

雷电电磁脉冲场对多芯线的耦合效应研究

王 浩, 陈亚洲, 万浩江, 王晓嘉

(军械工程学院静电与电磁防护研究所, 河北石家庄 050003)

摘要:为研究多芯线短线缆在雷电电磁脉冲场辐照下终端负载的感应电压,利用 WU-800 型 MARX 源和有界波模拟器来模拟雷电电磁脉冲场,对多芯线进行辐照耦合试验。试验中通过改变试验条件,得到了不同雷电电磁脉冲波形、多芯线长度、辐射场与线缆夹角、线缆终端负载条件下多芯线终端负载的感应电压的变化规律。试验发现:雷电电磁脉冲的上升沿对线缆耦合电压幅值影响较大,脉宽对耦合电压影响较小;线缆长度对感应电压的幅值及响应频点有重要影响;电场极化方向对线缆终端响应幅值有较大影响,但并不改变响应波形;随着受测端负载阻值的增加,线缆感应电压也逐步增大,非受测端负载对线缆感应电压无影响。

关键词:电磁学;雷电电磁脉冲;多芯线;有界波模拟器;耦合电压;终端负载

中图分类号:O441 **文献标志码:**A

Study on coupling effect between lightning electromagnetic field and unshielded multi-core cable

WANG Hao, CHEN Yazhou, WAN Haojiang, WANG Xiaojia

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

Abstract: In order to investigate the terminating load voltage of the unshielded multi-core cable coupled with lightning electromagnetic pulse (LEMP), we simulate LEMP within the bounded-wave transmission line which is input with a lightning surge signal produced by WU-800-type MARX generator and conduct the relevant experiments towards multi-core cable lines radiated by LEMP. We can get the respond laws of induced voltage of the load by changing the length of unshielded multi-core cable, angles between LEMP and cable, waveforms of LEMP as well as cable terminal loads including linear and non-linear loads. Results show that the amplitude of induced voltage is mainly determined by rising part of electromagnetic field waveforms and the pulse width has little effect on the induced voltage. The respond amplitude and the respond frequency are obviously affected by the length of cable. The polarization direction of the electric field has a great impact on the amplitude of terminal response, but it does not change the waveforms of the induced voltage. With the termination of test side increasing, the induced voltage is gradually increased, but the load in the other side has no effect on the induced voltage.

Keywords: electromagnetism; lightning electromagnetic pulse; unshielded multi-core cable; bound-wave simulator; coupling voltage; terminating load

收稿日期:2014-11-02;修回日期:2014-12-16;责任编辑:陈书欣

基金项目:国家自然科学基金(51377171)

作者简介:王 浩(1990—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事雷电电磁防护技术与测试方面的研究。

通讯作者:陈亚洲教授。E-mail: chen_yazhou@sina.com

王 浩,陈亚洲,万浩江,等.雷电电磁脉冲场对多芯线的耦合效应研究[J].河北科技大学学报,2015,36(2):163-169.

WANG Hao, CHEN Yazhou, WAN Haojiang, et al. Study on coupling effect between lightning electromagnetic field and unshielded multi-core cable[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(2): 163-169.

雷电是自然界中发生频率较高的一种大规模静电放电现象,同时是一种典型的天然强电磁危害源,发生闪击时,闪电回击通道中的电压可高达几百万伏,电流可高达几十万安培,会在闪电通道周围产生强大的电磁辐射效应,对电子电气设备构成了严重的威胁^[1-3]。1941年,BRUCE和GOLDE提出闪电电流的双指数模型,后人在此基础上进行了更加深入的研究,先后提出了TL(transmission line),MTLE(modified transmission line exponential),MTLL(modified transmission line linear),TCS(travelling current source)以及DU(Diendorfer-Uman)等雷电回击电流模型。与此同时,国内外研究者对雷电回击速度、回击通道高度以及传播环境对雷电电磁脉冲的分布影响进行了大量的实际测试工作,得到了许多宝贵的数据。根据这些测量数据,研究者对雷电回击以及雷电电磁脉冲场的传播进行了广泛的理论研究^[4-6]。

