

文章编号: 1001-4322(2003)05-0464-03

一个新的 IEC61000 - 4 - 2 标准 ESD 电流解析表达式*

盛松林, 毕增军, 田明宏, 刘尚合

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 分析了两个 ESD 标准电流波形表达式, 并提出一个新的基于脉冲函数来描述 ESD 标准电流的解析表达式, 该表达式符合最新的标准 IEC61000 - 4 - 2, 在零时刻的电流及其微分部为 0, 且波形与实际测量波形基本吻合。

关键词: 标准; ESD; 电流波形; 脉冲函数; 解析表达式

中图分类号: O44.4 **文献标识码:** A

国际电工委员会(IEC)在 2002 年 3 月颁布了关于静电放电(ESD)测试的最新标准 IEC61000-4-2^[1], 该标准是第二版, 其对应的第一版是 IEC 于 1995 年颁布的 IEC1000-4-2, 并在 1998 年和 2000 年经过两次修正。同第一版一样, 这个最新的标准将人体-金属模型的电流波形作为典型的 ESD 电流波形。但是它仍然存在一个问题, 就是仅仅规定了 ESD 电流的典型波形大致形状和一些特征数据, 譬如上升时间、峰值、30ns 和 60ns 处的幅值, 而没有给出类似雷电电流十阶 Heidler 函数式的电流波形解析表达式, 这给用户在引用标准电流时带来不便和不确定性, 也给计算和分析 ESD 相关电磁场的工作带来困难。许多学者曾经对这个问题进行过试探性研究, 也有一些 ESD 电流表达式被提了出来, 但它们都存在一些缺陷, 所以一直未被 IEC 采纳。本文将对两种 ESD 电流表达式进行分析, 并基于脉冲函数, 提出一个新的 ESD 标准电流解析表达式。

1 两种人体-金属模型放电电流的解析式

1991 年, Keenan 和 Rosi 曾经提出一个四指数电流波形^[2], 用来近似描述人体-金属模型的放电电流, 这是最著名的一个人体-金属模型电流解析式, 即

$$i(t) = I_0(e^{-t/t_1} - e^{-t/t_2}) + I_1(e^{-t/t_3} - e^{-t/t_4}) \quad (1)$$

1996 年, Kodali 在《工程电磁兼容——原理, 测量和技术》一书中也引用了这个表达式^[3]。在式(1)中, 电流的单位为 A, 时间单位为 ns。对于 15 kV 的放电电压, 其波形如图 1 所示, 图中实线即放电电流波形, 两条虚线分别是电流表达式中的第一项和第二项。第一项表示前臂和手持小金属物的快放电过程, 时间参数 t_1, t_2 和幅度系数 I_0 分别取值 2.2 ns, 2ns 和 1 943 A, 上升时间 1.2 ns, 峰值电流 68 A; 第二项表示人体的慢放电过程, 时间参数 t_3, t_4 和幅度系数 I_1 分别取值 22ns, 20ns 和 857 A, 上升时间 12ns, 峰值电流 30A。两项相加后总的峰值电流约为 75.8A, 上升时间约 1.3ns。

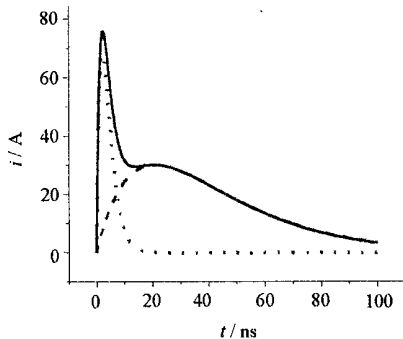


Fig. 1 Four-exponential function waveform

图 1 四指数函数式波形

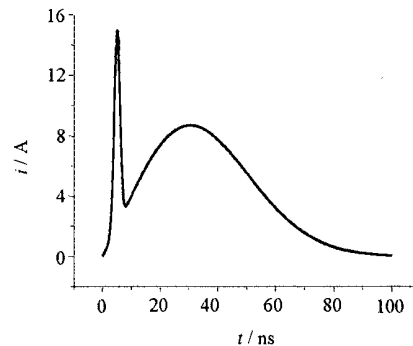


Fig. 2 Gauss function waveform

图 2 高斯函数式波形

1998 年, Berghe 和 Zutter 在研究 ESD 信号通过同轴电缆耦合进入系统时, 提出了另外一个基于高斯函数

* 收稿日期: 2002-08-27; 修订日期: 2003-01-15
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(批准号: 50077024); 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 盛松林(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲电磁场计算及测试方向的研究; E-mail: pineshpxl@sohu.com.

