

• 电气工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202300316



本刊网刊

# 高速铁路信号设备通信接口雷击过电压损伤试验研究

王州龙<sup>1,2</sup>, 徐金鹏<sup>2,3</sup>, 靳邵云<sup>1,2</sup>, 麦瑞坤<sup>4\*</sup>

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所, 北京 100081; 2.国家铁路智能运输系统工程技术研究中心(中国铁道科学研究院集团有限公司), 北京 100081; 3.北京华铁信息技术有限公司, 北京 100081; 4.西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 本文提出一种关于高速铁路信号设备通信接口雷击过电压损伤检测及判定方法, 是对当前高速铁路信号设备通信接口雷击试验及检测方法的优化和完善。首先, 对雷电波频谱进行了分析, 确定了信号设备通信接口雷击试验波形和检测电路。然后, 选取ZPW-2000A轨道电路系统的CAN通信接口器件PCA82C250和编码读取电路的光耦TLP621-4作为试验对象, 按电压幅值由低到高分别对其进行雷电冲击试验。试验结果表明: PCA82C250横向雷电冲击损坏电压约为88 V, 纵向雷电冲击损坏电压约为48 V; 光耦采集电路中, 直接对光耦进行雷电冲击时, 雷电冲击损坏电压约为140 V; 在雷电冲击点与光耦间串入4.7 k $\Omega$ 电阻后, 雷电冲击损坏电压约为800 V, 故增加器件的输入阻抗, 可以提高耐雷电冲击水平。最后, 讨论分析了信号设备通信接口器件的雷击过电压损伤特性, 分析结果表明: 信号设备通信接口器件的雷击过电压损伤特性分为3个阶段, 即正常阶段、临界损伤阶段和损坏阶段; 信号设备通信接口器件存在冲击损坏积累效应, 当器件处于临界损伤阶段时, 仍可进行数据传输, 但输出信号与正常阶段不一致。信号设备通信接口器件雷击过电压损伤检测, 应按电压幅值由低到高进行雷电冲击试验, 以冲击时是否有击穿现象和通信线上信号电平是否发生异常作为损伤判定的基本依据, 并结合相应测试标准等, 做出科学准确的判断。

**关键词:** 高速铁路; 信号设备; 通信接口; 雷击过电压; 损伤

中图分类号: U238

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)04-0287-10

信号系统的可靠运行是保障高速铁路运营安全的重要基础<sup>[1]</sup>。随着中国高速铁路的发展, 雷害对其运营的影响也逐步凸显。雷击接触网或附近区域, 不但会引起牵引系统和轨旁信号系统故障<sup>[2-4]</sup>, 雷击电磁脉冲还会感应到敷设于高架桥的信号电缆, 耦合出很高的瞬态过电压传导到信号设备接口<sup>[5]</sup>, 造成接口过电压损坏。信号设备接口过电压损坏问题也得到研究者越来越多的关注。轨道电路是整个铁路信号系统的重要组成部分<sup>[6]</sup>, 传输设备和信号电缆沿线敷设暴露于室外<sup>[7]</sup>, 其通信接口极易因雷电电磁脉冲干扰而产生故障。通过调查发现, 2016—2018年南方某路局雷击造成轨道电路故障多达几十起, 轨道电路设备中的发送器、接收器通信接口损坏最为严重。

ZPW-2000A无绝缘移频轨道电路是目前中国铁路广泛应用、具有自主知识产权的轨道电路设备, 该系统中的发送器采用“N+1”冗余结构, 接收器采用成对双机并联运用, 提高了系统可靠性。ZPW-2000A轨道电路的发送器、接收器为微电子设备, 采用大规模集成电路和通信接口芯片, 耐冲击电压水平较低<sup>[8]</sup>, 容易在雷击过电压条件下因击穿或过热导致器件受到损坏<sup>[9-10]</sup>。

在设备通信接口雷击过电压损伤试验研究方面, 张鹏等<sup>[11]</sup>分析认为总线浪涌脉冲会损坏通信接口甚至后级电路, 但是, 其提出的损伤故障原因未明确定位和试验验证; 李瑶等<sup>[12]</sup>对ARINC825总线接口芯片的损伤进行了研究, 但是, 仅对实际工况的“负脉冲”

收稿日期:2023-04-24 修回日期:2023-06-06 网络出版日期:2023-06-15

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金项目(U2268217); 中国国家铁路集团有限公司科研专项(J2022G006); 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心(中国铁道科学研究院集团有限公司)开放课题基金项目(2022YJ034&RITS2022KF09)

作者简介:王州龙(1982—), 男, 副研究员, 硕士。研究方向: 交通信息工程及控制; 过电压防护; 电磁瞬态防护。E-mail: 67836462@qq.com

\*通信作者:麦瑞坤, 教授, E-mail: mairk@swjtu.edu.cn

进行了模拟试验验证,对接口芯片的雷击过电压损伤研究不够全面。

在铁路信号设备雷击试验检测方面,李洋<sup>[13-14]</sup>对信号设备进行了模拟雷击试验,但仅参照文献<sup>[15-16]</sup>的试验方法对设备进行雷电冲击试验,即按通信接口与不同的应用环境电缆连接分为1~6级共6个试验严酷等级,分别对应不同的冲击电压幅值,选取某一等级对设备进行冲击试验,通过观察系统的反应情况,评定试验结果,判定条件按无察觉到的变化、短时状态变化、短时功能丧失等分为A、B、C 3类。信号设备的耐雷电冲击性能检测,是验证信号设备雷击过电压防护有效性的重要手段,目前存在着对防护盲区 and 冲击损坏积累效应漏检等问题。

上述对设备通信接口雷击过电压损伤试验研究,在选取试验雷击波形时,并未对雷电波频谱进行特征分析。雷电波频谱特征是雷电防护技术的重要依据,也可为电子设备的雷电冲击试验提供技术参考<sup>[17]</sup>。常见的雷电流模型有双指数函数模<sup>[18-19]</sup>、Heidler函数模型<sup>[20]</sup>、冲击函数模型<sup>[21]</sup>等。Heidler函数是一个时域函数,不存在解析傅里叶变换频谱式<sup>[22]</sup>;脉冲函数模型在模拟雷电波时,存在参数选取不直接,参数取值较大时偏差也较大的问题;双指数函数能够直接进行积分和微分,基本上能反映出雷电流的主要参数,在雷电波频谱分析中应用最广泛。

针对上述实际检测中存在的问题,本文对雷电波频谱进行了分析,搭建了信号设备通信接口雷击过电压损伤试验电路,进行了通信接口器件雷击过电压损伤特性,提出了高速铁路信号设备通信接口雷击过电压损伤检测及判定方法,为当前高速铁路信号设备通信接口雷击试验及检测方法的优化和完善提供了研究基础。

