

雷电电磁脉冲对通信车天线的感应耦合

傅国庆¹ 郭在华¹ 朱成²

(1 成都信息工程学院, 大气探测学院, 成都 610225; 2 四川中光高科技有限公司, 成都 610225)

摘要:进入21世纪以来,全球范围内自然和人为的各类重大突发公共事件频繁发生,给经济发展造成直接影响,也给环境和社会造成长远的、多方面影响,同时向各区政府的应急管理提出挑战。目前我国应急管理的重点是大力推进防灾减灾相关部门的联动工作机制,明确要求各级部门建立抗灾应急联动协调机制。落实上述工作机制,建立稳定、可靠、高效的应急通信系统是必不可少的。应急通信车是应急通信系统的核心组成部分,作为现场通信指挥系统,可以为抢险救灾现场指挥提供了一个多功能的指挥调度平台,并及时将现场采集信息回传到指挥中心,方便指挥中心领导指挥。因此,要确保应急通信系统的可靠工作,更好地为抢险救灾及突发事件处置提供可靠的通信保障,必须在系统设计和集成工程中对应急通信车安全防护予以高度重视,并采取切实可靠的技术措施加强防护。LEMP对电子设备的毁伤作用主要通过两个途径:一是通过电线电缆的耦合作用在终端产生过电压、过电流,从而毁伤设备;另一方面直接在未屏蔽的电器、电子设备上产生过电压、过电流。由于LEMP以第一种途径的毁伤作用更常见、更严重,因此国内外雷电研究者更注重于LEMP对架空电线、电缆的耦合效应研究。如在美国的佛罗里达国际雷电研究测试中心和肯尼迪太空中心有固定的人工引雷基地,并有专门研究LEMP效应的实验设备。20世纪80年代以来,他们通过人工引雷的方式对LEMP的毁伤效应进行了一系列研究,并得到了一些由LEMP在架空电力线上感应产生的电压波形和数据^[1],但没有关于LEMP对雷击点附近电子设备毁伤效应的直接报道,也没有关于地面附近电缆感应电压的测量结果。随着信息时代的到来,信息设备的微电子化、高度集成化使之对雷电电磁脉冲(LEMP)的干扰与毁伤效应越来越敏感,由雷电放电产生的电磁脉冲效应而导致设备与系统蒙受损失的事件大量增加,且危及范围越来越大。因此,LEMP对微电子设备的毁伤效应研究日趋重要。本文在有关LEMP近场计算方法、雷电回击模型最新研究成果的基础上,研究LEMP对通信车天线的耦合效应,为通信车雷电电磁脉冲防护提供相关理论依据。

关键词:雷电电磁脉冲 天线 耦合效应 感应电压

1. 引言

进入21世纪以来,全球范围内自然和人为的各类重大突发公共事件频繁发生,给经济发展造成直接影响,也给环境和社会造成长远的、多方面影响,同时向各区政府的应急管理提出挑战。目前我国应急管理的重点是大力推进防灾减灾相关部门的联动工作机制,明确要求各级部门建立抗灾应急联动协调机制。落实上述工作机制,建立稳定、可靠、高效的应急通信系统是必不可少的。应急通信车是应急通信系统的核心组成部分,作为现场通信指挥系统,可以为抢险救灾现场指挥提供了一个多功能的指挥调度平台,并及时将现场采集信息回传到指挥中心,方便指挥中心领导指挥。因此,要确保应急通信系统的可靠工作,更好地为抢险救灾及突发事件处置提供可靠的通信保障,必须在系统设计和集成工程中对应急通信车安全防护予以高度重视,并采取切实可靠的技术措施加强防护。

因此,要确保应急通信系统的可靠工作,更好地为抢险救灾及突发事件处置提供可靠的通信保障,必须在系统设计和集成工程中对应急通信车安全防护予以高度重视,并采取切实可靠的技术措施加强防护。通信车的安全防护主要包括防震安全、电气安全、防雷安全、电磁安全、消防安全等几方面的防护,防雷安全和电磁安全是系统安全防护的重点。随着现代化的推进,通信车内加装的敏感电子设备越来越多。当发生雷击时,强大的雷电流及其所产生的空间电磁脉冲能够通过传导、感应和耦合等方式在通信车的电子系统中产生过电压,当暂态过电压沿电源线或信号线等线路传输时,就形成了过电压波。这些暂态过电压和过电压波对电子系统的安全运行颇具危害,轻则造成通信出错、通信中断,重则造成设备和线缆直接损坏,整个通信系统瘫痪,造成严重的后果。

