

核电磁脉冲辐射与防护技术

〔美〕L W 雷盖特 等著

段 中 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍核电磁脉冲辐射对电子设备和系统工作产生的干扰和破坏作用，以及屏蔽和加固措施。

全书分三部分：一、核电磁脉冲环境与干扰效应；二、元器件和分系统的性状；三、对系统的加固。

本书可供从事军事电子技术的工程技术人员参考。

EMP Radiation and Protective Techniques

John Wiley & Sons, Inc.

1976

*

核电磁脉冲辐射与防护技术

[美] L. W. 雷盖特 等著

段 中 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张10¹/₄ 214千字

1980年4月第一版 1980年4月第一次印刷 印数：0,001—1,800册

统一书号：15034·1909 定价：1.05元

目 录

第一部分 核电磁脉冲环境与干扰

第一章 核电磁脉冲环境	1
1.1 核电磁脉冲与核武器效应	1
1.2 概况	4
1.3 基本的核电磁脉冲环境	6
1.4 核爆炸电磁脉冲与其它效应的关系	31
第二章 核电磁脉冲干扰	37
2.1 引言	37
2.2 准静态干扰	39
2.3 功率流与孔径的关系	46
2.4 几种严密方法	49
2.5 核电磁脉冲干扰的计算	57
2.6 输电线和其它非谐振型汇能器的干扰	62
2.7 地下屏蔽电缆的瞬态效应	64

第二部分 元器件和分系统的性状

第三章 核电磁脉冲对元器件的效应	77
3.1 半导体器件的失效	78
3.2 通用电阻的失效	118
3.3 电容器的失效	122
3.4 其它元器件的失效	125
3.5 结语	125
第四章 防护技术	128
4.1 屏蔽与防护装置	128
4.2 电缆与电缆屏蔽	151

4.3	滤波器、变量器与扼流圈	177
4.4	电涌放电器	192
4.5	电涌放电器和滤波器混合装置	218
4.6	非硬导线限幅器	224
4.7	断路	229
第五章	实验室试验技术	235
5.1	引言与设备一般要求	235
5.2	屏蔽	240
5.3	电缆、连接器和导管	245
5.4	滤波器	249
5.5	电涌放电器	252
5.6	变量器 and 对称-不对称变换器	254

第三部分 对系统的加固

第六章	对系统进行加固的若干途径	259
6.1	引言	259
6.2	对系统的加固分配问题	269
第七章	对系统的加固分配	293
7.1	分配原理	293
7.2	分配法的实施	294
7.3	地下设施的分配	296
7.4	移动式屏蔽拖车的屏蔽分配	302
7.5	飞机的分配	312
7.6	结语	315

第一部分 核电磁脉冲环境与干扰

第一章 核电磁脉冲环境

1.1 核电磁脉冲与核武器效应

什么是核电磁脉冲

核爆炸时伴随产生的电磁脉冲，通常称之为“核电磁脉冲”^①。从性质上来说，这种电磁脉冲很像附近雷击所产生的电磁场。雷击所辐射的电磁场，对无线电接收机产生天电干扰。但是，核电磁脉冲很可能会产生更为严重的效应，比方说，会把与长天线相接的无线电接收机烧损。称这样的核电磁脉冲为“无线电闪电”也许更合适。换句话说，核电磁脉冲所占有的频谱分量，是与调幅广播电台、短波发射机、甚高频和超高频电视发射机目前所采用的信道是相同的。

可见，核电磁脉冲有别于核爆炸所产生的其它波长更短的电磁辐射，如可见光、 x -射线和 γ -射线。此外，也不要吧核电磁脉冲与其它的核辐射（如 α -粒子、 β -粒子和中子）相混淆。

