



中华人民共和国国家标准

GB/T 18039.8—2012/IEC 61000-2-10:1998

电磁兼容 环境 高空核电磁脉冲(HEMP)环境描述 传导骚扰

Electromagnetic compatibility—Environment—
Description of HEMP environment—
Conducted disturbance

(IEC 61000-2-10:1998, IDT)

2012-11-05 发布

2013-02-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目次

前言	I
1 范围和目的	1
2 规范性引用文件	1
3 总论	1
4 术语和定义	2
5 HEMP 环境描述、传导参数	4
5.1 引言	4
5.2 早期 HEMP 外部传导环境	5
5.3 中期 HEMP 外部传导环境	6
5.4 晚期 HEMP 外部传导环境	7
5.5 天线电流	8
5.6 HEMP 内部传导环境	11
附录 A (资料性附录) 关于早期 HEMP 对长线耦合的讨论	13
A.1 架空线	13
A.2 埋地线的耦合	14
A.3 参考文献	15
附录 B (资料性附录) 关于中期 HEMP 对长线耦合的讨论	16
B.1 架空线	16
B.2 埋地线	16
附录 C (资料性附录) 简单线性天线对 IEC 早期 HEMP 环境的响应	17
C.1 引言	17
C.2 IEC 早期 HEMP 环境	17
C.3 天线响应的计算	19
C.4 计算结果	20
C.5 小结	21
C.6 参考文献	26
附录 D (资料性附录) 电话交换间内电缆的感应电流测量值	27
D.1 参考文献	27

前 言

GB/T 18039《电磁兼容 环境》分为以下几个部分：

GB/Z 18039.1—2000 电磁兼容 环境 电磁环境的分类

GB/Z 18039.2—2000 电磁兼容 环境 工业设备电源低频传导骚扰发射水平的评估

GB/T 18039.3—2003 电磁兼容 环境 公用低压供电系统低频传导骚扰及信号传输的兼容水平

GB/T 18039.4—2003 电磁兼容 环境 工厂低频传导骚扰的兼容水平

GB/Z 18039.5—2003 电磁兼容 环境 公用供电系统低频传导骚扰及信号传输的电磁环境

GB/Z 18039.6—2005 电磁兼容 环境 各种环境中的低频磁场

GB/Z 18039.7—2011 电磁兼容 环境 公用供电系统中的电压暂降、短时中断及其测量统计结果

GB/T 18039.8—2012 电磁兼容 环境 高空核电磁脉冲(HEMP)环境描述 传导骚扰

本部分为 GB/T 18039 的第 8 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分等同采用国际标准 IEC 61000-2-10:1998《电磁兼容(EMC) 第 2-10 部分：环境 高空核电磁脉冲(HEMP)环境描述 传导骚扰》。

本部分由全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC 246)提出并归口。

本部分起草单位：解放军理工大学工程兵工程学院。

本部分主要起草人：高成、周璧华、苏丽媛、石立华、李炎新、陈彬。

电磁兼容 环境

高空核电磁脉冲(HEMP)环境描述

传导骚扰

1 范围和目的

GB/T 18039 的本部分规定了高空核电磁脉冲(HEMP)传导环境,HEMP 是高空核爆炸的系列效应之一。研究这类课题要考虑两种情况:

- 高空核爆炸;
- 低空核爆炸。

对民用系统来说,两种情况之中最重要的是高空核爆炸。高空核爆炸的特点是,冲击波、大地震动、热辐射和核辐射等核爆炸的其他效应在地面上都不存在,但是由核爆炸产生的电磁脉冲会造成通信、电子和电力系统中断和损坏,从而扰乱现代社会的稳定性。

本部分的目的是建立一个关于 HEMP 环境的共同标准,以便从中确定真实的电磁骚扰环境,用于评估受影响设备的性能。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容(IEC 60050(161):1990,IDT)

IEC 61000-2-9:1996 电磁兼容(EMC) 第 2-9 部分:环境 高空核电磁脉冲(HEMP)环境描述 辐射骚扰(Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-9:Description of HEMP enviroment—Radiated disturbance)

IEC 61000-4-24:1997 电磁兼容(EMC) 第 4-24 部分:试验和测量技术 HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法(Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-24:Testing and measurement techniques—Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance)

3 总论

距地面 30 km 以上高空核爆炸产生的电磁脉冲,在地球表面观察到的有三种类型:

- 早期 HEMP (快);
- 中期 HEMP (中);
- 晚期 HEMP (慢)。

过去,人们把注意力集中在早期 HEMP 上,将其简称为“HEMP”。但是本部分中所用“高空 EMP”或“HEMP”一词,则包括上述三种类型。核电磁脉冲(NEMP)一词则涵盖了各类核电磁脉冲,其中包括地面爆炸产生的源区电磁脉冲(SREMP—Source Region EMP)和空间产生的系统电磁脉冲(SGEMP—System Generated EMP)。

因为 HEMP 是由高空核爆炸产生的,所以在地面上观测不到诸如 γ 射线、热辐射、冲击波等其他核武器效应。关于 HEMP 的报道是由于 20 世纪 60 年代初美国在南太平洋进行的高空核爆试验对远离爆点的电子设备产生了效应。

本部分阐述了在金属导线(诸如电缆、输电线)上、设备内部和外部的线路以及外部天线上感应出的传导型 HEMP 环境。

4 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

4.1

垂直面上的仰角 angle of elevation in the vertical plane

Ψ

Ψ 角是在垂直面上地平面和传播矢量方向之间的夹角(见图 1)。

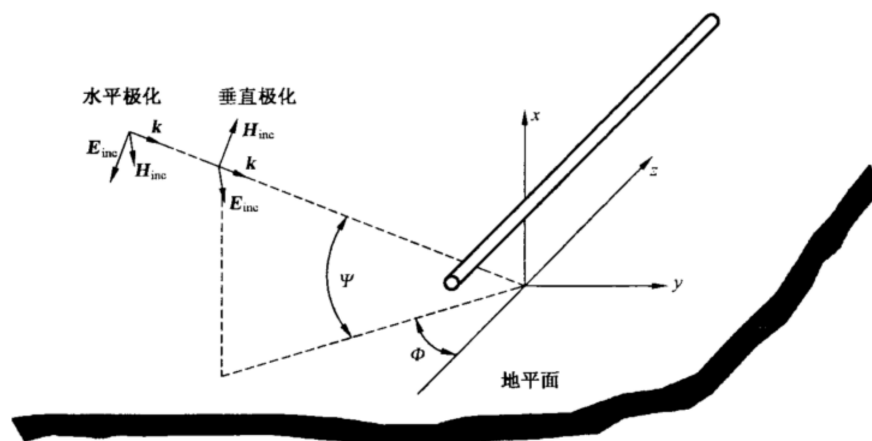


图 1 仰角 Ψ 、方位角 Φ 和极化方向的几何关系

4.2

方位角 azimuth angle

Φ

传播矢量在地平面上的投影与受 HEMP 作用系统主轴的夹角(图 1 中传输线的 z 轴)。

4.3

合成波 composite waveform

从一批波形中将重要参数各取其最大值合成得到的波形。

4.4

耦合 coupling

HEMP 场作用于系统时在系统表面和电缆上产生电流和电压的过程。而由感应电荷产生电压仅在低频即波长大于系统表面或缝隙尺寸时才有定义。

4.5

电磁波的传播方向 direction of propagation of the electromagnetic wave

传播矢量 k 的方向,垂直于由电场矢量和磁场矢量构成的平面(见图 2)。

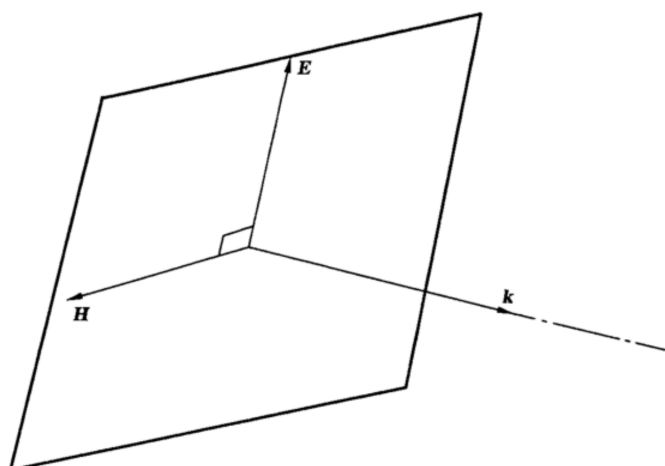


图2 平面波定义中的几何关系

4.6

 E_1, E_2, E_3

早期、中期、晚期 HEMP 电场的专用术语。

4.7

EMP

电磁脉冲的统称。

4.8

地磁倾角 geomagnetic dip angle θ_{dip}

地磁场磁通量密度矢量 B_e 的倾角,是测得的地磁场磁通量密度方向与当地水平面之间的夹角。
在地磁北极, $\theta_{\text{dip}} = 90^\circ$; 在地磁南极, $\theta_{\text{dip}} = -90^\circ$ (见图 3)。

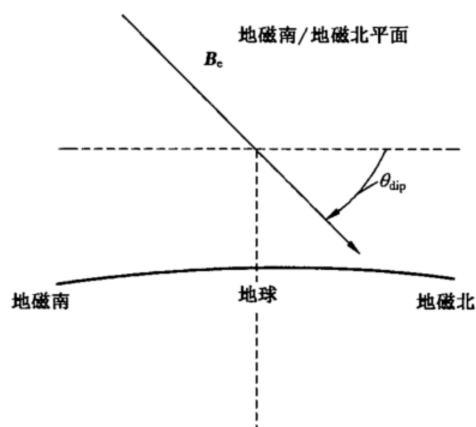


图3 地磁倾角

4.9

HEMP

高空核爆炸产生的电磁脉冲。

4.10

高空核爆炸 high-altitude(nuclear explosion)

爆高超过 30 km 的核爆炸。

4.11

水平极化 horizontal polarization

当电磁波的磁场矢量位于入射面内,电场矢量垂直于入射面(因而平行于地面)时,称为水平极化(见图1)。这种极化也称正交极化或称这种电磁波为横电(TE)波。

4.12

入射面 incidence plane

传播矢量 k 和入射点的地面法向所组成的平面。

4.13

低空核爆炸 low-altitude(nuclear explosion)

爆高在 1 km 以下的核爆炸。

4.14

NEMP

核电磁脉冲;所有核爆炸产生的电磁脉冲。

4.15

进入点 point-of-entry(PoE)

在尚未提供足够防护装置的情况下,电磁阻挡层上电磁能量进出的实体位置。一个进入点并不限于一个几何点。按照进入的类型可分为孔缝进入点或传导进入点。也可按照它们的功能,分为建筑、机械、结构或电气进入点。

4.16

脉冲宽度 pulse width

除非另有规定,系指脉冲前沿和后沿上瞬时值为其峰值一半的两个点之间的时间间隔。

4.17

整流冲击量 rectified impulse(RI)

时域波形幅度的绝对值在指定时间间隔内的积分。

4.18

脉冲上升时间 rise time(pulse)