1 雷电波形选择及检测电路

从雷电的频谱结构可以获悉雷电波电压、电流的能量在各频段的分布,根据这些数据可以分析信号设备通信接口频带范围内雷电冲击的幅度和能量大小,选取试验波形,并确定检测电路。

图1为模拟电压波形示意图。图1中,  $T_1$  为波头时间,  $T_2$  为半峰值时间,  $T$  对应0.3~0.9电压幅值上升的时间。

虽然,各种雷电波总体的轮廓相似,但是,每一次雷电闪击的电流或电压波形仍然存在很大的随机性。目前,还不能将自然界的雷击进行统一的频谱分析,为了便于分析,使用式(1)的双指数函数曲线表征雷电流波形<sup>[23]</sup>。

$$i(t) = I_0 k(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})u(t) \tag{1}$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  为时间常数;  $k$  为波形校正系数;  $I_0$  为雷电

流幅值;  $u(t)$  为截断函数,限定雷电流波形的定义域范围是  $(0, +\infty)$ 。

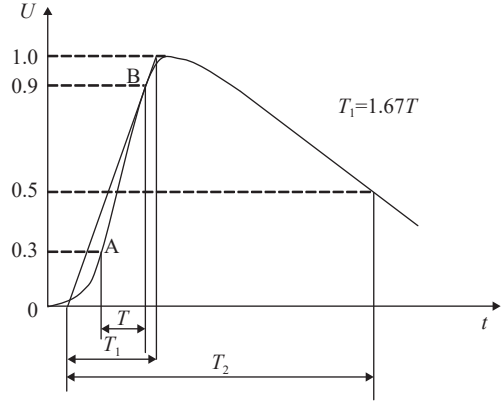


图 1 模拟电压波形示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of simulated voltage wave  
1.1 雷电波形选择

雷电波可以看成无穷多个频率连续变化的简谐波动的合成。把式(1)进行傅里叶变换,得:

$$I(j\omega) = \int_0^{+\infty} I_0 k(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})u(t)e^{-j\omega t} dt = I_0 k \left( \frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) = I_0 k \left( \frac{\alpha - j\omega}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta - j\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) = I_0 k \left[ \left( \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + j \left( \frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \tag{2}$$

式中,  $\omega$  为角频率。

将雷电波形的频谱进行归一化,得:

$$\frac{I(j\omega)}{I_0} = k \left[ \left( \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + j \left( \frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \tag{3}$$

令  $M = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2}$ 、 $N = \frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2}$ , 得到雷电流波形的幅度谱  $A(\omega)$ , 即:

$$A(\omega) = k \sqrt{M^2 + N^2} \tag{4}$$

当负载为纯电阻  $R$  时,在同一负载上,功率只与通过它的电流的平方成正比,令  $E(\omega)$  为雷电流的能量积累谱,则有:

$$E(\omega) = \int_0^{\omega} \frac{R}{\pi} |A(\omega)|^2 d\omega \tag{5}$$

将式(4)代入式(5)并积分,得:

$$E(\omega) = \frac{k^2 R}{\pi} \cdot \frac{\beta - \alpha}{(\alpha + \beta)\alpha\beta} \left( \beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta} \right) \tag{6}$$

把整个雷电波总能量规定为  $E_0$ , 其计算使用式(6)从0到 $+\infty$ 积分可得<sup>[23]</sup>,则能量比率积累的频率分布为:

$$\frac{E(\omega)}{E_0} = \frac{2}{\pi(\beta - \alpha)} \left( \beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta} \right) \tag{7}$$

《电子设备雷击试验方法》(GB/T3482—2008)中,将1.2/50  $\mu\text{s}$ 和10/700  $\mu\text{s}$ 波形用于电信线路连接设备的雷击试验,这已经被IEEE、IEC等国际组织认可。分别计算1.2/50  $\mu\text{s}$ 和10/700  $\mu\text{s}$ 雷电波相对能量累积谱,有助于分析两种波形的能量分布,从而选取出更合理的检测试验波形。

计算雷电波相对能量累积谱,需首先得到式(1)中 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $k$ 和 $I_0$ 这4个参数值,本文采用文献[23]的方程法,代入实际波形中的4个已知点,进而构建方程组进行参数求解。

经计算,1.2/50  $\mu\text{s}$ 和10/700  $\mu\text{s}$ 波形的雷电波相对能量频谱见表1,表1中的“—”表示未得到相应值。

表1 雷电波相对能量累积频谱  
Tab. 1 Relative energy accumulation spectrum of lightning waves

| 频率/Hz            | 雷电波相对能量频谱               |                         |
|------------------|-------------------------|-------------------------|
|                  | 1.2/50 $\mu\text{s}$ 波形 | 10/700 $\mu\text{s}$ 波形 |
| 1                | $4.352\times10^{-5}$    | $6.217\times10^{-4}$    |
| 100              | $4.352\times10^{-3}$    | 0.0619                  |
| $1\times10^3$    | 0.0434                  | 0.4391                  |
| $6.27\times10^3$ | —                       | 0.9000                  |
| $10\times10^3$   | 0.3823                  | 0.9964                  |
| $87.5\times10^3$ | 0.9000                  | —                       |
| $100\times10^3$  | 0.9131                  | —                       |
| $1\times10^6$    | 0.9956                  | 0.9999                  |

由表1可知:10/700  $\mu\text{s}$ 冲击波,总能量90%以上分布在6.27 kHz频率以下。而1.2/50  $\mu\text{s}$ 冲击波,总能量90%以上分布在87.5 kHz频率以下。可见这两种波形对工作在低频和直流状态的信号设备危害极大。10/700  $\mu\text{s}$ 较1.2/50  $\mu\text{s}$ 雷电波更平缓,其在低频部分有更多的能量分布。根据实测,即使陡度较高的雷电波,经信号电缆线路传输延时、衰耗,到达和线路连接的信号设备接口时波形已经变得比较平缓,因此,本文采用波头和波尾都更长的10/700  $\mu\text{s}$ 雷电波作为信号设备通信接口器件雷击过电压损伤检测的冲击波形。

1.2 检测电路

10/700  $\mu\text{s}$ 雷电波冲击电压发生器的检测电路如图2所示,图2的检测电路中接入了调波电容。该检测电路主要模拟电缆线路的传导雷,同时,还可用于考核由电缆引入信号设备接口的耐雷电冲击水平。

由图2检测电路可知:先由调压器 $T_1$ 控制高压变压器 $T_2$ 升压,再由高压变压器 $T_2$ 经过保护电阻 $R$ 限流和高压硅堆 $D$ 整流后向主电容器 $C_1$ 充电;当主电容 $C_1$ 充电到一定电压后,便可通过脉冲点火发生器向高压球隙送点火脉冲,以触发放电回路动作,从而使主电容器 $C_1$ 在放电回路中通过阻尼电阻 $R_z$ 、波头电阻 $R_t$ 、