核武器效应概要

为抗核爆炸所产生的各种效应而对一个系统进行加固

① 原文为EMP (electromagnetic pulse) 或 NEMP (nuclear electromagnetic pulse)。——译者

时，主管人员对核电磁脉冲应连同核武器的其它效应环境统一考虑。图 1.1 示出这种环境的一些情况。爆震波和冲击波所造成的一般性破坏，大概是最为明显的核武器爆炸瞬时效应。其它的这种瞬时效应，还有热效应和核辐射效应，以及“对电子设备的瞬时辐射效应”[●]。热效应起因于波长更短的电磁辐射的作用，如红外波长或波长更短的辐射。而“对电子设备的瞬时辐射效应”则系 γ -射线和中子以各种有害方式作用于元器件（如半导体器件）的结果。至于核电磁脉冲的产生，则与 γ -射线有关，故也可以认为是一种瞬时效应。

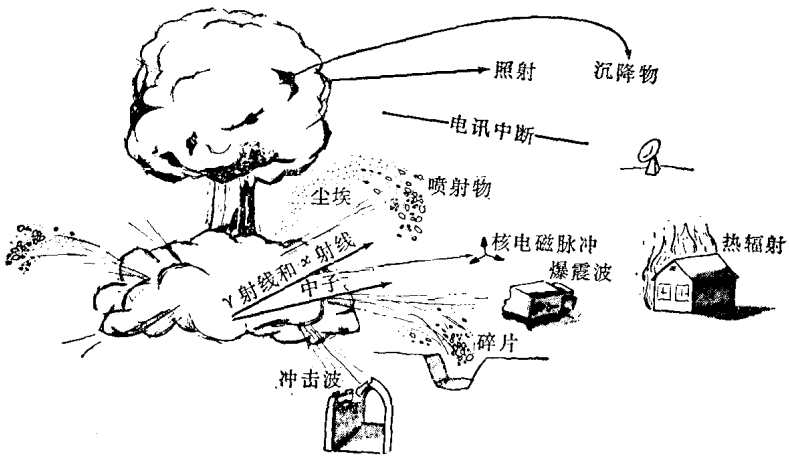


图 1.1 核武器爆炸的各种典型效应

近地爆炸时，砾石、灰沙和尘埃等大量的地面物体，被抛向空中，从而也就在地面上形成一个大的弹坑。当这些东西落下来的时候，可能会把附近正在使用的设备蒙上或掩埋

● 原文为 TREE (transient radiation effects in electronics)。——译者

起来而无法对其有效利用。这种尘埃可能留存下来，并以大家所熟知的方式对机械设备产生危害。

核爆炸有一种晚期效应，称为“电讯中断效应”[●]，往往与核电磁脉冲相混同；因为此效应也使通信设备和雷达系统的性能恶化。有两种情况值得一提，因为都可以说明核电磁脉冲危害的严重性。较为明显的一个情况，就是雷达和通信设备临近地面爆炸的爆点，但仍有足够的距离得以生存下来。此时，由已电离粒子、冷凝的水滴和尘埃混合而成的火球或烟云，对正在传播的无线电电磁波产生严重的影响，如对其进行反射、衰减和折射。这种效应可严重到足以使无线电波衰减或失真，使雷达和通信系统的电讯传播发生暂时中断现象。

可是，对于无线电系统，出现最为严重的电讯暂时中断现象，则视电离层的折射性质而定。由于自由电子处于大气层的上层，此空域对广播和短波发射机辐射出的电磁波具有反射或折射的特性。须知，远程短波通信就是利用电离层（自由电子区）的折射特性而实现洲际通信的。可是，这种远程短波线路的传播特性，对电离层电子密度的变化极为敏感。太阳黑子或核爆炸，均可使电离层的电子密度发生变化。这种变化可严重到足以使远程短波通信暂时中断达数小时之久。

核爆炸对于生物的效应，早已为大家所熟知；不过，为了使读者有一个全面的了解，这里只是简单地提一下。火球的瞬发辐射，可对生物产生危害。包含在烟云之中并随风漂散的放射性粒子和气体，所产生的晚期残余辐射，也能危害距爆点有一定距离的人员。

