

文章编号: 2095-4980(2023)10-1239-05

SGEMP 等效脉冲电流注入波形研究

李进玺, 吴 伟, 程引会, 王一雄, 赵 墨, 郭景海

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 采用电磁范数对系统电磁脉冲(SGEMP)脉冲电流注入(PCI)波形参数的确定方法进行研究。负载分别为高阻和低阻时, 对 SGEMP 敏感端口响应典型波形进行电磁范数参数化表征, 综合考虑等效波形的上升时间、峰值、携带的能量和电荷量与响应波形的差异情况, 开展了 PCI 等效波形参数研究。仿真结果表明, 方波等效波形可以很好地模拟出响应波形, 等效波形与响应波形的峰值一致, 频谱特征近似; 等效波形的上升时间、携带的能量和电荷量等参数通过调整脉宽即可实现与响应波形一致。因此, 可采用电磁范数对 SGEMP 响应波形进行参数化表征等效, 获得的等效波形容易在实验室生成, 从而为采用电流注入方法开展 SGEMP 研究提供一种新的途径。

关键词: 系统电磁脉冲; 电流注入; 电磁范数; 波形等效

中图分类号: O482.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021265

Study on the equivalent pulse current injection waveform of SGEMP

LI Jinxi, WU Wei, CHENG Yinhui, WANG Yixiong, ZHAO Mo, GUO Jinghai

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: The determination method of Pulse Current Injection(PCI) waveform parameters of System Generated Electromagnetic Pulse(SGEMP) is studied by using electromagnetic norm. When the load is high and low resistance respectively, the typical response waveform of SGEMP is double exponential waveform and Gaussian waveform. Considering the difference between the rise time, the peak value, the energy and the charge carried by the equivalent waveform and the response waveform, the equivalent waveform parameters of pulse current injection are studied. The results show that the square wave equivalent waveform can simulate the response waveform according to the characteristics of the response waveform and electronic system. Therefore, it is possible to use electromagnetic norm to parameterize the equivalence of SGEMP response waveform, and the equivalent waveform can be easily generated in laboratory, which provides a new way for the study of SGEMP by the current injection method.

Keywords: System Generated Electromagnetic Pulse; current injection; electromagnetic norm; waveform equivalence

现代电子设备受电磁脉冲威胁严重, 电磁脉冲因其高峰值、大能量、上升时间短等特点, 会对电子装备中的核心器件造成不可逆的损伤; 系统电磁脉冲(SGEMP)是脉冲 X 射线引起的电子系统效应之一, 与电子系统相连接的线缆瞬态辐照响应是 SGEMP 效应主要研究内容, 线缆受到 X 射线辐照后产生的 SGEMP 对以半导体器件为核心的各种电子装备构成了严重的威胁^[1]。

波形等效主要是寻求一种实验室容易获得或者理论上能够生成的波形, 利用其与目标响应波形特征参数数值相接近的特点, 模拟系统在原环境中的响应。现阶段国内关于波形等效的研究大多集中于高空电磁脉冲^[2-4], 利用范数对脉冲波形的幅值、上升时间和脉宽等参数定性地对复杂波形进行等效简化, 此种方式并未对波形等效性做更深入准确的研究。

由于大面积、高注量的 X 射线环境难以获取, 无法直接利用 X 射线源对电子系统开展 SGEMP 效应研究^[5-6], 因此, 需要寻求一种有效的替代研究途径。本文采用了电磁范数对典型线缆的 SGEMP 响应波形进行了参数化表

收稿日期: 2021-06-23; 修回日期: 2021-08-06

征, 将 SGEMP 研究中敏感端口的响应以不同参数的方波进行等效, 用这种能够在实验室容易获得的波形来替代 X 射线线缆 SGEMP 响应, 以此作为采用电流注入方法开展 SGEMP 研究的依据。

