

核爆 电磁脉冲探测 远区探测 概论

刘新中 陈祝东 编著
陈鸿飞 刘元璋



中国原子能出版社

编者的话

核爆炸电磁脉冲远区探测,是综合核科学、无线电工程、电子学技术、信号处理与分析等学科的专业性很强的边缘科学。目前,它具有十分显著的军事和科学价值。

本书是该学科有关理论和关键性技术的一个系统性概述。是我国从事该学科研究和试验工作的诸多科学家、工程技术人员多年研究成果的系统性总结。其中,程开甲、朱岗崑、熊皓、忻贤杰、吴明义、陈雨生等同志在这方面做出了突出的贡献。

本书的第一、二、六、七章及第九章的部分内容由刘新中撰写;第五章和第九章的一部分由陈鸿飞撰写;第三、四章由陈祝东撰写;第八章由刘元瑾撰写。

本书可供从事核爆远区探测、遥感与侦察技术的专业技术人员学习参考,也可作为有关专业院校在校学生和研究生的教材。

本书对从事核裁军谈判、制定核查对策的专业技术人员也有所裨益。

感谢高潮同志对本书出版给予的支持。

由于作者水平有限,错误疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言.....	(1)
第一章 核爆电磁脉冲源电流.....	(5)
第一节 核爆炸电磁脉冲效应.....	(5)
第二节 近地面核爆的 γ 源.....	(10)
第三节 近地面核爆电磁脉冲源电流的微观模式.....	(14)
第四节 近地面核爆电磁脉冲源电流的宏观模式.....	(19)
参考文献.....	(34)
第二章 电磁脉冲波的传播.....	(35)
第一节 电磁脉冲传播的一般原理.....	(35)
第二节 低空核爆电磁脉冲场强的传播衰减.....	(37)
第三节 核爆电磁脉冲谱的传播与漂移.....	(43)
第四节 雷电电磁脉冲谱的传播特征.....	(49)
参考文献.....	(65)
第三章 电磁脉冲波的接收.....	(66)
第一节 电磁脉冲波的探测与接收.....	(66)
第二节 幅选接收及幅选接收机.....	(69)
第三节 环天线对变化磁场的感应.....	(72)
第四节 方选接收机.....	(75)
第四章 定位技术与探测台网.....	(81)
第一节 电磁脉冲源定位体制及原理.....	(81)
第二节 双曲线定位.....	(87)
第三节 原子频标.....	(95)
第四节 时间同步.....	(98)

第五章	核爆电磁脉冲动态谱分析	(103)
第一节	动态谱及分析方法	(103)
第二节	电磁脉冲的群速度与距离的关系	(106)
第三节	准半周期随时间的变化与距离的关系	(109)
第四节	动态谱分析	(114)
第五节	典型的核爆炸电磁脉冲的动态谱	(121)
第六节	远区核爆电磁脉冲波动态谱斜率的统计	(122)
	参考文献	(134)
第六章	核爆与天电电磁脉冲波的识别	(135)
第一节	核爆电磁脉冲事件与天电电磁脉冲波群序列	(135)
第二节	时间同步识别方法及其可靠性分布	(137)
第三节	空间选择识别方法及其可靠性分布	(143)
第四节	归一谱特征值筛选识别法及识别域的选择	(146)
第五节	天电脉冲抽样筛选误判率的测定	(156)
第六节	单站定向、多站交汇观测综合识别及其可靠性估算	(167)
	参考文献	(169)
第七章	核爆炸源特征值提取及当量、爆高计算	(170)
第一节	核爆炸的源特征值	(170)
第二节	电磁脉冲远区波形峰值场强与爆炸当量的关系	(173)
第三节	谱心频率与爆炸当量及爆心相对地面高的关系	(176)
第四节	谱的平滑滤波与当量计算精度的改善	(180)
	参考文献	(191)
第八章	专用预处理、信息处理及分析技术	(192)
第一节	探测站址选择	(192)
第二节	预估场强	(193)
第三节	时差网格预算	(199)
第四节	DFT、FFT及WFTA 算法述评	(202)
第五节	核爆电磁脉冲波形特征值	(212)

