

文章编号: 1001-4322(2005)01-0099-05

强电磁脉冲的有效带宽、测量带宽 及来自上升时间的影响*

朱长青, 刘尚合, 魏 明

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所 河北 石家庄 050003)

摘 要: 从能量分布和测量有效性的观点出发, 提出了强电磁脉冲的能量有效带宽和动态范围有效带宽的概念。针对 IEC61000-4-4, MIL-STD-464, IEC61000-4-2, IEC61312-1 等标准规定的核电磁脉冲(NEMP)、雷电电磁脉冲(LEMP)、静电放电电磁脉冲(ESDEMP)等强电磁脉冲, 分别计算了它们的能量有效带宽和动态范围有效带宽。通过分析, 得知在一定的范围内, 上述强电磁脉冲上升时间的变化对两种有效带宽的影响并不明显, 在此基础上, 确定了它们的测量带宽。计算结果为 NEMP, ESD EMP 及 LEMP 的 60 dB 有效带宽分别是 371, 786, 1 233 MHz 与 96 kHz, 99% 能量有效带宽分别是 46, 95, 183 MHz 与 15 kHz; 不失真测量所需的带宽分别是 152, 307, 916 MHz 和 95 kHz。

关键词: 强电磁脉冲; 有效带宽; 上升时间; 测量带宽

中图分类号: O441; TM930 **文献标识码:** A

用 3dB 带宽或上升时间的倒数(有时用半脉冲宽度的倒数)来表示核电磁脉冲(NEMP)、雷电电磁脉冲(LEMP)、静电放电电磁脉冲(ESD EMP)等强电磁脉冲的频带宽度时, 往往不能准确表达这些强电磁脉冲的性质。由于测量系统的研制和强电磁脉冲防护标准的制定等都要以带宽为依据, 对强电磁脉冲带宽的研究至为关键。为此, 我们将针对 IEC61000-4-4, MIL-STD-464, IEC61000-4-2, IEC61312-1 等标准规定的强电磁脉冲, 提出一个能准确表达其特性的有效带宽概念, 并详细讨论上升时间对有效带宽的影响, 在此基础上确定测量上述强电磁脉冲所需的带宽。

1 电磁脉冲的有效带宽

1.1 脉冲信号的带宽与能量

用 3 dB 带宽或上升时间的倒数(有时用半脉冲宽度的倒数)作为强电磁脉冲的频带宽度都不能准确表达强电磁脉冲的特性。以人体模型静电放电为例^[1], 静电电压为 U 时的放电电压脉冲 $u(t) = Ue^{-\frac{t}{RC}} = Ue^{-\alpha t}$, 对应的频谱幅值 $|u(j\omega)| = U/\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}$ 。由此计算出其 3 dB 带宽 $f_{BW} = 1/2\pi\alpha \approx 241.3 \text{ kHz}$ ($C = 330 \text{ pF}$, $R = 2 \text{ k}\Omega$)。在此带宽范围内, 信号所具有的能量 $W = \frac{1}{\pi R} \int_0^\alpha |u(j\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{4}CU^2$, 只占静电放电总能量 $\frac{1}{2}CU^2$ 的 50%。另一方面, 由于该脉冲的上升时间为 0, 其频带宽度不能用无穷大表示。若用半脉冲宽度的倒数表示脉冲的带宽也只有 2.2 MHz。此带宽范围内信号的能量也仅占总能量的 93%。因此, 必须考虑带宽与能量的关系。

1.2 强电磁脉冲信号的测量有效性

测量系统必然存在噪声, 其中有效值为 $E_n = \sqrt{4kTR_{in} \times f_{BW}}$ (单位 V) 的热噪声输入电压是不能克服的 ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 是玻耳兹曼常数, T/K 为热力学温度, R_{in}/Ω 为测量系统的输入阻抗, f_{BW} 是测量系统的带宽), 它限制了有效测量的最小输入值。另一方面, 受电源电压等条件的限制, 测量系统的最大输入值也是受限的。因此, 只有对一定动态范围内的输入信号, 测量才是有效的。