波尾电阻 $R_f$ 以及试品放电,产生雷电波冲击电压。

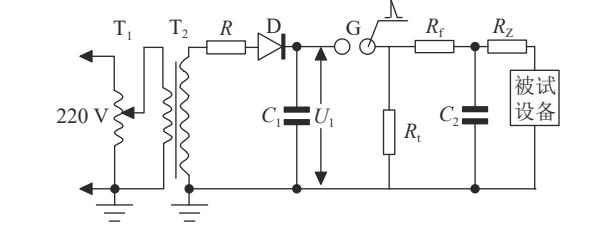


图2 雷电波冲击电压检测电路  
Fig. 2 Lightning wave surge voltage detection circuit

图2中,10/700  $\mu\text{s}$ 雷电波冲击电压发生器检测电路的主电容 $C_1=20\text{ }\mu\text{f}$ ,波前电容 $C_2=0.2\text{ }\mu\text{f}$ ,波头电阻 $R_t=50\text{ }\Omega$ ,波尾电阻 $R_f=15\text{ }\Omega$ ,阻尼电阻 $R_z=0\sim2.5\text{ }\Omega$ 。理论波头时间为 $R_tC_2=10\text{ }\mu\text{s}$ ,半峰值时间为 $0.7R_tC_1=700\text{ }\mu\text{s}$ ,信号发生器内阻为40  $\Omega$ 。

针对信号设备通信端口传输线的线—地及线—线之间采用放电管耦合方式,其作用是避免辅助供电设备及受试设备的工作电压直接施加到雷电脉冲发生器的放电回路,从而影响发生器输出波形。通信传输线端口的试验电路如图3所示。

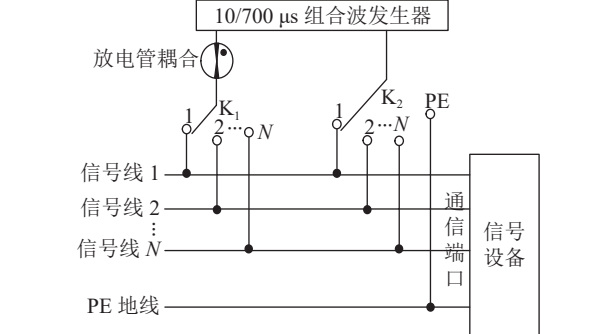


图3 通信传输线端口试验电路示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of port test circuit for communication transmission lines

2 信号设备通信接口雷击过电压损伤试验及结果分析

随着铁路各种信号设备间的数据交换传输的增加,各系统间的通信方式越来越多,各种通信接口器件得到广泛应用。信号设备通信接口在应用中雷击损坏的情况较为常见,目前在现场应用和实验室雷击试验中,以太网、485/422通信接口、CAN总线通信接口经常发生损坏,是铁路信号系统雷电防护中一个较为薄弱环节。通过对这些通信接口器件的雷击过电压损伤试验,研究其耐雷电冲击特性,可为信号设备的可靠防护提供数据支持[24]。

2.1 信号设备通信接口分析

ZPW-2000A分为主轨道电路和调谐区小轨道电路两个部分,通过编码条件控制主轨道电路的发送器产生不同频率的移频信号,载频频率为1 700、2 000、

2 300和2 600 Hz<sup>[25]</sup>。

ZPW-2000A无绝缘移频轨道电路主要的通信接口器件的接口和型号见表2,其发送器、接收器采用CAN总线通信方式,通信接口采用PCA82C250作为CAN总线收发器。

ZPW-2000A轨道电路的数据传输流程:由列控中心通过设备接口采集轨道电路状态及信号开放等条件,计算各个轨道电路区段的低频信息码;相关编码数据通过CANA、CANB通信总线送到轨道电路通信接口板进行转发,再由CAND、CANE通信总线传

送至发送器;发送器的CPU1、CPU2根据收到的载频、低频条件产生移频信号。ZPW-2000A设备的通信接口连接如图4所示。

表 2 ZPW-2000A通信接口器件

| 设备    | 接口        | 型号        |
|-------|-----------|-----------|
| 发送器   | CAN通信端口   | PCA82C250 |
| 接收器   | CAN通信端口   | PCA82C250 |
|       | 轨道继电器输出端口 | TLP621-4  |
| 通信接口板 | CAN通信端口   | PCA82C250 |

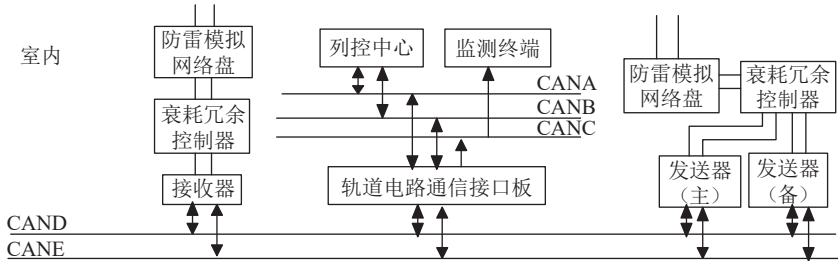


图 4 ZPW-2000A设备通信接口连接

Fig. 4 ZPW-2000A device communication interface connection

ZPW-2000A设备的通信接口中,发送器及接收器的主控芯片无法和外部物理总线直接相连,需要通过CAN通信端口芯片PCA82C250进行连接,PCA82C250是CAN协议控制器和物理总线之间的接口,也是极容易遭受雷击过电压影响的器件之一,该芯片结构如图5所示。由图5可知:CAN控制器通过

串行数据输出线TXD和串行数据输入线RXD连接到该芯片,该芯片通过有差动发送和接收功能的两个总线终端CANH和CANL连接到总线电缆,芯片的额定电源电压为直流5 V。该芯片的功能即为向总线提供差分传输能力,向CAN控制器提供差分接收能力。