参考文献	(219)
第九章 人工模拟核爆电磁脉冲技术	(220)
第一节 核爆电磁脉冲的场效应	(220)
第二节 人工诱发雷电技术	(221)
第三节 球载甚低频电磁脉冲模拟器方案设想	(223)
参考文献	(238)

前 言

对核爆炸进行远区地面探测，从学科上来讲是现代遥感技术的一个新的分支。它有很大的科学价值和军事价值。它涉及到核科学、地球物理学、电波传播、微电子学、无线电工程、声学、波动力学、中层大气、日地物理以及数字信号处理与分析等学科的内容，并和这些学科的最新发展密切相关。至今只有30多年的历史。

对核爆炸在数千公里甚至上万公里远处进行探测，需要解决探测方式的选择、信号的识别、源特征的提取、确定爆源位置、抑制干扰等关键性技术。这就涉及到，采用不同的探测方式或手段，需研究相应信号及其源的产生机制，信号在介质中的传播特性及规律，干扰来源及干扰方式等内容。

本书则专门论述了利用电磁脉冲方法进行核爆炸远区探测的各种技术问题和所依据的基本原理。

核爆炸事件或核爆炸过程，既是一种自然界的常见现象和行为，又是一种可被人为控制的事件行为。在恒星内部，在宇宙空间经常发生着核爆炸事件。比如新星爆发、太阳爆发以及某些陨石坠落事件（1908年坠落在西伯利亚通古斯地区的陨石爆炸），往往都属于自然界中发生的核爆炸。而人们制造的原子弹、核弹产生的核爆炸，则属于人工诱发的核爆炸事件。两者有着同一的本质，区别仅在于一个是天然事件，一个是人为事件。

因此，通过对人工核爆炸行为的探测，很容易推论到对

天然核爆炸事件的探测。前者涉及到一个国家、一个民族的安全问题。后者既涉及到人类对自然界的认识，同时又涉及到整个人类的安全问题。若在地球附近发生了一次相当于1988年5月份观测到的太阳爆发那种规模的核爆炸，整个人类经历的灾难，不会亚于一次全面核战争造成的直接和间接损失。

核爆炸过程通常伴生着电磁脉冲效应。一般视爆源环境的不同，这一效应所占的能量输出的比例不同。

爆心位于电离层中发生的核爆炸，或核爆炸伴生的X、 γ 辐射能够明显地作用于地球大气外缘的电离层。此时将产生强的高空核爆电磁脉冲效应。

爆心位于近地面或地面的大气层内的核爆炸，由于其伴生的 γ 辐射与大气及地面介质相互作用产生光电效应，通常称为康普顿效应，亦产生强的电磁脉冲效应。

爆心位于其它介质中的核爆炸，其电磁脉冲效应相对而言要小得多。或受到介质屏蔽作用较大，对外部作用和影响变小。或者由于介质光电特性迟钝，X、 γ 射线转变成的光电流很小。例如发生在地壳或深水中的核爆炸，由于地壳及水的屏蔽，使外漏的电磁脉冲较小。发生在宇宙深空中的核爆炸，由于高度真空，爆心附近没有可产生光电效应的介质，因此产生的电磁脉冲也极小。

因此，利用电磁脉冲效应探测核爆炸，最敏感的爆炸源是能够影响电离层的高空核爆炸和接近于地面或位于地面的近地面核爆炸。

电磁脉冲波的传播和普通电磁波一样，其速度和光速相当。因此，用电磁脉冲方法探测核爆炸，具有最快的反应速度。

为了实现远区用电磁脉冲方法对核爆炸进行探测，必须解决“探测接收原理”、“信号识别”、“信号分析”等关键性技术。

由于核爆炸本身具有电磁脉冲效应。因此，采用电磁脉冲接收技术对其进行探测，就是该手段依据的基本原理。

但是地球本底环境中产生电磁脉冲信号的干扰源很多，例如天然雷电、工业火花放电、电台广播等等。对于天然雷电，在地球表面发生的频度很高，就平均值而言，地球表面上每秒大约发生100~1000个左右的闪电。每个闪电产生的电磁脉冲都可以覆盖很大区域。因此，该种探测技术必须能够从这众多的干扰中识别出核爆炸产生的对应的电磁脉冲。这样才能实现有效探测这一目的，这就是核爆电磁脉冲远区探测的识别技术问题。