1 范数的概念及电磁脉冲参数

范数作为向量或矩阵的一种数字特征, 可以用来定量描述复杂波形的特征值, 对于时域脉冲波形 $f(t)$, 通常所用的 p 范数可以表示为:

$$\|f(t)\|_p = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^p dt \right)^{1/p}, \quad 1 \leq p < \infty \quad (1)$$

无穷范数的定义为 $\|f(t)\|_\infty = \max |f(t)|$ 。

范数用在电磁脉冲效应研究领域, 不同的特征值代表着不同的含义。常用的电磁脉冲波形参数主要包括前沿、脉宽、峰值、最大变化率、携带的总电荷和能量, 后面 4 种参数对应的范数分别为 ∞ 范数、一阶微分的 ∞ 范数、1 范数和 2 范数。

2 波形等效方法

一般情况下, 电子系统中的电路和器件对于干扰脉冲的峰值最为敏感, 同时, 电路和器件的类型和功能不一样时, 其对于干扰脉冲的上升沿、携带的能量和电荷量也表现出不同程度的敏感性; 因此, 波形等效中, 主要考虑等效脉冲的峰值和上升时间与目标脉冲源相同、等效脉冲峰值和包含的能量与目标脉冲源相同、等效脉冲峰值和携带的电荷量与目标脉冲源相同这 3 种情况, 依据上述 3 种情况, 以典型端口高阻和低阻 2 种状态下的 SGEMP 响应波形为源波形^[6-11], 参照范数的定义提取波形的特征参数, 开展注入等效波形参数研究。

2.1 高阻状态线缆响应波形等效

线缆两端负载 $R=100 \text{ k}\Omega$, 受 X 射线辐照时, 负载响应电流的典型波形^[6]如图 1 所示, 波形类似于双指数脉冲, 图 2 为其对应的频谱波形。

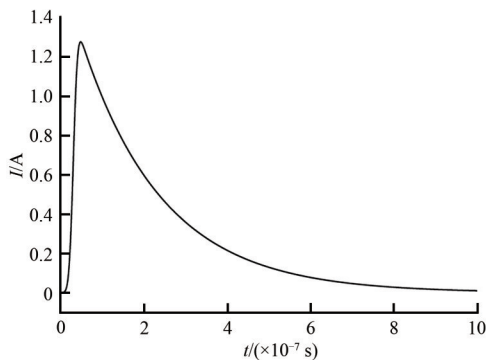


Fig.1 Current waveform of the wire at $R=100 \text{ k}\Omega$
图 1 $R=100 \text{ k}\Omega$ 时线缆两端的电流波形

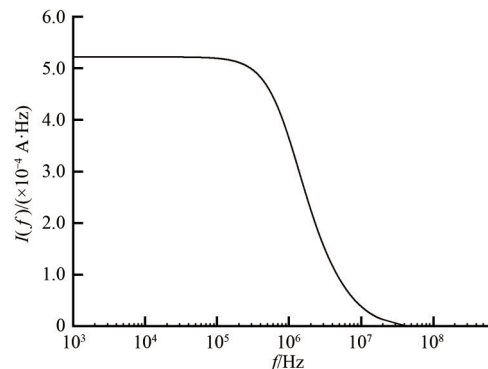


Fig.2 Current spectrum waveform of the wire at $R=100 \text{ k}\Omega$
图 2 $R=100 \text{ k}\Omega$ 时线缆两端的电流频谱波形