而雷电造成的灾害可以分为两大类,一类是由于雷电的直接效应造成的,另一类是由于二次雷击效应或者说感应雷造成的,也叫雷电的间接效应。而线缆是电子设备LEMP耦合的主要途径之一,目前对雷电电磁场与线缆的耦合研究主要集中于架空输电线和通信线缆以及埋地线缆的长距离耦合或者是雷击近点线缆的感应过电压^[7-11],而对于短线缆的雷电电磁脉冲远场耦合效应的研究还比较少。

在信息时代,多芯线在工程上具有广泛应用,具有很高的研究价值^[12-14]。本文利用室外雷电电磁脉冲场有界波模拟器,对多芯线短线缆进行辐照,模拟雷电电磁脉冲远场对线缆的耦合效应,得到雷电电磁脉冲波形的改变以及多芯线的线缆长度、极化角度及终端负载改变对线缆终端响应的规律,对雷电电磁脉冲防护工作的研究具有一定参考意义。

1 试验平台

1.1 试验设备介绍

试验装置选用大型有界波模拟器来产生雷电电磁脉冲场。有界波模拟器的典型结构如图1所示,主要包括脉冲源、前过渡段、传输线、后过渡段和终端负载等几部分。试验中选取WU-800型MARX源和雷电电磁脉冲源作为脉冲源,脉冲源输出电压最高可达800 kV,且通过调节脉冲源前端负载及终端负载可输出不同雷电脉冲波形。输出波形的脉冲前沿时间为0.5,1.2,1.5,2,3,8,10,20 μs 可调,脉冲半波宽度为20,50,100,200,250,500 μs 可调。对于有界波模拟器,在工作区间内,可视为均匀场,且当脉冲源频率 $f \leq 1$ MHz时,有界波模拟器不按传输线理论分析,其场强可以按 $E = K \cdot U/d$ 计算,当所加激励源的脉冲上升时间大于1 μs 时,传输系数 $K=1$,即认为有界波模拟器可以对雷电电磁脉冲进行无损耗的传输^[15-18]。

1.2 试验方法

试验过程中将选用5.4 m五芯线缆垂直放入有界波模拟器工作区,选择其中2根作为试验对象,一端接50 Ω 屏蔽式负载,另一端连接50 Ω 通过式负载,其余3根芯线两端悬空,等效于连接大电阻。通过式负载之后通过30 dB衰减器连接光电设备与示波器连接,其中光电转化的特性阻抗为50 Ω 。为方便表示,定义连接光电设备的一端负载为受测端负载,另一端负载为非受测端负载。然后通过改变雷电电磁脉冲场波形、线缆长度、摆放角度以及负载等条件,分别触发5次取平均值,得到多芯线受测端负载感应电压对雷电电磁脉冲的响应。

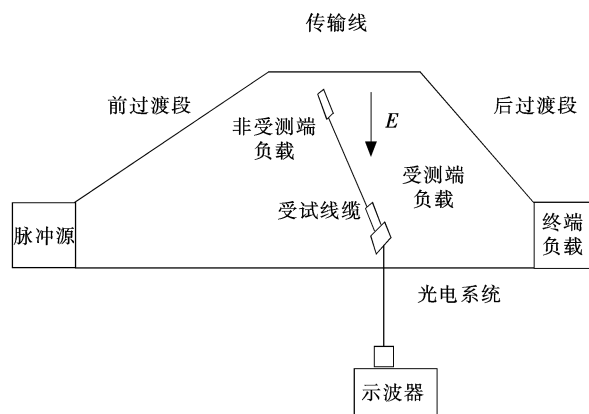


图1 电缆耦合试验系统

2 雷电电磁脉冲场波形对线缆感应电压的影响

Fig.1 Test configuration for cable coupling studies

由于雷电电磁脉冲函数并不是完全确定的,标准雷电电磁脉冲只是对雷电的一种近似描述,所以国际电工委员会规定:雷电波的上升时间可有30%的误差,半峰值时间可有20%的误差^[19]。在试验中调节MARX源的前端负载和终端负载,可以得到1.5/20,8/50,8/20,2/100,3/200,20/250,10/200,20/200 μs 8种雷电电磁脉冲模型。设定触发电压为25 kV,图2所示分压比为4170/1的分压器分压经20 dB衰减后得到的输出波形。输出波形通过有界波模拟器的无损耗传输,可在工作区间得到场强 $E = K \cdot U/d = 25 \text{ kV}/6 \text{ m} = 4.2 \text{ kV/m}$ 的平面波均匀场。