LEMP对电子设备的毁伤作用主要通过两个途径:一是通过电线电缆的耦合作用在终端产生过电压、过电流,从而毁伤设备;另一方面直接在未屏蔽的电器、电子设备上产生过电压、过电流。由于LEMP以第一种途径的毁伤作用更常见、更严重,因此国内外雷电研究者更注重于LEMP对架空电线、电缆的耦合效应研究。如在美国的佛罗里达国际雷电研究测试中心和肯尼迪太空中心有固定的人工引雷基地,并有专门研究LEMP效应的实验设备。20世纪80年代以来,他们通过人工引雷的方式对LEMP的毁伤效应进行了一系列研究,并得到了一些由LEMP在架空电力线上感应产生的电压波形和数据^[1],但没有关于LEMP对雷击点附近电子设备毁伤

效应的直接报道，也没有关于地面附近电缆感应电压的测量结果。

2、雷电通道附近电磁场的分布

国内外对于雷电通道周围电磁场的分析已经比较成熟，将雷电放电通道简化为竖直线天线模型。视地面为理想导体，通过镜像电流与实际通道电流产生的电磁场的叠加。获得任意空间点的电磁场。在柱坐标系下，根据偶极子理论，从Maxwell方程可以导出空间任意点P的垂直及水平电场强度及磁场强度表达式^[2]：

$$E_r(z, r, t) = \frac{Z_0}{4\pi\epsilon_0\cdot H} \int_0^H \frac{3r(z-z')}{R^5} i(z', t - R/c) dt + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i(z', t - R/c) + \frac{r(z-z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz \quad (2-1)$$

$$E_z(z, r, t) = \frac{Z_0}{4\pi\epsilon_0\cdot H} \int_0^H \frac{2(z-z')-r^2}{R^5} i(z', t - R/c) dt + \frac{2(z-z')-r^2}{cR^4} i(z', t - R/c) + \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz \quad (2-1)$$

$$B_\Phi(r, z, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} \right] \quad (2-3)$$

式中，其中 B_Φ 表示磁感应强度， $B_\Phi = \mu_0 H_\Phi$ ， μ_0 为自由空间的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^7$ H/m。 r_0 和 r 分别为径向坐标、方位角和轴向坐标； R 是电流偶极子到场点的距离，对于通道实际电流和镜像电流，分别对应图中的 R 和 R_0 ； ϵ_0 、 μ_0 和 c 分别为真空电导率、磁导率及光速； z' 表示雷电电流元的坐标。（2-1）和（2-2）右边第一项为静电场，第二项为感应场或中间场，第三项为辐射场或远场区；（2-3）式右边第一项为感应场，第二项为辐射场。

3、天线雷电磁脉冲入侵耦合

感应雷在各种耦合途径中的耦合量级的确定，对于感应雷的防护设计是至关重要的。根据各端口上的耦合电压和短路电流可以确定该端口的雷电防护量级。下面针对通信车天线的电磁脉冲耦合途径进行具体分析和计算。受到雷电电磁脉冲辐射场作用的柱状体，包括鞭状短天线、金属引线、接插件等，当其尺寸远远小于雷电电磁脉冲上限频率分量的波长，可按单极子或偶极子天线作近似分析。电子、电气设备中由金属导体构成的环路，包括印制板中的回路在内，当其环路尺寸远远小于电磁脉冲上限频率分量的波长时，可按磁偶极子天线作近似分析^[3]。通信车顶部安装的天线一般为偶极子天线，长度一般为几米，由于雷电磁场的频率主要集中在1MHz以下^[4]，车顶天线的长度小于最高频率对应波长的1/4，属于电小性的导体。假定半长度为 a 的偶极子天线被垂直放在车顶，如图2.1(a)所示，图2.1(b)中即为偶极子天线的等效电路^[3]。图中偶极子天线的长度为 $2a$ ，天线半径为 a ；入射电磁脉冲电场强度为 $E(h, t)$ ，电场 $E(h, t)$ 和天线的夹角为 θ ； $V_s(t)$ 为等效电路的源电压，它等于天线的开路电压 $V_{ao}(t)$ ； Z_L 为负载阻抗。 Z_A 为天线输入阻抗。 Z_A 近似为