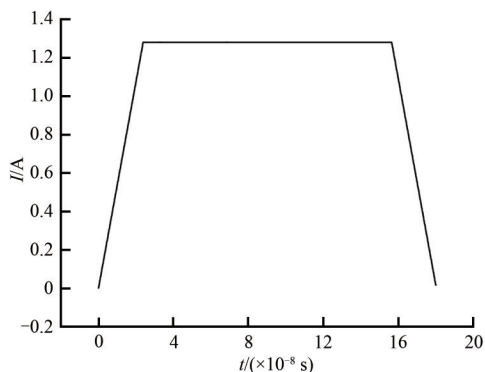


Fig.3 Equivalent square waveform
图 3 等效方波

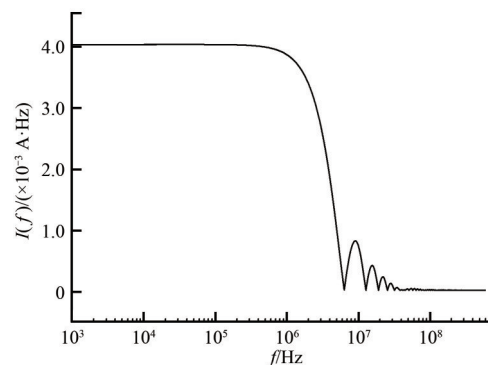


Fig.4 Spectrum of equivalent square wave
图 4 等效方波频谱

当等效波形与目标波形的峰值、上升时间相近时，等效方波及其频谱如图 3、图 4 所示，比较图 2 和图 4 可以看出，两脉冲的频率主要集中在 10 MHz 以下，等效方波与源波形频谱分量相似程度很高。

当等效波形与目标波形的峰值、能量作用方根相近时，图 5 给出了等效波形与目标波形的比较，表 1 给出了等效波形与目标波形特征参数的比较。

表 1 源波形与等效波形特征参数的比较

Table1 Comparison of characteristic parameters of source waveform and equivalent waveform

	peak/A	t_r /ns	t_{FWHM} /ns	maximum change rate/(A·s ⁻¹)	charge/(A·s)	energy(A ² ·s)
source	1.275	19.066	157.261	6.728×10^7	2.762×10^{-7}	4.332×10^{-4}
square	1.275	19.065	139.290	5.351×10^7	1.776×10^{-7}	4.621×10^{-4}

当等效波形与目标波形的峰值、整流总脉冲相近时，图 6 给出了等效波形与目标波形的比较，表 2 给出了等效波形与目标波形特征参数的比较。

表 2 源波形与等效波形特征参数的比较

Table2 Comparison of characteristic parameters of source waveform and equivalent waveform

	peak/A	t_r /ns	t_{FWHM} /ns	maximum change rate/(A·s ⁻¹)	charge/(A·s)	energy(A ² ·s)
source	1.275	19.066	157.261	6.728×10^7	2.762×10^{-7}	4.332×10^{-4}
square	1.275	19.065	228.551	5.351×10^7	2.914×10^{-7}	5.989×10^{-4}

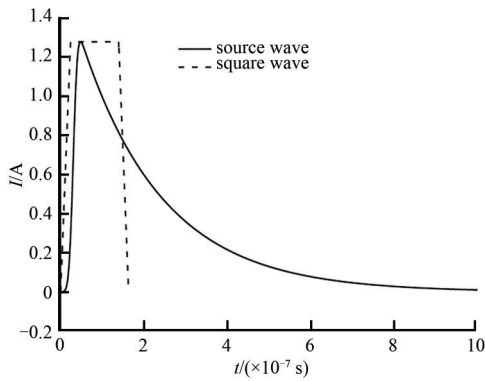


Fig.5 Comparison of equivalent square wave with source waveform
图 5 等效方波与源波形的比较

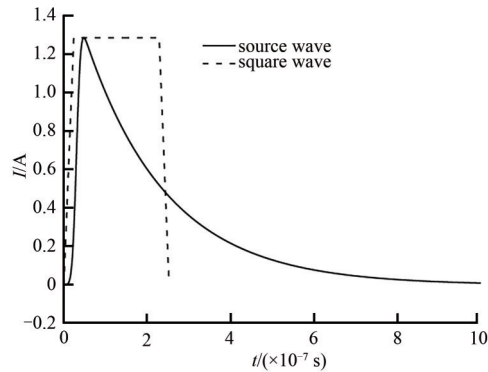


Fig.6 Comparison of equivalent square wave with source waveform
图 6 等效方波与源波形的比较

2.2 低阻状态线缆响应波形等效

当线缆两端负载 $R=10 \text{ k}\Omega$ ，其受 X 射线辐照时，负载响应电流的典型波形^[6]如图 7 所示，波形类似于高斯脉冲，图 8 为其对应的频谱波形。

