8章,是解放军理工大学智能封锁弹药研究中心团队集体创作,王伟策教授、方向教授、张卫平博士完成主要内容撰写,马光彦、蒋新胜、刘强、

孙峥、罗珊、郅熙彪等博士也都勇挑重担，参与了项目研究和撰写工作。撰写中得到各级领导和兄弟单位的热情支持和帮助，南京理工大学的王儒策教授和徐学华研究员审阅了本书。在此表示衷心的感谢。

本书有不足之处，敬请读者指正。

作 者

2015 年 11 月

目 录

第 1 章 概论	1
第 2 章 目标物理场特性测试与分析	7
2.1 声波传播特性	7
2.1.1 声场	7
2.1.2 声传播模型	7
2.1.3 传播过程中的声衰减	8
2.2 目标声和地震动信号采集系统	11
2.3 目标物理场测试方法	14
2.4 目标物理场特性分析	15
2.4.1 坦克目标声场特性分析	15
2.4.2 坦克目标地震动场特性分析	17
2.4.3 战场背景干扰噪声特性分析	19
第 3 章 预警技术	22
3.1 目标特征	22
3.2 基于模式识别的预警技术	23
3.3 基于过零率检测技术的目标预警	24
3.3.1 过零率理论	25
3.3.2 目标信号的过零率特性分析	27
第 4 章 多传感器探测技术	30
4.1 多传感器数据融合的基本原理	31
4.2 多传感器信息融合常用的理论与算法	32
4.3 目标识别与跟踪的计算机仿真	43
4.3.1 目标的识别	43
4.3.2 目标方位角的跟踪	45
第 5 章 信号分离技术	47
5.1 盲信号处理问题的一般描述	47

5.2	盲源分离的数学模型	48
5.2.1	线性瞬时混合模型	49
5.2.2	线性卷积混合模型	50
5.2.3	盲源分离的基本假设	51
5.3	盲源分离和独立分量分析的关系	52
5.4	信号的预处理	52
5.4.1	零均值化	53
5.4.2	白化	53
5.5	统计独立性及其度量	54
5.5.1	统计独立性	54
5.5.2	信号独立性度量	55
5.6	线性瞬时混合信号盲源分离算法	57
5.6.1	基于二阶统计量的算法	57
5.6.2	基于高阶统计量的算法	59
5.6.3	基于信息论的算法	61
5.7	算法性能评价指标	62
5.7.1	分离精度性能指标——PI 值	62
5.7.2	噪声缩减率指标	63
5.8	目标源数目估计算法	63
5.9	线性混叠信号盲分离实例	65
5.9.1	亚高斯声信号混叠	65
5.9.2	亚高斯与超高斯声信号混叠	71
5.9.3	实测混和信号盲分离	78
5.10	含有噪声的混叠声信号盲分离	79
5.10.1	含噪信号模型分析	79
5.10.2	白化算法的去偏	80
5.10.3	有噪声数据的 FastICA 算法	81
5.10.4	基于累积量的自适应 ICA 算法	82
5.10.5	噪声混叠实测信号的 ICA	83

第 6 章 阵列优化技术 88

6.1	窄带极大似然目标定位算法模型	88
6.2	窄带信号随机极大似然目标位置估计算法	90
6.2.1	SML 算法推导	90
6.2.2	SML 估计统计性能	91
6.3	窄带信号单目标位置估计误差	92
6.4	宽带信号单目标位置估计误差	95