图 3 所示为 5.4 m 多芯线在 10/200 μs 模型雷电电磁脉冲场场强为 4.2 kV/m 辐照条件下,经 30 dB 衰减后,线缆终端负载的感应电压波形。触发电平不变,改变 MARX 源输出波形可发现线缆终端负载的响应波形并未发生明显改变,但感应电压(峰-峰值)产生变化,如表 1 所示。

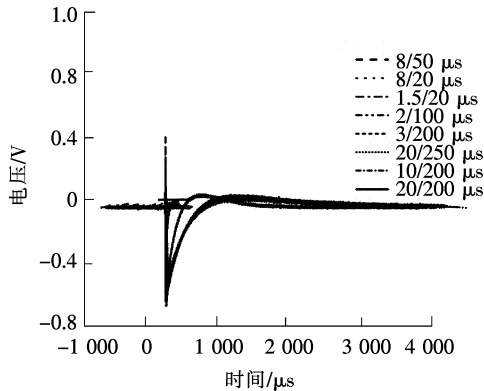


图 2 MARX 源可调雷电电磁脉冲波形
Fig. 2 Waveform of lightning electromagnetic pulse regulated by MARX generator

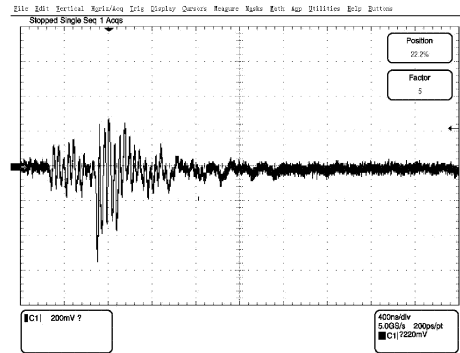


图 3 线缆感应电压波形
Fig. 3 Induced voltage waveform of unshielded multi-core cable

表 1 不同波形下线缆终端负载感应电压(峰-峰值)
Tab. 1 Peak-peak induced voltage of cable terminal load under different waveforms

输出场波形/ μs	前端负载/ Ω	终端负载/ $\text{k}\Omega$	感应电压(峰-峰值)/V
1.5/20	500	0.4	1.62
1.2/50	500	2	1.60
2/100	500	5.3	1.64
3/200	500	30.7	1.59
10/200	3 000	30.7	0.83
8/20	5 000	0.4	0.84
8/50	5 000	2	0.86
20/200	5 000	30.7	0.79

由表 1 可得,输出场波形的上升沿对线缆的感应电压影响较大,上升沿越快,线缆感应电压越大,而脉宽对线缆感应电压影响较小。这是因为雷电电磁脉冲的高频成分主要由上升沿决定,而脉宽或下降沿决定低频成分。脉冲上升沿越快,高频成分就越多,与线缆的谐振点越接近,耦合进线缆的能量就越大,导致线缆的感应电压越大。

图 4 所示为 10/200 μs 雷电电磁脉冲近似输出波形,在本次试验中选定以该波形为主要试验波形。下文如不特别指出,则默认有界波模拟器工作区间的场为 10/200 μs 雷电电磁脉冲波形所产生的辐射场。

3 电场入射方向对感应电压的影响

极化方向是影响线缆感应电压的重要因素,在试验中设线缆与电场方向平行时夹角 γ 为 0° ,电场方向与线缆方向垂直时夹角 γ 为 90° ,改变线缆与电场方向的夹角,其余试验条件不变,分别取 γ 为 $0^\circ, 22^\circ, 34^\circ, 48^\circ, 68^\circ$ 及 90° 时线缆终端负载处感应电压,如图 5 所示。

从图 5 中可以发现,当线缆方向与电场方向夹角 γ 为 0° 即平行时,线缆终端负载处感应电压最大,而随着线缆方向与电场方向角度 γ 的增大,线缆终端负载处感

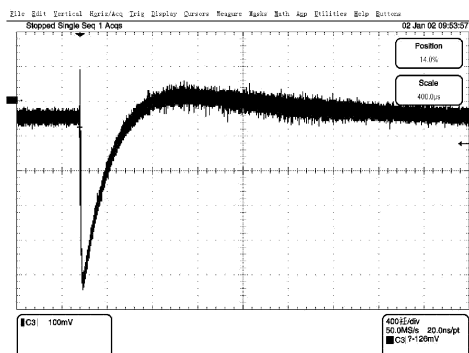


图 4 10/200 μs 雷电电磁脉冲波形
Fig. 4 Lightning electromagnetic pulse waveform of 10/200 μs model

