

文章编号: 1001-4322(2003)08-0781-07

高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析*

谢彦召^{1,2}, 王赞基¹, 王群书², 周 辉², 孙蓓云²

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 目前,国际上已有美军标、国际电工委员会、Bell 实验室及各种学术出版物等各种高空核爆电磁脉冲波形标准。综述了这些标准,并从时域参数、频谱、归一化累积能流谱、总的能量密度等几方面研究其异同性。比较后认为,IEC61000-2-9 和 MIL-STD-461E 表述的新标准要比 1976 年出版物波形和 Bell 实验室波形的频谱范围宽,对电子系统的小孔缝耦合效应稍强,但对多数效应物尤其是线缆引入的传导耦合,损伤程度则相对弱化。最后,分析了由于 HEMP 波形表述形式变化,给 EMP 模拟器和效应研究带来的影响和新动态趋势。

关键词: 高空核爆电磁脉冲; 标准; 累积能流谱; 模拟; HEMP 效应

中图分类号: O441 **文献标识码:** A

高空核爆(爆高高于 30km,文献[1]约定为不低于 100km)电磁脉冲(HEMP)参数是核爆炸主要效应参数之一,其电场时域波形示于图 1,包括 3 个部分^[2]:第一部分(早期)为 E_1 ,是核爆炸瞬发激励的 Compton 电子运动产生的,这个过程大约持续 1 μ s;第二部分(中期)包括 $E_{2,a}$ 和 $E_{2,b}$,在 1~100 μ s 之间,散射激励产生的场占主要成分,记作 $E_{2,a}$ (散射信号),在 1~10ms 之间,电场主要由高能中子和空气分子的非弹性碰撞产生的激励贡献,记为 $E_{2,b}$ (中子信号);第三部分(晚期)在 1s 到数百 s 之间,是各种空间碎片和空气离子在地磁场中运动感应产生的电场,称为磁流体(MHD)电磁脉冲,记作 E_3 。

HEMP 的 E_1 成分,包含覆盖中频(MF)、高频(HF)、甚高频(VHF)和一些超高频(UHF)波段的带内信号,具有辐射范围广、强度大、频谱宽等特点,可以通过天线、孔缝、线缆等的强耦合作用,对各种电子化设备和系统造成暂时和永久损伤,具有强大的破坏效应。

至今,高空核爆电磁脉冲(E_1 部分)的波形表述已有多种不同标准^[3],尤其是近年来国际电工委员会(IEC)和美军标等陆续制定了新的 HEMP 波形表述标准,这些变化值得关注。本文综合 HEMP(E_1 部分)的各种波形表述标准,从时域参数、频谱、归一化累积能流谱和总的能量密度几个方面比较异同性,并探讨由此对实验室模拟和效应研究工作带来的影响。

1 高空核爆电磁脉冲的各种表述形式

目前,较有影响的标准有美国国防部制定的一系列军用标准和手册,Bell 实验室标准和国际电工委员会制定的 HEMP 标准等。

1.1 高空核爆电磁脉冲表达式

美国国家标准 IEEE/ANSI C63.14 中对电磁脉冲的简明定义为^[4]:电磁脉冲是在核爆炸时,由于伽玛光子与空气介质分子的相互作用而产生的电磁辐射。根据高空核爆电磁脉冲的基本理论模型,采用指数上升的理想伽玛源进行简单计算时,虽然不能包括所有可能想到的情况,但却能给出相对合理的电磁场,对于工程应用还是非常有价值的。这些计算结果的精度与对 Compton 电流和空气电导率取值处理时的技术发展水平有关^[5]。一般高空核爆电磁脉冲场强可以总结为简单的双指数解析函数表达形式