电磁脉冲探测，通常给出的就是一个波形信号。通过对该信号的直观判读只能得到反映该波形本身特性的参数，例如峰值、半周数、波形持续时间等等，以及波形的环境特征参数。例如，来波到达时间、本底噪声电平等等。这些值和爆源是什么关系，如何通过波形本身及其环境参数导出爆源特征。若不解决这个问题，那么利用电磁脉冲方法进行的探测，就无法提供爆炸威力、爆心相对地面高这些有关源特征的数据。这些数据无疑是远区探测的主要目的之一。

解决由远区波形估计源特征值的问题，涉及到电波传播，源电流模式等基础问题。这就是源特征值的提取技术问题。

在远区可以接收到核爆电磁脉冲波，但是其源的发生地点及空间位置将如何确定，这是探测技术必须解决的又一个关键问题。这就是电磁脉冲的定位技术问题。

识别问题、源特征提取问题、定位问题。这三大问题构成了核爆电磁脉冲远区探测的三项主要内容。只有这三个问题均得到解决，或找到解决途径之后，这一探测手段在技术上才能达到可供应用的程度。

为了解决这三个问题，相应又发展了数据处理和信号分析等技术。

本著作就是从以上几个问题出发，对这一学科的基本要点和目前达到的水平给予系统地叙述。

第一章 核爆电磁脉冲源电流

第一节 核爆炸电磁脉冲效应

无论是自然界发生的核爆炸（例如新星爆发、恒星上的跃斑、黑子活动、或者反物质与正物质的相遇），还是人工制造的各种核装置经人工诱发产生的核爆炸，均伴生有电磁效应。

参加核反应的物质种类不同，爆心位于不同介质环境中，其产生电磁效应的机制则不相同。

对于人工引发的核爆炸大致可分为：真空中的核爆炸；高层大气外缘的高空核爆炸；大气层内的核爆炸；地面或近地面核爆炸；地下核爆炸。

由于核反应过程中均伴有极强的 γ 光子及X光子辐射，不同分类的核爆炸，特别当爆心位于不同介质中时，它们将以不同形式产生电磁脉冲效应。

位于真空中的核爆炸，由于爆心周围只有弹壳物质参与 γ 、X光子的光电作用，除此而外没有其它介质参与这种核爆后效过程。因此，此时只产生弹壳电磁脉冲。

由于弹壳质量的空间分布具有各向异性。壳体物质的原子被核反应伴生的 γ 、X光子照射产生光电效应，其电子被高速打出。于是壳体剩余电荷分布不均匀。当其被高压炸碎时，恰好处于上述不均匀状态，相当于一个电偶极子被核反

应的高温高压推动做扩展运动。于是产生了电磁脉冲效应。由于壳体几何尺寸不大，质量数有限，因此该电磁脉冲效应所占的能量份额以及强度都很小。

相比之下，由于核反应时的 γ 和X射线产额较大，因此利用现代电子学检测设备单独检测弹壳电磁脉冲效应十分困难。任何传感器在强 γ 或X射线环境中，由辐照引起的内电磁脉冲效应都会覆盖弹壳电磁脉冲效应。

位于高层大气层外缘的高空核爆炸，其能量份额中大约70%以上为X光子辐射，其余为核反应碎片辐射、 γ 光子辐射等等。强的X光子、 γ 光子照射到顶层稀薄大气时，在该层大气分子中将产生强的光电反应，并形成一光电反应沉积区。这个大致圆形的沉积区中心厚度可达80km，平均厚度约为40~48km。沉积区向外水平扩展的距离和当量及爆高