$$Z_A \approx \frac{1}{j\omega C_a} \quad (3-1)$$

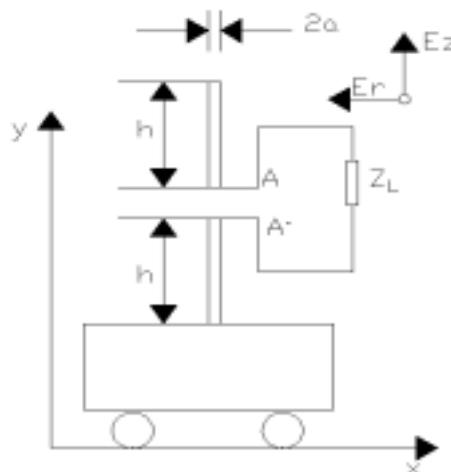


图3.1 (a) 通信车顶偶极子天线

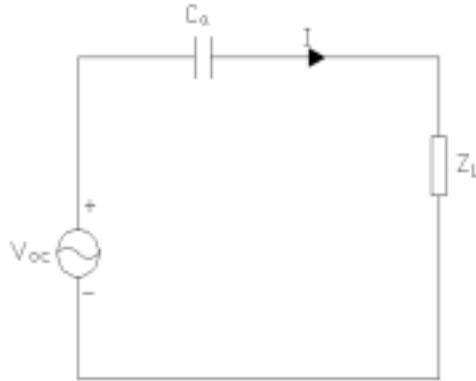


图3.1 (b) 偶极子天线等效电路

假如入射雷电电磁场的电场方向与偶极子轴线的夹角为 θ ，通信车天线上耦合的感应电压即为单个偶极子在对应高度上电场对于天线的积分。则感应上的等效开路电压源 V_{oc} 为

$$V_{oc}(t) = \int_{h_0}^{h_0 + h_c} E(h, t) \cos \theta dh = \int_{h_0}^{h_0 + h_c} E_z(h, t) dh \quad (3-2)$$

式中 h 偶极子的半长度， $E(h, t)$ 是在高度 h 处随时间变化的入射电场强度，由于水平电场对应的耦合为0，则只需要计算垂直电场所产生的耦合电压， $E_z(h, t)$ 是在高度 h 处随时间变化的入射垂直电场强度。等效电路中的 C_a 是偶极子的直流电容，它可用下式计算：

$$C_a = \frac{l}{c Z_0} \quad (F) \quad (3-3)$$

式中 c 为光速， $c = 3 \times 10^8$ (m/s)

$$Z_0 = 60[2 \ln(2l/a) - a] \quad (\Omega) \quad (3-4)$$

式中 a 为偶极子天线的半径。描述等效电路的微分方程为

$$\frac{1}{C_a} \int I(t) + Z_L I(t) = V_{oc} \quad (3-5)$$

天馈线所接负载 Z_L 正常工作时远大于天线的容抗 C_a ，电压 V_{oc} 几乎全部加到负载 Z_L 的两端，将会损坏负载或者影响其正常工作，所以要采用浪涌保护器对其进行保护。浪涌保护器在发生雷击工作时，其电阻将变得很小，负载几乎被其短路，负载上流过电流将很小，耦合电压很低，从而得到保护。

当负载被浪涌保护器短路时，浪涌保护器上的短路电流 I_{sc} 为

$$I_{sc} = C_a \frac{d \int_{h_0}^{h_0 + h_c} E_z(h, t) dh}{dt} \quad (3-6)$$

通信车上常用的天线有短波天线和超短波天线，由于短波天线的有效架高高度比超短波大，所以这里以短波天线作为例子进行计算。通信车顶部一般架设避雷针做直击雷防护，当雷电击中避雷针或者击在通信车周围时，雷击点距离通信车越近，产生的雷电磁脉冲在天线上产生的感应过电压越大。本文计算雷击点距离通信车10m时雷电磁脉冲在天线上产生的感应电压，根据IEEE推荐的雷电流幅值的概率曲线，可以发现，雷电流幅值发生在50KA以内的概率占了总体概率的60%以上^{[7][8]}，为了使计算具有普遍性，本文选取雷电流的幅值 $I_0 = 50KA$ ，假设车顶距离地面高度为3.5m，天线高度为 $h_c = 6m$ ，雷击点距离通信车距离为10m，即 $r = 10m$ ，天线半径 $a = 0.015m$ 。利用GB—50343中推荐的Heidler模型^[5]和改进传输线模型建立的雷电流模型^[6]，国际电工委员会(IEC)在其1995年的文件IEC1312—1中，明确规定了供分析用的雷电流解析表达式：

$$i(0, t) = \left(\frac{I_0}{\eta} \right) [k_s^n / (1 + k_s^n)] \exp(-t/\tau_2) \quad (3-7)$$

式中： I_0 —峰值电流； η —峰值电流修正因子(在 $n \phi \approx 1$ 、 $\tau_2 / \tau_1 \phi \approx 1$ 时, 取 $\eta \approx 1$)， $k_s^n = t/\tau_1$ ， $n = 10$ 。这是基于霍得勒 (Heidler) 模型和传输线模型提出的, 适用于首次雷击和后续雷击。雷电流回击通道的传播速度为 $v = 1.3 \times 10^8$ (m/s), 衰减常数 $\alpha = 0.6$, 分别代入公式(1-2)计算出垂直电场 E_z , 如图 3.2 所示, 再将求得的电场 E_z 分别代入式(3-2)和式(3-6)得到开路电压 $V_{oc}(t)$ 和短路电流 I_{sc} , 如图 3.3(a)和(b)所示。