1.3 强脉冲信号的有效带宽

考虑到能量与带宽的关系及测量的有效性, 我们提出有效带宽的概念, 它包括两方面的内容。

* 收稿日期 2004-04-07; 修订日期 2004-08-30

基金项目 国家自然科学基金资助课题(50077024, 50237040)

作者简介 朱长青(1963—), 男, 教授, 从事静电与电磁脉冲的测试技术研究, E-mail: zhucheng@163.com。

1. 电磁脉冲的能量主要集中于该带宽范围内,可以设定一确定值,如 95% 或 99% 等,称为电磁脉冲的能量有效带宽,如 95% 能量有效带宽。

2. 在该频带范围内,脉冲频谱幅值的变化不超过一确定的范围,如 20 dB 或 40 dB 等,称为电磁脉冲的动态范围有效带宽,如 20 dB 动态范围有效带宽,可简称 20 dB 带宽。

2 主要强电磁脉冲的有效带宽及来自上升时间的影响

为了观察上升时间对脉冲频带宽度的影响,我们除计算 IEC 标准或美军标规定的脉冲波形的有效带宽之外,还同时计算当脉冲宽度和幅度保持不变,而上升时间减小后对应脉冲的有效带宽。

2.1 IEC61000-4-4 和 MIL-STD-464 标准电磁脉冲的有效带宽及上升时间的影响

IEC61000-4-4 和 MIL-STD-464 标准规定,电磁脉冲的波形均可用双指数函数 $E(t) = E_0 \times k(e^{-at} - e^{-bt})$ 表示。IEC61000-4-4 标准规定其上升时间为 $5(1 \pm 30\%)$ ns,半脉冲宽度 $t_{0.5-0.5}$ 为 $50(1 \pm 30\%)$ ns。MIL-STD-464 标准规定 $a = 4 \times 10^7$ $b = 6 \times 10^8$,归一化系数 $k = 1.3$ 。经计算,对应的上升时间为 2.47 ns,半脉冲宽度 $t_{0.5-0.5}$ 为 22.98 ns。

对 IEC61000-4-4 标准,用 $a = 1.8 \times 10^7$ $b = 3.04 \times 10^8$ 拟合,取归一化系数 $k = 1.27$,所得脉冲的上升时间为 5.00 ns,半脉冲宽度为 49.95 ns。完全符合 IEC61000-4-4 标准。

为计算上升时间的影响,拟合出与原脉冲同宽度、同幅度,但具有更快上升时间的脉冲,并计算其有效带宽,以比较上升时间对带宽的影响。

对 IEC61000-4-4 标准用 $a = 1.54 \times 10^7$ $b = 9 \times 10^8$ $k = 1.09$ 拟合,所得脉冲的上升时间为 2.05 ns,半脉冲宽度为 50.03 ns;对 MIL-STD-464 标准采用 $a = 3.375 \times 10^7$ $b = 1.8 \times 10^9$ $k = 1.1$ 拟合,所得脉冲的上升时间为 1.02 ns,半脉冲宽度为 23.00 ns。

为方便起见,用上升时间/脉冲宽度来表示一个脉冲,经数值计算得到 IEC61000-4-4 和 MIL-STD-464 标准电磁脉冲的波形、频谱、能量分布及其上升时间的影响,分别如图 1 和图 2 所示。其中 (a) 图是标准脉冲和拟合的具有更快上升时间的脉冲波形 (b) 图是对电磁脉冲进行 FFT 计算得到的按幅值动态范围 g_A 表示的幅度频谱图 (c) 图是由对频谱进行积分得到的带内含能比例 η_w 表示的能量频谱图。