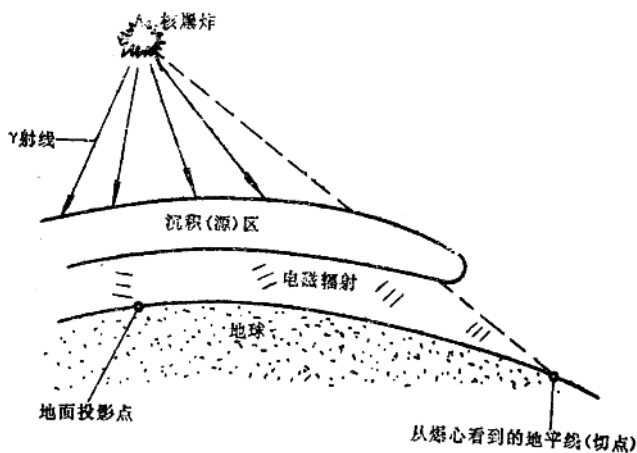


图1.1 高空核爆产生电磁脉冲沉积区

有密切关系。有关沉积区的范围与爆心的关系可参见图1.1。
沉积区的半径与爆高的关系可参见图1.2。

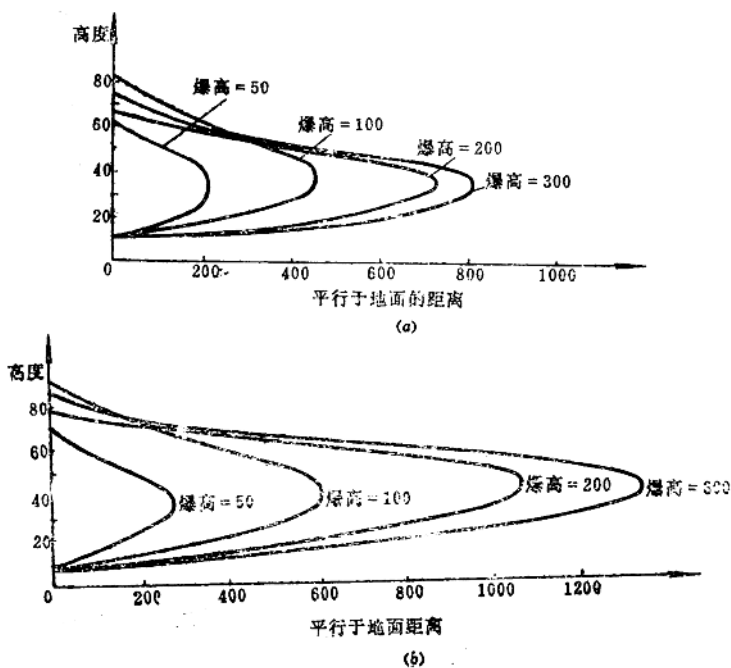


图1.2 不同当量、爆高的沉积区 (单位: km)
(a) 百万吨级; (b) 千万吨级。

在该区域内, 光电子在地球磁场作用下发生洛伦兹偏转, 并绕磁力线作螺旋运动。这种运动使光电子受到径向加速。由于地球磁场的磁力线通过整个沉积区, 从而使受到径向加速的光电子产生的电磁脉冲具有极大的覆盖半径。

爆心位于大气层内，且离地面高于其自身等离子火球半径的核爆炸，称为空中核爆炸。此类核爆炸，爆心向下的大气密度比向上的大气密度要大一些。此时X及 γ 光子的平均自由程比在真空中要短得多。因此核爆炸产生的大量X射线将以加热周围大气分子和弹壳碎片而将能量转化成可见光、热辐射以及爆心等离子火球的体积膨胀，即冲击波的能量形式。在爆心区域内X光子的主要效应改变为产生一个等离子火球，而不是像高空核爆产生一光电子沉积区。此时的电磁脉冲主要是由 γ 光子对等离子外缘的大气分子的康普顿效应引起的。

在大气层中，核爆产生的 γ 光子的平均自由程比X光子要长一些。由于大气质量密度沿垂直方向分布不均匀。因此使 γ 光子的平均自由程沿垂直方向分布也不均匀。射向地面的要短一些，射向天顶的要长一些（见图1.3）。

