2017年4月

文章编号: 2095-4980(2017)02-0338-07

电磁脉冲电缆耦合模拟试验技术与测试技术

罗学金^a,王自元^a,黎旭红^b

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.信息中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要:详细介绍了非空间电荷限制条件下进行的模拟密封腔体内测量内电磁脉冲(IEMP)耦合与电磁脉冲(EMP)耦合的实验。耦合模型的研究内容包括磁场耦合到电缆、电场耦合到电缆以及 电荷淀积或辐射从电缆表面耦合。耦合模型可将电场、磁场、电荷淀积的耦合方式用集总参数等 效电路内的电压、电流源表示理论模型。空间电荷电流和空间电荷密度象强源一样,是依赖于空 间和时间的分布函数。针对带电电缆的 IEMP 环境耦合与辐射感应电子发射产生的空间电荷对产生 的电流和场进行研究,并观察电缆走向、类型、偏置和终端负载的影响,得出了理论与试验结果。 关键词:封闭腔体;电缆;耦合;电磁脉冲;内电磁脉冲

中图分类号:TN823.25 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA201702.0338

Electromagnetism pulse cable coupling simulation and test techniques

LUO Xuejin^a, WANG Ziyuan^a, LI Xuhong^b

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Information Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The simulation of Internal Electro Magnetic Pulse(IEMP) coupling with Electro Magnetic Pulse(EMP) coupling in sealed cavity without space charge limit is described in detail. The research of coupling models contains magnetic field coupling to cable, electric field coupling to cable, charge or radiation coupling on the surface of cable. The voltage source and current source in the lumped parameter equivalent circuit are adopted to express the theoretical models of electric field coupling, magnetic field coupling and charge coupling. The space charge current and space charge density are distribution function dependent on space and time. The current and field induced by the IEMP coupling of charged cable and space charge are researched; the influence of the trends, types, bias and terminal loads of the cable, are observed. The test and theoretical results are obtained.

Keywords: sealed cavity; cable; coupling; Electro Magnetic Pulse; Internal Electro Magnetic Pulse

现代高科技的时代,国防军事设施和民用电子产品都处在复杂电磁环境中,这关系到武器系统的抗拦截技术 水平、生存能力和军、民用通信设施抗干扰能力的提高。电子线路的元器件、电子系统及连接线缆,在辐射(核 辐射和电离辐射)环境中受到的辐射效应研究,以及提高相关抗辐射能力的加固技术研究,在国防经济建设中作 用愈来愈显得迫切需要。其主要研究手段和方法是实验研究,要保证实验研究的数据正确和可靠,首先必须保证 实验方法的正确和试验测试系统的先进,才能为电子系统的电磁脉冲效应与加固技术研究提供重要的保障。这里 针对腔体内带电线缆的电磁脉冲(IEMP)环境耦合与辐射感应电子发射产生的空间电荷对电流和电磁场进行研究。

1 原理

当腔体内电子系统暴露于强γ或 X 射线脉冲环境时,发射出的电子将在电子系统外壳表面周围产生一个瞬态 的空间电荷电流和电磁场^[1]。其能量可以充分地耦合到电缆外壳里,使其系统的敏感部件发生损伤或故障^[2]。这 种现象通常称为内电磁脉冲(IEMP)^[3]。

1.1 耦合模型

从图 1 结构分析可以看出,一段绝缘或裸露导线穿过腔体导电壁,导线 2 端的负载是 Z₁和 Z₂,连接导线至 <u>w稿日期: 2015-12-23: 修回日期: 2016-03-09</u> 腔体壁,当γ或 X 脉冲辐照时,从表面引起电子 光电发射,产生一个空间电荷电流、电场和磁 场。由于腔体受到辐照时,腔体内气体回带一 个等离子体传导率,可以通过辐照时所产生光 电发射的空间电荷电流、场和等离子体传导率 为预测负载 Z₁和 Z₂内的电流和感应电压建立一 个模型^[4]。假定,腔体特征尺寸足够小,电子穿 越腔体的渡越时间和电子信号通过腔体壁、穿 过导线的渡越时间,光子辐射脉冲的上升时间