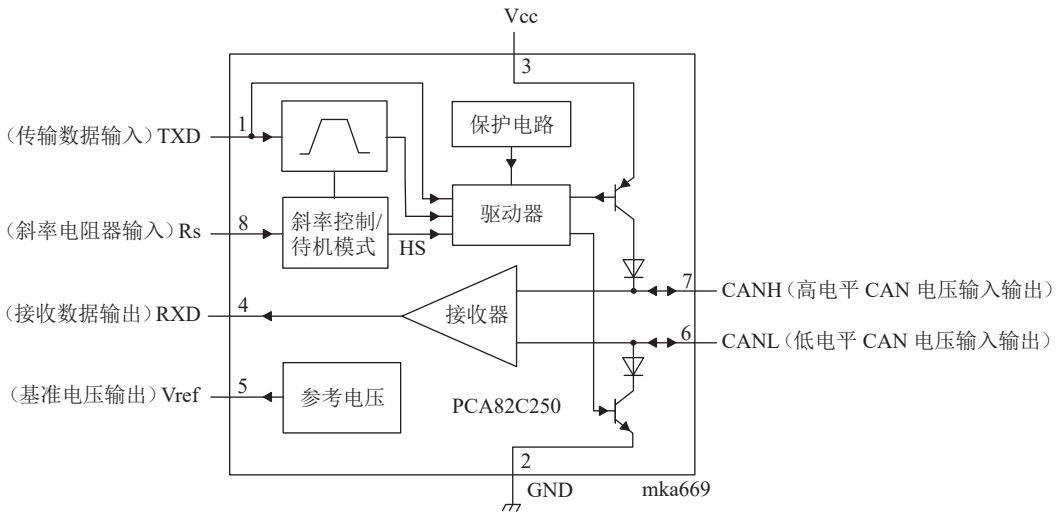


图 5 PCA82C250芯片结构

Fig. 5 PCA82C250 chip structure

ZPW-2000A设备的编码条件读取电路<sup>[26]</sup>的原理如图6所示。该电路设置了隔离器件来读取光耦和控制光耦,实现了对电路元件故障的动态检查。当任一光耦的发光源、受光器因雷击或电磁干扰发生短路或击穿等故障时,读取光耦的A点都得不到动态交流信号。光耦的型号为TLP621-4,该光耦由一个光电耦合

到砷化镓红外发射二极管的光电-晶体管组成,具有16个直插引脚,提供4路隔离通道,主要用于电路之间的信号传输,使之前端与负载完全隔离,可有效增加应用设备的安全性,减少电路干扰,简化电路设计。

由图6可知:编码条件读取电路由B点送入方波信号,当+24 V编码条件电源构成时,即可从读取光

耦的受光器A点获得与B点相位同相的方波信号,并送至CPU,实现编码条件读取。

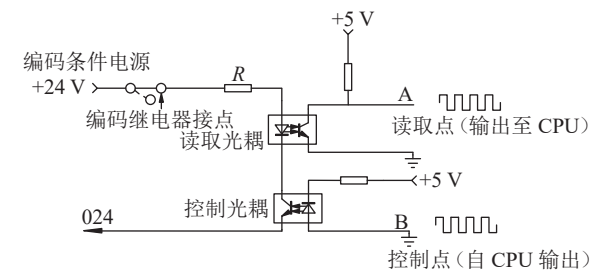


图 6 编码条件读取电路原理图<sup>[26]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of the coding condition reading circuit<sup>[26]</sup>

2.2 试验方法

采用10/700 μs雷电波冲击电压发生器进行试验,产生的波形如图7所示。试验器件选择表2中的CAN通信端口芯片PCA82C250和光耦TLP621-4。按照接口工作需要,分别完成两种通信接口器件的通信控制和总线驱动辅助电路的设计后,搭建好试验环境,如图8所示。

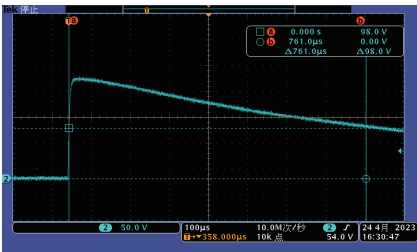


图 7 试验波形

Fig. 7 Test waveform

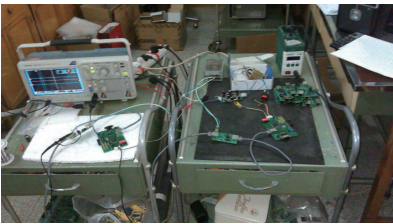


图 8 试验环境

Fig. 8 Test environment

试验过程中,首先,将数据信号作用于器件输入引脚位置,利用示波器观察器件输出引脚的信号,调整电路参数使通信接口器件运行至正常工作状态后,将数据输入信号断开;然后,在器件输入引脚上按照从低到高的顺序,施加雷电波冲击电压,并通过示波器记录冲击电压波形;最后,每次冲击完成后,先将雷电波冲击电压发生装置连线断开,再将数据信号与器件输入引脚重新连接上,分别查看输入的数据信号和经过通信接口器件后的输出信号。如果输出信号与未进行雷电波冲击时保持一致,则认为器件仍是完好的,继续施加该幅值的雷电波冲击电压直

至一定次数;如果器件工作正常,则将雷电波冲击发生设备的充电电压值合理提升,并继续在通信接口器件的输入引脚施加雷电波冲击电压,如此重复试验,直至输出信号发生异常,则判定器件已受到损坏,试验结束,并记录下当前试验电压。

2.3 接口器件雷击过电压损伤试验

2.3.1 CAN通信端口芯片PCA82C250的雷击过电压损伤试验

对郑武-2000A轨道电路系统中主要的通信接口芯片PCA82C250进行雷电冲击试验,分析其雷击过电压损伤特性。对样品1~11分别开展CANH—地间的共模正向、共模反向及CANH—CANL间的差模正向、差模反向雷电冲击试验,施加的开路冲击电压起始值远低于造成其损伤的冲击电压值,以步长3~5 V逐渐递增,每档电压冲击5次。冲击试验电路如图9所示,图9中,左侧靠近冲击发生器的CAN通信端口芯片为近端PCA82C250芯片,右侧距离冲击发生器较远的CAN通信端口芯片为远端PCA82C250芯片。