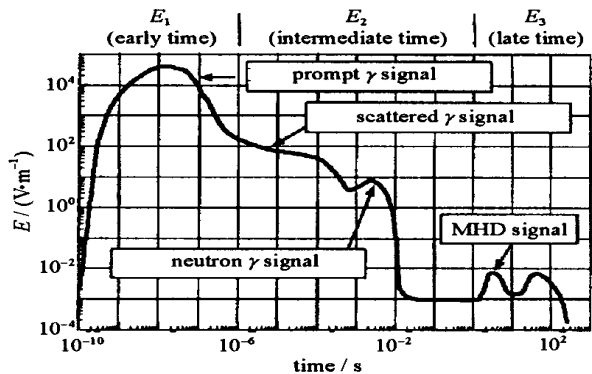


Fig. 1 HEMP environment (E_1, E_2, E_3)

图 1 HEMP 环境 (E_1, E_2 和 E_3)

* 收稿日期:2003-03-01; 修订日期:2003-05-15

作者简介:谢彦召(1973-),男,博士研究生,从事电磁脉冲研究;E-mail:xyz01@mails.tsinghua.edu.cn.

$$E(t) = E_0 k (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t}) \quad (1)$$

式中: E_0 为峰值场强; k 是修正系数; a_1, b_1 为表征脉冲前、后沿的参数。

1.2 美国国防部(DOD)制定的军用标准

美国国防部制定了各种电磁环境及其试验标准,以检验军事电气和电子设备、分系统及系统方面耐受各种电磁损伤的能力,高空核爆电磁脉冲是其中一个重要环节。在研究 HEMP 电磁环境、模拟器、测量技术基础上,针对敏感军事电气电子设备和系统做了大量效应试验摸索,到 20 世纪 80 年代,陆续形成 HEMP 辐射环境、试验方法的军用标准来规范相应的 HEMP 考核试验。

1.2.1 DOD-STD-2169 (high altitude electromagnetic pulse environment)

1985 年国防部 DOD 颁布军标 DOD-STD-2169,至今,标准全文依然没有公开。从引文中知悉 HEMP 的 E_1 成分标准^[6]为 $a_1 = 4.76 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, $b_1 = 3.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $k = 1.285$, $E_0 = 50 \text{ kV/m}$,波形如图 2 所示。

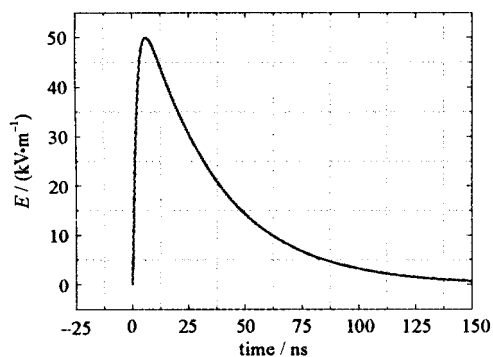


Fig. 2 DOD-STD-2169 waveform

图 2 美军标 DOD-STD-2169 时域波形

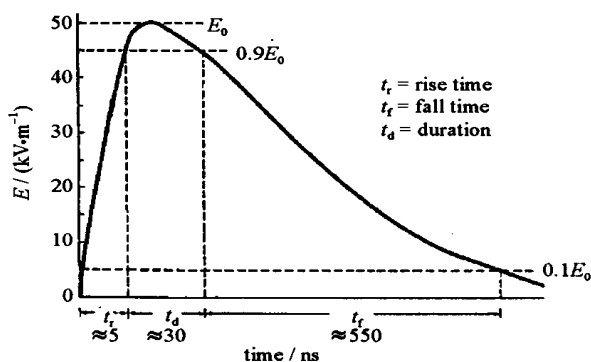


Fig. 3 MIL-STD-461C HEMP waveform

图 3 MIL-STD-461C 定义的 HEMP 波形

1.2.2 MIL-STD-461C (electromagnetic emission and susceptibility requirements for the control of electromagnetic interference)

1986 年,电磁脉冲作为 RS05 部分首次被写入该军标,波形如图 3 所示,并特意写明该条款为有限适用性,主要应用于海军的设备和分系统考核,同时规定考核时除非在允许范围内且分立设备或分系统可以多次恢复的条件下,对试验样品一般不实施会造成永久损伤及偏离规定的试验。