都较短。把探讨的问题简化成为一个准静态的问题。对导体导线上的电荷和感应电势,就只探讨解决静电的边界 值问题。

腔体内电缆电子结构由1组等效电路内的参数电压和电流源表示耦合模型。为了分析其中情况,波长通常用短导线。因此,用电路参数和源的一个简单装置表示全部结构。在导线远大于波长的情况下,这个模型不适用。 这些分析可能更适用于成段的短导线。每个装置的电路部分和源对于导线越长的源分布,信号导线的任何一端都 将叠加一个感生响应在负载里。

1.23个耦合模型讨论

1.2.1 来自导线表面的电荷淀积或辐射

式(1)是电荷淀积和电场耦合模型扩展的表达式,采用由导体表面上电场的法向部分来解决静电的边界值问题。电场和电荷淀积耦合,腔体内电势 $\phi(r)$ 、每点上的 γ 满足泊松方程:

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{1}{\varepsilon_0} \rho(r) \tag{1}$$

式中: ρ 是空间电荷密度; ϵ_0 为空气介电常数。设S为传导导线的面积,S'为腔体壁的面积,对电势而言,边界条件是:

$$\begin{aligned}
\nabla S' &= 0 \\
F_S &= V \end{aligned}$$
(2)
(3)

$$F_{S} = V$$

式中 V 是导线关于腔体壁的电势。 边界条件为法向部分在传导导线表面是:

$$\boldsymbol{n} \cdot \nabla \boldsymbol{\Phi}_{s} = \frac{r}{\varepsilon_{0}} \tag{4}$$

式中r为导体表面电荷密度。

为便于确定一个格林(新)函数 G(r), 假定腔体内的电势分布是相对于腔体内的非自由电荷, 当一个单位电势施加在传导导线上。G 满足拉普拉斯方程式:

$$\nabla^2 G = 0 \tag{5}$$

其边界条件:

$$G_{S'} = 0 \tag{6}$$

$$G_{\rm s} = 1 \tag{7}$$

在传导导线表面上,对G的梯度的法向部分边界条件用对应的式(4)求r:

$$\boldsymbol{\iota} \bullet \nabla G_{S} = \frac{r'}{\varepsilon_{0}} \tag{8}$$

式中 r'为均匀情况下内导体上的表面电荷密度。

应用格林定理,求体积 V 范围关于面积 S 和 S'的积分:

$$\int_{V} \left(G \nabla^{2} \Phi - \Phi \nabla^{2} G \right) \mathrm{d}V = \int_{S, S'} \left(G \nabla \Phi - \Phi \nabla G \right) \bullet \mathbf{n} \mathrm{d}S$$
⁽⁹⁾

将式(1)~式(8)代入式(9)得到:

$$-\int_{V} g \mathrm{d}V = Q - VQ' \tag{10}$$

这里

$$Q = \int_{S} r \mathrm{d}S \tag{11}$$

$$Q' = \int_{S} r dS \tag{12}$$

Q'是均匀情况下定义 G 导线上的总电荷,如果 C 是导线对腔体壁之间的电容量, $Q' = G_s C$,则通常的边界条件是:

$$Q' = C \tag{13}$$

Q是非均匀情况下导线的总电荷。设 I 是从传导导线进入腔体壁通过负载 Z_1 和 Z_2 的总电流。设 g 是导线和 腔体壁两者之间的等离子体电导。设 j(r)是腔体内空间电荷电流(传递电流),于是:

$$Q = -\int_0^t I dt - \int_0^t g V dt \int_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} dS$$
(14)

式中 V 是关于全电缆面积 S 的表面积分。

将式(13)、式(14)代入式(10)及微分的时间关系,得到微分方程:

$$I + gV(I) + C\frac{dV(I)}{dt} = C\frac{dU_{\rm E}(t)}{dt} + I_{\rm C}(t)$$
(15)

式中导线电势 V 是对负载 Z1 和 Z2 电流测定的一个函数。源函数 UE 和 Ic 定义为:

$$I_{\rm C}(t) = -\int_{S} j(r \cdot t) \bullet n dS$$
⁽¹⁶⁾

$$U_{\rm E}\left(t\right) = \frac{1}{C} \int_{V} G\left(r\right) \rho\left(r \cdot t\right) \mathrm{d}V \tag{17}$$

源项 *I*_c表示的是电荷辐射淀积耦合到导线的电流, *I*_c是正的,该电流并不是导线表面耦合的电子辐射电流; 对导线内的电子淀积产生的电流 *I*_c是负的。源项 *U*_E表示的是电容电场耦合到导线的电荷电势,从式(15)能够看 出,*U*_E是在零电荷辐射淀积和零等离子体传导率情况下导线的开路电压,并不是一个负空间电荷(电子),*U*_E是 负的。