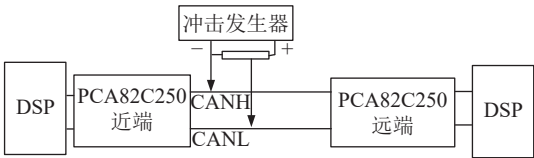


图 9 PCA82C250雷电冲击试验电路示意图

Fig. 9 Schematic diagram of PCA82C250 lightning surge test circuit

PCA82C250芯片的共模正反向、差模正反向雷击损伤特性曲线分别如图10、11、12、13所示。

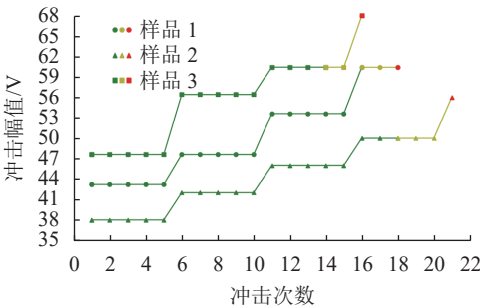


图 10 共模正向冲击特性

Fig. 10 Common mode forward shock characteristics

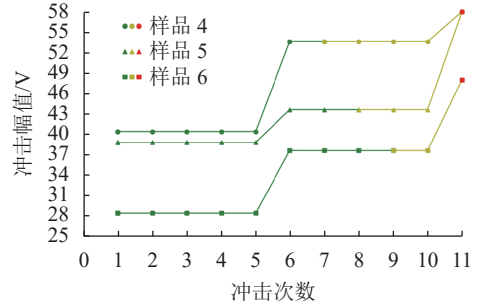


图 11 共模反向冲击特性

Fig. 11 Common mode reverse shock characteristics

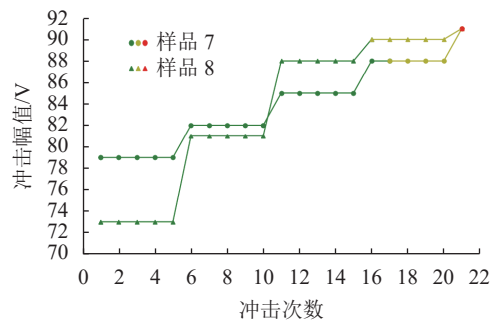


图 12 差模正向冲击特征

Fig. 12 Differential mode forward shock characteristics

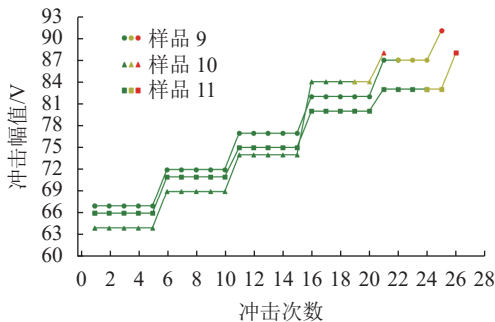


图 13 差模反向冲击特征

Fig. 13 Differential mode reverse shock characteristics

由图10~13可知：PCA82C250芯片的共模正反向、差模正反向的冲击特性变化均分为3个阶段，其中：绿色部分对应第1阶段，黄色部分对应第2阶段，红色部分对应第3阶段。第1阶段为正常阶段，冲击后的输出波形正常；第2阶段为临界损伤阶段，冲击后的输出波形异常，但仍能正常工作；第3阶段为损坏阶段，冲击后输出波形异常且无法正常工作。PCA82C250芯片的差模冲击损坏电压88 V，共模冲击损坏电压44 V。

在进行雷电冲击试验前用示波器查看通信总线正常信号波形，如图14中黄色波形所示。

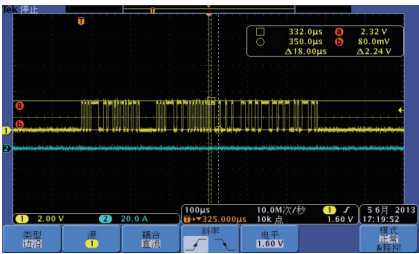


图 14 正常总线信号

Fig. 14 Normal bus signal

以样品1、4为例，对PCA82C250芯片CANH—地间共模正向、共模反向雷电冲击试验现象进行分析，并展示样品1的冲击波形和样品4的总线波形变化。样品1的共模正向雷电冲击试验中，施加的开路冲击电压从43.2 V开始，分别采用43.2、47.6、53.6、60.4 V对CANH和芯片地之间进行正向冲击，每档电压冲击

5次。当53.6 V冲击5次后，测试PCA82C250芯片发现器件工作正常，输出波形正常；冲击电压提升到60.4 V，对芯片进行第3次冲击时，在示波器中观察到冲击波形发生变化，如图15中黄色波形所示，此时，通信中断，经检测发现近端PCA82C250芯片损坏，远端PCA82C250芯片正常。

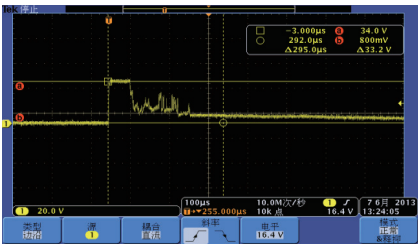


图 15 样品1冲击损坏时的冲击波形

Fig. 15 Shock waveform in case of shock damage for Sample 1

样品4的共模反向雷电冲击试验中，施加的开路冲击电压从40.4 V开始，以步长3~5 V逐渐递增，每档电压冲击5次，当冲击电压提升至53.6 V，冲击第1次时，虽然设备间可正常通信，但发现通信总线波形发生异常，如图16中黄色波形所示；采用冲击电压53.6 V完成5次冲击后，通信总线波形仍为正常信号波形（图14中黄色波形），此时设备间通信正常；随后，采用冲击电压58 V进行冲击，当冲击第1次时，通信中断，经检测发现近端PCA82C250芯片损坏，此时通信总线波形如图17中黄色波形所示。

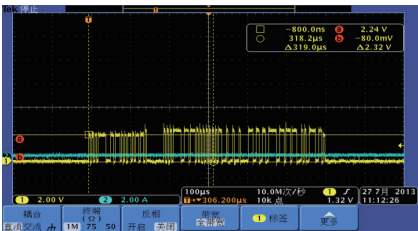


图 16 样品4初始损伤时通信总线波形

Fig. 16 Communication bus waveform at corrupted initial for Sample 4

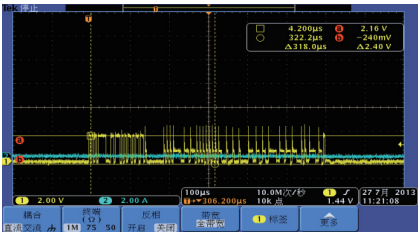


图 17 样品4损坏时总线波形

Fig. 17 Bus waveform in case of damage for Sample 4

### 2.3.2 光耦TLP621-4的雷击过电压损伤试验

对ZPW-2000A轨道电路系统中编码条件读取电路的光耦TLP621-4进行雷电冲击试验，分析其雷击过电压损伤特性。在电源与器件之间串联2.0和4.7

kΩ电阻,使接口测试电路与轨道电路的实际应用电路参数相同,以模拟线路阻抗。

在对光耦TLP621-4进行冲击试验时,分两种情况进行:一是,串接4.7 kΩ电阻后,雷电冲击信号施加在4.7 kΩ电阻与光耦串接后的两端;二是,将雷电冲击直接施加在光耦两端。以样品12~15为例,对光耦TLP621-4的雷电冲击试验现象进行分析,并展示样品12和14的波形变化。

首先,对雷电冲击信号施加在4.7 kΩ电阻与光耦串接后的两端雷击损伤特性进行试验,对样品12、13分别开展雷电冲击试验,施加的开路冲击电压起始值远低于造成其损伤的冲击电压值,以步长100 V逐渐递增,每档电压冲击5次,此时的试验电路示意图如图18所示。

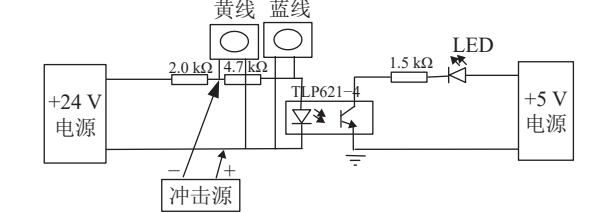


图 18 TLP621-4串接4.7 kΩ电阻冲击试验电路示意图  
Fig. 18 Schematic diagram of the TLP621-4 series-connected 4.7 kΩ resistor shock test circuit