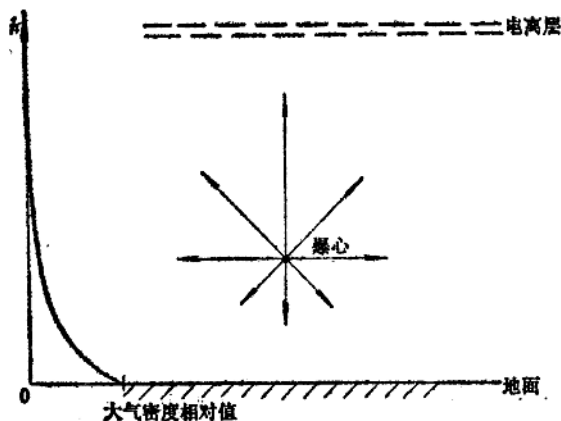


图1.3 γ 光子沿高度的分布示意图

于是 γ 光子与周围大气分子发生的康普顿光电效应，沿垂直方向的分布也变得不均匀不对称了。也就是说，由 γ 光子打出的沿径向向外飞散的康普顿电子电流，在爆心坐标系中呈垂直方向上的不对称性。这种不对称性显然具有电流偶极矩特征。这就是空中核爆炸产生电磁脉冲效应的主要原因。

此时源的范围大约在 γ 光子的1~2个半衰程之间，大约为数百米至数公里范围。

爆心位于地面和爆心等离子火球半径之间的核爆炸，称为近地面和地面核爆炸。在这类核爆炸中，向下辐射的 γ 光子被地面物质吸收，产生地壳内电磁脉冲。由于地壳具有导体特征，该电磁脉冲被其屏蔽。向上辐射的 γ 光子与大气分子产生康普顿效应，产生垂直方向的康普顿电子电流。该电流与 γ 光子的释放率相关，这个电子电流称为核爆电磁脉冲的初始电流。

向上运动的康普顿电子，将与大气中的分子产生碰撞，并产生二次、三次散射电子……。最后被正离子粘附。这个过程相当于产生了一个与康普顿初始电子电流方向相反的回流电流。使被 γ 光子激发的空间电场重新恢复平衡。这就是近地面及地面核爆电磁脉冲效应的主要模式。通常称为康帕涅茨—格林斯基模式，以此表彰他们最早提出这一概念。

地下核爆炸通常指爆心位于地表面以下，并分为两种。一种为浅表核爆炸，即爆心深度不够，产生冒顶效应；另一种为深地下核爆炸，不产生冒顶效应。无论那一种，由于 γ 光子与爆心周围地壳物质的光电作用，将产生电子注入式的电磁脉冲。由于地壳物质密度远大于大气密度，因此地下核爆源范围大约在几十米范围之内，并且衰减极快。

以上叙述的核爆电磁脉冲效应是基于通常所说的普通类型的核弹爆炸产生的效应，即由重核裂变或者再加上轻核聚变这种多元反应。其重核材料多为铀或钚，轻材料多为氢的同位素或锂、铍等等。

对于剪裁型核武器，例如中子弹、电磁脉冲弹、冲击波弹，其源场电磁脉冲效应，若核反应对 γ 光子通量、X光子通量有所改变，则也相应有所变化。

本著的重点是针对近地面普通型核弹爆炸产生的电磁脉冲进行描述。

第二节 近地面核爆的 γ 源

核爆炸时伴生于核反应过程释放出大量 γ 光子，它是一个从 10^{-8} s一直持续到秒级的脉冲过程。不同时刻的 γ 光子有不同的来源，并且具有不同的能量。对于近地面核爆炸， γ 光子的来源主要有以下几种：瞬发 γ 、即核反应直接产生的 γ 光子；中子与土壤的非弹性 γ 和俘获 γ 光子；中子与空气的非弹性 γ 和俘获 γ 光子；核反应裂片释放的 γ 光子等等。C.L. 郎格迈尔给出了一个百万吨核爆在地面爆炸时放出的 γ 光子的时间能谱关系，见图1.4。

瞬发 γ 具有最大的峰值，100万吨为 $1 \times 10^{33} \gamma\text{-MeV/s}$ ，一万吨为 $1 \times 10^{31} \gamma\text{-MeV/s}$ 。在其达到峰值之前，基本上是按 $e^{t\tau}$ 增长的。但在接近峰值时，则增长缓慢。 γ 值可以有很宽的范围，例如，从 $2 \times 10^7 \sim 7 \times 10^8 \text{s}^{-1}$ ，或更宽。它因随武器要求，使用材料、结构状况而不同。 γ 值不仅是武器的一个重要参数，也是核电磁脉冲的一个重要参数，因它极大地影响着脉冲峰值的大小。