● 原文为black out。——译者

1.2 概 况●

核电磁脉冲产生的基本机理，就是一个能量变换过程^(1,2)。从本质上来说，这是有一小部分核爆炸能量，经过几个中间步骤转变为射频电磁能。变换的第一步，是核爆炸释放出 γ -射线。第二步，是 γ -射线与大气或其它物质相作用，产生电子和正离子。这种电荷分离，将 γ -射线的一些能量转变为电荷运动和电磁场能量。 γ -射线与大气相互作用的空域，则称为“源区”。源区内电子的流动形成电流；如果在电流流动上存在着某些不对称性，就会辐射出电磁能。

核电磁脉冲最为重要的特点，如图 1.2 所示。图内示出核武器两个不同的爆点：（1）近地爆炸；（2）大气层外爆炸即高空爆炸（爆点处于大气层以上）。近地爆炸时，源区为半球形状，直径一般约为几公里。此源区的不对称形状，产生不断衰减的核电磁脉冲场，辐射到离爆点几十公里之外。靠近地面的稠密大气层，使 γ -射线的射程受到了限制，从而也就限制了源区的范围。此源区范围，大致与核武器大部分其它严重的瞬发效应的范围相当。可见，当核爆炸在大气层以内进行时，核电磁脉冲总是与其它瞬发效应一同出现。

另一方面，核爆炸如系在大气层以外进行， γ -射线在与空气分子碰撞之前，可以射出好几百公里远。此外，由于空气很稀薄，相当多的一部分 γ -射线可以透入大气层。在这种环境中进行大当量的核爆炸，所产生源区的直径上千公里，厚度约 20 公里，高度的下限约为 18 公里。在此源区内，因地

● 本节所列举的许多材料取自 DNA EMP Awareness Course Notes⁽²⁾。

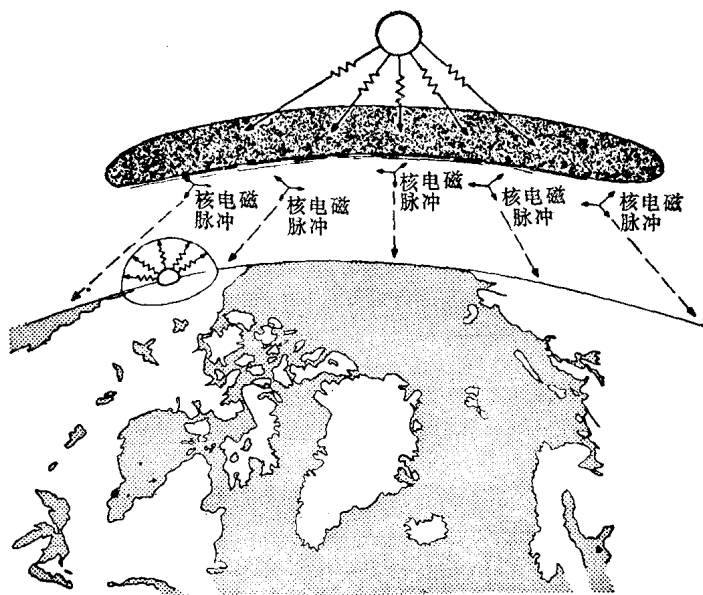


图1.2 近地爆炸和大气层外爆炸

磁场存在而出现不对称性电流流动，将源区的电磁能有效地变换为向下辐射的核电磁脉冲波。高空核爆炸时，并不存在压力脉冲。核武器所有其它的瞬时效应，在地面附近几乎均不存在，至多也是较为微弱的。

核爆炸在大气层以外进行时，源区很大，强的电磁脉冲向下辐射，覆盖地面的范围颇为宽广。图 1.3 示出，如在美国上空大气层外进行大当量核爆炸时，核电磁脉冲可能的覆盖范围与爆高的关系。