6.5	常见阵列误差分布规律	96
6.5.1	二元阵误差分布	98
6.5.2	线阵误差分布	98
6.5.3	三元阵误差分布	100
6.5.4	四元以上平面阵列误差分布	101
6.5.5	平面均匀圆阵误差分布	102
6.6	近场和远场划分界限	105
6.7	战场条件下距离和方向估计误差分析	106
第7章	被动距离估计技术	107
7.1	幅频域距离估计原理及算法	107
7.2	距离估计误差分析	108
7.2.1	已知 $\bar{P}_z(r, f_0)$, 距离估计误差分析	109
7.2.2	未知 $\bar{P}_z(r, f_0)$, 距离估计误差分析	117
7.2.3	目标类型差异和大气吸收函数差异, 对距离估计误差的影响	119
7.3	计算实例	120
第8章	多目标 DOA 估计技术	122
8.1	窄带信号 DOA 估计	123
8.1.1	窄带信号 DOA 估计模型	123
8.1.2	窄带信号 DOA 估计方法	124
8.1.3	非线性目标函数优化计算	125
8.1.4	初值估计方法	125
8.2	宽带信号 DOA 估计	126
8.2.1	宽带信号 DOA 估计模型	127
8.2.2	通用空间相关矩阵 DOA 估计方法	128
8.3	宽带信号目标数目估计方法	132
8.4	计算实例	133
8.4.1	仿真计算实例	133
8.4.2	实验计算实例	139
参考文献		142

第1章 概 论

说起地雷，人们自然会想起电影“地雷战”中那些炸毁日本侵略者的铁西瓜。封锁弹药中的地雷是中国在一千多年前发明并在战争中使用的武器。封锁弹药通常布设在地面或地面下，用以构成地面坦克装甲目标，超低空飞行器目标障碍物的专用爆炸性武器。封锁弹药主要由壳体（含炸药装药）和引信组成，在目标作用下起爆或自动探测，跟踪目标起爆以及操纵起爆，以杀伤敌有生力量和毁坏其技术装备，按用途分为防坦克封锁弹药、防步兵封锁弹药、防空封锁弹药和特种封锁弹药；按配用的引信分为触发封锁弹药、非触发封锁弹药和操纵封锁弹药；按制作方式分为制式封锁弹药和应用封锁弹药。

封锁弹药在战争中得到快速发展，这些封锁弹药发挥了重要作用。已从压发、绊发等触发弹药，发展为配用磁引信、声引信等非触发封锁弹药，这些封锁弹药不是受目标直接触动作用，而是受目标物理场作用而发火。近 20 年又出现了智能封锁弹药，使封锁弹药成为重要的现代化武器装备。

智能封锁弹药能自主探测、识别、定位、跟踪和主动攻击目标的封锁弹药，具有远距离感知、通信、遥控、分配攻击目标、雷场修复及敌我识别等功能，通常组成封锁弹药场网络在战场上使用，是一种重要的信息化弹药。

封锁弹药是一种有效、可靠、廉价的爆炸性障碍器材，主要用作阵地防御障碍。不仅能起到迟滞敌人，保护自己的作用，而且可以杀伤敌人的有生力量，破坏敌人的技术兵器，具有杀伤和心理威胁双重作用。随着现代电子技术的发展，高科技在武器装备中的运用，使封锁弹药品种更加多样化，性能也进一步提高。加上火箭、火炮、飞机等远距离大面积快速机动抛撒布设，使封锁弹药作用区域显著扩大，封锁弹药的作战效能得到进一步提高。

智能封锁弹药采用被动探测技术，可以克服通过雷达等主动式信号发现目标的武器自身也成为易暴露和易受攻击目标的缺陷。智能封锁弹药探测目标声波，该探测方法不易被敌方所侦测，因此具有隐蔽性强，攻击具有突发性，对敌方的武器装备不仅有很大的毁伤力，而且对敌方心理上也具有很强的威慑性。

随着新技术的出现，封锁弹药在技术上产生的重大突破，使封锁弹药正在发生深刻变革。其中第一代压发型防坦克封锁弹药已逐步减少，在大量装备和运用第二代防坦克封锁弹药的同时，世界各国正在积极研制具有广域、智能作用的第