1.2.2 传导导线的电容性电场耦合

从导线的基本电路考虑,对一个开路电压 U_E和康普顿电流源 I_c来讲,用唯一能够导出一个替换特性的式(15) 来研究完成一个求解的数据。这里探讨使用格林函数的优点,阐述说明计算空间辐射淀积和电容性场耦合源—式 (16)和式(17),注意式(17)可直接允许计算电容的电场耦合,不用首先计算电场和导线的等效点;如给定空间电荷 电流 **j**和空间电荷密度 ρ 函数的时间和位置,使用式(15)~式(17)就能够测定一个负载里的感应电流和电势。

图 2 为电场和电荷淀积耦合的等效电路, U_B 和 I_C 分别表示电场电压和电荷淀积电流源。 Z_1, Z_2 和 C 是电缆阻抗参数。构成等效电路集总参数所表示的图 2 中微分方程(15)是能够检查的, I_1 和 I_2 是表示在电缆两端上通过负载 Z_1 和 Z_2 的感应电流($I = I_1 + I_2$)。



^{1.2.3} 传导导线的磁场耦合

在磁场耦合模型中,设 φ_{R} 是通过导线和腔体壁传导回路形成的总的磁通匝连数:

第15卷

$$\mathcal{\Phi}_{B} = \int_{A} \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{n} \mathrm{d}A \tag{18}$$

于是,磁场感应电压降U_B周围回路:

$$U_{\boldsymbol{B}} = -\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\Phi}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{B} \tag{19}$$

引进一个电压源 U_B进入等效电路中,能表示磁场耦合。图 3 为电场、电荷淀积、磁场耦合的等效电路, U_B表示磁场电压源。

等效电路:图 3 与式(16)~式(19)为电流和电压源, 在电缆负载 Z₁,Z₂ 里测量 IEMP 感应电流 I₁和 I₂ 及电压降 U₀,为了简化不同类型的耦合模型测量,采用全电流源 来说明耦合模型,以便于重新形成等效电路。在图 4 中,



341

current source terms(terminal) 图 4 表示 IEMP 耦合的全电流源项(终端)的交流等效电路

负载是假定的, Z_1 和 Z_2 在电缆两端上能表示出由 R_L 串联,等效电流源 I_E 表示的电容电场耦合是:

1

$$I_{\rm E} = C \, \frac{\mathrm{d}U_{\rm E}}{\mathrm{d}t} \tag{20}$$

这里 $U_{\rm E}$ 由式(17)限定。等效电流源 $I_{\rm B}$ 表示的磁场耦合:

$$I_B = \frac{1}{L} \int_0^t U_B \mathrm{d}t \tag{21}$$

$$T_{B} = -\frac{1}{L} \Phi_{B}\left(t\right) \tag{22}$$

或

式中L=L+L,为全回路电感。

1.3 对场耦合的理论预测

在实验条件下,空间电荷电流和场的理论预测是尤其容易的。辐射电流密度足够小,以致于空间电荷范围 内的发射电流可以忽视。理论预测场作假定,空间电流密度各处平行于腔体轴,空间中的平均空间电荷电流密度 各处相等。场耦合的预测对额定的空间电荷电流密度 70 mA/cm²环境有利。(根据测量的空间电荷电流分布)由于 试验电缆沿腔体的直径分别中间沿腔体轴,试验腔体几何图型泊松方程的解通常是两维的^[5]。腔体内预测到的电 势峰值是 270 V。开路电压 U_E 由电容的电场耦合(式(17))预测到是 170 V。短路电流 I_E 的等效峰值是 98 mA(式(20))。 试验腔体内磁场峰值,相当于 70 mA/cm²空间电流密度峰值,理论预测为 0.17 mG。对矩形结构回路里的试验电 缆,短路电流峰值 I,由磁场耦合(式(21))理论预测是 66 mA。