核电磁脉冲严重照射的范围宽广，这确系很重要的一点。此时，随同核电磁脉冲虽无显著的核武器其它瞬时效应发生，但效用几乎相当。可见，一般不会作为核武器攻击目标的军

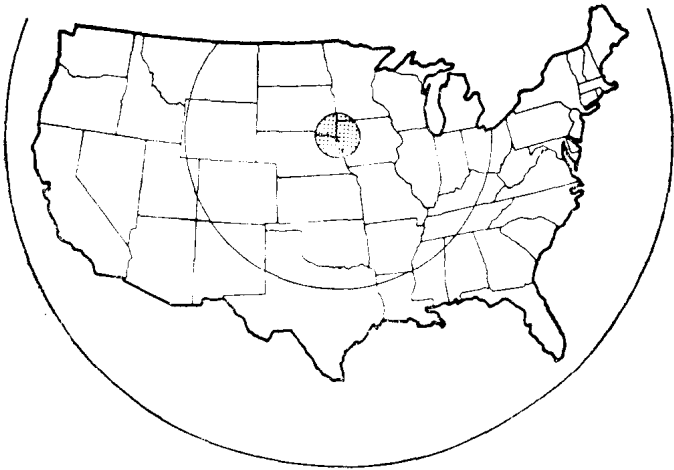


图1.3 大当量核爆炸如在美国本土上空进行，图中两个圆圈分别示出爆高80公里（小圆圈）和190公里（大圆圈）时核电磁脉冲的覆盖范围

事或民用系统，却可能遭受对远距离目标进行核攻击所产生的电磁脉冲的严重照射。

核电磁脉冲的严重照射，可能烧坏接有大型天线或外露导体，如供电线路的敏感电子电工元器件。核电磁脉冲也可能使数字处理或控制电路发生故障，但通常又无永久性的退化效应。可见，高空核爆炸所产生的核电磁脉冲效应，对各种电工系统和电子系统均应予考虑。如果某个系统确属重要，则应妥善采取抗核电磁脉冲措施或加固措施。

1.3 基本的核电磁脉冲环境

如上所述，即可得出一个正确的结论：一个系统所遭受的核电磁脉冲危害，是核武器爆点位置、该系统所在位置、爆

点与系统间的距离，以及武器特性等的函数。这就是说，为确定计算核电磁脉冲环境所需的情况，就大大有赖于了解核爆炸的详细方案。但是，由于在大气层外进行核爆炸具有很大的覆盖范围，而又不产生其它的瞬时效应，对核爆炸详细方案的依赖，常常是不妥当的。

讨论核武器爆炸电磁环境时，最好就所涉及的核武器细节加以说明，如当量和其它参数，以及爆点位置等。不过，关于可能的核武器威胁的细节是很少能搞得到的；任何对可能的核武器爆点的选择，除最为普通的情况外，也是难于判断的。假若所讨论的是最坏的情况，则对一个系统进行加固所需的这种知识也无从获得。另外一个有关的因素是，对于大气层中出现的范围宽广的核电磁脉冲威胁，不论核电磁脉冲照射类型有什么变化，抗核电磁脉冲所需的加固费用，都无多大变化。

关于核电磁脉冲环境的讨论，旨在鉴定出最坏的核电磁脉冲环境。本节概述核电磁脉冲环境随核武器当量和位置的各种变化。而且着重叙述核电磁脉冲环境影响加固的几个主要方面。

大体说来，基本的核电磁脉冲环境，如图 1.4 所示。最为基本的情况（1），是近地爆炸的源区（图 1.4 左方）。 γ -射线与周围环境相作用的各种源区，有许多共同之点，如中高度爆炸的源区（5）与大气层外爆炸的源区（10）就是这样。中高度爆炸和近地爆炸的辐射场区，都用（2）示出，因为二者有共同之点。地面下或很靠近源区的核电磁脉冲环境（4）均很重要。对近地爆炸有一定距离的地面下核电磁脉冲环境（3），对于地下长电缆有时也是很重要的。