的解析表达式^[4]

$$i(t) = I_0 e^{-I(t-t_1)/I_1} + I_1 t e^{-I(t-t_2)/I_2} \quad (2)$$

对于 4kV 放电, I_0 和 I_1 分别取 13A 和 0.4A/ns; t_1 和 t_2 分别取 5ns 和 10ns; I_1 和 I_2 分别取 1.414 ns 和 35.35 ns。波形如图 2 所示。式(1), (2)均能够描述出人体-金属模型的基本特征,即整个放电过程包括快放电和慢放电两部分,改变各参数的值,能够对波形进行调整。但是,它们都存在两个缺点,一是零时刻的电流时间导数不为零。在零时刻时,四指数函数式的时间导数为 87.21A/ns,高斯函数式的时间导数为 0.37A/ns,这与物理事实不符(电流波形在 $t=0$ 时导数为零),而当考虑 ESD 相关的场效应时,电流时间导数的影响又非常大;二是波形与标准中电流波形特征数据之间存在较大差异。

2 基于脉冲函数的 ESD 标准电流波形表达式

2.1 脉冲函数

脉冲函数的表达式为 $i(t) = i_0 + I_0[1 - e^{-(t-t_0)/\tau_1}]^p e^{-(t-t_0)/\tau_2}$ 。一般纵坐标偏置 i_0 和横坐标偏置 t_0 取 0,表达式可以简化为 $i(t) = I_0(1 - e^{-t/\tau_1})^p e^{-t/\tau_2}$ 。脉冲函数具有很多好的特性,譬如波形的峰值、前后沿的时间及其导数几乎都可以通过相关参数独立调整。通过下文分析还可以知道,它具有零时刻时间导数为 0、积分和微分计算方便等特性,非常适合于描述脉冲电流波形,张飞舟就曾经用脉冲函数来拟合雷电底部电流波形^[5]。

简单推导可以得到脉冲函数的微分表达式 $di(t)/dt = I_0 \tau_1^{-1} (1 - e^{-t/\tau_1})^{p-1} e^{-t/\tau_2} [p(1 - e^{-t/\tau_1})^{-1} + \tau_1^{-1}]$ 。容易证明在 $t=0$ 时脉冲函数的时间导数为 0,而 ESD 电流在零时刻的时间导数也为 0,所以用它或它的线性组合来表示 ESD 电流时就比双指数函数优越。

对脉冲函数求时间积分也很方便。将第一指数项展开得到 $(1 - e^{-t/\tau_1})^p = \sum_{k=0}^p \frac{(-1)^k p!}{k!(p-k)!} e^{-kt/\tau_1}$, 从而得
到脉冲函数的积分表达式 $f(t) = \int i(t) dt = I_0 \sum_{k=0}^p \frac{(-1)^k p!}{k!(p-k)!} \frac{1 - e^{-kt/\tau_1}}{1 + k/\tau_2} e^{-kt/\tau_1} e^{-t/\tau_2}$ 。

在偶极子场模型中,既有电流项,也有电流的积分项和微分项,而脉冲函数的这三项的计算都很方便。

2.2 用脉冲函数描述 ESD 电流波形

IEC61000-4-2 中 ESD 电流采用人体-金属模型的电流波形,规定其特征参数为:第一脉冲前沿上升时间为 0.7~1ns,峰值为 3.75A/kV,30ns 处为 2A/kV,60ns 处为 1A/kV。例如对于 8 kV 放电,脉冲峰值为 30 A,30ns 和 60ns 时的幅度分别为 16 A 和 8 A。标准未给出其它时刻的电流幅度参考值,也没有其它相关的解析表达式。参照 R·K·Keenan 的方法^[2],把 ESD 电流波形分成快放电和慢放电两个过程,分别用式(3)所示的两个脉冲函数描述,其中 I_0, I_1 分别是与快、慢放电幅度相关的参数; $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 分别是与快、慢放电上升时间和持续时间相关的参数; p, q 是无量纲参数。

$$i(t) = I_0(1 - e^{-t/\tau_1})^p e^{-t/\tau_2} + I_1(1 - e^{-t/\tau_3})^q e^{-t/\tau_4} \quad (3)$$

依据标准 IEC61000-4-2,仔细调整各参数值,可以得到各种放电电压下的电流波形解析式,譬如式(4)所示的 8 kV 放电电流波形的解析表达式。其它放电电压下的电流波形只是幅度上不同,所以其它放电电压下的解析表达式只需依标准同比例调节 I_0, I_1 即可得到。

$$i(t) = 213(1 - e^{-t/0.62})^8 e^{-t/1.1} + 121(1 - e^{-t/55})^8 e^{-t/26} \quad (4)$$

波形如图 3 实线所示,图 3 中短划线和虚线分别为快放电和慢放电两个过程的波形。

图 4 是四指数函数式、高斯函数式和脉冲函数式所得到的归一化波形比较。为了便于比较,波形峰值都归一到放电电压 8 kV 的情况,即峰值约 30A。四指数函数的两个系数分别由 1 943 和 857 变为 774.8 和 341.8,高斯函数式的两项的系数也由 13 和 4.0×10^8 变为 26.06 和 8.02×10^8 。由图 4 可见,只有脉冲函数式波形完全满足 IEC 标准,即上升时间为 0.7~1ns,脉冲峰值为 30A,30ns 和 60ns 处的幅度分别为 16A 和 8A。