三代高技术封锁弹药。20 世纪 80 年代以来，继美国之后，英、法、德、意等国也开始研制以高技术地雷为代表的第三代高技术封锁弹药。这些封锁弹药的共同特点是：在复杂的战场环境中能够自动警戒、捕获，识别坦克、装甲车辆及低空飞行器目标，探测出目标的运动参数，在最佳时机对捕捉到的目标实施攻击，对目标造成最大程度的毁伤。智能封锁弹药可人工布设，也可以用车辆、火箭、飞机、导弹、炮弹等多种手段布设。这种集火力、障碍于一身的新型封锁弹药已由传统的防御性武器变为具有攻击能力的武器，从“静态”的“固定”障碍变为“动态”的“机动”障碍。

随着无线网络技术和多传感器数据融合技术的发展，智能封锁弹药场的出现使智能封锁弹药的应用又上了一个新的台阶，不仅提高了单个智能封锁弹药的效能，而且扩展了封锁弹药的概念，使智能封锁弹药集防御、攻击和监控为一身，成为陆上的一个新概念武器装备。

智能封锁弹药是从 20 世纪 80 年代末，在灵巧地雷概念基础上重点发展的智能兵器。美国当时把人工智能技术列为十大军事高技术之一，而在优先发展的人工智能应用技术把智能雷列为第一位，进行重点研究。

美国研制的广域地雷（WAM）M93 是智能封锁弹药的典型，见图 1-1。

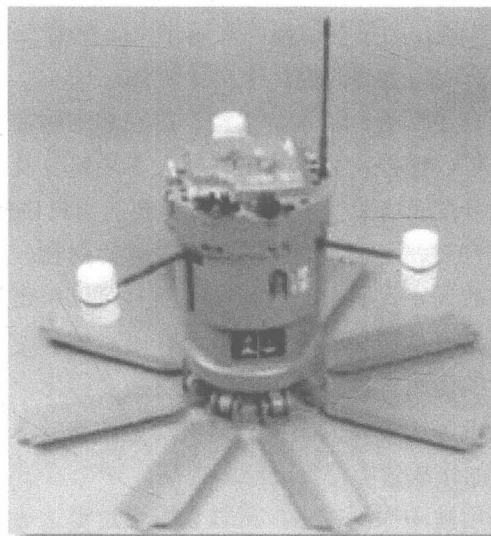


图 1-1 WAM 广域雷

WAM 广域雷采用斯基特（SKEET）战斗部技术，布设后展开八条稳定支架和一个传感器阵列，该阵列由三个声传感器和一个震动传感器组成。WAM 广域封锁弹药利用信号处理系统对声传感器和地震动传感器接收到的目标信号进行处理，完成对目标的预警、分类和跟踪，当在 100m 毁伤半径内发现目标后，地雷自动旋

转对准预测的截击点，发射类似 SKEET 的灵巧子弹药。灵巧子弹药升空后，利用双色红外敏传感器在空中作旋转运动，扫描搜索目标。当探测到目标后，在目标上方 20~30m 处起爆，发射爆炸成型弹丸战斗部，攻击目标的顶装甲，以摧毁目标，见图 1-2。由于采用了二次探测系统，增加了坦克的毁伤概率。

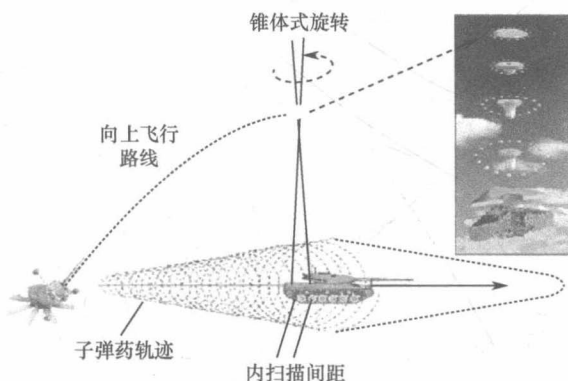


图 1-2 WAM 广域雷攻击坦克

WAM 雷可人工布设，也可用“火山”系统、陆军战术导弹系统和多管火箭系统布设。

智能封锁弹药场是目前智能封锁弹药研究的一个重要方向。雷场使用一个网关 (gateway)，其大小与地雷相当，其中有通信用收发机及自己的传感器。网关与封锁弹药同时布设，通过预编程传感器，可使友邻部队及其直升机通过该雷场，当己方部队靠近雷场行驶时，驾驶员可利用控制装置关闭封锁弹药场。目前美国正在研制的“猛禽”智能战斗警戒系统 (Raptor Intelligent Combat Outpost) 就是一种典型的智能封锁弹药场，见图 1-3。