除非另有规定,系指脉冲瞬时幅度首次达到指定的低值和高值,即峰值的 10% 和 90% 的两个点之间的时间间隔。

4.19

短路电流 short-circuit current

当电路输出端被短路时的电流值。通常是在检验浪涌抑制器的性能时关注这种电流。

4.20

源阻抗 source impedance

能源对设备或网络的输入端呈现的阻抗。

4.21

垂直极化

当电磁波的电场矢量位于入射面内而磁场矢量与入射面垂直(因而平行于地面)时,称为垂直极化(见图1)。这种极化也称平行极化或称这种电磁波为横磁(TM)波。

5 HEMP 环境描述、传导参数

5.1 引言

IEC 61000-2-9 中的描述的由高空核爆炸产生的电磁场能够在所有的金属结构上感应出电流和电

压。这些在导体内传播的电流和电压,称为传导环境。这就是说,传导环境是二次现象,是伴随辐射场产生的后果。

所有的金属结构(即电线、导体、管道、导管等)都要受到 HEMP 的影响。传导环境应当引起重视,因为它能通过信号线、电源线和接地线将 HEMP 能量引至敏感电子器件上。对于建筑物或任何其他包壳,导体必须区分为性质各异的两类:外导体和内导体。这种分类看上去简单,但根据本部分中所提供的资料,具有关键意义。

这两类导体的不同之处在于其所在处的电磁环境大相径庭。一般来说,外导体是位于建筑物外,完全暴露在 HEMP 环境中。这类导体包括输电线、金属通信线、天线电缆以及输送水和气的金属管道。在本部分涉及的场合,它们或架设在地面上方或埋设于地下。内导体则是指位于部分或完全屏蔽的建筑物内的导体,建筑物内的 HEMP 场已被衰减。这是一种非常复杂的情况,虽然可从 HEMP 模拟试验中得到一些测量数据,但由于建筑物的屏蔽,HEMP 场的波形将被显著改变,因此对于建筑物内导体和电缆的耦合问题很难计算。

本部分中,外部传导环境的通用模式是用简化的导体形状和早、中、晚期 HEMP 标准波形进行计算的。这些传导型外部环境一般被用来评估建筑物外面的防护装置的性能,由于电信和电源系统的多样性,这里对变压器和电话分线盒的作用不做考虑。这样处理得到的波形虽是近似的,但完全是确定的,是以标准化方法对外导体上的防护元件进行检测所需要的波形。对于内部导体,也确定了一种方法,用来评估适用于设备检测的传导环境。对于非屏蔽多芯电线,我们假定线到地的电流等于共模电流。

5.2 早期 HEMP 外部传导环境

对于早期的 HEMP,其高幅值的电场能有效地耦合进天线以及诸如输电线、电话线一类暴露的任何导线。天线耦合机制极具多样性,它取决于天线设计的细节。在许多场合下,适合于采用连续波对天线进行测试,并用卷积方法将天线响应函数与入射 HEMP 环境结合起来。我们也提供了一些计算细天线响应的简单方程式(见 5.5)。对于长线,有可能完成一组综合性通用模式的计算,其计算结果是可靠的,而且只依赖少量几个参数。这些参数包括导体的长度、暴露的状况(地上或埋于地下)和地表(深度在 5 m 以内)电导率。此外,因为 HEMP 耦合取决于仰角和极化方式(见图 1),所以有可能从统计的角度来分析产生特定大小电流的概率。

表 1 给出了导线上耦合的共模短路电流的计算值和戴维南等效源阻抗(用来确定开路电压)随严重程度、导体长度和大地电导率变化的函数关系。这些结果适用于裸导线、架空绝缘电线和屏蔽电缆或同轴传输线的外导体上的共模电流。对于屏蔽电缆,应当用实测的或规定的电缆传递阻抗来确定其内导体上的电流和电压。虽然由于暴露部分的形状大小不同会使波形产生不同的变化,但是仍然规定了一个时域波形用于对线缆的评估。该波形是用上升时间(10%~90%)和脉宽(半峰值宽度)来规定的,若把上升时间和脉宽放在一起表达,常写为 $\Delta t_r/\Delta t_{pw}$ 。

在表 1 中,99%的严重程度是指,所产生的电流 99%都将小于这个值。埋地导线电流计算值随入射角变化很小,这意味着一个很宽的概率分布,(严重程度从 10%到 90%,其差别都很小),因而没采用严重程度而以不同的大地电导率来展现 I_{pk} 的变化。关于表 1 的适用范围,凡架空导线高于 5 m 者,埋地导线略高于地表($h < 30$ cm)者和低于地面时, I_{pk} 是准确的。对于高度低于 5 m ($0.3 \text{ m} < h < 5 \text{ m}$)的导线,可用表 1 中的值通过线性内插求得。对于从架空线以绝缘状态转入地下的情况,电流波形初始段与波形 1 相似,并随埋深而减小,直至埋深增加到约 20 m,变为波形 2。这些波形的推导详见附录 A。

表 1 早期 HEMP 传导共模短路电流(包括时间特性和峰值电流 I_{pk})
随严重程度、导体长度 L 、大地电导率 σ_g 的变化

表 1a) 架空长导体

严重程度 (%) [*]	I_{pk}/A		
	$L > 200\text{ m}$	$100\text{ m} \leq L \leq 200\text{ m}$	$L < 100\text{ m}$
50	500	500	$5.0 \times L$
90	1 500	$7.5 \times L$	$7.5 \times L$
99	4 000	$20 \times L$	$20 \times L$
[*] 电流小于表中数值的百分比。 波形 1:10/100 ns;源阻抗: $Z_s=400\ \Omega$ 。			

表 1b) 埋地长导体

$\sigma_g/(S/m)$	I_{pk}/A
	所有长度 $> 10\text{ m}$
10^{-2}	200
10^{-3}	300
10^{-4}	400
波形 2:25/500 ns;源阻抗: $Z_s=50\ \Omega$ 。	

5.3 中期 HEMP 外部传导环境

中期 HEMP 环境只能对长度超过 1 km 的长导体产生有效的耦合。因而这里主要关注输电线和通信线之类的外导体。因为这种环境的脉冲宽度远远大于早期的 HEMP 环境,所以仰角对耦合影响很小。这意味着统计变化规律没有在早期 HEMP 耦合中那么重要。另一方面,除对埋地线外大地电导率对架空线的影响也很重要。详见附录 B。

表 2 给出了外部传导环境随线路长度和大地电导率(至 1km 深度)的变化关系。

表 2 中期 HEMP 传导共模短路传导电流(包括时间特性和峰值电流 I_{pk})
随导体长度 L 、大地电导率 σ_g 的变化

表 2a) 架空长导体

$\sigma_g/(S/m)$	I_{pk}/A			
	$L > 10\text{ km}$	$1\text{ km} \leq L \leq 10\text{ km}$	$100\text{ m} \leq L \leq 1\text{ km}$	$L < 100\text{ m}$
10^{-2}	150	75	$0.05 \times L$	0
10^{-3}	350	200	$0.15 \times L$	0
10^{-4}	800	600	$0.45 \times L$	0
波形 3:25/1 500 μs ;源阻抗: $Z_s=400\ \Omega$ 。				

表 2b) 埋地长导体

$\sigma_g/(S/m)$	I_{pk}/A		
	$L > 1\,000\text{ m}$	$100\text{ m} \leq L \leq 1\,000\text{ m}$	$L < 100\text{ m}$
10^{-2}	50	$0.05 \times L$	0
10^{-3}	150	$0.15 \times L$	0
10^{-4}	450	$0.45 \times L$	0
波形 3; 25/1 500 μs ; 源阻抗: $Z_s = 50\ \Omega$ 。			

5.4 晚期 HEMP 外部传导环境

晚期 HEMP 只对长的外导体(如输电线和通信线)的耦合是重要的。但是在这种情况下,即使对于感兴趣的典型例子,计算其短路电流也是不易完成的。这是因为我们把晚期 HEMP 环境描述为在大地中产生的电压源,而这种电压源只在那些二点或多点接地的导体中产生电流。由于电流的流动强烈地取决于电路中的电阻,故这里推荐一个研究标准传导环境的分析方法。

为了说明如何使用这个方法,举一个例子。图 4a)是一个三相星形——三角形(Y— Δ)电力配线图,图 4b)是其等效电路(E_0 是晚期 HEMP 的峰值)。注意,这个问题可以描述为一个准直流问题,电压源可直接由晚期 HEMP 环境计算得到。因为晚期 HEMP 环境的最高频率在 1 Hz 数量级,所以这一处理是合理的。由此可假定电压源 V_s 与时间的函数关系和 E_0 相同。已知图 4b)中的电阻(并联的 Y 绕组电阻 R_y 与接地电阻 R_f) 在频率小于 1 Hz 时与频率无关,因而感应电流 I_{pk} 与 E_0 与时间有着相同的函数关系。

以此例,峰值电流可由式(1)算出:

$$I_{pk} = \frac{E_0 L}{2(R_f + R_y) + r_L L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

r_L ——平行线单位长度电阻,单位为欧每米(Ω/m);

R_f ——接地电阻,单位为欧(Ω);

R_y ——一只变压器的并联绕组电阻,单位为欧(Ω);

L ——导线长度,单位为米(m)。

对于北美的长输电线,500 kV 输电线单位长度的电阻为 $8.3 \times 10^{-6}\ \Omega/m$,变压器绕组的电阻为 $0.06\ \Omega$,接地电阻为 $0.75\ \Omega$ 。对于长度在 10^5 m 的线路,产生的峰值电流约为 $40\,000 \times E_0$ 。(按 IEC 61000-2-9,深度 $d \gg 10\text{ km}$ 的大地电导率为 10^{-4} S/m , E_0 为 0.04 V/m),于是 I_{pk} 约等于 $1\,600\text{ A}$ 。得出这一峰值后,电流的时域波形可用一上升时间和脉宽为 $1/50\text{ s}$ 的单极性脉冲来近似。要想模拟这个例子的波形,需用一个源阻抗为 $2.45\ \Omega$ 的 4 kV 电压源。为了采用图 4 的电路,变压器应接地。一些 Δ — Δ 接法的变压器没有直接与地接通的路径。

通过计算整条线路的总电阻,并用线路上感应的总电压除以该电阻,就可很容易地将式(1)用于输电线以外其他长导体的电流计算。式(1)只适用于陆地上的长电缆,对于深海电缆,计算得出的电流应减小 100 倍。这种减小是因为电场 E_0 反比于大地(在 $10\text{ km} \sim 100\text{ km}$ 深度上)电导率的平方根。对于淡水湖和浅海,电流不会减小这么多。