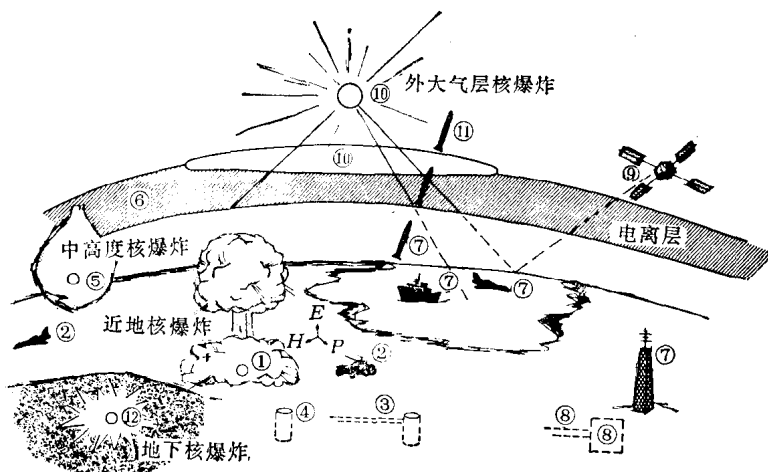


图1.4 十二种重要的核电磁脉冲环境

大气层外核爆炸所产生的核电磁脉冲辐射（7），大致出现于 18 公里以下或者更低；而且，核武器的其它瞬时效应也不严重。通常给出“自由场”波形。可是，对地面的反射效应，应按每个地点加以考虑。这样，导弹所遭受的核电磁脉冲照射，大大不同于靠近地面飞行的飞机。地面反射是可想而知的，而且可用分析的方法加以严格考虑。

地面下的核电磁脉冲环境（8），也可由“远场”推导出来。不过，大地所引入的变化是难于设想的，最好把这一区域列为单独一类。后面还要谈到，大气层外核爆炸所辐射的电磁脉冲，最初是向下传播。由于大地的反射，此波几经变化即可通过电离层，并在卫星运行的高度产生一异常的环境（9）。也许是非所预料，有一个区域（11）出现于大气层外核爆炸的爆点附近，但又是在大气层和源区以上。虽然不存

在空气分子，但 γ -射线可与设备本身相作用，并在被照射的系统之内或附近产生一个局部的电磁场。地面下的核爆炸(12)，也产生核电磁脉冲。

近地爆炸

现象 近地爆炸时，产生核电磁脉冲的主要方式，是“康普顿电子效应”^(1,2)。高能核武器爆炸时，辐射出初始 γ -射线(硬 x -射线)，并碰撞周围大气中的分子，使电子急剧地飞离空气分子。被打出来的这种电子称为“康普顿反冲电子”，由爆点向外运动，同时把重的运动较慢的正离子抛在后面，如图1.5中A所示。正、负电荷的这种相对位移，就产生出一

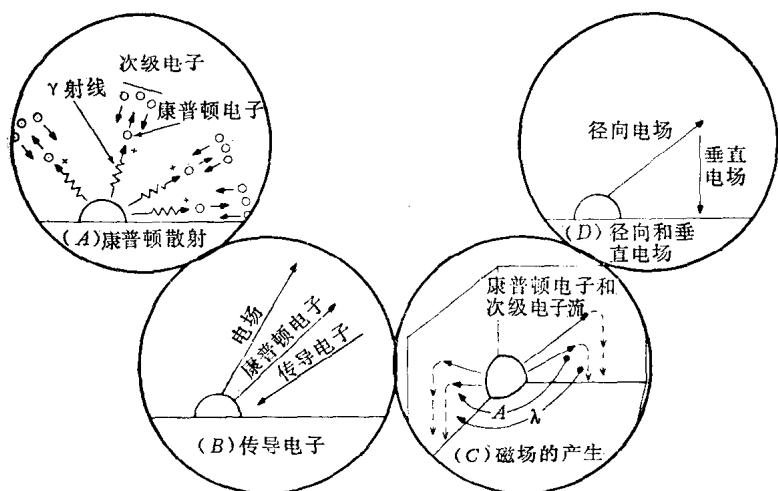


图1.5 地面爆炸时产生电磁脉冲的机理

个强电场。在海平面上的空气中， γ -射线在与空气分子发生康普顿碰撞之前，平均移动距离约200米，但有些 γ -射线可远达几公里。而康普顿电子向外移动只有1~2米的距离时就