“猛禽”智能战斗警戒系统集成战斗部、传感器、通信系统、应用软件于一体。它由四个部分组成，三个部分固定，一个部分根据情况而变。三个固定的部分是空中可散布声传感器、一个网关和一个地面控制站，而战斗部则可机动。目前装备的弹药是“大黄蜂”PIP (广域弹药)，战场情况和指挥员的作战意识最终通过“大黄蜂”体现。该系统的功能主要有：①无须看守火力、侧翼防护和前沿防护即可占领交战区。②为战场充当警戒系统。③作为前方侦察系统，指导火力 (火炮和空中火力) 对威胁目标实施打击。“猛禽”可由单兵手持布设，也可由机载布设。每个“猛禽”系统都有一个地面控制站，当目标进入控制区域时，战斗部将目标的距离、方位等信息周期性地通过网关报告给地面控制站，由控制站的指挥员向网关发送交战指令，接受指令后，网关无需人工干涉即可指挥火力，此时，该区域就进入战斗状态。

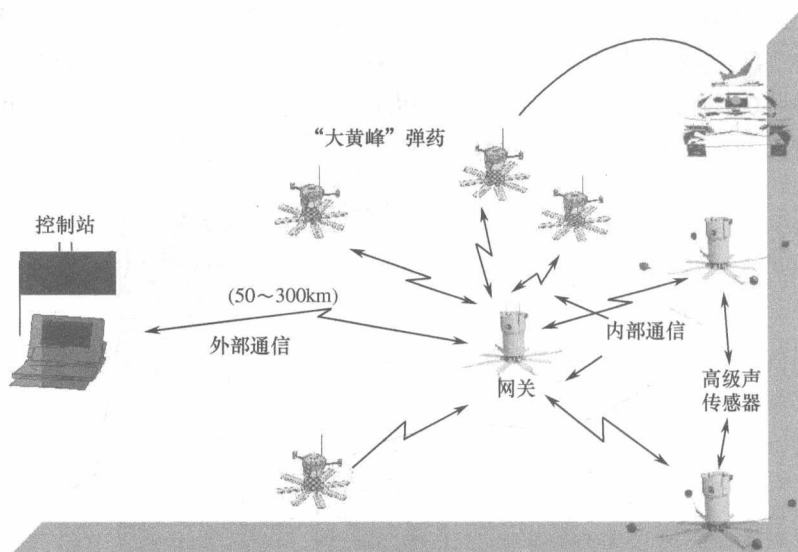


图 1-3 “猛禽”智能战斗警戒系统

本书重点介绍智能封锁弹药的智能探测系统的原理和相关关键技术，先扼要介绍该系统的组成和动作原理。

一般情况下，智能封锁弹药武器系统是以单个封锁弹药攻击单个运动的坦克目标，实现整个系统的作用。我们重点研究一般的反坦克智能封锁弹药武器系统，它由预警探测器、发射装置与子弹药三部分组成。发射装置由发射器、地面指挥控制器、随动机构、安全保险机构和地面电源等组成；子弹药由控制器、扫描装置、战斗部、目标敏感传感器、电源等组成。

反坦克智能封锁弹药布设完毕并上电后，将自动按照预定的程序工作。智能封锁弹药首先进入预警状态，将在探测发现目标后，再进行目标的分类识别，当识别为坦克目标后，对目标进行跟踪定位；当预测目标进入毁伤区域后，随动机构将封锁弹药子弹自动旋转对准预测的截击点，发射子弹药。被发射的子弹药在空中作旋转运动扫描搜索和识别目标。当探测锁定到目标后，在目标上方起爆战斗部，攻击目标的顶甲，摧毁目标。