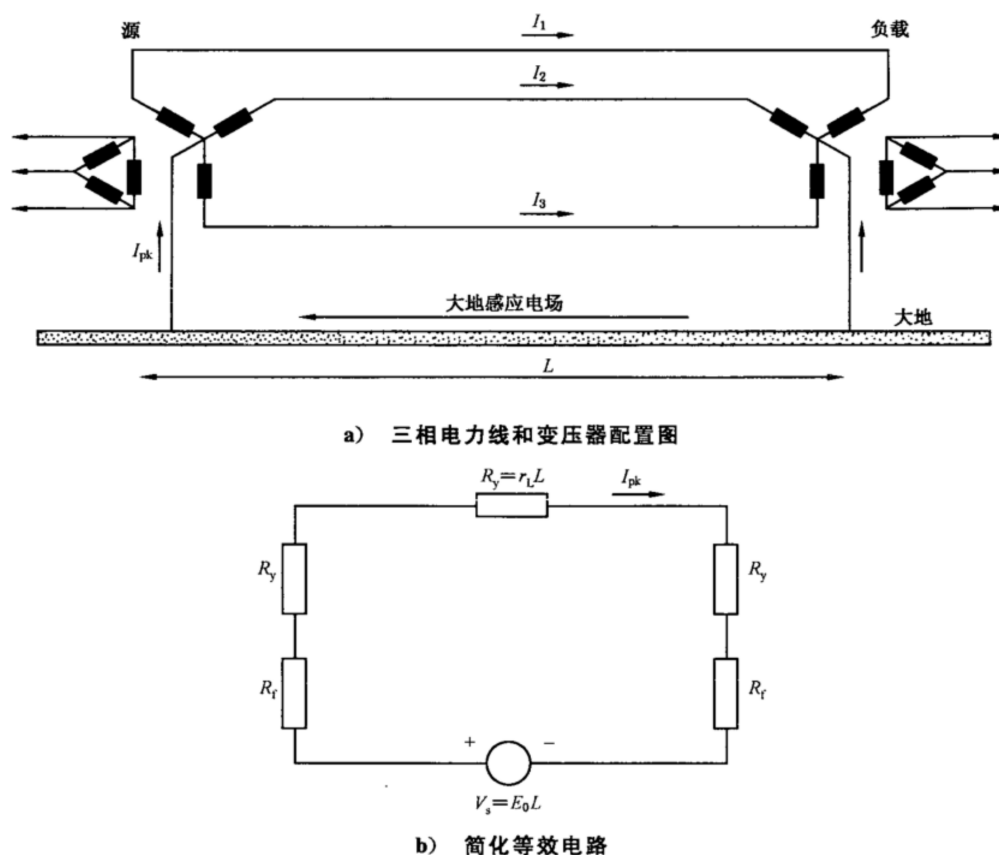


图4 计算晚期 HEMP 传导电流用的三相线路及其等效电路图

5.5 天线电流

天线的尺寸和形状各异。在 VLF 和 LF 频段,即 3 kHz~300 kHz,天线一般为很长的导线,有时埋入地下。在 MF 频段,300 kHz~3 000 kHz,天线通常为与地面垂直的塔,通过埋在地下的平衡网络馈电。在 3 MHz~30 MHz 的 HF 频段和 30 MHz~300 MHz 的 VHF 频段,典型的天线是中心馈电的偶极子。在更高的频段(如 UHF、SHF 等),天线更趋于一个分布系统,包括抛物面天线和孔径天线。

通常,天线工作在设计的基频附近一个窄的频段。为了提高天线的窄带性能,常采用各种方法进行调谐,如附加集总阻抗元件,在有源天线近旁附加无源元件,以及把天线排成阵列等。

天线构造有如此大的差异,使得我们很难为每一种类型的天线提供一个精确的响应标准(电流和电压波形)。然而,可以采用如图 5 所示的简单细线垂直偶极子作为近似模型,用它的响应来了解其他更为复杂的天线的响应。当然,这个模型仅适用于电偶极子类型的天线。环型(磁偶极子)天线和孔径天线不适合于用这种简单结构作为模型。对于更复杂的天线,推荐用连续波(CW)照射或强脉冲测试来评估天线的响应。

上述连续波与脉冲波的测试方法见 IEC 61000-4-23。

设图 5 所示的天线接有标称值为 $50\ \Omega$ 的负载,这是实际天线工作频段内负载的典型值。天线长度为 l ,半径为 a ,由这两个参数可以计算出形状参数 $\Omega = 2 \ln(l/a)$ 。这种天线加载电流的谐振带宽因子 Q 可以近似为 $Q = \Omega/3.6$ 。对非理想天线,参数 Q 可从天线响应测量结果中推算出。

图 5 所示的天线架设位置附近通常会有其他导电物体,这些物体将改变入射场,使得天线响应与孤立天线不同。例如,天线可以固定在地面上或地面附近,在那里大地的反射场就是天线额外的激励源。同样地,偶极子也可能安装在一根长杆上,长杆及其支座和馈线等的散射场将会改变激励源。

由于天线的形状、大小多种多样,所以在推导标准响应波形时很难把所有这些的可能性都考虑进去。不过,这个问题可以简化,因为对于实际中的许多情形,反射场是在入射场已经激励了天线之后才到达天线。因此,依然可以将入射场的响应规定为天线的全部响应。作这样的简化处理,就将任何散射场的影响都忽略了。

为了计算天线的响应,先由式(2)确定谐振基频。

$$f_c = \frac{c}{2l} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

c ——光速;

l ——偶极子的总长,若是单极子,则是在地平面上高度的两倍。

于是,天线的响应由 $50\ \Omega$ 负载上的电流表达为:

$$I_L(t) = kI_p e^{-\frac{\pi f_c t}{Q}} \sin(2\pi f_c t) \quad \text{当 } t \geq 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中, I_p 值列于表 3。归一化因子 k 按照使得 I_L 达到峰值 I_p 来确定,它依赖于 Q 和 f_c 的值。在表 3 中 I_p 定义为乘积 $l\hat{I}$, 其中 \hat{I} 为 HEMP 入射磁场的峰值。在 10 MHz 以下,天线的峰值电流被认为是常数。

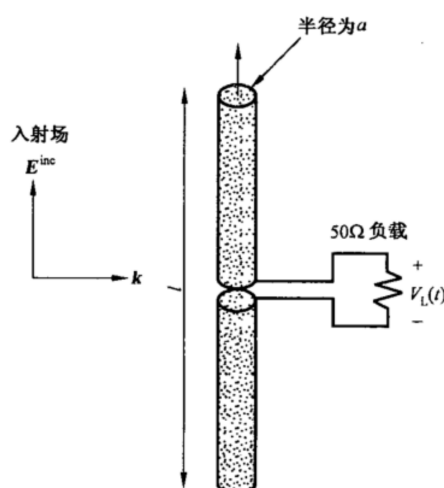


图 5 长度为 l , 半径为 a 的中心接负载的偶极子天线, 激励源为早期 HEMP 场

表 3 电偶极子天线负载电流的峰值与天线主频的关系

f_c/MHz	L/m	$\hat{I}/\text{A/m}$	$l\hat{I}/\text{A}$	I_p/A
<1	>150	—	—	$2\ 000^*$
$1\sim 10$	$15\sim 150$	—	—	$2\ 000^*$
10	15	130	1 950	1 950
100	1.5	130	195	195
200	0.75	130	97.5	97.5
>200	$150/f_c$	130	$19\ 500/f_c$	$19\ 500/f_c$
* 最大允许值。				

上述方法对细线垂直偶极子天线给出接近最坏情形的耦合结果(但不计大地反射),采用曾用于表 1 的类似方法,还可给出耦合的统计数据。附录 C 采用计及仰角随覆盖面积变化的方法,给出了爆

高为 100 km 情况下两种细线天线详细的耦合结果。这两种天线分别是：长度为 l_m 的垂直单极子天线（包括地面对 HEMP 的反射）和长度为 l_h 的水平偶极子天线（不包括地面反射），都接有 $50\ \Omega$ 的负载。垂直单极子天线的耦合结果汇总在表 4～表 6 中，而水平偶极子天线的耦合结果汇总在表 7～表 9 中。

表 4 垂直单极子天线的 HEMP 响应电平 V_{sc}

单位：kV

长度 l_m		1 m			3 m			10 m			100 m		
严重程度		50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
磁倾角	0°	13.6	28.4	33.6	46.5	91.7	104.6	125.7	232.0	249.0	383.2	470.7	477.1
	15°	13.1	27.0	32.4	45.1	88.5	101.1	125.3	226.2	240.5	365.5	454.0	461.0
	30°	11.8	24.3	29.0	40.5	80.3	90.4	107.2	200.2	215.5	326.9	406.9	413.1
	45°	9.5	19.5	23.7	32.7	64.9	73.8	89.0	164.3	175.9	273.6	332.3	337.3
	60°	6.6	14.1	16.5	23.3	45.6	52.1	63.9	116.4	124.4	190.1	234.8	238.4
	75°	3.5	7.2	8.6	12.0	23.9	26.9	33.2	60.1	64.3	98.8	121.6	123.3
	90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5 垂直单极子天线的 HEMP 响应电平 I_{sc}

单位：kA

长度 l_m		1 m			3 m			10 m			100 m		
严重程度		50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
磁倾角	0°	0.08	0.19	0.22	0.33	0.66	0.70	1.12	1.74	1.91	3.13	3.68	4.37
	15°	0.08	0.18	0.21	0.32	0.64	0.68	1.13	1.68	1.85	3.02	3.55	4.31
	30°	0.07	0.16	0.19	0.28	0.57	0.61	0.96	1.50	1.65	2.71	3.25	4.13
	45°	0.06	0.13	0.16	0.23	0.47	0.50	0.79	1.23	1.35	2.23	2.72	3.67
	60°	0.04	0.10	0.11	0.16	0.33	0.35	0.57	0.87	0.95	1.57	1.94	2.73
	75°	0.02	0.05	0.06	0.08	0.17	0.18	0.30	0.45	0.49	0.81	1.01	1.38
	90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 6 加载垂直单极子天线的 HEMP 响应电平 I_L^*

单位：kA

长度 l_m		1 m			3 m			10 m			100 m		
严重程度		50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
磁倾角	0°	0.06	0.15	0.17	0.23	0.49	0.55	0.76	1.31	1.33	2.37	2.71	3.53
	15°	0.06	0.14	0.16	0.23	0.48	0.53	0.76	1.26	1.29	2.28	2.59	3.34
	30°	0.05	0.13	0.15	0.20	0.43	0.47	0.65	1.13	1.15	2.03	2.32	3.00
	45°	0.04	0.10	0.12	0.16	0.35	0.39	0.54	0.92	0.94	1.69	1.91	2.51
	60°	0.03	0.07	0.08	0.12	0.25	0.27	0.39	0.65	0.67	1.17	1.35	1.79
	75°	0.02	0.04	0.04	0.06	0.13	0.14	0.20	0.34	0.34	0.61	0.70	0.91
	90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
* 乘 $50\ \Omega$ 即为相应的负载电压值。													