1.2.3 MIL-STD-461D (requirements for the control of electromagnetic interference emissions and susceptibility)

1993 年 461C 修正为 461D,其中电磁脉冲标准 RS105 适用范围变宽,并规定对于一种试验状态,至少要有 5 炮且频率不多于每分钟一次。波形前沿小于等于 10ns,后沿大于 75ns。如图 4 所示。

显然,相对 461C 给出的严格定义的波形,461D 仅规定了脉冲的峰值时间、衰落时间和峰值场强,波形标准限定条件没有以前严格。但标准过于灵活,在模拟器参数确定、考核试验级别等方面标准就不统一,给效应数据的比对带来难度,因为不同标准的 HEMP 考核试验结果是不同的。

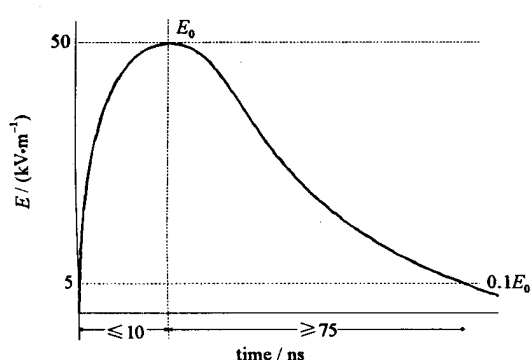


Fig. 4 MIL-STD-461D HEMP waveform

图 4 MIL-STD-461D 定义的 HEMP 波形

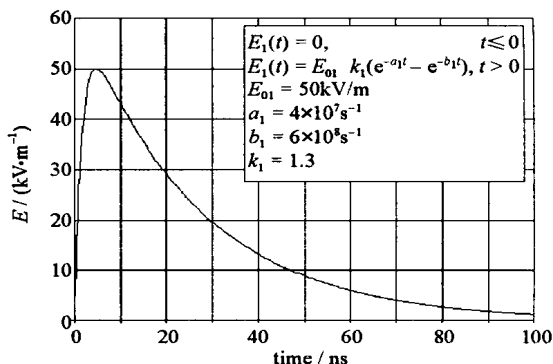


Fig. 5 IEC61000-2-9 HEMP waveform (E_1)

图 5 IEC61000-2-9 及 MIL-STD-461E 定义的 HEMP 波形 (E_1)

比照 MIL-STD-461D 的要求,1993 年也修订了 MIL-STD-462D (measurement of electromagnetic interference characteristics),对有关电磁脉冲(RS105)的试验仪器配置、模拟器、测量手段、效应物放置、试验方法、数据处理等都做了规范。

1.2.4 MIL-STD-461E (requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment)

1999 年再次修正发布了最新的版本 461E。涉及 EMP 的 RS105 的变化,一是将原 MIL-STD-462D 中 RS105 试验方法部分修订后合并放在 MIL-STD-461E 中;其二是采用 IEC 61000-2-9 中定义的 HEMP 早期波形,如图 5 所示。这样,MIL-STD-461E 既包含具体的 HEMP 波形 (E_1 部分)标准,又规定了试验设备及系统配置、程序、数据表述和标定测量。

1.3 国际电工委员会(IEC)制定的国际标准

IEC 国际电工委员会有关标准的技术准备工作由 200 多个技术委员会(TC)和分委员会(SC)的专家实施。高空核爆电磁脉冲的标准(immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse)是由“电磁兼容”(TC77)的一个单独分委员会 SC77C 来完成^[7~9]。HEMP 分委员会有 15 个成员国和 8 个观察会员国,主席是 W. A. Radasky 博士(美国)。从 80 年代初期开始,国际电工委员会开始讨论是否处理核电磁脉冲效应带来的问题,1991 年,成立 SC77C 分委员会。

IEC 61000 是“immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse”所属的 IEC 工程编号,其中 IEC 61000-2-9 (description of HEMP environment-radiated disturbance)内容是早期、中期和晚期 HEMP 波形的许多定义和辐射参数^[10]。这是一项国际性的民用标准,正越来越广泛地被引用^[2]。其波形参数为: $\tau = 6.0 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $\tau_0 = 4.0 \times 10^7 \text{s}^{-1}$, $k = 1.3$, $E_0 = 50 \text{kV/m}$ 。