预警探测器是反坦克智能封锁弹药武器系统三个组成部分之一，主要功能是对目标进行预警搜索、识别、定位并向地面指挥控制器提供目标信息，还具有自检功能。对预警探测器设计的依据是反坦克智能封锁弹药武器系统对预警探测器提出的功能要求。

智能封锁弹药预警探测器包括传感器阵列、硬件和数字信号处理（DSP）三部分，如图 1-4 所示。

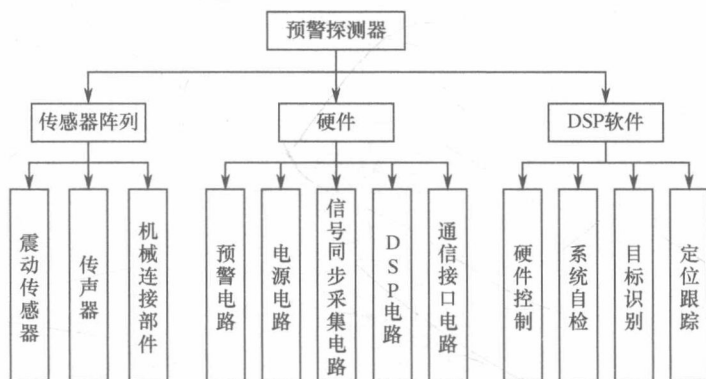


图 1-4 预警探测器组成

传感器阵列包括声、震传感器和机械连接部件。传声器阵列接受目标的声信号，震动传感器接收目标的地震动信号。机械连接部件是用来固定连接预警探测器分系统中声和震动传感器的机械部件。

预警探测器硬件主要由预警电路、电源电路、声和震动信号同步采集电路、DSP 电路、通信接口电路五部分组成。预警探测器硬件主要是实现电源的转换和控制、上电自检和目标的预警、数据的采集以及数据的传递。

预警探测器软件主要包括系统硬件控制模块、自检模块、目标识别模块、定位跟踪模块等。预警探测器软件主要是完成系统上电自检、系统控制、目标预警、目标识别和跟踪定位的算法，与硬件共同实现预警探测器的技战术指标。

预警探测器工作流程：智能封锁弹药武器系统布设完毕，开启电源后，预警探测器首先进行系统硬件的自检，自检正常后系统进入值更工作状态。在值更工作状态，预警探测器中仅有部分传感器和预警电路工作，对接收到的信号进行初步分析。当有潜在目标进入传感器探测范围后，预警电路发出预警信号，激活预警探测器 DSP 电路，使其进入正常工作状态。DSP 电路先进行初始化工作，对预处理电路和信号采集电路的相关参数进行设置。DSP 电路进入正常工作状态后，进行信号采集、目标识别，进一步对目标进行身份属性判定。如果确认对方是打击的目标后，对目标进行跟踪定位，解算目标运动状态和位置参数，确定目标的方位、距离和运动速度等参数。然后，通过通信接口把参数数据传输给地面指挥控制器。预警探测器工作流程如图 1-5 所示。

智能封锁弹药的预警探测系统涉及到多门学科、多项高技术领域，其中关键技术有：目标特性测试与分析、声波和地震动波被动检测技术、多传感器数据融合目标识别、多节点多传感器数据融合目标跟踪定位、声地震动被动定位、过零率预警技术、布阵技术、时延估计技术，探测传感器阵列技术、信息探测、处理与控制、人工智能技术、现代信号处理技术、模糊信号处理、谱分析、小波分析及应用等。本书将重点举例说明这些关键技术的原理及具体应用情况。