在 ESD 电流表达式(1), (2), (3)中,只有脉冲函数式在零时刻的时间导数为 0,而且它的波形前沿与实际波形吻合最好。图 5 是图 4 的波形局部展宽,图中叉形点是按照 IEC61000-4-2 标准规定的方法用电流靶测量的 ESD 模拟器在 -8kV 空气放电时的电流波形(所用的模拟器为日本 Noiseken 公司生产的 ESS-200AX,电流测量选用的是采样速率为 5Gs/s,带宽为 1GHz 的 TDS680B 数字存储示波器,环境温度为 16℃,湿度为 38%),

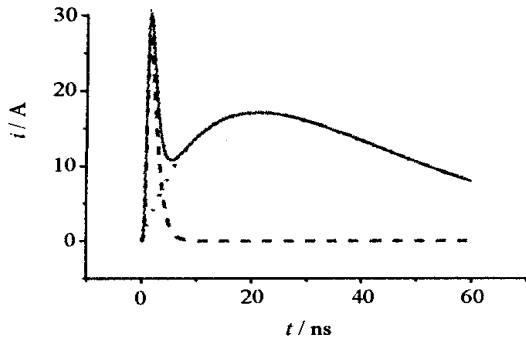


Fig. 3 Pulse function ESD current waveform

图 3 脉冲函数式 ESD 电流波形

实线是脉冲函数式波形,点线是高斯函数式波形,短划线是四指数函数式波形。

3 结论

本文分析了两种已有的 ESD 标准电流波形表达式,它们的缺点是在零时刻的电流时间导数不为 0,且电流波形与标准中电流波形的特征数据之间存在较大差异。本文提出的基于脉冲函数的表达式,它的一些波形参数符合最新的标准 IEC61000-4-2,而且在零时刻的电流及其微分都为 0。与实际测量波形进行比较,发现它的波形前沿与实测波形吻合很好,波形后沿吻合不太好,这是因为电流靶本身的高频性能不佳引起的,在实际测量 ESD 电流过程中,测量电缆的分布参数及连接匹配的非理想性等,也会引起实测电流波形后端振荡。在改进电流靶性能、提高测量精度的情况下,二者的波形后沿也会趋于吻合。

参考文献:

- [1] IEC 61000-4-2. Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-2: Testing and measurement techniques-electrostatic discharge immunity test [S]. 2002.
- [2] Keenan R K, Keenan R K, Rosi L A, et al. Some fundamental aspects of ESD testing(part1) [A]. Proc IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. 1991. 236—241.
- [3] Kodali V P. Engineering electromagnetic compatibility—principles, measurements, and technologies[M]. NJ, Piscataway: IEEE Press, 1996.
- [4] Berghe S V D, Beyghe S V D, Zutter D, et al. Study of ESD signal entry through coaxial cable shields[J]. *Journal of Electrostatics*. 1998, **44**: 135—148.
- [5] 张飞舟. 雷电回击脉冲电磁场的理论与数值计算[R]. 石家庄: 军械工程学院, 2001. (Zhang F Z. Theoretical study and numerical computation of the electromagnetic fields of lightning stroke pulse. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2001)

A new analytical expression of current waveform in standard IEC61000-4-2

SHENG Song-lin, BI Zeng-jun, TIAN Ming-hong, LIU Shang-he

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

Abstract: According to the current waveform in standard IEC61000-4-2, two analytical expressions of the standard current are analyzed and then a new one based on pulse function is proposed. The new expression is consistent with the new standard IEC61000-4-2, in which both the current and its derivative are zero at the zero moment, and the waveform basically is agreed with the measured one.

Key words: Standard; ESD; Current waveform; Pulse function; Analytical expression

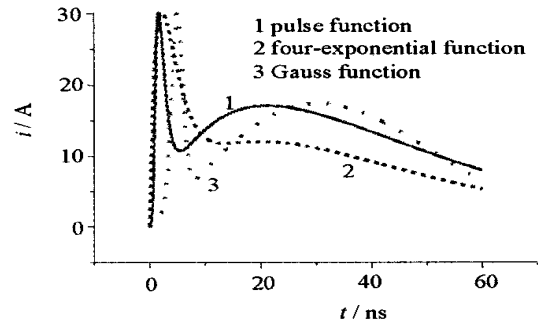


Fig. 4 Comparison of the three function waveforms

图 4 三种函数式波形比较

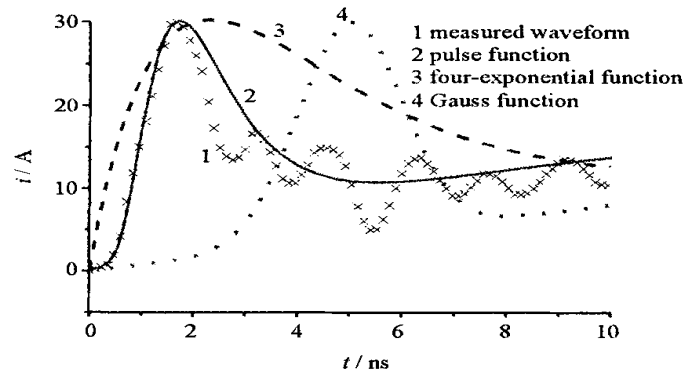


Fig. 5 Rise-time comparison of the four ESD current waveforms

图 5 四种 ESD 电流波形前沿比较