需要着重指出的是,IEC 的这个标准是 1996 年颁布的,实际上早在 1987 年^[2,5],C.L.Longmire 等人就已经完成并发表了较新的计算结果。

1.4 学术出版物和著名实验室的标准

比较有影响的标准主要有两种,一种由文献[11]给出: $\tau = 2.6 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $\tau_0 = 1.5 \times 10^6 \text{s}^{-1}$, $k = 1.04$, $E_0 = 50 \text{kV/m}$,其波形如图 6 所示;另外一种由美国 Bell 实验室提出,其参数为: $\tau = 4.76 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $\tau_0 = 4 \times 10^6 \text{s}^{-1}$, $k = 1.05$, $E_0 = 50 \text{kV/m}$ (MIL-STD-461C 波形等同这个标准),波形如图 7 所示,这个标准是很著名的,很多文献资料都采用该标准来研究效应问题^[2,12~20]。

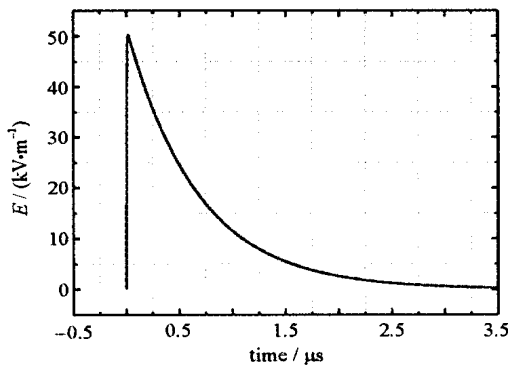


Fig. 6 HEMP waveform in 'EMP radiation and protective techniques', 1976

图 6 1976 年出版物 HEMP 波形

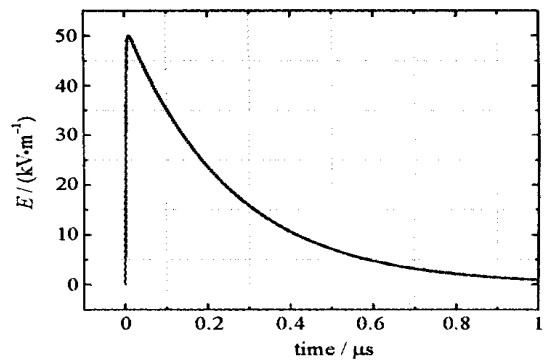


Fig. 7 Bell lab. HEMP waveform

图 7 Bell 实验室 HEMP 波形

文献[21]给出了另外一种标准 ($k = 1.06$, $E_0 = 50 \text{kV/m}$, $\tau = 3.9 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $\tau_0 = 3.7 \times 10^6 \text{s}^{-1}$),用于考核舰船的 EMP 效应。以色列的研究人员在文献[22]中给出的标准类似于 Bell 实验室的波形,其参数为 $k = 1.052$, $E_0 = 50 \text{kV/m}$, $\tau = 4.4 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $\tau_0 = 4.0 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ 。文献[23]中给出一种用于电力系统试验的标准,其参数为 $k = 1.89$, $E_0 = 94.5 \text{kV/m}$, $\tau = 5.0 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $\tau_0 = 5.0 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ 。