光耦TLP621-4在前端串接4.7 kΩ电阻情况下的冲击损伤特性曲线如图19所示。

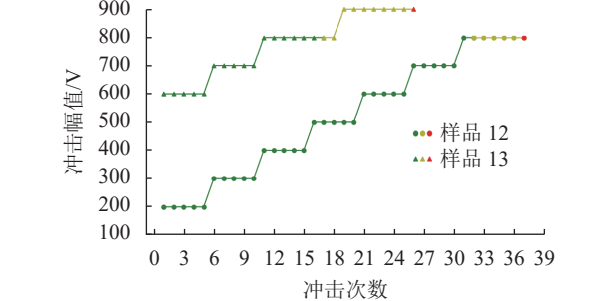


图 19 前端串入电阻冲击特性  
Fig. 19 Front-end series resistance shock characteristics  
由图19可得,光耦TLP621-4在前端串接4.7 kΩ电阻时,冲击损坏电压为800 V。

在对光耦TLP621-4进行雷击损伤试验前,先用远低于造成其损伤的雷击电压(即用700 V的10/700 μs电压波)对其进行反向冲击,此时光耦未被击穿,得到如图20所示的正常波形。图20中,蓝色波形是施加冲击时光耦输入端两端的电压波形。

样品12在光耦TLP621-4导通状态下的测试中,起始雷电冲击电压为200 V,以步长100 V逐渐递增,每档电压冲击5次。当冲击电压提升至800 V,第2次冲击时,光耦的输入端冲击电压发生变化,光耦处于临界损伤状态,光耦被反向击穿,此时的电压波形如

图21中蓝色波形所示,但此时器件的CPU仍可接收到有效的低电平传输信号,通信正常;在接下来的4次冲击中,每次都会造成光耦的反向击穿,当进行第7次冲击时,光耦输入端两端的电压波形如图22中蓝色波形所示,光耦彻底损坏,输出电压升高到TTL高电平,此时芯片的CPU收到错误的传输信号。

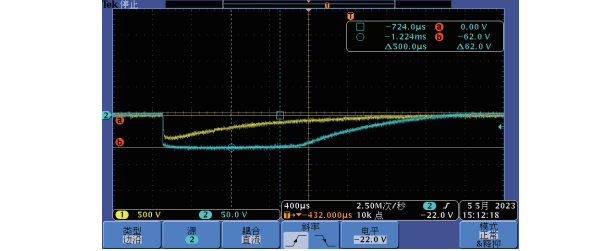


图 20 光耦器件未被击穿电压波形  
Fig. 20 Photocoupled device unbroken voltage waveform

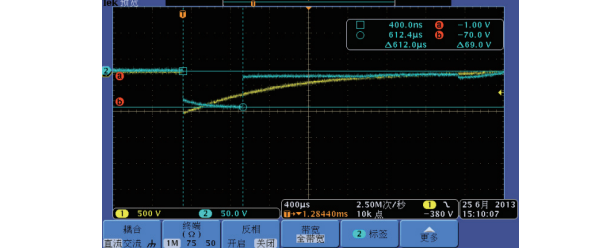


图 21 样品12在800 V第2次冲击时光耦电压波形  
Fig. 21 800 V second shock optocoupler voltage waveform for Sample 12

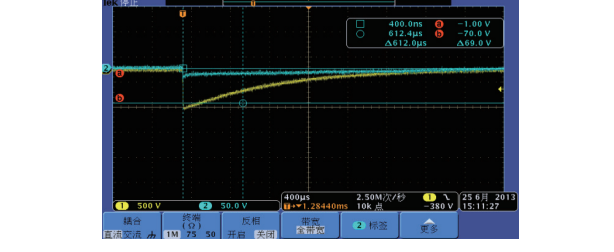


图 22 样品12在800 V第7次冲击时光耦电压波形  
Fig. 22 800 V 7rd shock optocoupler voltage waveform for Sample 12

样品13在光耦TLP621-4导通状态下的测试中,起始雷电冲击电压为600 V,以步长100 V逐渐递增,每档电压冲击5次。当冲击电压提升至800 V,第7次冲击时,光耦的输入端冲击电压发生变化;第8次冲击时,光耦的输入端冲击电压再次发生变化;当采用冲击电压900 V第8次冲击时,测试电路中的LED发光亮度变暗。

其次,将雷电冲击电压直接施加在光耦两端,对样品14、15分别开展雷电冲击试验,施加的开路冲击电压起始值远低于造成其损伤的冲击电压值,以步长3~5 V逐渐递增,每档电压冲击5次,测试其耐雷电冲击电压水平,此时的试验电路示意图如图23所示。

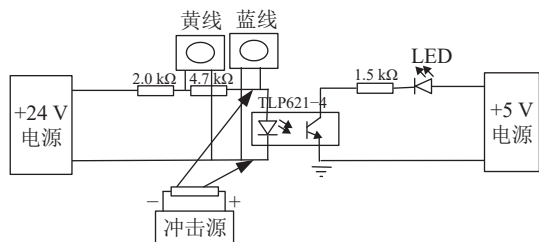


图 23 改变雷电冲击信号施加位置后TLP621-4冲击试验电路示意图

Fig. 23 Schematic diagram of the TLP621-4 shock test circuit after changing the application position of lightning impulse signal

光耦TLP621-4直接冲击的冲击损伤特性曲线如图24所示。由图24可得,光耦TLP621-4在前端未串接电阻的情况下,冲击损坏电压为140 V。

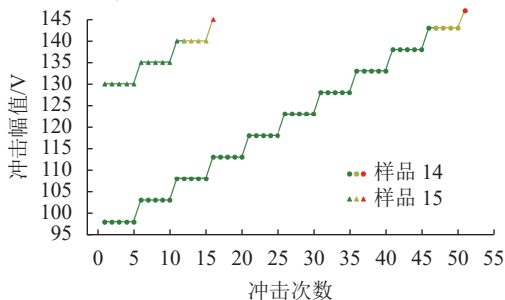


图 24 对光耦直接冲击特性

Fig. 24 Direct shock characteristics to optocouplers

样品14在光耦TLP621-4关断状态下的测试中,起始雷电冲击电压为98 V,以步长3~5 V逐渐递增,每档电压冲击5次。当冲击电压提升至147 V,第1次冲击时,光耦输入端冲击电压发生变化,其电压波形如图25中黄色波形所示,此时光耦损坏。