应电压(峰-峰值)也随之降低,直至夹角 γ 为 90° 时,感应电压最小。线缆在电场中的感应电压大小为 $U = E \cdot l \cdot \cos \gamma$, 随着夹角的增大,电场在线缆方向的分量逐渐缩小,从而耦合到线缆上的能量降低,驱动电压变小,导致感应电压逐步降低。当线缆方向与场方向垂直时,理论上线缆的感应电压为 0,但有界波模拟器内的电场方向并不是完全垂直,也存在一定的水平分量,同时由于试验噪声的存在,导致线缆与电场方向垂直时负载处依然存在感应电压。同时发现随着感应电压的减小,线缆衰减振荡的波形及脉宽并没有变化,即线缆极化方向对终端负载电压只影响幅值大小,并不影响频域变化。

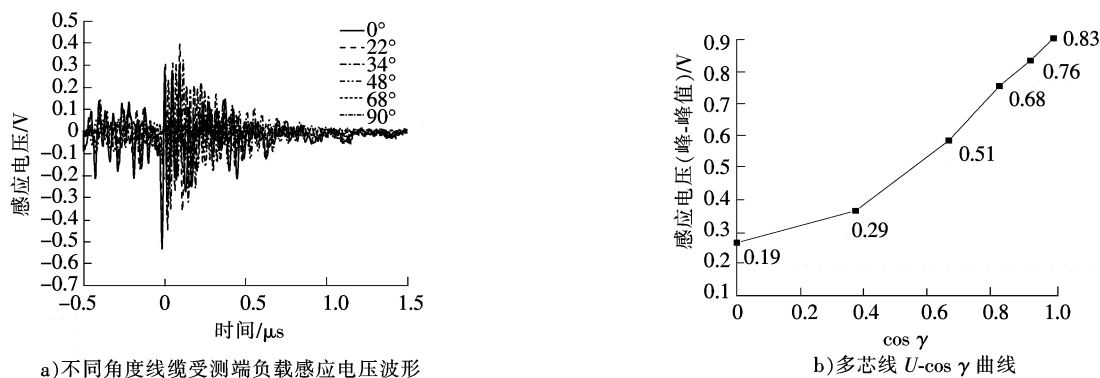


图5 不同角度时线缆受测端负载感应电压

Fig. 5 Induced voltage of the terminating load of multi-core cable at different angles

4 线缆长度对终端负载感应电压的影响

互联系统中受试线缆的长度决定了电磁辐照效应的选频特性,是决定终端负载响应的重要因素之一。在试验中,分别取 1.2, 2.4, 5.4, 10.8 及 21.6 m 多芯线进行测试,由于试验场地的限制,10.8 m 多芯线及 21.6 m 多芯线与电场的夹角分别呈 45° 及 30° ,其余条件不变,得到不同长度多芯线在 $10/200 \mu\text{s}$ 模型雷电电磁脉冲场辐照下的感应电压,结果如图 6 所示。