表 7 水平偶极子天线的 HEMP 响应电平 V_{oc}

单位:kA

长度 l_h		1 m			3 m			10 m			100 m		
严重程度		50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
磁倾角	0°	0.8	4.0	11.5	2.8	13.5	44.0	7.9	37.9	110.4	19.0	99.8	289.1
	15°	4.9	7.0	13.1	17.1	25.1	45.8	43.3	68.2	113.3	115.3	162.2	309.1
	30°	8.9	12.5	15.4	31.0	45.6	53.9	81.3	128.1	154.6	211.9	291.0	367.3
	45°	12.5	17.6	18.6	43.1	64.1	67.3	112.7	179.7	188.2	293.9	407.4	434.7
	60°	15.1	21.4	21.9	52.5	78.2	79.8	136.2	218.6	224.0	355.4	495.9	508.0
	75°	16.8	23.9	24.2	58.3	87.0	88.4	152.2	243.9	248.6	395.1	552.1	563.6
	90°	18.0	24.6	25.1	60.0	89.9	91.5	159.4	251.7	257.2	404.8	573.1	583.3

表 8 水平偶极子天线的 HEMP 响应电平 I_{oc}

单位:kA

长度 l_h		1 m			3 m			10 m			100 m		
严重程度		50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
磁倾角	0°	0.003	0.01	0.04	0.01	0.05	0.15	0.03	0.16	0.47	0.10	0.53	1.66
	15°	0.02	0.02	0.04	0.06	0.09	0.17	0.19	0.27	0.48	0.55	0.81	1.71
	30°	0.03	0.04	0.05	0.11	0.17	0.20	0.35	0.49	0.62	1.04	1.36	1.99
	45°	0.04	0.06	0.06	0.15	0.24	0.25	0.49	0.69	0.73	1.47	1.87	2.27
	60°	0.05	0.07	0.07	0.18	0.29	0.30	0.59	0.84	0.86	1.79	2.27	2.52
	75°	0.05	0.08	0.08	0.20	0.32	0.33	0.65	0.94	0.96	2.00	2.52	2.65
	90°	0.05	0.08	0.08	0.21	0.34	0.34	0.67	0.97	0.99	2.06	2.61	2.69

表 9 加载水平偶极子天线的 HEMP 响应电平 I_L^*

单位:kA

长度 l_h		1 m			3 m			10 m			100 m		
严重程度		50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%	50%	90%	99%
磁倾角	0°	0.002	0.012	0.032	0.008	0.040	0.13	0.028	0.14	0.39	0.078	0.042	1.26
	15°	0.014	0.020	0.036	0.050	0.078	0.14	0.16	0.23	0.40	0.45	0.65	1.33
	30°	0.024	0.036	0.044	0.092	0.15	0.17	0.29	0.44	0.54	0.84	1.10	1.58
	45°	0.034	0.050	0.054	0.13	0.20	0.22	0.41	0.61	0.64	1.17	1.51	1.83
	60°	0.042	0.062	0.062	0.16	0.25	0.26	0.50	0.74	0.76	1.44	1.83	2.05
	75°	0.046	0.068	0.070	0.17	0.28	0.29	0.55	0.83	0.85	1.60	2.04	2.18
	90°	0.048	0.070	0.072	0.17	0.28	0.30	0.57	0.86	0.88	1.66	2.10	2.22
* 乘 50 Ω 即为相应的负载电压值。													

5.6 HEMP 内部传导环境

如前所述,内部传导环境(在建筑物或设备内部)比外部传导环境更难确定。内部传导信号有两种来源:一由外部传导信号贯穿屏蔽层(无论有无进入点防护装置产生的衰减)而来,二由穿透建筑物且对暴露导线发生耦合的 HEMP 场产生。因为建筑物的电磁屏蔽材料种类繁多,从木质结构到焊接良好的钢板屏蔽室,各种各样,所以对于设备内部电缆和其他导体的耦合很难计算。然而,有可能确定一种简

单的方法使我们能够估计内部的瞬变传导信号。

解决内导体问题的第一步是要认识到外部瞬变传导信号的漏入是要考虑的主要对象。我们要根据以上得出的传导环境来确定设备进入点防护措施的类型。利用计算数据或测量数据,可以估计透入设备的电流波形。应注意,如果存在非线性装置,很可能需要用 IEC 61000-4-24 规定的方法进行测试,除非确有很高的抑制量。

第二步是估计屏蔽层对早期 HEMP 辐射环境的衰减量(不必计及中期和晚期场,因为这些低频场对设备内部布线紧凑的电缆耦合不大)。定义 A_t 为平面波衰减因子($f > 1$ MHz), D 为所关心的内部电缆长度(m), B 是幅度因子(基于表 1 中引用的严重程度因子),于是,内部电缆通用模型电流峰值 I_{pk} 可以按式(4)估算

$$I_{pk} = BDA_t \quad \text{当 } D < 100 \text{ m} \quad \dots\dots\dots(4)$$

幅度因子 B 的单位为 A/m,是根据乘积 DB 与表 1a)最右边一栏的单位相一致而推导出来的;当严重程度分别为 50%、90%、99%,得出的 B 相应为 5.0 A/m、7.5 A/m 和 20 A/m。因此,当严重程度为 50%,建筑物衰减因子为 0.01(−40 dB)和导体长度为 10 m 时,耦合电流的峰值为 0.5 A。如附录 D 所示,产生的电流波形将类似于阻尼正弦曲线。用式(2)和式(3)时,应取 $l = D$ 和 $Q \geq 60$ 。

这种处理方法是不精确的,因为入射电磁场的衰减并不是各频率都相等的,特别是有孔缝存在时。另外,一旦内部场建立起来,在经常有许多电缆存在的情况下,使得精确的耦合计算变得困难起来。最后,由设备产生的谐振(波模由谐振腔的尺寸和形状决定),对耦合电流也有影响。尽管有这么多困难,但是用这种方法依然能够粗略估计内部传导电流。

作为第二种替代方法,估算 HEMP 产生的内部传导电流 I_{pk} ,则是直接利用已往收集的三种等级建筑物结构的数据。附录 D 给出了严重程度分别为 50%、90%、99%时,对应于混凝土块、铆接金属,浇筑混凝土结构的电流。严重程度为 50%时,三种结构的电流峰-峰值分别是 10 A、10 A、3 A,而严重程度为 99%时的值分别为 25 A、25 A、7 A。这些内部电流仅仅是由外部 HEMP 场的耦合产生的,不包括随贯通导体流入电流的贡献。电流随时间变化的波形由式(2)和式(3)得出,其中 $f_c = 7$ MHz, $Q \geq 60$ 。

第三种(也是最精确的)获得内导体电流的方法,是通过试验测量。这种方法包括使用(100 k~500 M)Hz 的连续波模拟器。在建筑物暴露在几种不同仰角和场极化情况下测量内部电缆电流。将传递函数与入射的早期 HEMP 波形作卷积即可计算出内部电缆的电流波形。通常需要测定多个电流波形峰值和脉冲形状的变化,以导出设备测试用的组合波形。

值得指出的是,这三种方法仅仅给出了 HEMP 场直接耦合产生的内部电流。有必要通过估算(或测量)外部电流贯穿设备屏蔽体(包括浪涌抑制器)的漏入量,来确定外部电流对内部总电流的贡献。

附录 A

(资料性附录)

关于早期 HEMP 对长线耦合的讨论

A.1 架空线

表 1 中所列的数据来自 Ianoz 等人^{[A.1]¹⁾}关于耦合问题的一系列概率统计计算结果。在这些计算中,作者采用了在 IEC 61000-2-9 中定义的 IEC 早期 HEMP 电场脉冲,计算了大地电导率为 10^{-2} S/m 时地面上方 10 m 高处 1 km 长架空线的耦合(短路电流)。计算分别针对 100% 水平极化和 100% 垂直极化两种情况。对于每种极化,仰角 Ψ 和入射场的传播矢量和耦合导线之间的方位角 ϕ 均以 2.5° 网格变化。这些计算结果存储后重新组合可应用于感兴趣的任何高度和地球上的任何位置(以地磁纬度标记)的核爆炸。

图 A.1 是爆炸高度为 100 km,磁倾角 θ_{dip} 分别为 0° 、 45° 、 67° 、 75° 、 90° 时的计算结果。其中,没有采用磁倾角为 0° 时的结果,这是由于耦合计算中未考虑地磁赤道上由于弱地磁场而造成的 HEMP 电场的减小。这样的磁倾角造成入射场减少并使耦合电流降低 30% 到 40%。根据图 A.1 ($\theta_{\text{dip}} > 45^\circ$) 所示结果,选择 4 000 A,对应的概率为 1%;1 500 A 对应于 10%;500 A 对应于 50% (精度在 10% 以内)。这里所讨论的概率为 1%、10%、50%,相当于在正文第 5 章中讨论的概率为 99%、90%、50% 的严重程度。

文献[A.1] 还采用本部分给出的时域电流波形研究了波形上升时间(10%~90%)和冲击电量等波形特征参数。冲击电量 RI 为一单极性脉冲的面积。表 A.1 中列出了垂直极化时的 RI 值,同时还列出了用给定的峰值电流 I_p 计算出的有效脉冲宽度 Δt_{pw} r. m. s (RI/I_p) 值。

用这种估算方法,有效脉宽的最大值选为 127 ns,将它换算为双指数衰减波形的脉冲半峰值宽度,即为 88 ns,在表 1a) 中,近似为 100 ns。

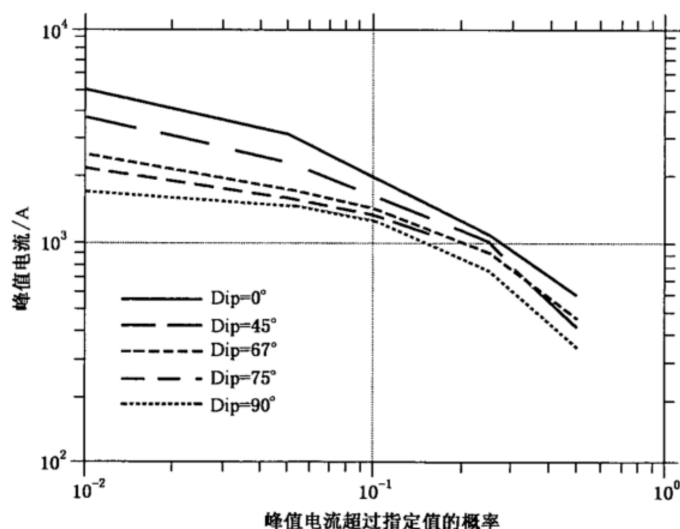


图 A.1 耦合到电缆上的电流峰值随当地磁倾角的变化

1) 方括号中的编号是本附录 A.3 所列参考文献号。

表 A.1 架空导体($h=10\text{ m}$)在垂直极化早期 HEMP 作用下的冲击电量值和有效脉冲宽度

概率 (%)	冲击电量 $RI/(\text{A}\cdot\text{s})$	峰值电流 I_P/A	有效脉冲宽度 $\Delta t_{\text{pw r. m. s.}}/\text{ns}$
50	$>3.7\times10^{-5}$	>500	74
10	$>1.9\times10^{-4}$	$>1\,500$	127
1	$>3.0\times10^{-4}$	$>4\,000$	75

在对这种耦合问题的研究中,上升时间的估算更为困难。文献[A.1]中用列表方式给出了水平极化和垂直极化两种条件下的上升时间(10%~90%)。该计算结果表明,水平极化和垂直极化对应的最小上升时间分别为 2.3 ns 和 5.1 ns。仔细检查后发现,这些最小上升时间并不发生在峰电流最大的情况下。因为该文献中没有列出电流波形上升沿的斜率值,所以还需要进一步的计算。