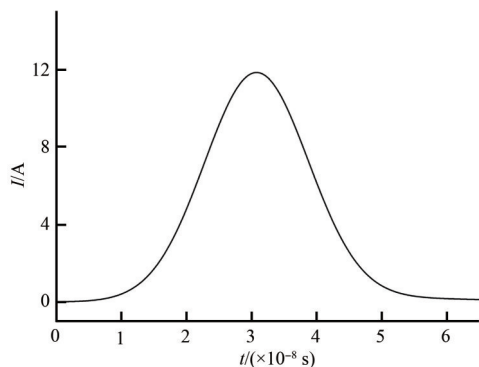


Fig.7 Current waveform of the wire at $R=10 \text{ k}\Omega$
图 7 $R=10 \text{ k}\Omega$ 时线缆两端的电流波形

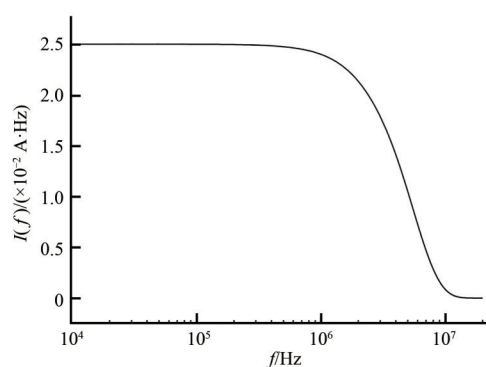


Fig.8 Current spectrum waveform of the wire at $R=10 \text{ k}\Omega$
图 8 $R=10 \text{ k}\Omega$ 时线缆两端的电流频谱波形

当等效波形与目标波形的峰值、上升时间相近时，等效方波及其频谱如图 9、图 10 所示，比较图 8 和图 10 可以看出，两脉冲的频率主要集中在 10 MHz 以下，等效方波与源波形频谱分量相似程度很高。

当等效波形与目标波形的峰值、能量作用方根相近时，图 11 给出了等效波形与目标波形的比较，表 3 给出了等效方波与目标波形特征参数的比较。

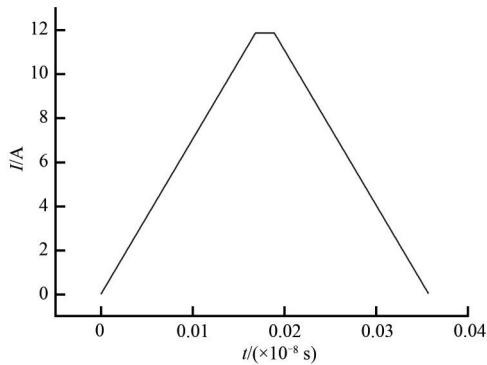


Fig.9 Equivalent square waveform
图9 等效方波

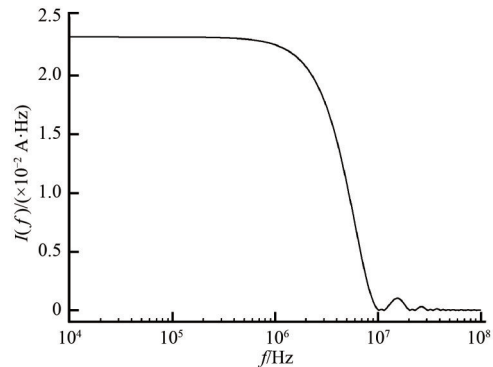


Fig.10 Spectrum of equivalent square wave
图10 等效方波频谱

表3 源波形与等效波形特征参数的比较

Table3 Comparison of characteristic parameters of source waveform and equivalent waveform

	peak/A	t_r /ns	t_{FWHM} /ns	maximum change rate/(A·s ⁻¹)	charge/(A·s)	energy/(A ² ·s)
source	11.859	13.50	18.931	8.988×10^8	2.434×10^{-7}	1.417×10^{-3}
square	11.859	13.50	31.147	7.028×10^8	3.694×10^{-7}	1.895×10^{-3}