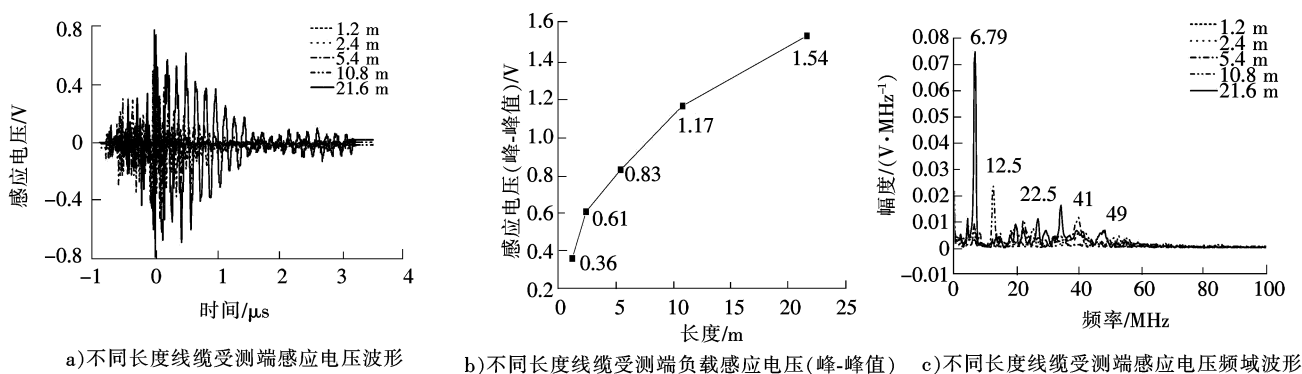


图6 不同长度线缆受测端负载感应电压

Fig. 6 Induced voltage of the terminating load of multi-core cable with different length

由图 6 可知,随着线缆长度的变大,终端负载处的感应电压的脉宽及幅值也随之增大,对终端负载处感应电压做傅里叶变换,发现感应的主频降低,但幅值变大。这是因为对于线缆的频域峰值响应频点为 $f = n \cdot c / 2L$, 式中 c 为真空光速, L 为线缆长度, n 为自然数。当 $n=1$ 时, 6.79, 12.5, 22.5, 41 及 49 MHz 所对应的线缆长度分别为 22, 12, 6.6, 3.7 及 3 m, 与受试线缆长度基本一致。而产生偏差的原因是由于试验条件与理想试验条件存在一定差距,同时傅里叶变换过程是离散的,导致提取感应理想峰值频点时存在一定误差。对于试验选取的 $10/200 \mu\text{s}$ 雷电电磁脉冲的主频在 30 kHz 之内,其波长为 $\lambda = c/f \geq 10 \text{ km} \gg 21.6 \text{ m}$, 此时的场线耦合可以视为闭合回路耦合^[20],随着线缆长度的增加,闭合回路的面积不断变大,导致耦合能量不断增强,从而导致终端负载处的感应电压逐渐变大。 $10/200 \mu\text{s}$ 雷电电磁脉冲频谱如图 7 所示。

5 负载变化对耦合电压的影响

不同的终端负载对线缆终端处负载上的耦合电压也会有影响。实际运用中,一般更关心的就是终端设备上的耦合电压,因此研究负载变化对于研究雷电电磁脉冲对线缆的辐照感应电压的影响具有重要意义。

5.1 受测端负载对耦合电压的影响

为得到线缆不同终端负载情况下的感应电压,分别在受测端连接 10, 25, 50, 80, 100, 220, 300, 470, 680, 1 200 Ω 通过式负载,由于光电的特性阻抗为 50 Ω,因此,线缆的受测端连接负载阻值分别为 8, 17, 25, 31, 33, 41, 43, 45, 47, 48 Ω,然后连接输入内阻为 1 MΩ 的示波器。线缆终端负载处的感应电压如图 8 所示。

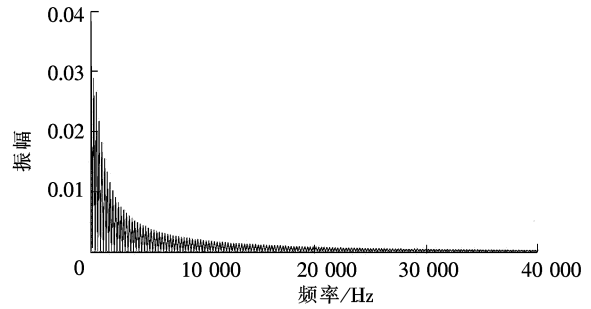


图 7 10/200 μs 雷电电磁脉冲频谱
Fig. 7 Frequency spectrum of lightning electromagnetic pulse with 10/200 μs waveform