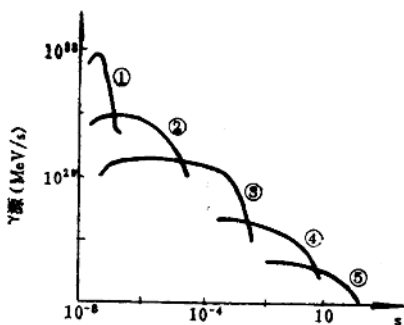


图1.4 近地面核爆 γ 光子时间能谱关系

- ① 瞬发和土壤非弹；② 空气非弹；③ 土壤俘获；
④ 空气俘获；⑤ 裂变碎片。

瞬发 γ 之后，仍然存在着一个很强的 γ 源。图1.4告诉我们，在 $100\mu\text{s}$ 后， γ 源强仅降三个量级稍多一点。换句话说， γ 有着一个长“尾巴”。此长尾巴极大地影响核电磁脉冲的总持续时间。

对于氢弹来说， γ 脉冲应该不止一个瞬发 γ 。因为，氢弹必须由板机引爆。不管武器结构如何，原子弹板机的起爆与氢弹被板机的被引爆总不可能是同时的。它们之间必定有一个时间间隔。因此，在图1.4的瞬发 γ 峰之前，还应当有一个反映板机的瞬发 γ 峰，例如，板机为万吨时，它是 $10^{31}\gamma\text{-MeV/s}$ 。尽管此峰比被板机的 γ 峰小二个量级，但它将对核电磁脉冲有着重要的贡献，并使波形带有重要的核信息。

不同来源的 γ 有不同的平均能量。即使同一来源，其 γ 能量也是连续分布的。表1.1给出各 γ 源的平均能量及其在空气中所对应的能量吸收长度和线性吸收长度。表中同时给出空气密度为 $\rho_0 = 1 \text{ mg/cm}^3$ 的两种自由程。其它密度下

表1.1 各 γ 源的主要参数

Y源	Y平均能量 (MeV)	能量吸收		线性吸收	
		长度g/cm ²	自由程cm①	长度g/cm ²	自由程cm①
瞬发	1.5	40.5	4.05 × 10 ⁴	19.4	1.94 × 10 ⁴
空气非弹	4	51.8	5.18 × 10 ⁴	32.8	3.28 × 10 ⁴
土壤俘获	3	48.8	4.88 × 10 ⁴	28.6	2.86 × 10 ⁴
空气俘获	6	58.8	5.88 × 10 ⁴	40.8	4.08 × 10 ⁴
碎片 γ	1	36.4	3.64 × 10 ⁴	15.7	1.57 × 10 ⁴

① 自由程数据是密度 $\rho_0 = 1 \text{ mg/cm}^3$ 时的值。

的自由程可根据自由程与密度成反比的关系求出。

γ 在空气中的运输规律。距爆心 r 处的 γ 剂量率可近似表为

$$\dot{F}_\gamma(t, r) = \dot{f}_\gamma(t) \frac{e^{-r/\lambda_r}}{4\pi r^2} \quad (1.1)$$

式中， \dot{f}_γ 为单位时间出弹壳的 γ 数； λ_r 表示 γ 随距离衰减的一个常数。

在计算康普顿电流时，因电流是矢量，虽然散射后的 γ 仍然有一定能量，但由于运动方向已大大地偏离径向，考虑到这个因素之后， λ_r 的数值应稍大于线性自由程，记为 λ_r 。但是，对空气电离来说，它仅与 γ 能量衰减有关，故应取能量吸收自由程，记为 λ_a 。

γ 与物质的相互作用主要有三种，即光电效应、康普顿效应和电子俘获三种。何种效应为主，决定于 γ 的能量。对于表1.1所列的 γ 源，康普顿效应是主要的。

当 γ 受到原子中的电子散射时，电子获得 γ 光子的部分能量，同时 γ 的飞行方向发生偏转，这就是康普顿效应或康普顿散射（图1.5）。在康普顿散射中，入射 γ 、康普顿电子和散射 γ 三者间遵守能量守恒和动量守恒，并据此可求出康