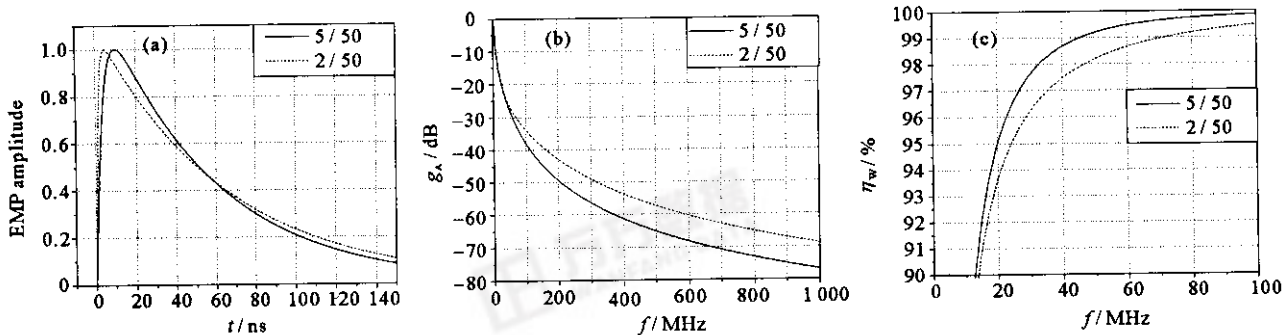


Fig. 1 Waveform (a), frequency spectrum (b) and energy distribution (c) of EMP specified in IEC61000-4-4 as well as the effect from rising time

图 1 IEC61000-4-4 标准电磁脉冲的波形 (a)、频谱 (b)、能量分布 (c) 及其上升时间的影响

2.2 雷电电磁脉冲的有效带宽及上升时间的影响

根据 IEC61312-1 标准,归一化首次雷击电流脉冲 $i = \{h(t/\tau_1)^{10} [1 + (t/\tau_1)^{10}]\} e^{-t/\tau_2}$, 其中 h 为归一化系数,按标准取 1.07, τ_1 、 τ_2 分别为波头和波尾的时间常数,分别取 19.0 和 485 μ s。经计算其上升时间是 7.99 μ s,脉冲宽度(按标准,由上升沿幅度的 10% 至下降沿幅度的 50% 所确定的时间间隔)为 355.58 μ s,通常近似用 8 μ s/350 μ s 来表示。减小上升沿所构成的脉冲参数为 $h = 1.03$ $\tau_1 = 7.5$ μ s $\tau_2 = 500$ μ s,得到的脉冲宽度是 355.46 μ s,基本保持不变,而上升时间是 3.23 μ s,是标准的 1/2.47,我们用 3 μ s/350 μ s 表示。图 3 是两者的波形图、计算所得的动态范围频谱图和能量分布图。

2.3 静电电磁脉冲的有效带宽及上升时间的影响

IEC61000-4-2 标准规定了静电放电电流脉冲的波形,但只给出了上升时间、最大值及 30 ns 和 60 ns 时的幅度,没有相应的函数表达式。有许多文献试图给出它的解析表达式,其中利用文献 [3] 和 [5] 给出的表达

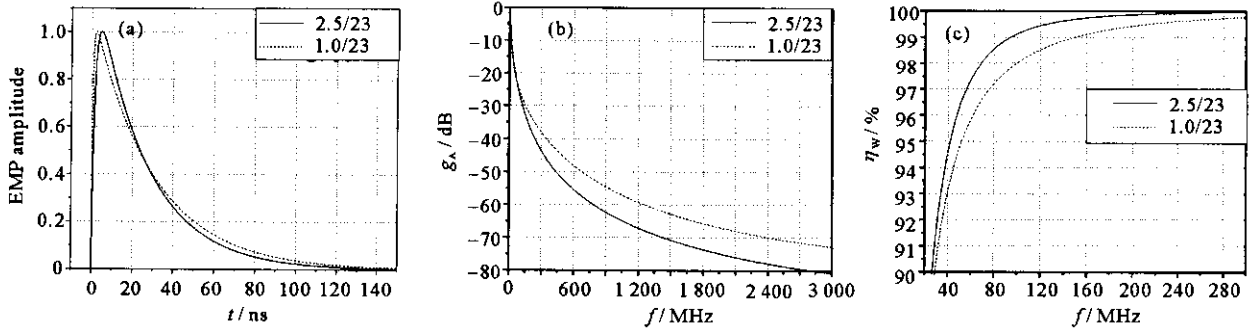


Fig.2 Waveform (a) , frequency spectrum (b) and energy distribution (c) of EMP specified in MIL - STD - 464 as well as the effect from rising time