测量短路电流 *I*_c 峰值(式(16)),对沿腔体直径分布,经过腔体轴的单绝缘导线预测峰值电流是 120 mA。对试验几何图形和光子环境作详细记录,所

有3种耦合模型—电场、磁场、电荷淀积, 预测到可以比较量值的感应短路电流。

2 耦合结构分析

2.1 对电缆的耦合

2.1.1 磁场耦合

图 5 所表示研究的矩形回路结构, 磁 场耦合到 1 个电缆,回路由 1 个 10 k Ω 电 阻(R_3)对地隔离,简化了回路内电场和电 荷淀积感应的电流测量。在分压器网络里, 使用一个 10 k Ω 电阻,提供一个关于地的 导线开路电势的测量。因为 *RC* 时间常数



对电流通过 10 kΩ 电阻到辐射脉冲宽度比较长,电缆分压器网络输出也可以以电缆内总电荷密度为测量条件。图

5 试验腔体示意为回路结构到磁场耦合测量(R_1 , R_2 均为 50 Ω , R_3 为 10 k Ω)。

导线内磁场感应的回路电流,是由矩形回路对边上的2个电流探头读取的磁场感应电流,电场和电荷淀积感应电流在回路和地之间通过10kΩ电阻,这两边信号的量值是相等的。由2个电流探头读取电场和电荷淀积感应的电流,同样应当是相同的信号,但是测量方法有差别,因为不同的空间电荷电势和电荷淀积由矩形回路的两端观测,磁场感应回路电流 *I*₈是由探头读取,所以等于*I*₁和*I*₂之和的一半。

$$I_{B} = \frac{1}{2} \left(I_{1} + I_{2} \right) \tag{23}$$

电场正电荷淀积感应电流 $I_{\rm E}$ + $I_{\rm C}$ 在回路与地之间与不同探头之间输出 $I_{\rm I}$ 和 $I_{\rm 2}$ 是相等的:

$$I_{\rm E} + I_{\rm C} = I_1 - I_2 \tag{24}$$

电流 $I_{\rm E} + I_{\rm C}$ 的一个附加测量是以在电压分压器网络里串联一个 10 kΩ 的电阻穿过 50 Ω 电阻的电压降为条件。

图 5 表明的是矩形回路的两边典型的电流脉冲为 *I*₁和 *I*₂。空间电荷电流峰值为 65 mA/cm²(平均空间),磁场 感应回路电流 *I*_a从探头测到是 63 mA,理论预测值大约 61 mA。这个值是比较适宜的。

2.1.2 电场耦合

对结构而言,绝缘导线行程通 过腔体的直径,从法向对极小的射 线进行探测(图 6 所示),两电缆任 何一个终端上感应的磁场感应电 流,由于对称,应为零。电缆终端 上电流是总的电场和电荷淀积感 应电流。从空间电荷环境里熟悉的 电场测量尝试到,实验是空间的电 场和电荷淀积构成的感应电流。探 讨的是在辐射脉冲期间导线内的 电荷淀积的测量,假定电荷淀积电 流的时间相关与康普顿二极管监 测的空间电荷电流脉冲的时间相



关联,计算导线里电荷淀积所得到的感应电流时间关联时,应减去这个从测量电流获得的电场感应电流。导线内 总的电荷淀积测定,靠10kΩ分压网络测量导线的开路电势,从腔体壁由1个10⁻⁹F电容与导线隔离,*RC*时间 常数比辐射脉冲宽度长。所以导线上的辐射电压在辐射脉冲的终点上是电缆里总的电荷淀积的测量,对 60mA/cm²峰值的空间电荷电流密度(平均空间),导线里总电荷淀积测量是 3.2×10⁻⁹C,符号误差不超过10%。

导线上开路电势 Vo由下式给出:

$$U_{0}\left(t\right) = U_{E}\left(t\right) + \frac{1}{C}\int_{0}^{t}I\left(t\right)dt$$
(25)

式中: $U_0(t)$ 为导线的开路电势; U_E 为电场感应电势(式(17))。假定, $I_C(t)$ 的时间与康普顿二极管输出的相关时间相同,就能测定电场感应电势 $U_E(t)$ 。在特定情况下,探测到 70 mA/cm²的空间电荷电流密度,电场感应电势峰值为 150 V。预测值(式(17))是 170 V,误差小于 15%。等效电场感应的短路电流测定值是 85 mA(式(20)理论预测值是 98 mA)。

2.1.3 电荷淀积耦合

从导线里测量的总的电荷淀积和空间电荷电流波形,是空间电荷淀积 $I_{c}(t)$ 耦合进入导线的总电流测定,特定情况下,当空间电荷电流密度峰值为 60 mA/cm² 时,电荷淀积电流 I_{c} 峰值的测定值是 92 mA,预测值为 100 mA,误差不超过 10%。