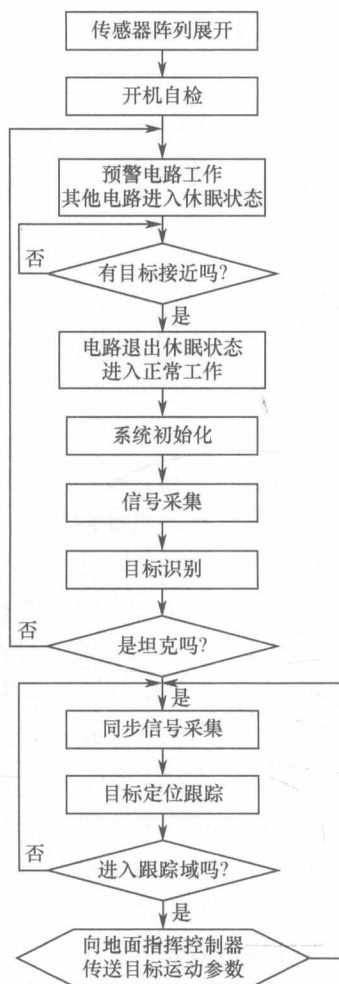


图 1-5 预警探测器工作流程图

第2章 目标物理场特性测试与分析

现代封锁弹药引信向智能、自寻的和制导等方向发展,所以引信与目标的非接触相互作用关系就非常重要。本章重点讨论目标声场,同时介绍目标地震动场的特性。

2.1 声波传播特性

2.1.1 声场

声波传播的区域称为声场。当声场的便捷效应可以忽略不计时,声波可以自由传播,不受任何阻碍,这样的声场称为自由声场。理想的自由声场是没有边界、媒质均匀的,各向同性的声场。如果测试的场地很开阔,则只剩下地面的反射,这样的声场称为半自由场。

实际声源是复杂的,要想从数学上严格求解具体声源产生的声场是困难的,因此在理论处理时,往往将它们加以简化,既避免了繁琐的数学推导,所得结果又可揭示出声辐射的基本规律。

2.1.2 声传播模型

1. 平面声波

平面声波是波阵面具有与传播方向垂直的平行平面的声波。平面声波的主要特点有:声压与质点速度同相位;在理想媒质中,声压和质点速度不随距离的不同而变化;对平面声波而言,空气的特性阻抗是常数,即 $Z_c = \text{const}$ 。

对于平面声波的声强与功率,有

$$I = P \cdot v = P_m^2 / 2\rho_0 C \quad (2-1)$$

$$W_A = I \cdot S = P_m^2 S / 2\rho_0 C \quad (2-2)$$

2. 球面声波

球面声波是波阵面为同心球面的声波。球面声波的主要特点有:声压与质点速度之间的相位差与 γ/λ 成反比,其中 γ 为球面声波的半径, λ 为波长;理想媒质中,声压与球面声波的半径成反比。媒质的声阻抗率 Z_s 是复数,当 γ 很大时,纯抗分量可忽略,则声强与声功率为

$$I = P_m^2 / 2\rho_0 C \quad (2-3)$$

$$W_A = 2\pi(\gamma P_m)^2 / \rho_0 C \quad (2-4)$$

3. 点声源

点声源是最理想的声源模型。点声源是无方向性的，而且声场中各点的声压只与该点到声源的距离有关，也就是说，它辐射的是球面波。当球源半径比较小或者所辐射的声波频率比较低时，可以近似地看作点声源。

在距离声源较远的地方，接收到的目标噪声信号将呈现较微弱、低信噪比的特点，同时声压幅度变化很缓慢。实际应用中，脉动声源被近似看作是点声源。所谓脉动声源就是进行均匀涨缩振动的球面声源，即球源表面上各点沿着径向作同振幅、同相位的震动。

当声传播的距离超过几个波长时，绝大多数声波以球面波的形式传播。应用中，当声源尺度与声源到接收器之间的距离相比很小，即可以不考虑声源尺寸时，就可以将它近似为点声源处理。