图 2 MIL - STD - 464 标准电磁脉冲的波形 (a) 、频谱 (b) 、能量分布 (c) 及其上升时间的影响

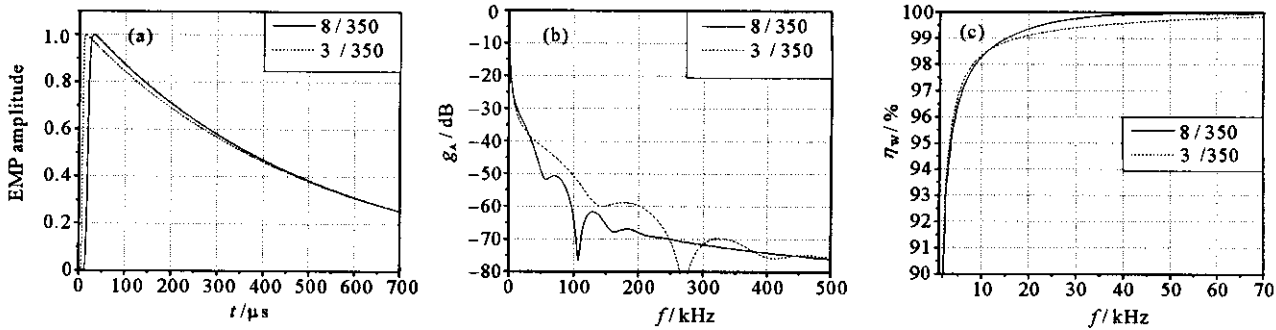


Fig.3 Waveform (a) , frequency spectrum (b) and energy distribution (c) of EMP specified in IEC61312 - 1 as well as the effect from rising time

图 3 IEC61312 - 1 标准雷电电磁脉冲的波形 (a) 、频谱 (b) 、能量分布 (c) 及其上升时间的影响

式来拟合时 相对误差较小 ,但与实际情况有较大差异。作者曾在文献 [1] 中提出过一种利用精确计算来表示脉冲的方法 ,可以完全拟合 IEC61000 - 4 - 2 标准规定的波形。这里仍然采用该方法进行计算。图 4 (a) 是标准拟合波形与对应的快上升沿波形 ,通过 FFT 计算 ,得到图 4 (b) 用幅值动态范围 g_A 表示的幅频特性 ;图 4 (c) 是其能量分布的频谱特性。

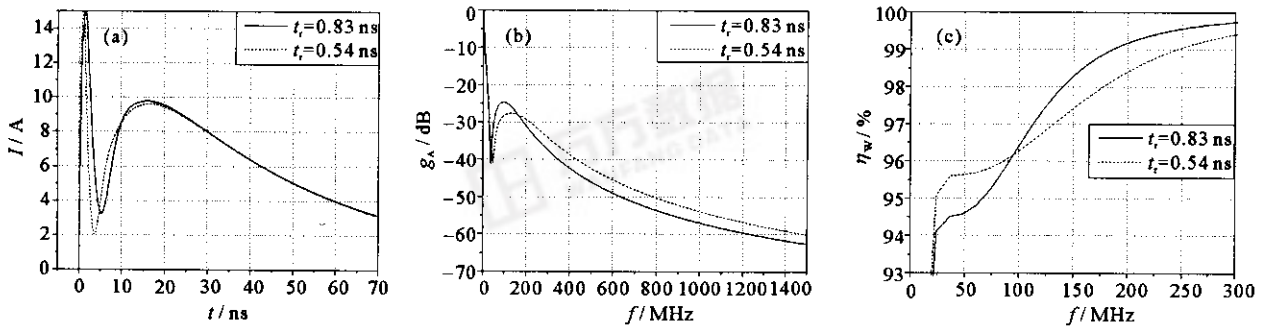


Fig.4 Waveform (a) , frequency spectrum (b) and energy distribution (c) of ESD EMP specified in IEC61000 - 4 - 2 as well as the effect from rising time