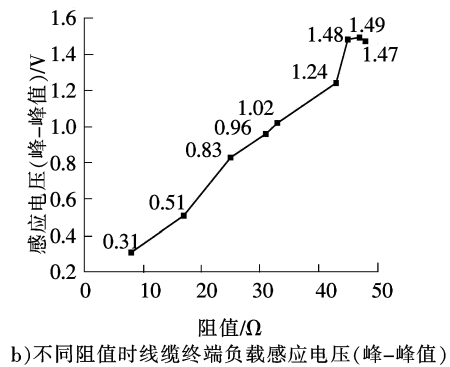
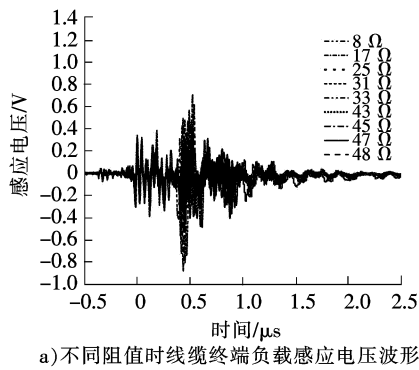


图 8 不同阻值时线缆受测端负载感应电压

Fig. 8 Induced voltage of the terminating load of the cable with different value of resistance

从图 8 可以发现,线缆终端负载处的感应电压随着受测端负载阻值的增加而增大,且增大的趋势并未出现明显变化。同时,随着感应电压幅值的增大,感应电压的波形并没有发生变化,说明终端负载的变化并没有改变线缆感应电压的频谱分布。

5.2 非受测端负载对耦合电压的影响

试验条件不变,在线缆受测端连接 50 Ω 通过式负载,通过 30 dB 衰减器连接光电设备与示波器。在非受测端,分别连接 50, 80, 100, 200, 300, 1 000 Ω 屏蔽式负载,观察示波器,得到非受测端负载变化时线缆受测端负载感应电压,如图 9 所示,表 2 所示为感应电压(峰-峰值)。

表 2 非受测端负载改变时线缆受测端感应电压(峰-峰值)

Tab. 2 Peak-peak induced voltage change of cable terminal load under test with different value of terminal load not under test

非受测端电阻/Ω	感应电压(峰-峰值)/V
50	0.83
80	0.81
100	0.75
200	0.75
300	0.78
500	0.74
1 000	0.81

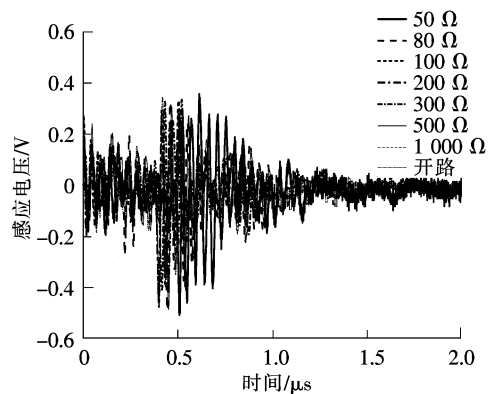


图 9 非受测端负载改变时线缆受测端负载感应电压
Fig. 9 Induced voltage change of terminals load under test with different value of terminal load not under test

从图9及表2可以发现当非受测端负载发生改变时,受测端负载的感应电压波形未发生变化,与受测端负载改变时测得的波形基本一致,说明非受测端负载变化并未改变受测端感应电压的频谱分布。但通过改变非受测端负载,受测端感应电压的幅值产生了不规律变化。

前文提到试验选取的10/200 μs 雷电电磁脉冲的主频在30 kHz之内,其波长为 $\lambda = c/f \geq 10 \text{ km} \gg 21.6 \text{ m}$,此时的场线耦合可以视为闭合回路耦合。此时线缆与大地构成回路,当线缆受到电磁脉冲辐照时,平行于线缆的电场与通过回路的磁场能量将耦合到线缆,耦合产生的感应电流在线缆两端来回振荡。同时等效形成沿线分布的电压源,对于多芯线端口处负载,线缆可以等效为带有一定内阻 r 的电压源 U ,如图10所示,其中 R_1 为受测端负载, R_2 为非受测端负载。根据分压原理,受测端负载 R_1 电压 $U_1 = R_1 U / (R_1 + r)$ 。

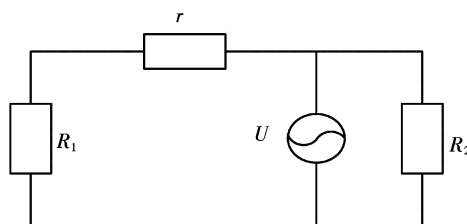


图10 辐照条件下多芯线终端负载响应等效电路
Fig. 10 Equivalent circuit of terminal load response for unshielded multi-core cable under irradiation test