2 高空核爆电磁脉冲波形特征参数分析比较

2.1 时域波形参数比较

将上述几种主要标准的波形绘制在图 8 中,可直观地比较波形脉宽、前沿、后沿等时域参数。

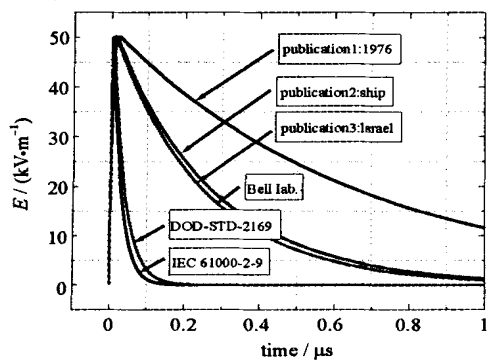


Fig. 8 Several typical HEMP waveforms

图 8 各种典型 HEMP 标准时域波形

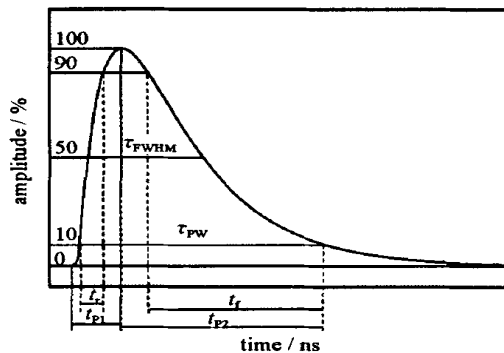


Fig. 9 Time domain waveform parameters

图 9 时域波形参数表述示意图

根据图 9,我们定义脉冲波形的时域参数为:前沿即上升时间 t_r (10% ~ 90%);后沿即下降时间 t_f (90% ~ 10%);脉冲半高宽 τ_{FWHM} (50% ~ 50%);上升峰值时间 t_{p1} (0 ~ 100%);下降峰值时间 t_{p2} (100% ~ 10%);脉宽 τ_{PW} (10% ~ 10%);据此,将各种波形标准的参数列于表 1 中。

表 1 各种 HEMP 表述标准的波形参数对比

Table 1 Comparison of the characteristics of HEMP waveforms in some standards

		/ s ⁻¹	/ s ⁻¹	k	t _r / ns	t _{p1} / ns	t _f / ns	t _{p2} / ns	FWHM/ ns	j/ (J · m ⁻²)	date	remark
organization	LLL	2.6E8	1.5E6	1.037							1973	(*)
publication 1	1976	2.6E8	1.5E6	1.04	7.8		1465		483	2.350	1976	
publication	1976 ⁺	2.6E8	1.5E7	1.248	5.8					0.289	1976	liter. ^[11]
organization	Bell lab.	4.76E8	4.0E6	1.05	4.1	10.1	550		184	0.891	1975	
publication 2	Ship:paper ^[21]	3.9E8	3.7E6	1.06	5	10	600		200	0.979		
publication 3	Israel:paper ^[22]	4.4E8	4.0E6	1.052	4.5		600			0.893		Bell
DOD STD	DOD-STD-2169	4.76E8	3.0E7	1.285	3.1					0.151	1985	
DOD STD	MIL-STD-461C				5		550			0.891	1986	Bell
DOD STD	MIL-STD-461D					10		75			1993	
DOD STD	MIL-STD-461E									0.114	1999	= IEC
IEC STD	IEC61000-2-9	6.0E8	4.0E7	1.30	2.5	4.8	55		23	0.114	1996	

* 注:解析表达式: $E(t) = E_0 k [e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2} - A(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2})]$, 其中 $A = (\tau_1^{-1} - \tau_2^{-1}) / (\tau_1^{-1} - \tau_2^{-1})$, 其中 $\tau_1 = 2.0E5$, $\tau_2 = 5.0E5$

可以看出,各标准峰值场强幅值多为 50kV/m。但时域参数变化很大,可分为 3 种主要类型,即较长(1976 年出版物),中等(Bell),较短(IEC)。基本趋势是前沿变快、持续时间变短。下面再从频谱、归一化累积能流谱和总的能量密度等方面比较脉冲涵盖的频谱范围、频域的能量分布。

2.2 频谱、归一化累积能流谱和焦耳能量密度

对于形如式(1)双指数函数表述形式的 HEMP 波形,其频谱响应由傅立叶变换得到

$$\tilde{E}(f) = \int_0^{\infty} E(t) e^{-j2\pi f t} dt = \frac{E_0 k (\tau_1 - \tau_2)}{(j2\pi f + 1/\tau_1)(j2\pi f + 1/\tau_2)} \quad (2)$$