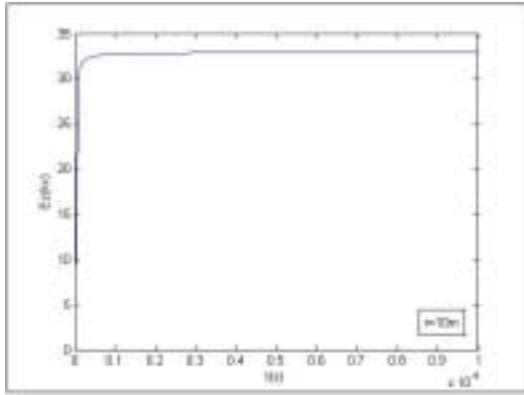


图3.2 距离通信车10m处垂直电场 E_z

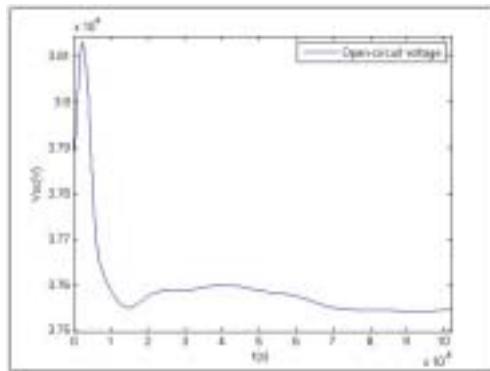


图3.3(a) 天线上耦合的电压 $V_{oc}(t)$

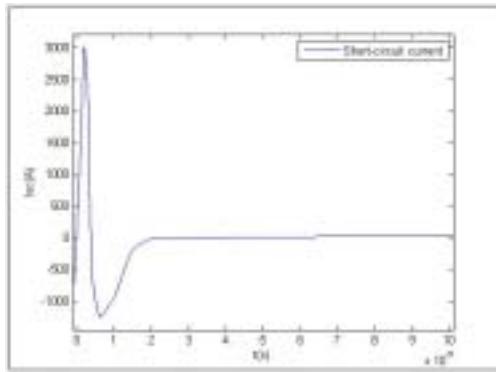


图3.3(b) 天线上短路电流 I_{sc}

4、 结论

本文在有关LEMP近场计算方法、雷电回击模型研究成果的基础上,研究LEMP对地面通信车天线的耦合模型,对通信车天线上由LEMP感应产生的电压和电流峰值进行了数值计算和相应分析,根据仿真图可以得到通信车天线上雷电电磁脉冲感应耦合电压和电流的大致数量级,根据耦合电压和电流的具体数量级,在进行天馈避雷器的具体型号选取上可以有一个较为可靠的依据。结果表明距雷击点几十米左右的通信车,LEMP可在其外导体即天线上感应产生几万伏到几十万伏的电压,以及几千安的电流,在天线连接的导体终端上大部分都是耐压只有几伏的微电子设备,如此大的感应电压及电流将会对通信车内部的微电子设备造成严重的损伤。在实际情况中,雷击在通信车车体上的概率远小于雷击在通信车周围的地面,因此我们在实际情况中,对通信车LEMP的防护应给予足够的重视。

参考文献:

- [1] Rubinstein M. Tzeng A Y. Uman M A *An Experimental Test of a Theory of Lightning -induced Voltages on an Overhead Wire* 1989(04)
- [2] GERHARD DI ENDORFER *Induced Voltage on an Overhead Line Due to Nearby Lightning* 1990
- [3] 周壁华 陈彬 石立华 电磁脉冲及其工程防护 2003
- [4] 杨金夕 钱俞寿 雷击电磁脉冲频谱的FFT分析 2005
- [5] Heidler F. *Trvaling current source model for LEMP calcuation[C]*. Proc. 6th Int. Zurich Symp. Tech. Exhib. Electromagn. Compat., Zurich, 1985: 157~162.
- [6] GB50343-2004 建筑物电子信息系统防雷技术规范 2004
- [7] “*Lightning and Insulator Subcommittee of the T &D Committee . Parameters of lightning strokes : a review [J]*” . IEEE Transactions on Power Delivery , 2005 , 20 (1) : 3462358.
- [8] “*Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE working report : Estimating lightning performance of transmission lines -updates to analytical models [J]*” . IEEE Transactions on Power Delivery , 1993 , 8(3) : 125421267.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>