图 4 IEC61000 - 4 - 2 标准静电放电电磁脉冲的波形 (a) 、频谱 (b) 、能量分布 (c) 及其上升时间的影响

2.4 讨论与分析

根据上面的计算 ,表 1 列出了 IEC 和 MIL - STD - 464 标准规定的四种强电磁脉冲及快上升沿脉冲的 30 dB 和 60 dB 动态范围有效带宽以及 99% 能量有效带宽。其中 ,上升时间对有效带宽影响最小的是雷电电磁脉冲 ,当上升时间减小到原来值的 1/2.47 情况下 ,30 dB 带宽扩展不到 10% ,而 99% 能量有效带宽提高也不超过 25%。影响最大的是静电放电电磁脉冲 ,当脉冲的上升时间由 0.83 ns 减小至 0.54 ns ,变化幅度是 1.5 倍 ,30 dB 带宽扩展幅度是 20% ,而 99% 能量有效带宽展宽 33% ,但与上升时间的变化相比 ,仍不显著。

从上述结果可以看出 ,电磁脉冲的宽度越小 ,上升时间对其有效带宽的影响越大 ,但对于 4 种主要的强电磁脉冲 ,上升时间在较大范围内变化时 ,引起的有效带宽变化并不明显。

表 1 IEC 和美军标规定的电磁脉冲及快上升沿拟合脉冲的有效带宽

Table 2 Effective bandwidths of EMP specified in IEC and MIL standard as well as EMP fitted with faster rising time

	rising time /ns	semi-pulse width/ns	30dB effective bandwidth	60dB effective bandwidth	99% energy effective bandwidth
IEC61000-4-4	5.00	49.95	58.6 MHz	371.1 MHz	46.4 MHz
	2.05	50.03	68.4 MHz	585.9 MHz	70.8 MHz
MIL-STD-464	2.47	22.98	122.1 MHz	786.1 MHz	95.2 MHz
	1.02	23.00	148.9 MHz	1 257.3 MHz	148.9 MHz
IEC61312-1	7 990	355 580	10.6 kHz	96.4 kHz	14.6 kHz
	3 230	355 460	11.5 kHz	139.2 kHz	18.3 kHz
IEC61000-4-2	0.83	30.0	183 MHz	1 233 MHz	183 MHz
	0.54	30.0	220 MHz	1 478 MHz	244 MHz

3 强电磁脉冲所需的测量带宽

根据上面的讨论,电磁脉冲的上升沿是脉冲高频成份的主要来源。用具有有效带宽的测量系统来测试电磁脉冲时,造成的误差主要是使脉冲的上升时间展宽,引入附加的上升时间 $t_a = 0.35/f_{BW}^{[2]}$,它导致测量所得电磁脉冲的上升时间是 $t_m = \sqrt{t_a^2 + t_r^2}$ (t_r 是脉冲真实上升时间)。

根据前面的讨论,由于上升时间对有效带宽的影响并不明显,尤其当测量上升时间不超过原脉冲上升时间的 10% 时,可以认为,测量系统是无失真传输的,据此推导出测量系统的带宽为 $f_{BWm} = 0.35/(t_r \times \sqrt{0.21}) \approx 0.76/t_r$ 。据此可求得各型强电磁脉冲要求的测量带宽,并列于表 2。

表 2 各型强电磁脉冲所需的测量带宽及其可测动态范围和能量比

Table 2 Measurement bandwidths required by high-EMP and corresponding measurable dynamic range, energy ratio

	rising time t_r	required measurement bandwidths	measurable dynamic range/dB	energy ratio/%	
NEMP	IEC61000-4-4	5.00 ns	152 MHz	45.0	99.60
	MIL-STD-464	2.47 ns	307 MHz	37.5	99.90
ESD	IEC61000-4-2	0.83 ns	916 MHz	55.0	99.99
LEMP	IEC61312-1	8.00 μ s	95 kHz	58.0	100.00