智能封锁弹药系统外场测试是在距离坦克较远的远声场进行的，坦克的几何尺寸和探测距离相比要小到一二个数量级，因此坦克目标声源可简化为点声源模型，认为坦克声信号是以球面波的方式传播，其波阵面是以点声源为球心的球面，在该球面上，任两点声信号幅值和相位相同，这样就可以只考虑目标与测点相对位置的变化，大大地简化了信号的测试与处理工作。

点声源在空间产生的声场为

$$P = \frac{Q}{2\pi r} e^{2\pi j f(t-r/c)} \quad (2-5)$$

式中： P 为测点声压的瞬时值； r 为测点与声源之间的距离； f 为频率； c 为声速； $Qe^{2\pi j f(t-r/c)}$ 为声源能量的瞬时值。

2.1.3 传播过程中的声衰减

在外场，声压级与声源类型、声波传播和接收器特性有关，对智能封锁弹药探测系统来说，这分别涉及到目标特性、声波传播损耗和传感器等方面的问题。大气中的声传播受众多因素影响，随着探测装置作用距离的增大，媒质中的传播损耗问题变得越来越重要。

1. 距离引起的声衰减

声波在传播时，随着距离的增加，声压降低。在点声源情况下，距离点声源为 r_1 和 r_2 两点之间的声压级差值为

$$L_{p2} - L_{p1} = 20 \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (2-6)$$

2. 空气引起的声衰减

声波在大气中传播时，由于空气分子的粘滞性、热传导性引起的吸收使声波衰减，大气的衰减作用相当于一个低通滤波器，因此当坦克向传感器驶近时，高频噪声明显增加。

气体所引起的传播损耗包括三种机理。

(1) 黏性损耗：在 1 个大气压、20℃ 气体中，黏性引起的衰减系数为

$$a_v = 8.5 \times 10^{-8} f^2 \quad (\text{dB/km}) \quad (2-7)$$

式中：\$f\$ 为声波频率 (Hz)。

空气的粘滞性引起声能吸收，高频声波的吸收远大于低频声波的吸收，衰减了声波高频成分，改变了声波频谱，减弱了声波强度并改变了它的传播特性。

(2) 热传导损耗：对于 1 个大气压、20℃ 的气体，热传导引起的衰减系数为

$$a_v = 3.6 \times 10^{-8} f^2 \quad (\text{dB/km}) \quad (2-8)$$

式中：\$f\$ 为声波频率 (Hz)。

(3) 分子吸收损耗：对 1 个大气压、20℃ 的氧气，热传导引起的衰减系数为

$$a_b(O_2) = \frac{0.056 \frac{f^2}{f_m}}{1 + \left(\frac{f}{f_m} \right)^2} \quad (\text{dB/km}) \quad (2-9)$$

式中：\$f\$ 为声波频率 (Hz)；\$f_m\$ 为分子振动的弛豫频率 (Hz)。

空气的总衰减系数为

$$a = a_v + a_T + a_b \quad (2-10)$$

图 2-1 表现的是随着传播距离的增加声波的衰减曲线，从中可以看出高频成分随着距离的增加急剧衰减。

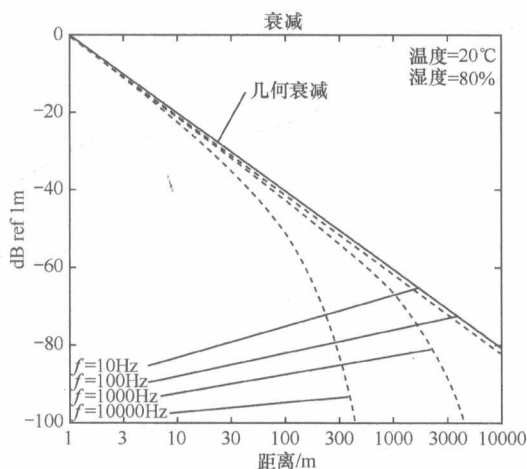


图 2-1 空气传播中的声衰减