为空气所制动。康普顿电子的径向电流，在爆点附近很强；并随半径的扩大而减弱，在几公里处这就很微弱了。可见，地面爆炸的源区与 γ -射线在大气层中被吸收的关系，比与核武器当量的关系要大。每个康普顿电子在其慢化过程中，可产生数千个次级电子。于是，空气就变成了导电性的。

电子在空气中向外移动，就产生径向电场。该电场激励出传导电流，并抵销康普顿电流，从而使电场受到限制，如图 1.5 中 B 所示。

大地使其附近的径向电场短路，因为大地一般是较空气为好的导体。大地附近，传导电子找到一个易于通过的路径而流入大地，并返回爆点，如图 1.5 中 C 所示。这就形成一个产生方位磁场的电流回路。需要有一个垂直电场，来接通垂直分量和传导电流。如图 1.5 中 D 所示，可以认为垂直电场的作用，就是把空气中康普顿电子与其在大地中的影象电荷接通。可见，地面爆炸时有一个径向电场、垂直电场和一个方位磁场。大地特性和地面特点的不规则性，也促使产生其它的分量。在此初始情况之后，这些场以相当复杂的形式趋向衰减。可是，电场和磁场均具有很高的场强。此外，围绕爆点的直接区域被高度电离，从而成为导电性的。此导电性空域，其时空变化的精确性质显然是颇为复杂的。

还有一个复杂的问题，就是 γ -射线直接打在系统上而在其内和附近所产生的场。关于此问题的详细论述，参阅 1.3 节《系统内产生的核电磁脉冲》（系统内产生康普顿带电现象或内电磁脉冲）。另外，由于系统直接汇集核电磁脉冲场、康普顿电流和系统内产生的核电磁脉冲，其附近的局部场使空气的电导率发生变化。

波形、当量和空间关系 源区核电磁脉冲的波形和重要参数, 包括以下各项:

1. 径向电场 $E_r(t)$;
2. 垂直电场 $E_v(t)$;
3. 方位磁场 (或圆周磁场) $H_z(t)$;
4. 康普顿电流 $J_e(t)$;
5. 空气电导率 $\sigma(t)$;
6. γ -射线 $\Gamma(t)$ 。

径向电场的上升时间, 近似于核反应速率, 通常为 10^{-8} 秒⁽¹⁾。在公开的文献资料中, 所引用的源区电场场强为 10^5 伏/米⁽²⁾。径向电场和垂直电场, 均按复杂形式衰减。按照对近地爆炸⁽³⁾所产生辐射的核电磁脉冲波形的讨论 (15 页), 重要的垂直电场数值, 保持几十微秒或更长的时间。源的“等离子体振荡”可能持续几毫秒的时间⁽¹⁾。

磁场波形的总特点, 趋向于与电场波形相似。有一篇研究核电磁脉冲现象的文章提出, 存在与 E_v/η_0 无关的很强的磁场, 式中 E_v 为垂直电场, η_0 为自由空间的阻抗。

源区这些场的有效值, 可望持续几十微秒或者更长的时间。有必要对最坏情况下磁场与时间的关系特性进行计算, 因为电磁屏蔽的效果作为 $\int H(t)dt$ 函数而恶化。

如果就两个核武器当量 (具体说来, 如低当量为千吨, 高当量 > 5 百万吨) 来比较空气电导率, 就会发现, 高当量武器的电导率, 峰值约为 1 姆欧/米; 而低当量武器的电导率, 峰值仅达 10^{-4} ^(4,5)。高当量武器波形的上升时间更陡, 电导率变化可高达 10^{10} 欧姆/米/秒。空气电导率、电场和康普顿电流三者随时间而变化的波形都相似 (图 1.6)。