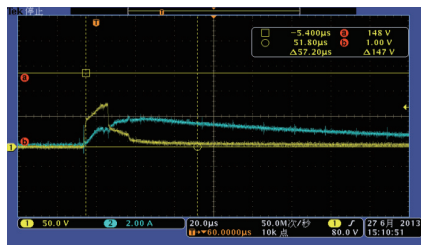


图 25 样品14在147 V第1次冲击时光耦冲击损坏电压波形

Fig. 25 147 V first shock optocoupler damage voltage waveform for Sample 14

样品15在光耦TLP621-4关断状态下的测试中,起始雷电冲击电压为130 V,以步长3~5 V逐渐递增,每档电压冲击5次。当冲击电压提升至145 V,第1次冲击时,光耦输入端冲击电压发生变化,光耦损坏。

## 2.4 结果分析

在冲击试验时,设备的损坏表现出多种现象。如果冲击能量远大于被试设备能够承受的能量时,会导致被试设备出现功能丧失,无法正常工作。如果冲击过电压刚刚达到被试设备击穿的临界值,且冲击

能量较小时,过电压冲击对器件的损坏不会使其立刻停止工作,只是使器件的性能变坏,热稳定性变差,此时器件已进入临界损伤状态;随着冲击次数的增加,器件性能损坏程度逐渐积累;当冲击到一定次数后,器件性能表现为彻底失效,这种特性就是器件冲击损坏积累效应。这种积累效应可能会导致在设备检验过程中出现测试不准确的情况。从防护的角度考虑,真正有效的防护措施是可以保护通信设备接口既不被击穿,也不会产生冲击损坏的积累效应。

第2.3节试验中的多个器件都表现出了冲击损坏积累效应。第2.3.1节CAN通信接口器件PCA82C250的冲击试验中存在着冲击损坏的积累效应。在对PCA82C250进行雷击冲击试验时,用临界冲击电压对其进行冲击,两设备之间虽可正常进行通信,但通信总线波形已发生异常,且每次冲击使芯片造成损伤,经过多次临界冲击电压的测试,最终导致芯片PCA82C250彻底损坏。同样地,第2.3.2节光耦冲击试验中也体现了冲击损坏积累效应。

按照《铁路通信信号设备雷击试验方法》(TB/T 3498—2018)<sup>[16]</sup>标准规定进行冲击试验,在完成规定次数的冲击测试后,在光耦和CAN通信端口器件彻底损坏之前,仅凭设备的工作状态无法准确判断器件的损坏情况,但此时器件可能已经损伤。因此在试验过程中,不可仅凭系统两端数据是否能够正常通信作为判断器件损坏的依据,应该按照被测设备接口的特点,通过示波器观察冲击波形和器件冲击前后信号波形的变化情况,来准确判断接口器件的损伤情况;如果发生击穿或性能变差的情况,则表明器件已经损伤,其特性变坏,不能再给出合格的测试结果。

## 3 结 论

针对高速铁路信号设备耐雷电冲击性能检测方面的问题,开展了信号设备通信接口过电压损伤试验研究,提出了高速铁路信号设备通信接口雷击过电压损伤检测及判定方法,得出如下结论:

1)信号设备通信接口器件的雷击过电压损伤特性分为3个阶段,即正常阶段、临界损伤阶段和损坏阶段。处于临界损伤状态的器件在遭受到雷电冲击时,即使仍能正常工作,但该器件已经损伤,每次冲击都会使其特性变坏;且随着冲击次数的增加,在冲击损坏的积累效应作用下,最终会导致器件彻底失效。

2)ZPW-2000A轨道电路CAN通信接口芯片PCA82C250横向雷电冲击损坏电压约88 V,纵向雷电冲击损坏电压约48 V。光耦采集电路中,直接对光耦进行雷电冲击时,雷电冲击损坏电压约为140 V;在雷电冲击点与光耦间串联入4.7 kΩ电阻后,进行雷

电冲击时,雷电冲击损坏电压可达到约800 V;试验结果表明增加器件的输入阻抗,可以提高耐雷电冲击水平。

3)已有对信号设备耐雷电冲击性能的研究,仅是参照相关标准的试验方法对设备进行冲击试验,通过观察系统的反应情况,判定试验结果,存在着对防护盲区和冲击损坏积累效应漏检等问题。本文提出的信号设备通信接口雷击过电压损伤检测方法,按电压幅值由低到高进行雷电冲击试验,结合被测设备的特点,以冲击时有无击穿现象和传输信号是否发生异常作为器件损伤判定的基本依据,并结合相应测试标准等判定试验结果,本文的判定方法更科学准确。同时,通过掌握接口器件的雷击损伤特性,可以避免防护处于临界状态,从而更好地保障信号设备可靠运行。