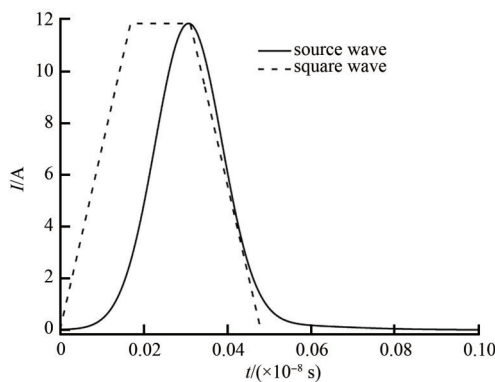


Fig.11 Comparison of equivalent square wave with source waveform
图11 等效方波与源波形的比较

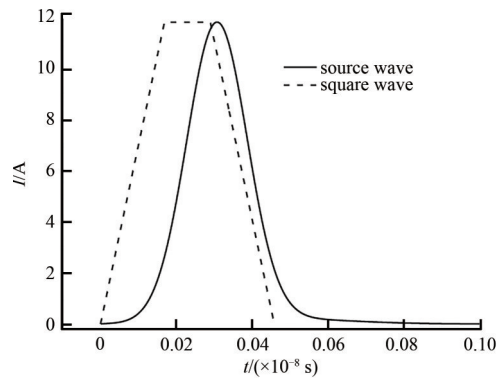


Fig.12 Comparison of equivalent square wave with source waveform
图12 等效方波与源波形的比较

当等效波形与目标波形的峰值、整流总脉冲相近时，图 12 给出了等效波形与目标波形的比较，表 4 给出了等效方波与目标波形特征参数的比较。

表4 源波形与等效波形特征参数的比较

Table4 Comparison of characteristic parameters of source waveform and equivalent waveform

	peak/A	t_r /ns	t_{FWHM} /ns	maximum change rate/(A·s)	charge/(A·s)	energy/(A ² ·s)
source	11.859	13.50	18.931	8.988×10^8	2.434×10^{-7}	1.417×10^{-3}
square	11.859	13.50	28.970	7.028×10^8	2.436×10^{-7}	1.812×10^{-3}

通过对高阻和低阻 2 种状态线缆电流响应等效波形的分析和对比可以看出，等效波形的峰值、能量作用方根和整流总脉冲与目标脉冲波形都基本一致，在频域上也与目标波形类似，等效波形可以根据目标波形的特征参数，结合电子系统的特点，很好地模拟出目标波形。

从表 1~表 4 可以看出，无论是那种特征参数等效，等效波形与目标波形的峰值和上升沿基本一致，只需要调整等效波形的脉宽，从而使得两者所携带的能量和电荷趋于一致。

3 结论

不同类型的强电磁脉冲作用下，各类器件对电磁脉冲的非线性响应特性不仅仅与脉冲峰值、脉冲宽度等直接相关，而且与上升前沿引起的电流变化率、波形包络等均有关系。SGEMP 是脉冲 X 射线引起的电子系统效应之一，受到辐射脉冲源条件的限制，全系统的 SGEMP 效应辐照实验不便开展，需要利用电流注入的方法来开展等效实验。采用了电磁范数对典型线缆的 SGEMP 响应波形进行了参数化表征，结合电子系统中器件对电磁脉冲干扰的敏感性，将 SGEMP 研究中敏感端口的响应以不同参数的波形进行了等效，本文建立的方法可以应用于

PCI方法开展SGEMP易损性研究。

参考文献:

- [1] 周璧华,石立华,王建宝,等. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 2版. 北京:国防工业出版社, 2019. (ZHOU Bihua,SHI Lihua,WANG Jianbao,et al. Electromagnetic pulse and its engineering protection[M]. 2nd ed. Beijing:National Defense Industry Press, 2019.)
- [2] 谢彦召,孔旭,和少寅,等. 电磁脉冲的范数探测及其应用[J]. 高电压技术, 2016,42(4):1221–1227. (XIE Yanzhao,KONG Xu, HE Shaoyin,et al. Norm detection and application for its electromagnetic pulse study[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(4): 1221–1227.) doi:10.13336/j.1003–6520.hve.20160405017.
- [3] 谢彦召,相辉,翟爱斌,等. 电磁脉冲效应研究中的范数分析方法及应用[J]. 核电子学与探测技术, 2010,30(10):1287–1293. (XIE Yanzhao,XIANG Hui,ZHAI Aibin,et al. Applications of various norms in the field of EMP effects[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010,30(10):1287–1293.) doi:10.3969/j.issn.0258–0934.2010.10.004.
- [4] TIAN Jin,LI Jinzhou,ZHANG Siwen,et al. Equivalence of characteristic parameters of HEMP based on norm[C]// The 3rd National Conference on Complex Electromagnetic Environment Technology and Applications. Luoyang, Henan, China: [s. n.], 2019.
- [5] 邱爱慈. 脉冲X射线模拟源技术的发展[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 24–28. (QIU Aici. The development of technology for pulsed X-ray simulators[J]. Engineering Science, 2000,2(9):24–28.) doi:10.3969/j.issn.1009–1742.2000.09.004.
- [6] 李进玺,吴伟,程引会,等. 线缆瞬态辐照响应的数值研究[J]. 原子能科学技术, 2009,43(12):1143–1148. (LI Jinxi,WU Wei, CHENG Yinhui,et al. Calculation of wire and cable transient radiation responses[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009,43(12):1143–1148.)
- [7] HIGGINS D F. Time-domain calculation of the leakage of SGEMP transients through braided cable shields[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989,36(6):2042–2049. doi:10.1109/23.45403.
- [8] 李进玺,程引会,周辉,等. 屏蔽电缆对脉冲X射线响应的数值计算[J]. 强激光与粒子束, 2006,18(6):981–984. (LI Jinxi, CHENG Yinhui,ZHOU Hui,et al. Responses of shielding cable to pulsed X-rays[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6):981–984.)
- [9] 李进玺,程引会,周辉,等. 用传输线和时域有限差分法计算电缆X射线响应[J]. 强激光与粒子束, 2007,19(12):2079–2082. (LI Jinxi,CHENG Yinhui,ZHOU Hui,et al. Calculation of coaxial line X-ray responses by transmission line method and finite difference time domain method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007,19(12):2079–2082.)
- [10] 周辉,李宝忠,王立君,等. 不同注量X射线系统电磁脉冲响应的数值计算[J]. 计算物理, 1999,16(2):157–161. (ZHOU Hui,LI Baozhong,WANG Lijun,et al. The calculation of SGEMP response in various ranges of X-ray fluence[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1999,16(2):157–161.) doi:10.19596/j.cnki.1001–246x.1999.02.008.
- [11] 李进玺,郭景海,赵墨,等. 电磁脉冲微分测量信号的数值积分[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):738–741. (LI Jinxi, GUO Jinghai,ZHAO Mo,et al. Processing of electromagnetic pulse signal based on numerical integration[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):738–741.) doi:10.11805/TKYDA201605.0738.

作者简介:

李进玺(1978–), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为电磁脉冲效应 .email:lijinxi@nint.ac.cn.

王一雄(1996–), 男, 在读硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为强电磁脉冲效应.

吴伟(1976–), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为强电磁脉冲生成与效应技术.

赵墨(1986–), 男, 在读博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为强电磁脉冲效应.

程引会(1965–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高空电磁脉冲效应.

郭景海(1986–), 男, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为强电磁脉冲效应.