4 结 论

针对 IEC61000-4-4, MIL-STD-464, IEC61000-4-2, IEC61312-1 等标准规定的 HEMP, LEMP, ESD EMP 等强电磁脉冲,从能量分布和测量有效性的观点出发,用动态范围有效带宽和能量有效带宽更能确切地表述其性质。上升时间在较大范围内改变时,上述强电磁脉冲的有效带宽并没有明显的改变,因此测量结果出现微小的附加上升时间不影响测量的准确性。按 IEC61000-4-4, MIL-STD-464, IEC61000-4-2, IEC61312-1 标准规定的 NEMP, ESD EMP 及 LEMP 的 60dB 有效带宽分别是 371, 786, 1 233 MHz 和 96 kHz; 99% 能量有效带宽分别是 46, 95, 183 MHz 和 15 kHz; 不失真测量所需的带宽分别是 152, 307, 916 MHz 和 95 kHz。

参考文献:

- [1] 朱长青, 刘尚合, 魏明, 等. 静电放电电流的频谱分析与计算[J]. 高压技术, 2003, 29(8): 23—25. (Zhu C Q, Liu S H, Wei M, et al. An analysis and calculation on spectrum of ESD current. *High Voltage Engineering*, 2003, 29(8): 23—25)
- [2] Shimanouchi Masashi. New paradigm for signal paths in ATE pin electronics are needed for serial-com device testing[A]. Proceedings IEEE International Test Conference 2002[C]. Baltimore, MD, USA: ITC2002, 903—912.
- [3] Wang K, Pommerenke David, Chundru Ramachandran, et al. Numerical modeling of electrostatic discharge generators[J]. *IEEE Trans on EMC*, 2003, 45(2): 258—271.
- [4] Zhang F Z, Liu S H. A new function to represent the lightning return stroke currents[J]. *IEEE Trans on Electromag Compat*, 2002, 44(4): 595—597.
- [5] 盛松林. 静电放电电磁场时空分布理论模型及测试技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2003. (Sheng S L. A research on time-space distributed theoretical model of electromagnetic field by ESD and test technology. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2003)
- [6] Pommerenke D. ESD: transient fields, simulation and rise time limit[J]. *J Electrostatics*, 1998, 44: 191—203.
- [7] IEC61000-4-4. Electromagnetic compatibility (EMC) part 4: Testing and measurement techniques-section 4: Electrical fast transient/burst immunity test[S]. 1995.

- [8] MIL - STD - 464. Electromagnetic environment effects requirements for systems [S]. 1997.
- [9] IEC61312 - 1. Protection against lightning electromagnetic impulse-part 1 : General principles [S]. 1995.
- [10] IEC61000 - 4 - 2. Electromagnetic compatibility (EMC) part 4 : Testing and measurement techniques - section 2 : electrostatic discharge immunity tests [S]. 2001.
- [11] Florian Krug , Peter Russer. The time-domain electromagnetic interference measurement system [J]. *IEEE Trans on Electromag Compat* , 2003 **45** (2) 330—338.

High-EMP effective bandwidth , measurement bandwidth and effect from rising time

ZHU Chang-qing , LIU Shang-he , WEI Ming

(*Electrostatic & Electromagnetic Protection Research Institute , Ordnance Engineering College , Shijiazhuang 050003 , China*)

Abstract : The bandwidths of high-electromagnetic pulses generated by high altitude nuclear explosion , lightning and ESD have been investigated. In terms of the energy spectrums of the high-EMP and from the viewpoint of measurement validity , we have put forward two new concepts , energy effective bandwidth and dynamic range effective bandwidth , to represent the bandwidth of the high-EMP. Both of the effective bandwidths of the high-EMP specified in IEC61000 - 4 - 4 , MIL - STD - 464 , IEC61312 - 1 and IEC61000 - 4 - 2 , have been calculated , 60 dB effective bandwidths are separately 371 MHz , 786 MHz , 1 233 MHz , 96 kHz and 99% energy effective bandwidths 46 MHz , 95 MHz , 183 MHz and 15 kHz. In addition , it has been known that the rising time of above high-EMP has a little impact on the two kinds of effective bandwidth , and it is neglectable within a certain range. At last , the measurement bandwidths of above high-EMP are given , which are separately 152 MHz , 307 MHz , 916 MHz and 95 kHz.

Key words : High-EMP ; Effective bandwidth ; Rising time ; Measurement bandwidth

万方数据
WANFANG DATA