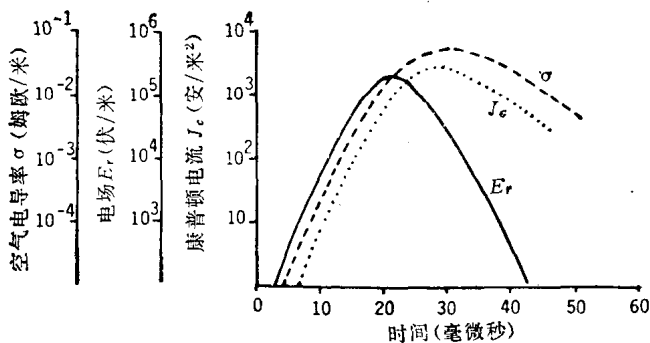


图1.6 图中曲线分别示出 σ 、 E_r 和 J_c 随时间而变化的特性曲线

如所预料，空气电导率、康普顿电流和 γ -射线（导致产生内核电磁脉冲），对源区外边界附近典型系统所汇集的电流和电压影响较小。可是，如果指望一个系统在源区内得以生存，就必须对这几种数值按最坏的情况加以计算，然后用来计算最坏情况时可能加于敏感元器件上的电压和电流。空气电导率尽管趋向于降低电场强度，但却趋向于增强所汇集能量的低频成分。这一点是很重要的，因为许多元器件的烧损性状，是“库仑含量”($\int i dt$)以及焦耳能量和峰值功率的函数。

近地爆炸辐射场^[6-8] 现在来讨论距地面爆炸爆点某些距离上电磁场是怎样产生的问题。可以想到，如果两个异性电荷骤然分离，则许多邻近的电荷也经受到同样但略小的力（即电场）的作用。可见，此力场的一部分以光速由位移电荷向远处运动。这就能影响远距离上其它电荷的位置。最远的场称为辐射场；因此，就把这一效应称为电磁辐射。电磁辐射场可使距离很远的良导体如金属结构、天线和电线中的电荷流动。

近地爆炸时，在超出源区颇远的距离上，“远区场”核电磁脉冲环境，系由此源区的电磁辐射所引起。如果核爆炸是接近对称的，例如，地面以上理想空气中的小型核爆炸，则在各个方向上电磁效应都是等同的。在离此爆点一定距离上（源区几乎为球形），源区以外的各相反分量趋向于相互抵销。可是，如属非对称性核爆炸，如近地爆炸，则在相当远的距离上会出现大的分量。大地本身的存在，就强制了核武器残余物和辐射向上半球的扩展。因此，有效的康普顿电子脉冲基本上是垂直的，如图 1.7 和 1.8 所示。

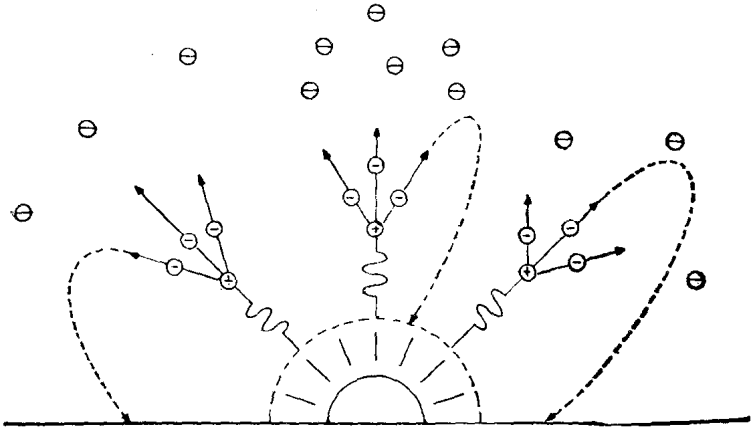


图1.7 康普顿电子

地下辐射场源区 近地爆炸所产生的辐射波，几乎是以正切方式沿地球表面传播， E 场矢量为垂直的。由于大地的有耗特性，使辐射波“斜射”到大地表面之内，产生几乎与坡印庭矢量和地面平行的正切表面电场（surface electric field）。

一般对于低频核电磁脉冲，在 $j\omega\epsilon \ll \sigma$ 时，此近面场值