对于 IEC 电场脉冲完全垂直极化的情况,电流导数的最大值 $2.7\times10^{11}\text{ A/s}$ 是在仰角 5° 时算得到的,其他有关耦合的形状尺寸皆与[A.1]相同。这个最大值是从一系列结果中得到的,耦合电流在这个角度达到最大值。当概率定为 1%,算出上升时间(10%~90%)的公式为:

$$(0.8)\times(4\,000\text{ A})/(2.7\times10^{11}\text{ A/s})=1.2\times10^{-8}\text{ s}$$

本部分将上升时间定为 10 ns。虽然对概率更大的情况,似乎较长的上升时间将更为适合,但计算结果表明,与 50%概率相对应的上升时间为 14.4 ns。因此为了使差异相对地小一些,表 1 中的所有情况都选取相同的上升时间。

A.2 埋地线的耦合

对于埋地的通信线或输电线,尽管近地面的大地电导率有一定的影响,但耦合进的 HEMP 信号受场的极化和角度影响不是十分显著。对于埋深 1 m 的导线对 HEMP(IEC 脉冲)响应的计算,大地电导率取 10^{-2} S/m 、 10^{-3} S/m 、 10^{-4} S/m 三种情况。对不同仰角、不同极化所得 42 组计算结果摘要列于表 A.2。

由表中数据可见,对于两种较低的电导率,表 A.2 中对两种较低的电导率情况,这些值都约在最接近表 1 采用的 100 A(10^{-3} —300 A, 10^{-4} —400 A),这些值都已有 10%减弱。对导电率的情况,电流调整为 200 A,以适用于近地表(较浅埋深)处较高场强。

表 A.2 早期 HEMP 对埋地导体的耦合电流($h=-1\text{ m}$)

大地电导率 $\sigma_g/(\text{S/m})$	极化方式	最大短路电流 I_{sc}/A	仰角 Ψ
10^{-2}	垂直	152	60°
10^{-2}	水平	148	90°
10^{-3}	垂直	332	45°
10^{-3}	水平	267	90°
10^{-4}	垂直	437	30°
10^{-4}	水平	418	90°

关于所用波形的参数,(10%~90%)上升时间和半峰值宽度由表 A.3 给出。

将表 A.3 中的不同数值,去平均后,按每种电导率分类列于表 A.4 中。

表 A.3 早期 HEMP 对埋地导体耦合的波形参数($h = -1 \text{ m}$)

大地电导率 $\sigma_g/(\text{S/m})$	极化方式	上升时间(10%~90%) $\Delta t_r/\text{ns}$	脉冲宽度(50%~50%) $\Delta t_{pw}/\text{ns}$
10^{-2}	垂直	26.7~34.7	185~355
10^{-2}	水平	17.6~19.5	263~282
10^{-3}	垂直	25.0~29.2	198~398
10^{-3}	水平	19.3~26.5	236~267
10^{-4}	垂直	27.0~29.8	309~583
10^{-4}	水平	27.4~29.3	361~458

表 A.4 早期 HEMP 对埋地导体耦合的波形参数平均值

大地电导率 $\sigma_g/(\text{S/m})$	上升时间(10%~90%) $\Delta t_r/\text{ns}$	脉冲宽度(50%~50%) $\Delta t_{pw}/\text{ns}$
10^{-2}	24.6	271
10^{-3}	25.0	275
10^{-4}	28.4	428

给出这些资料后,推荐上升时间选用 25 ns。关于脉宽,它随大地电导率的变化更强烈些,故推荐用 500 ns(而不是 400 ns),以便覆盖低电导率情况算得的较大的脉宽(见表 A.3)。表 1 正是采用了这些值。

A.3 参考文献

[A.1] Ianoz, M., Nicoara, B. and Radasky, W. A., *Modelling of an EMP Conducted Environment*, IEEE/EMC Transactions on EMC, Vol. 38, No. 3, p. 400-413, August 1996

附 录 B

(资料性附录)

关于中期 HEMP 对长线耦合的讨论

表 2 所列的短路电流数据来自一组(共 70 个)HEMP 对架空线($h=10\text{ m}$)和埋地线($h=-1\text{ m}$)的耦合计算结果。研究中考虑了导体的长度(1~100)km、仰角($0^\circ\sim 85^\circ$)及大地的电导率(10^{-2} S/m 、 10^{-3} S/m 、 10^{-4} S/m)的不同取值。计算采用与时间相关的传输线分析程序,并且 HEMP(IEC)入射中期波形取垂直极化情况。

B.1 架空线

表 B.1 列出了长度大于 10 km 情况的峰值短路电流和波形特征参数。

表 B.1 中期 HEMP 对架空线($h=10\text{ m}$)耦合形成的短路电流

大地电导率 $\sigma_g/(\text{S/m})$	峰值电流 I_{PK}/A	上升时间(10%~90%) $\Delta t_r/\mu\text{s}$	有效脉冲宽度 $\Delta t_{\text{pw r. m. s}}/\mu\text{s}$
10^{-2}	138	60~120	700~2 100
10^{-3}	342	25~65	850~2 100
10^{-4}	849	30~65	1 000~2 100

线长较短时,峰值电流降低,但脉冲特性相近。峰值电流推荐值接近表 2 中采用的 150 A、350 A、850 A。脉冲特性与提供的数据相近,即上升时间为 25 μs ;有效脉冲宽度为 2 100 μs (转换为半峰值宽度则为 1 500 μs)。

B.2 埋地线

对于长于 1 km 的埋地线,算得的峰值电流几乎是不变的,仅随大地电导率变化。对短于 1 km 的埋地线,可按长度比例估算其结果。入射仰角从 0° 变化到 85° 对结果影响小于 10%。计算结果列在表 B.2 中。

表 B.2 中期 HEMP 对埋地导体耦合时的短路电流($h=-1\text{ m}$)

大地电导率 $\sigma_g/(\text{S/m})$	峰值电流 I_{PK}/A	上升时间(10%~90%) $\Delta t_r/\mu\text{s}$	有效脉冲宽度 $\Delta t_{\text{pw r. m. s}}/\mu\text{s}$
10^{-2}	46	38~57	1 800~2 000
10^{-3}	147	40~61	1 900~2 100
10^{-4}	431	46~78	1 900~2 100

上述结果可近似为上升时间(10%~90%)40 μs ;有效脉冲宽度 2 100 μs ;峰值分别为 50 A、150 A、450 A。有效脉冲宽度转化为半峰值宽度(假定按双指数衰减)约为 1 455 μs 或 1 500 μs 。由于架空线和埋地线的波形特性相似,所以表 2 只需用一种波形(上升时间为 25 μs ,半峰值宽度为 1 500 μs)。

附录 C
(资料性附录)

简单线性天线对 IEC 早期 HEMP 环境的响应

C.1 引言

用一种方法来表述各种天线的可能响应,对于理解民用设备对高空电磁脉冲(HEMP)的防护要求将是有益的。虽然天线分析是一成熟的学科,确定天线典型响应有许多不同的计算模型可用^{[C.1]2)},但是,天线分析常常都是在其工作频带内进行的,要想获得天线的瞬态响应需要在很宽的频带内进行计算,这些模型不是很有用。

此外,在分析天线对瞬态场的响应时,所得出的结果常以有限数目的不同入射角下的瞬时波形来表述。所以由此想要全面了解天线的性能和典型响应,也是勉为其难的。

改善这种状况的方法之一,便是对不同天线、在 HEMP 不同入射角条件下的天线瞬态响应作出大量计算,然后将计算结果(例如天线的开路电压峰值)以累积概率分布(CPD)的形式表述出来。CPD 所提供的是天线响应超过某一指定值的概率。在本部分中,分析了两种不同天线对 IEC 早期 HEMP 的响应。一种是垂直放置的单极子天线,从地对端馈电。另一种是地面上水平放置的偶极子天线。每种天线可观测的量:开路电压峰值(V_{oc})、短路电流峰值(I_{sc})、天线输入端 $50\ \Omega$ 负载上的电压峰值(V_L)和相应的 $50\ \Omega$ 负载上的电流峰值(I_L)。

C.2 IEC 早期 HEMP 环境

正如 IEC 61000-2-9 中所描述的,HEMP 被表达为一入射平面波,如图 C.1 所示。它以垂直仰角 ψ 和入射方位角 ϕ 照射到地面或近地系统上, ϕ 角从某一个方便的参考方向(这里为 x 轴)算起。

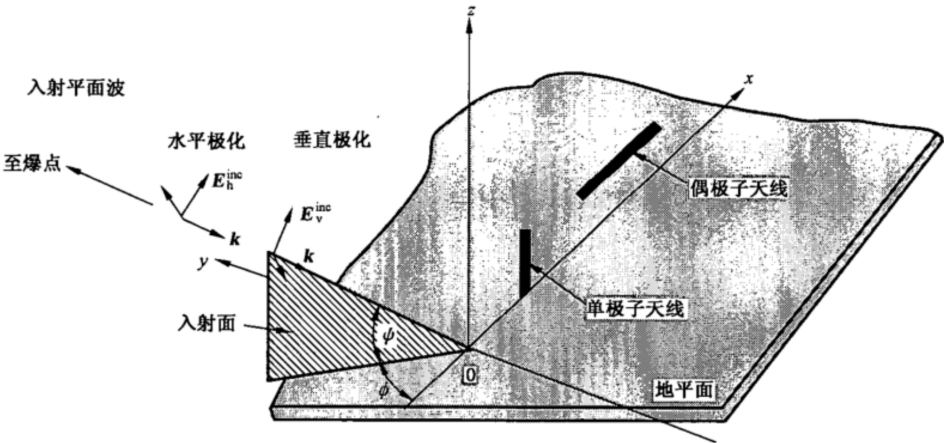


图 C.1 入射 HEMP 场示意图

因为地球是球形,所以地表上只有有限大小的区域能被 HEMP 直接照射到。如图 C.2 所示,照射区域的大小以切点半径 R_t 来表示, R_t 可按下式算得:

2) 方括号中的文献编号是 C.6 所列参考文献号。

$$R_t = R_e \arccos\left(\frac{R_e}{R_e + HOB}\right) \quad \text{..... (C.1)}$$

式中, HOB 为爆高; R_e 为地球半径(6 371.2 km)。

若爆高 $HOB < 500$ km, 上式可近似为:

$$R_t \approx 110\sqrt{HOB} \text{ km} \quad \text{..... (C.2)}$$

本研究假定爆高为 100 km, 这意味着切点半径 $R_t \approx 1\,100$ km。在 HEMP 照射区域以外, HEMP 场值为零。在照射区域内, 入射场的时间特性以双指数波的形式给出:

$$E^{\text{inc}}(t) = 65\,000 \times (e^{-4 \times 10^7 t} - e^{-6 \times 10^8 t}) \text{ (V/m)}, \quad t > 0 \quad \text{..... (C.3)}$$