在试验数据中任取2组进行计算,得到 $U = 9.3 \text{ V}$, $r = 256 \Omega$ 。将试验数据与计算值进行对比,如表3所示,发现试验值与计算值之间存在一定的差异,考虑到试验误差,结果在误差接受范围之内。因此,受测端负载处电压随着负载阻值的增加而增大,而由图10可得非受测端负载的变化对受测端负载的感应电压变化无影响,而试验过程中由于非受测端负载阻值的改变而造成受测端负载感应电压的小幅度变化可视为试验误差。

表3 终端负载感应电压计算值及差值

Tab. 3 Induced voltage calculation values and differential values of multi-core cable terminal load under test

受测端负载/ Ω	终端负载感应电压峰-峰值		相对误差/ $\%$
	实测值/V	计算值/V	
8	0.31	0.29	6
17	0.51	0.57	11.7
25	0.83	0.84	1.6
31	0.96	1	4.2
33	1.02	1.26	4.4
43	1.24	1.34	8.3
45	1.48	1.39	6.1
47	1.49	1.44	3.2
48	1.47	1.47	0.2

6 结 语

利用以WU-800型MARX源和雷电电磁脉冲源作为脉冲源的有界波模拟器,进行了雷电电磁脉冲场对多芯线短线缆的辐照试验,尝试模拟了雷电电磁脉冲远场部分对线缆的耦合效应。试验中通过改变雷电电磁脉冲场波形、线缆长度、线缆与电场夹角及线缆终端负载等条件得到了在不同条件下受测端负载处的感应电压,为下一步研究雷电电磁脉冲远场对多芯线缆的耦合作用奠定了一定的试验基础。经过分析,得到了以下结论。

1) 雷电电磁脉冲场波形上升沿越快,高频分量越多,多芯线终端负载的感应电压越大,而场波形的脉宽对终端负载的感应电压基本无影响。

2) 多芯线终端负载感应电压幅值随着线缆与电场方向夹角的增大而变小,但感应电压的频谱分布并不发生变化。

3) 当线长 $L \ll$ 波长 λ 时,辐射场对多芯线的耦合可以看作闭合回路耦合,线缆终端负载的感应电压随着线缆长度的增加而变大,且线缆长度具有选频特性,随着线缆的增大其感应的主频点也随之降低,为 $f = c/2L$ 。

4) 当多芯线两端连接线性负载时,线缆对受测端负载可等效为一含内阻的电压源,受测端负载电压随 R

的增加而增大,与内阻进行分压;而非受测端负载的改变对受测端负载感应电压无影响;且当多芯线两端负载线性变化时并没有影响受测端负载感应电压的频谱分布。

参考文献/References:

- [1] 郑生全,侯冬云,李迎,等.舰船系统的雷电防护设计[J].河北科技大学学报,2011,32(sup):178-182.
ZHENG Shengquan, HOU Dongyun, LI Ying, et al. Threatens of ship-flat electromagnetic pulse and its protection requirements[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(sup):178-182.
- [2] 夏云峰,夏文文,范松海.冲击电压下特高压支柱绝缘子表面电场研究[J].河北工业科技,2012,29(6):347-351.
XIA Yunfeng, XIA Wenwen, FAN Songhai. Research on the exterior electric field of the ultra-high voltage post insulator under impulse voltage[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2012, 29(6): 347-351.
- [3] 唐克,谢保军.野战指挥车的雷电防护研究[J].河北科技大学学报,2011,32(sup):18-20.
TANG Ke, XIE Baojun. Research of lightning protection on field battle commanding car[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(sup): 18-20.
- [4] 王琳,陈亚洲,万浩江,等.雷电斜向放电通道电磁场建模及计算[J].微波学报,2012,28(2):16-21.
WANG Lin, CHEN Yazhou, WAN Haojiang, et al. Modelling and calculation of electromagnetic field of oblique discharge channel[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(2): 16-21.
- [5] 王晓嘉,陈亚洲,万浩江,等. LEMP空间表达式求解及分布规律研究[J].微波学报,2012,28(6):16-21.
WANG Xiaojia, CHEN Yazhou, WAN Haojiang, et al. Calculation of LEMP's spatial expression and research on distribution laws[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(6): 16-21.
- [6] 张其林,刘明远,杨璟,等.近距离地闪电场变化及对通道电荷密度分布的响应[J].气象学报,2012,70(4):847-854.
ZHANG Qilin, LIU Mingyuan, YANG Jing, et al. Characteristics of the close leader/return stroke electric field change and its response to the corresponding charge density along the lightning channel[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(4): 847-854.
- [7] 任合明,周璧华,余同彬,等.雷电电磁脉冲对架空电力线的耦合效应[J].强激光与粒子束,2005,17(10):1539-1543.
REN Heming, ZHOU Bihua, YU Tongbin, et al. Coupling effects of LEMP on aerial multiconductor power lines[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(10): 1539-1543.
- [8] 欧阳双,张其林,李颖,等.地表湿度导致土壤电参数变化对雷电电磁场传播的影响[J].气象科技,2012,40(6):1018-1024.
OUYANG Shuang, ZHANG Qilin, LI Ying, et al. Impact on lightning electromagnetic field propagation of soil electrical parameter variation induced by varying surface soil moisture[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(6): 1018-1024.
- [9] YANG Bo, ZHOU Bihua, CHEN Bin, et al. Numerical study of lightning-induced currents on buried cables and shield wire protection method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(2): 323-331.
- [10] REN Heming, ZHOU Bihua, RAKOV V A, et al. Analysis of lightning-induced voltages on overhead lines using a 2-D FDTD method and agrawal coupling model[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(3): 651-659.
- [11] 张其林,张源源,李东帅,等.地形地表的规则起伏对雷电电磁场传输的影响[J].气象学报,2013,71(2):357-365.
ZHANG Qilin, ZHANG Yuanyuan, LI Dongshuai, et al. Effect of irregular terrain on propagation of lightning electromagnetic field[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(2): 357-365.
- [12] 叶志红,廖成,张敏,等.基于时域BLT的多导体传输线串扰响应分析[J].强激光与粒子束,2014,26(7):1-4.
YE Zhihong, LIAO Cheng, ZHANG Min, et al. Analysis of crosstalk responses of multiconductor transmission lines based on time domain BLT equation[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2014, 26(7): 1-4.
- [13] 张玉廷,蔡智,张华.多导体传输线瞬态响应研究[J].电波科学学报,2014,29(2):377-384.
ZHANG Yuting, CAI Zhi, ZHANG Hua. Transient analysis of multiconductor transmission lines[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(2): 377-384.
- [14] 冀维林,刘仲亚,李莉.不均匀多导体传输线的瞬态分析[J].电波科学学报,2013,28(3):572-576.
JI Weilin, LIU Zhongya, LI Li. Transient analysis of nonuniform multiconductor transmission lines [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(3): 572-576.
- [15] 潘晓东,魏光辉,任新智.有界波模拟器内部电场分布仿真研究[J].测试技术学报,2007,21(5):410-413.
PAN Xiaodong, WEI Guanghui, REN Xinzhi. Simulation research on electric field distribution in bounded-wave simulator[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21(5): 410-413.
- [16] 黄志洵.平行板传输线式横电磁室及其应用技术[J].光纤与电缆及其应用技术,1991(4):6-11.
Huang Zhixun. Parallelplate transmission line TEM-cell and application [J]. Optical Fiber and Electric Cable and Their Applications, 1991(4): 6-11.
- [17] 黄志洵,贺涛.横电磁传输室和吉赫横电磁室特性阻抗的准静态分析与计算[J].计量学报,1994,15(3):167-174.
HUANG Zhixun, HE Tao. The quasi-static analysis and computation of the characteristic impedances on TEM transmission cell and gigahertz TEM cell[J]. ACTA Metrology Sinica, 1994, 15(3): 167-174.
- [18] 潘晓东,魏光辉,任新智.有界波模拟器远场辐射特性仿真研究[J].机械工程学院院报,2006,18(3):15-17.
PAN Xiaodong, WEI Guanghui, REN Xinzhi. Simulation research on far field radiation of bounded-wave simulator[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2006, 18(3): 15-17.
- [19] IEC 61000-4-5. Surge Immunity Test[S].
- [20] 谭志良.电磁脉冲防护理论及技术[M].北京:国防工业出版社,2013.
TAN Zhiliang. Electromagnetic Pulse Protection Theory and Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.