图 10 绘出了几种典型波形的频谱(幅度谱),IEC61000-2-9 标准和 DOD-STD-2169 标准波形的 3dB 带宽范围最宽;Bell 实验室波形和出版物 2、3 居中;出版物 1 即 1976 年出版物波形 3dB 带宽范围最窄。但是比较频谱幅值,出版物 1 波形频谱成分几乎覆盖了其他所有波形(10MHz 附近,几种波形频谱曲线有交叉,在此频率以上 IEC61000-2-9 标准频谱分量要稍稍大于 1976 年出版物标准,体现在效应上为小孔耦合效应方面稍强),因此一定意义上,出版物 1 波形威胁最严重,Bell 实验室波形次之,而近年新修订的 IEC61000-2-9 (MIL-STD-461E) 波形相对要宽松的多,虽然其 3dB 带宽反而更宽一些。

由帕斯瓦尔定理,定义能谱 $S(f)$ 来描述能流随频率的变化,表达式为

$$S(f) = \frac{2|\tilde{E}(f)|^2}{Z_0}, \quad Z_0 = 120 \quad (3)$$

将上式在频域积分(远场一般 $f > 1\text{kHz}$)可以得到早期 HEMP(E_1) 波形的累积能流

$$W_t = \int_{10^3}^{\infty} S(f) df \quad (4)$$

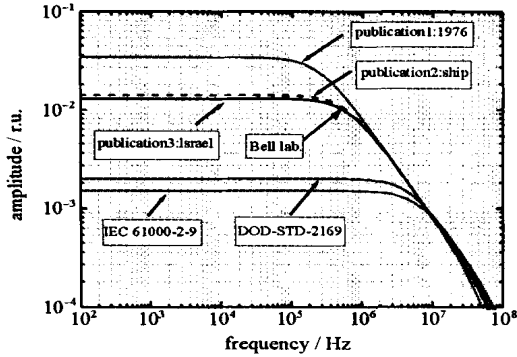


Fig. 10 Amplitude frequency spectrum
图 10 不同标准 HEMP 波形的频谱图

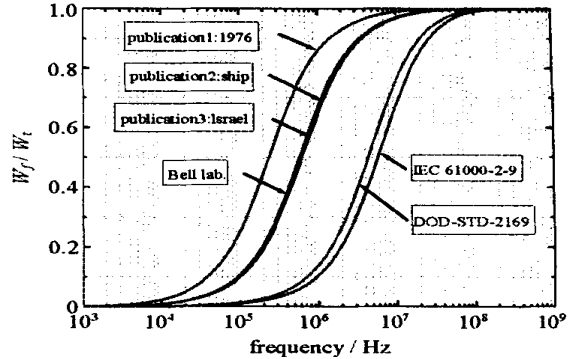


Fig. 11 Cumulative amount of energy fluence vs frequency
图 11 归一化累积能流谱

$$W_f = \int_{10^3}^f S(f) df \tag{5}$$

$$W = \frac{W_f}{W_t} \tag{6}$$

定义 W 为归一化累积能流谱。图 11 中是由上式的计算结果绘出的归一化累积能流成分随频率的变化曲线,图中可以看出各种波形的能流分布的主要频段范围。IEC61000-2-9 频率到 100kHz 时能流成分占到 2%, 而到 100MHz 时,这个比例为 98%,因此,IEC 波形 96% 的能流分布范围在 100k ~ 100MHz。相应,Bell 实验室波形的能流范围主要在 10k ~ 30MHz 之间。出版物 1 即 1976 年出版物波形,其能流分布范围主要在约 1k ~ 10MHz 的频段。

脉冲包含的总的能量密度 j (辐射能量密度, J/m²) 可表示为

$$j = \int_0^+ E^2(t) dt = Z_0 \int_0^+ H^2(t) dt = \int_0^+ S(f) df \tag{7}$$

根据上式从时域或频域可以计算出不同标准波形的总的能量密度大小,数值结果列于表 1 中。出版物 1 波形的能量密度最大,为 2.350J/m²;Bell 实验室波形居中,约 0.891J/m²;IEC 波形最小,仅有 0.114J/m²。