2.1.4 耦合上的偏置作用

电缆上低能电子对电荷淀积产生的感应电流的贡献研究,是以电缆上用腔体壁感应电流比偏置电势作测量。 绝缘导线敷设横向穿过腔体的直径、从负到正的偏置电势,感应电流的测量数据说明感应灵敏度是相当高的。 这意味感应电流的重要部分起因于导线内低能量(少于1keV)电子的淀积或辐射。这里不给出结果,也不作讨论^[5]。

through a

conductor

3 实验装置

图 6 是瞬时强γ或 X 辐射源上的实验装置。γ 剂量率在 10⁷~10⁹ Gy/s 范围内变化,监测模拟腔体 前、后端的总剂量,确定γ剂量率。同时测量腔体 内 IEMP 环境下,电缆导线中的感生电流。

图 7 是在瞬时强γ或 X 辐射源上的实验装置。 γ剂量率在 10⁷~10⁹ Gy/s 范围内变化,监测弹头前、 后端的总剂量,确定剂量率。同时测量腔体内 IEMP 环境下,从导线里测量的总的电荷淀积和空间电荷 电流实验装置。

图 8 是利用原套试件在 SAE-501A 大型电磁脉 冲模拟器上测量与 IEMP 参数相当的条件下的感 生电流。

4 测量系统

在瞬时强γ或 X 辐射源上采 用抗辐射强的对称—差分测量系 统(双屏蔽短电缆),用 DSA 数字 示波器记录。在 EMP 模拟器上 采用抗电磁辐射强的光纤传输 系统,用 DSA 数字示波器记录。

测量电缆采用的导线是 PVC多股芯铜质导线,导线的集 总参数 R 约等于 0.8 Ω, L 约等于 0.3 μH, C 约等于 21 PF。

磁场测量采用的是直径为 1 mm的裸露铜质导线作回路环, 电流探头是自研制的,灵敏度为 2.5 V/A,而 IEMP 电场探头是平



PVC insulated wires

图 8 电磁脉冲模拟器上的实验装置

行板网栅传感器, 灵敏度通过 TEM 小室鉴定。磁场采用的是半环, 半环的直径 2*b*=50 mm, 导线直径 2*a*=0.9 mm, 半环的负载 R_L =50 Ω_o 半环的有效长度 $l_E = \frac{\pi b}{l_n \left(\frac{b}{a}\right)}$ =0.019 5 m, 负载上的电压为 U_{out} , 则磁场强度 $H = \frac{(U_{out}/R_L)}{l_E}$,

磁场的方向为 F 方向。

在 EMP 模拟器上电场测量采用的是电探针(短天线),天线的直径为 0.51 mm,天线长度为 20~30 mm,短天 线的天线电容为: $C_a = \frac{4\pi}{C\rho_0} \frac{h}{\Omega - 3.39}$,式中 $\rho_0 = 120\pi$, $\Omega = 2l_n \left(\frac{2h}{a}\right)$,式中 h为天线的几何高度, a为天线的半径,天线的负载为电容 C_l 。如天线负载电容的输出电压为 U,则电场强度为 $E = (U/l_e)K$,式中 $l_E \approx h/2$ 为天线有效长度,天线电容与负载电容的分压倍数 $K = \frac{C_a + C_l}{C}$ 。电流与磁场探头与瞬时强辐射源上使用的相同。

5 测量结果分析

理论模型表明:磁场、电场、电荷淀积耦合是由集总参数等效电路内的电压和电流源表示,源可以表示为腔体内空间电荷电流和空间电荷密度分布的函数。对实验结果的耦合源测量,如上所述,尽管耦合模型的理论预测 合理,而预测数据与实验所得数据误差范围不超过 10%~20%,但在电缆上空间电荷流动会引起空腔体内的场扰 动,假定对电缆电流耦合测量影响很小^[6]。使 EMP 模拟器上的内电场条件(调整耦合圆孔缝隙)满足瞬时强γ或 X

simulation of cavity

electric-field probe

space charge record

辐射源上的 IEMP 环境(2×103~3×103) V/m 条件,且采用相同试件。

导线在腔体内的型号、走向、 终端负载等相同条件下,导线中感 应电流的幅频响应特性与激励源上 升前沿有关:电场波形频率愈丰富, 导线中耦合的感应电流愈大,反之 愈小。