入射波可以分解为垂直极化分量和水平极化分量, 见图 C.1。

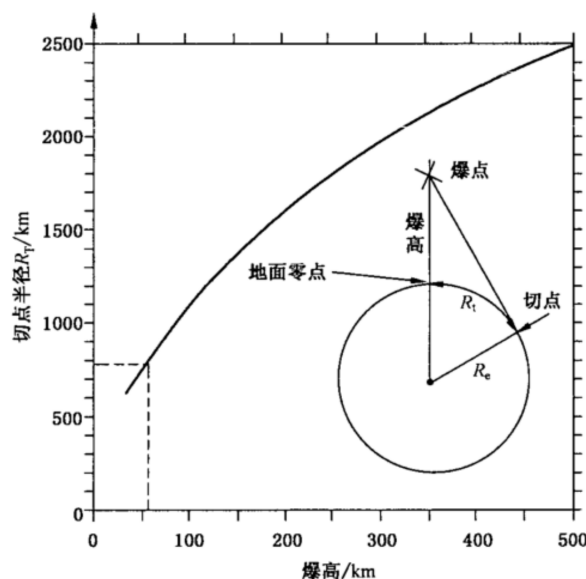


图 C.2 HEMP 切点半径随爆高的变化

如 IEC 61000-2-9 所述, 入射 HEMP 场分解成的垂直分量和水平分量的大小依赖于地磁倾角 θ_{dip} 。参数 θ_{dip} 随爆点和观察者的位置而变, 这里将其作为独立变量处理, 计算了 θ_{dip} 取不同值时的天线响应。入射场的垂直分量和水平分量分别用 E_v^{inc} 和 E_h^{inc} 表示, 并采用术语极化系数 f_v 和 f_h , $E_v^{\text{inc}} = f_v E^{\text{inc}}$, $E_h^{\text{inc}} = f_h E^{\text{inc}}$, 在本研究中用其最大值时的极化系数来近似, $f_v = \cos\theta_{\text{dip}}$, $f_h = \sin\theta_{\text{dip}}$ 。

在图 C.1 中, 单极子天线垂直安置在地面上, 另一偶极子天线水平放置与地面平行。为了计算出天线上感应的电流, 必须求出沿天线的切向激励电场。该场的组成为 HEMP 入射场加上地面反射场。对于垂直放置的单极子天线, 激励场为 E -场的 z -分量。距离地面任意高度 z 处, 激励场由式 (C.4) 给出 [C.2]:

$$E_z = E^{\text{inc}} \cos\theta_{\text{dip}} \cos\psi (1 - R_v e^{-jkz \sin\psi}) \quad \text{..... (C.4)}$$

式中: R_v 为垂直极化场的菲涅耳反射系数, 由式 (C.5) 给出 [C.3]:

$$R_v = \frac{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0}\right) \sin\psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0}\right) - \cos^2\psi\right]^{1/2}}{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0}\right) \sin\psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0}\right) - \cos^2\psi\right]^{1/2}} \quad \text{..... (C.5)}$$

式中: σ_g 为大地电导率; ϵ_r 为大地的相对介电常数; ϵ_0 为自由空间的介电常数。注意, 对于垂直放置的天线, 只有入射 HEMP 的垂直极化分量才对天线响应有贡献。

对于水平放置的天线, 设它平行于 x 轴, 激励场在地面高度 h 处的电场 E_x 分量才对天线的响应有

贡献。激励场的垂直极化分量和水平极化分量,表示如下^[C.2]:

$$E_x = E^{\text{inc}} e^{-jkx \cos \psi \cos \phi} [\cos \theta_{\text{dip}} \sin \psi \cos \phi (1 - R_v e^{-jk2h \sin \psi}) + \sin \theta_{\text{dip}} \sin \phi (1 + R_h e^{-jk2h \sin \psi})] \dots\dots (C.6)$$

式中, R_h 为水平极化分量的菲涅耳反射系数^[C.3],由式(C.7)给出:

$$R_h = \frac{\sin \psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}}{\sin \psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}} \dots\dots\dots (C.7)$$

C.3 天线响应的计算

给定式(C.4)和式(C.6)中的切向激励场以及天线的长度、半径和负载阻抗,天线和负载上的感应电流可以用矩量法求出^[C.4]。矩量法是一种求解频域电流积分方程的数值计算方法。一旦计算出响应的频谱,其瞬态响应就可以通过快速傅里叶变换(FFT)得到。详细算法见参考文献^[C.5]和^[C.6]。

C.3.1 单极子天线的响应

图 C.3 示出本研究所用垂直单极子的几何关系。从式(C.4)中可以看出,激励场与方位角 ϕ 无关,故只有入射仰角 ψ 参与计算。设单极子天线长度为 L ,半径为 a ,通过一个 50Ω 的负载接地。通常用参数 Ω_0 表达天线的长度和半径之比值,定义为

$$\Omega_0 = 2 \ln \left(\frac{2L}{a} \right) \dots\dots\dots (C.8)$$

这里取 $\Omega_0 = 8$,与此对应, $L/a = 27.3$,代表一般的粗天线。计算中取大地电导率 $\sigma_g = 0.01 \text{ S/m}$,相对介电常数 $\epsilon_r = 10$,均为典型值,与文献^[C.3]一致。单极子天线(C.3.2中的偶极子天线也是如此)有四个参数需要计算:开路电压 V_{DC} 、短路电流 I_{sc} 、负载电压 V_L 和负载电流 I_L 。Harrington 在文献^[C.4]中指出,所有这些量通过天线电流积分方程联系起来。因为负载阻抗已有简单的 V - I 关系, $V_L = Z_L I_L$ 。所以感兴趣的只是瞬时响应的峰值,数值计算提取的也就是这些量。

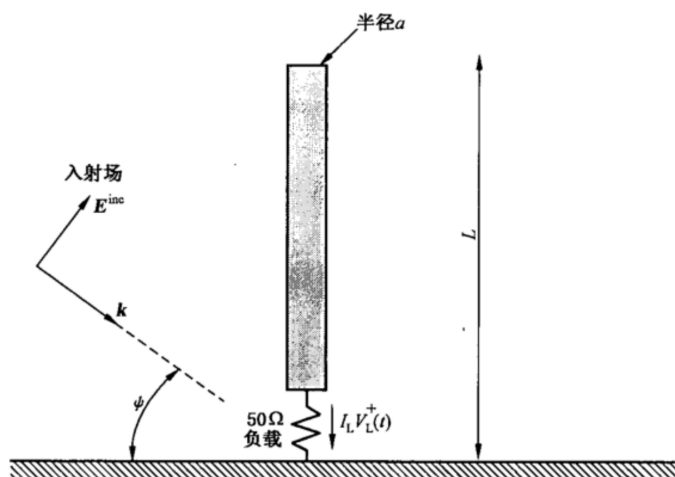


图 C.3 单极子天线的几何关系

由于在 HEMP 照射区域内,观测点是任意选取的,所以要确定以上观测量的累积概率分布,就需完成大量的天线响应计算。一般选取 3 000 个不同的观测点,对每个观测点,积分方程的解就提供了一组可观测的值,从而得出天线响应的分布规律,最终形成累积概率分布。根据累积概率分布,天线特定响应超过指定值的概率即可得出。

C.3.2 偶极子天线的响应

水平偶极子天线的几何关系见图 C.4。对于这种天线,激励与入射角度 ϕ 和 ψ 以及入射场的水平极化分量和垂直极化分量均有关。设偶极子天线总长为 L ,半径为 a ,负载阻抗为 $50\ \Omega$ 。天线长度和半径的比值定义为

$$\Omega_0 = 2 \ln\left(\frac{L}{a}\right)$$

同样选取 $\Omega_0 = 8$,相应的 (L/a) 值为 54.6。

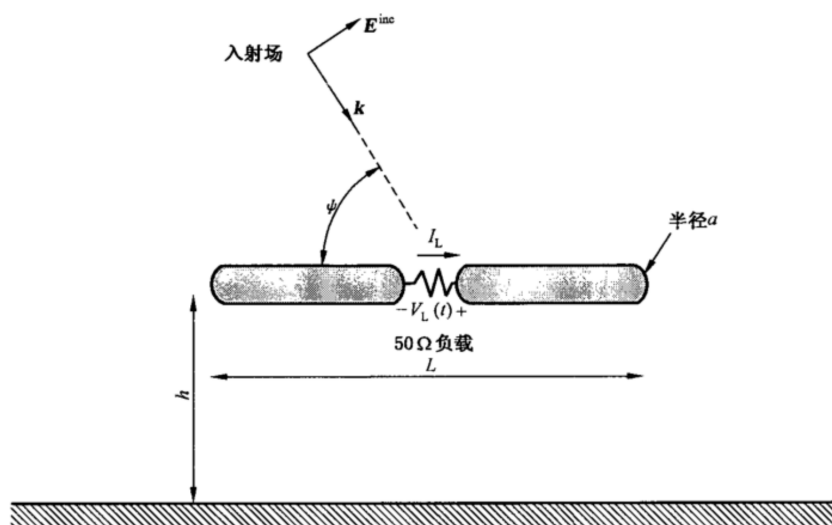


图 C.4 偶极子天线的几何关系

地面的存在使得描述天线的状况还需要增加一个参数,即天线距离地面的高度 h 。根据式(C.6),天线的激励由入射场加上地面反射场产生。一般地,地面反射场起着抵消入射场的作用。但是,这种反射场对激励的抵消作用通常是在入射场响应的峰值出现以后才到达天线。于是,对于 h 超过 $L/2$ 的天线,地面反射场对天线响应的峰值没有影响。所以,完全忽略地面的反射并认为天线放置在自由空间,所提供的最坏情况下的天线响应,是一种好的估计。无疑这是合理的,因为通常为了优化天线在工作频带内的特性,这类天线均远离地面放置。

除了还需要考虑 ϕ 角的影响外,偶极子天线响应的累积概率分布计算过程和单极子天线是相同的,其前提是已假定天线沿 x 轴放置, ϕ 角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内等概率选取。在 HEMP 照射区域共选 3 000 个不同的点放置天线,每一点上入射波的 ϕ 角共取 500 个值,这样,为了得出累积概率分布曲线,需要研究 150 万种天线耦合情况。

C.4 计算结果

运用以上讨论的分析方法和数值计算模型,无论是单极子天线还是偶极子天线,它们对 IEC 早期 HEMP 的四种天线响应累积概率分布都可以计算出来。计算中,单极子天线和偶极子天线都取四种长度: $L=1\text{ m}$ 、 3 m 、 10 m 和 100 m 。这些结果在本节中给出。

垂直放置的单极子天线分别取四种长度时,天线负载电流和电压的累积概率分布如图 C.5~图 C.8 所示。

水平放置的偶极子天线分别取四种长度时,天线负载电流和电压的累积概率分布如图 C. 9~图 C. 12 所示。

C. 5 小结

图 C. 5~图 C. 12 的概率分布曲线,给出了天线受 HEMP 激励时的可能响应的重要细节。但是,通常我们只关心概率为 50%、10% 和 1% 的响应,在本部分中把它们分别称为 50%、90% 和 99%“严重程度”,用来表明实际的天线响应小于指定值的百分比。这些数值可在表 3~表 9 中查到。