3 对模拟和效应研究工作的影响

早期建设的 HEMP 模拟器(如美国的 ARES, Trestle, HEMPS 模拟器;俄罗斯的 IEMP-6 模拟器;荷兰的 EMIS- 模拟器等)的指标一般是前沿约 8 ~ 10ns,脉冲持续时间 200 ~ 500ns^[24]。

随着对 HEMP 的深入认识和标准逐步修订,目前的研究热点一方面是新的 EMP 环境(FREMP)模拟,研制快前沿电磁脉冲(FREMP)模拟器,指标一般为前沿小于 1ns(典型为 0.3ns)、脉冲持续时间为几十 ns^[25]。另一方面就是高空核电磁脉冲指标修正,改进 HEMP 模拟器前沿指标为 2 ~ 5ns、脉冲持续时间约百 ns^[26]。

HEMP 标准的改变会引起模拟、测量等试验手段的变化,对效应试验的结果也有影响。文献[27]中选取了 3 种 EMP 波形进行效应试验,分别是快(前沿 1.5ns、脉冲半高宽 80ns),中(前沿 5ns、脉冲半高宽 300ns),慢(前沿 10ns、脉冲半高宽 500ns)3 类波形。文献[28]则研究了 1976 年出版物和 IEC 两种 EMP 对电缆耦合效应的异同。结果表明,采用不同的标准,HEMP 效应结果有明显区别。

4 结 语

本文综述了国外涉及 HEMP 辐射环境(E_1 成分)表述的各种标准,比较了这些脉冲波形标准的时域参数、频谱、归一化累积能流谱和总的能量密度等,认为从 1976 年出版物波形到 Bell 实验室波形再到 IEC 和 MIL-STD-461E 波形,标准变化的基本趋势是脉冲前沿变快、脉宽变窄,除去小孔耦合效应可能要稍强之外,对多数效应物尤其是线缆来讲,耦合的严重程度则相应变弱。

标准的变化相应会给 HEMP 的模拟、测量、效应及考核等各个方面带来重要影响。因此,在充分认识和分析这些国际标准的差异和新变化趋势的基础上,结合国内的研究成果,有关行业应尽快确定新的 HEMP 波形表述标准供讨论和研究比对。当然不同的用户也可以根据具体情况做适当调整,如适用范围广泛的通用设备和系统可以选用 IEC61000-2-9 的表述形式,而在关键电子化系统效应等方面的研究则以选用效应影响程度较

高的 Bell 实验室波形标准为宜。

参考文献:

- [1] Lee. K S H. EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data[M]. New York: Hemisphere, 1986.
- [2] Ianoz M, Nicoara B I C, Radasky W A. Modeling of an EMP conducted environment[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1996, **38**(3):400—413.
- [3] 潘虎. 高空核爆电磁脉冲环境的表述[J]. 抗核加固, 1998, **15**(2):73—78. (Pan H. High altitude electromagnetic pulse environment expression. *Nuclear Hardening*, 1998, **15**(2):73—78)
- [4] ANSI C63. 14, 1992. American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD) [S].
- [5] Baum C E. From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics[A]. Proceedings of the IEEE[C]. 1992, **80**(6):789—817.
- [6] Nanevicz J E, Vance E F, Radasky W, et al. EMP susceptibility insights from aircraft exposure to lightning[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1988, **30**(4):463—472.
- [7] Radasky W A, Wik M W. IEC standardization of immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP) [A]. Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. 1997. 40—42.
- [8] Wik M W. International standardization of immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP) [A]. Regional Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. From a Unified Region to a Unified World, 1992. 1-2-4/ 1-2.
- [9] Radasky W A, Wik M W. IEC standardisation of immunity to high power transient phenomena[A]. Proceedings of Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics[C]. Shanghai, China, 2000. 344—346.
- [10] IEC 61000-2-9 Description of HEMP Environment-Radiation Disturbance Basic EMC Publication[S].
- [11] Ricketts L W, Bridges J E, Miletta J. EMP radiation and protective techniques[M]. New York: Wiley, 1976.
- [12] Press J L. EMP response of a generic ground based facility[A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. 1990. 74—79.
- [13] Deb G K. Nuclear electromagnetic pulse penetration analysis in combat vehicle[A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. 2000, **1**:427—430.
- [14] Ron P H. Configurations of intense pulse power systems for generation of intense electromagnetic pulses[A]. Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility[C]. 1999. 471—478.
- [15] Kashyap S, Dion M, Seregelyi J S. Computation and measurement of EMP response of antennas[A]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1989. AP-S. Digest[C]. 1989, **2**:590—593.
- [16] Tesche F M. Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1992, **34**(2):93—99.
- [17] Hsing-Yi Chen, F Young Tam, YeouJou Hwang. NEMP fields inside metallic container with an aperture in one wall[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1995, **37**(1):95—105.
- [18] Ari N, Blumer W. Analytic formulation of the response of a two-wire transmission line excited by a plane wave[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1988, **30**(4):437—448.
- [19] D'Amore M, Feliziani M. Induced fast transients in multiconductor shielded cables[A]. Seventh International Conference on Electromagnetic Compatibility[C]. 1990. 103—108.
- [20] Warne L K, Chen K C. A bound on aperture coupling from realistic EMP[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1994, **36**(2):149—154.
- [21] Hunt G R, Fisher W G. EMP ship trial, planning, execution and result[A]. Seventh International Conference on Electromagnetic Compatibility [C]. 1990. 308—317.
- [22] Weissman J. Composite and exoatmospheric EMP influence on naval vessels[A]. 1992 Regional Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. From a Unified Region to a Unified World, 1992. 5.2. 1/ 1-5.2. 1/8.
- [23] Millard D P, Meliopoulos A P S, Cokkinides G J. Parametric analysis of EMP induced overvoltages on power lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988, **3**(3):1224—1231.
- [24] Giles J C. A survey of Non-U. S. nuclear electromagnetic pulse (EMP) simulators[M]. 1997 LA-UR-97-4964.
- [25] Gilman C, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP- 2000: a fast risetime, 2 MV EMP pulse[A]. Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. 1999, **2**:1437—1440.
- [26] Schilling H, Schluter J, Peters M, et al. High voltage generator with fast risetime for EMP simulation[A]. Digest of Technical Papers, Tenth IEEE International Pulsed Power Conference[C]. 1995, **2**:1359—1364.
- [27] Camp M, Garbe H, Nitsch D. UWB and EMP susceptibility of modern electronics[A]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. 2001, **2**:1015—1020.
- [28] 孙蓓云, 周辉, 谢彦召. 两种高空核电磁脉冲电缆耦合效应的比较[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(6):901—904. (Sun B Y, Zhou H, Xie Y Z. Comparison of the cable coupling effects under two kinds of HEMP environment. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(6):901—904)

High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards : a review

XIE Yan-zhao¹, WANG Zan-ji¹, WANG Qun-shu², ZHOU Hui², SUN Bei-yun²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

Abstract: There are a number of high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP) waveform standards for equipment and systems on susceptibility to the testing effects. These typical HEMP standards include IEC61000-2-9, MIL-STD-461E and some other publication standards such as Bell Laboratory's etc. The time domain parameters, amplitude spectrum, and the cumulative energy fluence of these HEMP waveforms are compared in this paper. The results show that early-time HEMP in IEC61000-2-9 (equals to MIL-STD-461E) is less severe than HEMP in the 'publication 1976' and Bell laboratory standard except for slots coupling as the former have slightly shorter rise time and more wide 3dB bandwidth. In the end, the influence on the HEMP simulation and effects due to the change of HEMP standard are also discussed in this paper.

Key words: High altitude electromagnetic pulse; Standard; Cumulative amount of energy fluence; Simulation; HEMP effects; Amplitude spectrum