在导线型号、终端负载相同条 件下,导线在电场中的极化方向对 耦合的感应电流大小影响极大。当 处于垂直极化方向时,导线的耦合 电流较小,导线处于同一等位面上, 只存在电场、磁场、电荷淀积耦合 的电流;当处于水平极化方向时,

表 1 瞬时强γ或 X 辐射源试验感应电流							
Table1 Strong instantaneous γ or X induced current source tests							
serial-number	IEMP electric	induced	PVC insulated	conductor polarization			
	field/(V·m ⁻¹)	current/mA	wires	direction			
1	2 437	120.0	single conductor	the horizontal direction			
2	2 542	28.3	single conductor	the vertical direction			
3	2 289	168.0	double wire	the horizontal direction			
4	2 872	36.5	double wire	the vertical direction			

表 2 EMP 模拟器试验感应电流 Table2 EMP simulator test induced current							
serial-number	IEMP electric field/ $(V \cdot m^{-1})$	induced current/mA	PVC insulated wires	conductor polarization direction			
1	2467	187.0	single conductor	the horizontal direction			
2	2905	85.3	single conductor	the vertical direction			
3	2654	212.0	double wire	the horizontal direction			
4	3276	76.2	double wire	the vertical direction			

导线中各段将产生一个感生电动势,形成感生电流与耦合电流叠加趋势,产生的感应电流较大。

对非空间电荷限制条件下,进行的腔体内电缆 IEMP 耦合和 EMP 耦合的实验研究,有助于各种电缆类型的 电缆终端上感应的短路电流和开路电压的测量。根据对实验测量得到的感应电压峰值和感应电流峰值数据的初步 分析,就电压源和电流源而论,说明耦合模型—磁场、电场、电荷淀积或辐射,这些源的测量与理论预测相符。

6 结论

从实验结果观测,磁场感应电流的测量数据表明,如图 8 绝缘导线走向行程横过穿越腔体的直径,这个状态的电流是电荷淀积感应和电场感应电流的总和。由导线集总参数等效电路内以及导线集总参数 R,L,C 关系来确定 感应电流 I 是正比于频率变化的,激励源响应特性快,频率高,容性电场耦合就愈大,感应电流相应增加。导线 上的感应电流,是电容性电场耦合、磁场耦合以及电荷淀积或辐射从导线表面耦合 3 种耦合的总和(表 1~表 2)。 贯穿导体(水平极化)产生的电场、磁场、电荷淀积或辐射耦合很大,危害性较强。本工作为芯片设计及考虑温度 效应的物理综合、布局、布线算法提供有效参考。

参考文献:

- [1] 乔登江. 核爆炸物理概论[M]. 北京:原子能出版社, 1988. (QIAO Dengjiang. Introduction to Nuclear Explosion Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988.)
- [2] 杰弗里.高斯. 高空电磁脉冲理论 AD-777846 [M]. 吴朔平,译. 北京:原子能出版社, 1986. (GAUSS Geoffrey. High Altitude Electromagnetic Pulse Theory AD-777846 [M]. Translated by WU Shuoping. Beijing: Atomic Energy Press, 1986.)
- [3] 赖祖武. 电磁干扰防护与电磁兼容[M]. 北京:原子能出版社, 1993. (LAI Zuwu. Electromagnetic Interference Protection and Electromagnetic Compatibility[M]. Beijing:Atomic Energy Press, 1993.)
- [5] EPH. Vance love. Influence of Electromagnetic Field on Shielding Cable[M]. Translated by GAO Yougang, LYU Yinghua. Beijing:People's Posts and Telecommunications Press, 1988.)
- [6] GAUSS Labintela N. Electromagnetic Pulse Environment and System Design[M]. Translated by Ying-Jean Kuoe tc. Beijing:Anti Nuclear Reinforcement Editorial Department, 1988.)

作者简介:



罗学金(1956-),男,重庆市人,高级工程师,主要研究方向为 NEMP/IEMP/SGEMP 模拟 试验方法、测试技术、信号传输与脉冲功率技术.email:lxjin530@sina.com.

王自元(1941-),男,河南省上蔡县人,工 程师,主要研究方向为 NEMP/IEMP/SGEMP 测 试技术与信号传输系统.

黎旭红(1961-),男,贵州省铜仁市人,研 究员,主要研究方向为系统设计、信息情报收集.