以上所有的计算结果都是在取天线参数 $\Omega_0=8$ (相应地,对于单极子天线 $L/a=27.3$,偶极子天线 $L/a=54.6$)时得到的。如果天线的长度和半径之比发生变化,天线的响应也随之改变。图 C. 13 给出了倍增修正系数(相对于 $\Omega_0=8$ 进行了归一化)。利用修正系数、本附录中的数据 and 表 4~表 9,可以得出不同天线的响应。

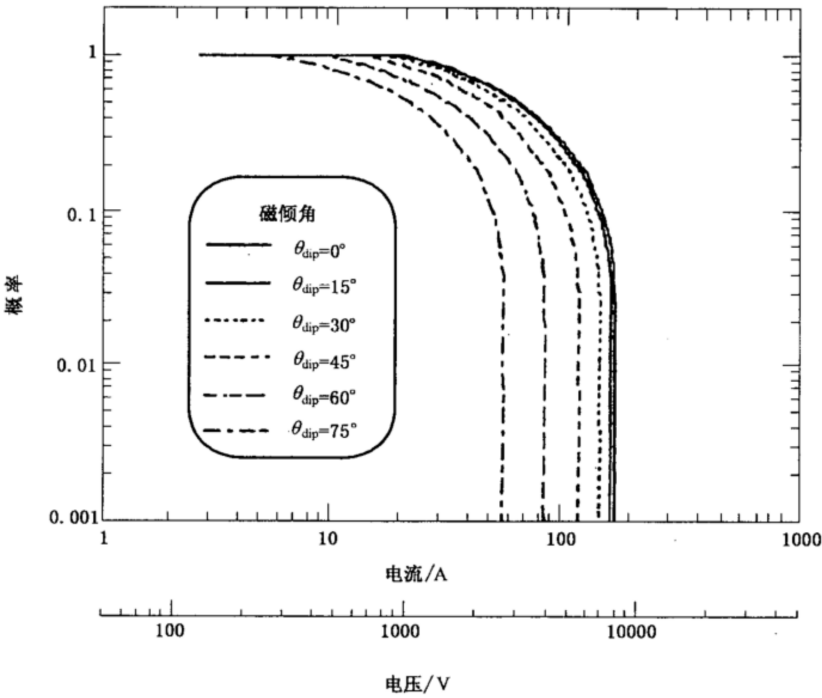


图 C. 5 1 m 长垂直单极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

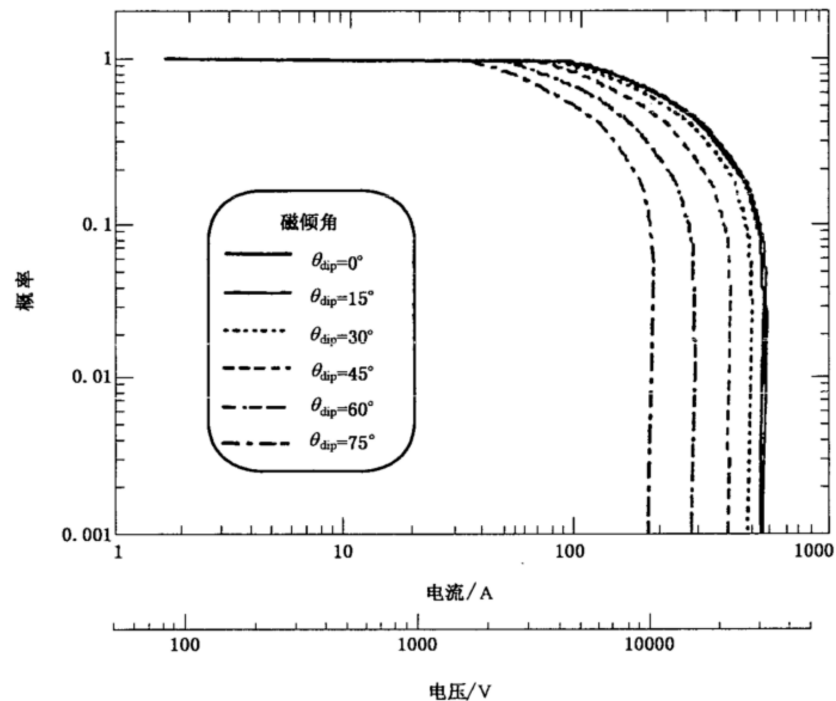


图 C.6 3 m 长垂直单极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

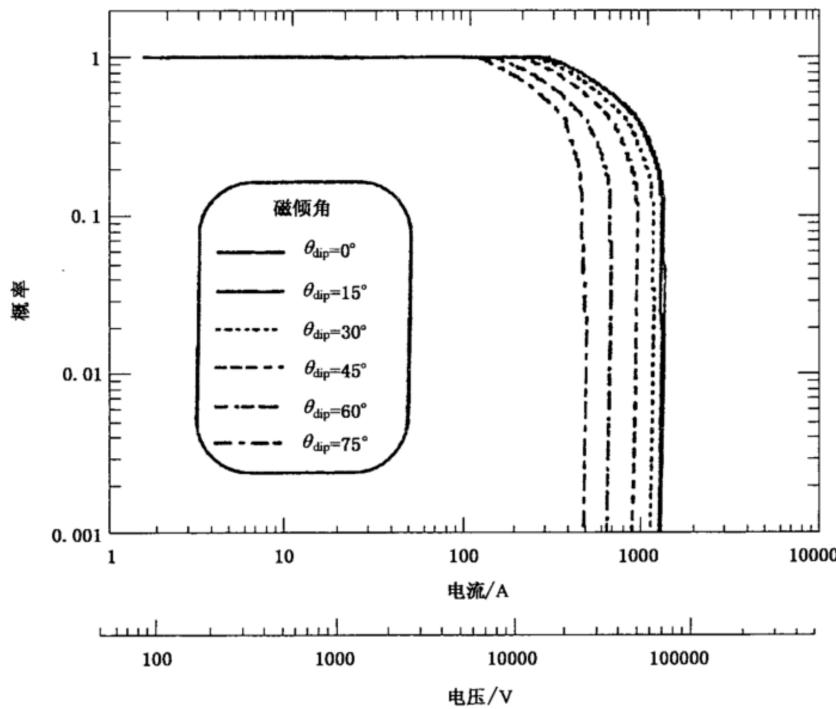


图 C.7 10 m 长垂直单极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

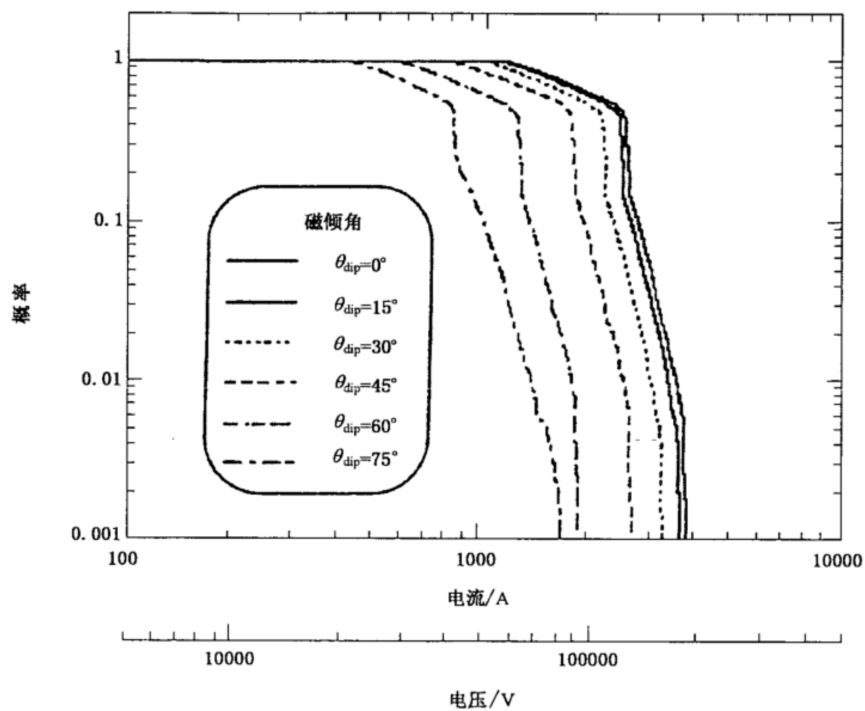


图 C.8 100 m 长垂直单极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

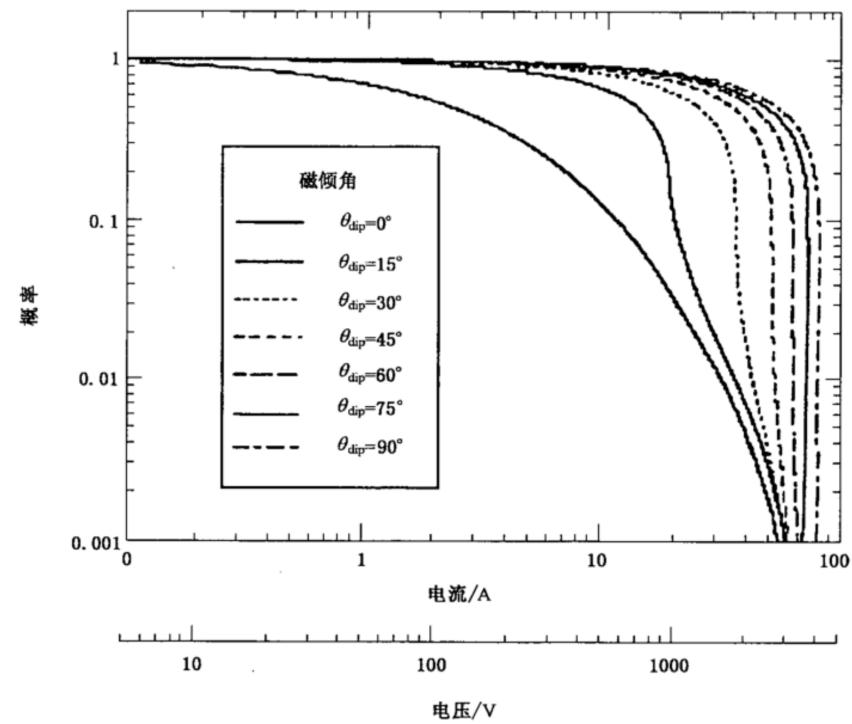


图 C.9 1 m 长水平偶极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

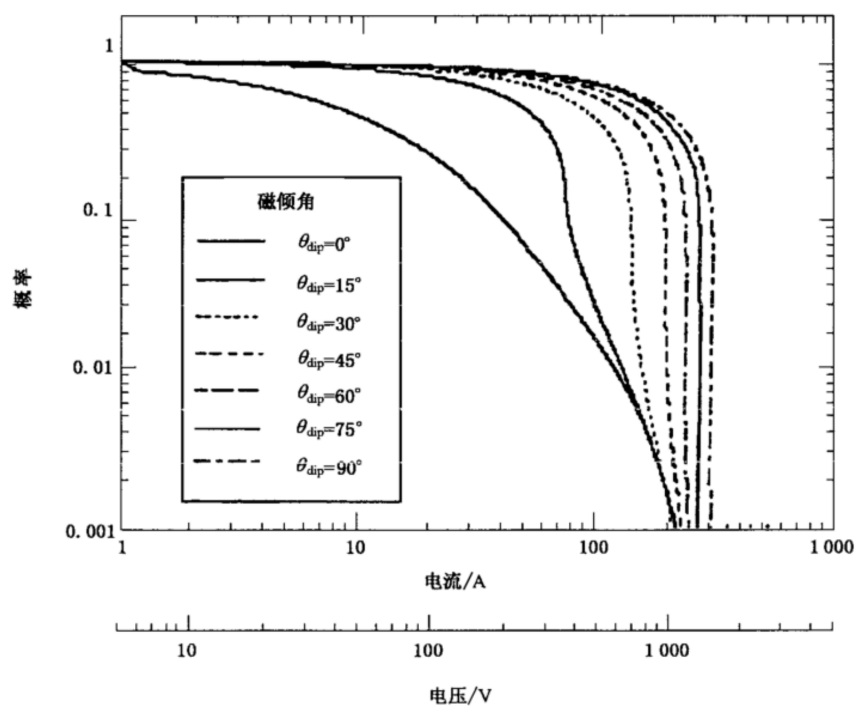


图 C.10 3 m 长水平偶极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

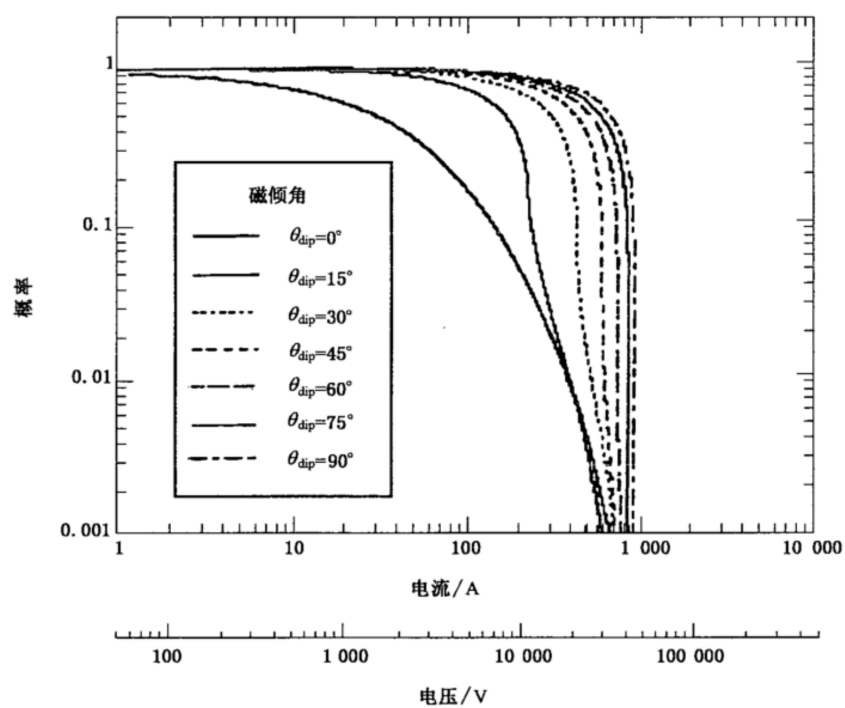


图 C.11 10 m 长水平偶极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

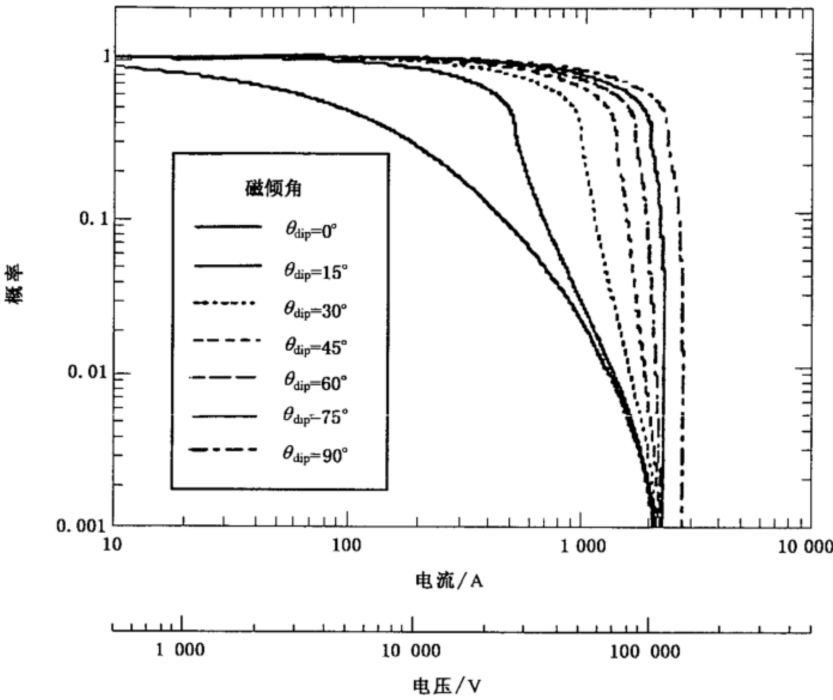


图 C.12 100 m 长水平偶极子天线负载电压峰值和电流峰值的累积概率分布

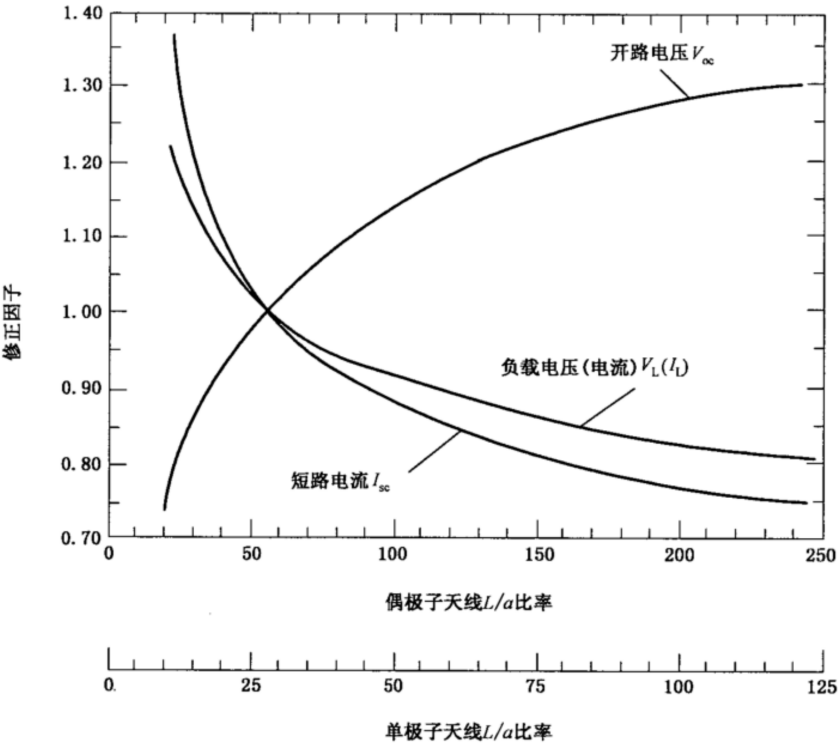


图 C.13 其他 L/a 比率天线 V_∞ 、 I_{sc} 、 I_L 、 V_L 的倍增修正系数随 L/a 的变化

C.6 参考文献

[C. 1] EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data, K. S. H. Lee, editor, Hemisphere Publishing Co. New York, 1989.

[C. 2] Tesche, F. M. "Plane Wave Coupling to Cables" Chapter 4 in Handbook of Electromagnetic Compatibility, R. Perez, editor, Academic Press, 1995.

[C. 3] Vance, E. F. Coupling to Shielded Cables, Krieger Publishing, 1987.

[C. 4] Harrington, R. F. Field Computation by Moment Methods, Reprinted by the author Syracuse University, Syracuse, NY, 1968.

[C. 5] Balanis, C. A. Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley and Sons, New York, 1989.

[C. 6] Tesche, F. M., Ianoz, M., Karisson, T. EMC Analysis Methods and Computational Models. John Wiley & Sons, New York, 2004.

附录 D
(资料性附录)

电话交换间内电缆的感应电流测量值

20 世纪 60 年代末 70 年代初,美国贝尔实验室就电话交换机房内导线对 HEMP 的耦合问题,采用低电平连续波进行了测试,交换机房大小为(22~700)m³。他们公布了对于三种不同结构(混凝土砖、铆接金属、浇筑钢筋混凝土)的电流分布。尽管当时测量所采用的 HEMP 波形与现在 IEC 所采用的有所不同,但二者在(6~50)MHz 频带内的幅频特性差不多相同,因此其结果仍可直接应用于 IEC 标准中。表 D.1 为贝尔实验室测得的电流峰峰值摘要。

表 D.1 HEMP 直接照射下内部电缆电流峰峰值(I_{pp})的估计值

建筑结构类型	严重程度*	I_{pp}/A	严重程度*	I_{pp}/A	严重程度*	I_{pp}/A
混凝土砖	50%	10	95%	20	99%	25
铆接金属		10		20		25
浇筑混凝土		3		5		7
* 电流低于给定值的百分比。						

根据这些测量结果,可总结出内部 EMP 电流波形的特性。采用由式(D.1)表达的阻尼正弦波可较好地描述其波形。式中 I_{pp}见表 D.1,f_c、Q 见表 D.2。

$$I_c(t) = k(I_{pp}/2)e^{-\frac{\pi f_c t}{Q}} \sin(2\pi f_c t) \dots\dots\dots (D.1)$$

归一化常数 k 保证使 I_c的最大值等于 I_{pp}/2。

表 D.2 按测量结果得出的内部电缆电流的阻尼正弦波形参数(式(D.1))

分类	振铃频率 f _c /MHz	阻尼参数 Q	
		平均值	取值范围
最小值	1	20	15~25
平均值	7	60	40~100
最大值	16	150	100~200

D.1 参考文献

[D.1] EMP Engineering and Design Principles, Bell Laboratories, 1975.

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电 磁 兼 容 环 境
高空核电磁脉冲(HEMP)环境描述
传导骚扰

GB/T 18039.8—2012/IEC 61000-2-10:1998

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

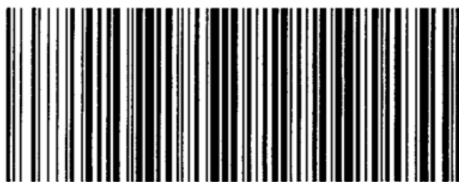
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2 字数 56 千字
2013年2月第一版 2013年2月第一次印刷

*

书号: 155066 • 1-46189 定价 30.00 元



GB/T 18039.8-2012

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107

打印日期: 2013年3月13日 F009A

库七七 www.kqkw.com 提供下载