本文仅选取了ZPW-2000A无绝缘移频轨道电路的通信接口器件进行试验研究,本文提出的方法能否对所有系统和设备接口都适用,有待于进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Wang Zhoulong. Study on lightning transient transmission characteristics of high speed railway signal system[J]. *Railway Standard Design*, 2022, 66(5): 177–182. [王州龙. 高速铁路信号系统雷击瞬态传输特性研究[J]. *铁道标准设计*, 2022, 66(5): 177–182.]
- [2] Su Jie, Gu Shanqiang, Zhao Chun, et al. Calculation of direct lightning stroke trip-out rate with exposure globoid method for high-speed railway traction network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(19): 5103–5113. [苏杰, 谷山强, 赵淳, 等. 高速铁路牵引网暴露弧面法直击雷跳闸率计算[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 5103–5113.]
- [3] 侯文玉. 高速铁路接触网雷害特征与防护[J]. *中国铁路*, 2016(11): 1–6.
- [4] Su Zhiguo, Yang Jin, Han Congying, et al. Lightning transients of the overhead catenary system pillar and its adjacent grounding systems in a high-speed railway depot[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(3): 779–785.
- [5] Xiang Nianwen, Chen Weijiang, Bian Kai, et al. The electromagnetic transient model for high-speed railway viaducts struck by lightning based on the decoupling method[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(5): 1541–1548.
- [6] Li Gang, Lu Peiling, Yang Yong. Research on application of ZPW-2000 fault diagnosis algorithm for track circuits[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(6): 53–59. [李刚, 卢佩玲, 杨勇. ZPW-2000轨道电路故障诊断算法应用研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(6): 53–59.]
- [7] Qiao Zhichao, Xiang Nianwen, Yang Jin, et al. Research of lightning transient model for high-speed railway signal system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(9): 90–96. [乔志超, 向念文, 阳晋, 等. 高速铁路信号系统的雷电暂态模型研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(9): 90–96.]
- [8] 付茂金. 高速铁路通信信号综合防雷技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] Sun Jianhui, Liu Juntao, Xu Shengwei, et al. Weak brain-EEG signal high resolution detection based on hybrid analog/digital signal control ASIC system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(5): 1025–1033. [孙建辉, 刘军涛, 徐声伟, 等. 高精度微弱脑电检测数模混合控制芯片系统[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(5): 1025–1033.]
- [10] Lu Qiwei, Gao Zhixuan, Teng Shangfu, et al. Current limiting solid state circuit breaker based on MOSEFT and its over voltage suppression[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(24): 42–52. [卢其威, 高志宣, 滕尚甫, 等. 基于MOSFET的限流式固态断路器及其过电压抑制[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(24): 42–52.]
- [11] Zhang Peng, Wu Xiaodong, Cui Haiqing. Research on reliability design method of ARINC825 bus communication interface[J]. *Computer Measurement & Control*, 2018, 26(9): 210–214. [张鹏, 吴晓东, 崔海青. 一种ARINC825总线通信接口可靠性设计方法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26(9): 210–214.]
- [12] Li Yao, Chen Jingqiang, Bai Wenxia, et al. Research on the damage of ARINC825 bus interface chip caused by airborne power supply switching[J]. *Measurement & Control Technology*, 2022, 41(7): 50–56. [李瑶, 陈竞强, 白文霞, 等. 机载电源切换对ARINC825总线接口芯片的损伤研究[J]. *测控技术*, 2022, 41(7): 50–56.]
- [13] Li Yang. Analysis of lightning impulse test of railway computer interlocking system[J]. *Railway Standard Design*, 2017, 61(10): 167–173. [李洋. 铁路计算机联锁系统模拟雷击试验方法的研究[J]. *铁道标准设计*, 2017, 61(10): 167–173.]
- [14] Li Yang. Lightning impulse test for acquisition and driving circuit of urban rail transit signal[J]. *Urban Mass Transit*, 2017, 20(4): 82–85. [李洋. 城市轨道交通信号系统采集和驱动电路雷击试验方法[J]. *城市轨道交通研究*, 2017, 20(4): 82–85.]
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验: GB/T 17626.5—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 国家铁路局. 铁路通信信号设备雷击试验方法: TB/T 3498—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [17] Li Shun, Xing Hongyan, Yi Xiucheng. Spectrum and steepness performance analysis of lightning current signals[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(18): 106–111. [李顺, 行鸿彦, 易秀成. 雷电流信号的频谱与陡度性能分析[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(18): 106–111.]
- [18] Nucci C A, Diendorfer G, Uman M A, et al. Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D12): 20395–20408.
- [19] de Conti A, Visacro S. Analytical representation of single-

and double-peaked lightning current waveforms[J].*IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*,2007,49(2): 448–451.

[20] Wan Jing,Wu Tao,Lai Min,et al.Study on semi-analytical approximation for reproduction of lightning channel base current function[J].*Power System Technology*,2013,37(7): 2066–2070.[万靖,吴涛,赖敏,等.雷电通道基底电流函数半解析逼近研究[J].*电网技术*,2013,37(7):2066–2070.]

[21] Diendorfer G,Uman M A.An improved return stroke model with specified channel-base current[J].*Journal of Geophysical Research:Atmospheres*,1990,95(D9):13621–13644.

[22] Zhu Chongming,Zhang Pengfei,Zou Jun.High order approach accurately approximating spectrum function of lightning base channel heidler model[J].*Power System Technology*,2019,43(12):4591–4596.[朱崇铭,张鹏飞,邹军.雷电基底电流Heidler模型频谱函数高阶高精度逼近方法[J].*电网技术*,2019,43(12):4591–4596.]

[23] Chen Shaocong,Wang Xiaobo,Li Bin,et al.Frequency spec-

trum of standard lightning currents and its application[J].*Meteorological*,2006,32(10):11–19.[陈绍东,王孝波,李斌,等.标准雷电波形的频谱分析及其应用[J].*气象*,2006,32(10):11–19.]

[24] Zhou Wenjun,Wang Jiye,Zhang Hongyi,et al.Over-voltage withstand test of communication interface chips[J].*High Voltage Engineering*,2001,27(4):41–43.[周文俊,王继业,张洪义,等.常用通信接口芯片过电压耐受能力[J].*高电压技术*,2001,27(4):41–43.]

[25] Zhao Bin,Chen Lei,Ou Jingning,et al.Transient response analysis considering ZPW–2000A track circuit with high frequency loss[J].*China Railway Science*,2023,44(1):186–193.[赵斌,陈磊,欧静宁,等.考虑高频损耗的ZPW–2000A轨道电路暂态响应分析[J].*中国铁道科学*,2023,44(1): 186–193.]

[26] 林瑜筠,吕永昌,徐彩霞,等.新型移频自动闭塞 [M].3版.北京:中国铁道出版社,2007:140–141.

Experimental Study on Lightning Transient Overvoltage Damage of Interface Devices of High-speed Railway Signal Equipment

WANG Zhoulong<sup>1,2</sup>, XU Jinpeng<sup>2,3</sup>, JIN Shaoyun<sup>1,2</sup>, MAI Ruikun<sup>4\*</sup>

(1.Signal & Communication Research Inst., China Academy of Railway Sciences Corp. Ltd., Beijing 100081, China; 2.The Center of National Railway Intelligent Transportation System Eng. and Technol., China Academy of Railway Sciences Corp. Ltd., Beijing 100081, China; 3.Beijing Hua-tie Info. Technol. Co., Ltd., Beijing 100081, China; 4.School of Electrical Eng., Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 611756, China)

**Abstract:** This article proposes a method for detecting and determining the lightning overvoltage damage in communication interfaces of high-speed railway signal equipment, which is an optimization and improvement of the current lightning test and detection methods for communication interfaces of high-speed railway signal equipment. Firstly, an analysis of the lightning wave spectrum is conducted to determine the lightning test waveform and detection circuit of the communication interface. Subsequently, the CAN communication interface device PCA82C250 of the ZPW–2000A track circuit system and the optocoupler TLP621–4 of the encoding reading circuit were selected as the test objects. The lightning impulse tests were conducted on the test objects with gradually increasing voltage amplitudes. The test results showed that the transverse lightning impulse damage voltage of PCA82C250 is about 88 V, and the longitudinal lightning impulse damage voltage is about 48 V. In the optocoupler acquisition circuit, when the lightning impulse is directly applied to the optocoupler, the voltage damaged by lightning impulse is about 140 V. By connecting a 4.7 kΩ resistor in series between the lightning impulse point and the optocoupler, the lightning impulse damage voltage is about 800 V. Therefore, increasing the input impedance of the device can improve the lightning impulse resistance level. Finally, the lightning overvoltage damage characteristics of signal equipment communication interface devices were discussed and analyzed. The analysis results showed that these characteristics can be divided into three stages, which are the normal stage, the critical damage stage, and the damage stage. There exists an accumulation effect of impact damage on these components. When the components are in the critical damage stage, data transmission can still be carried out, but the output signal is inconsistent with the normal stage. The detection of lightning overvoltage damage to communication interface devices of signal equipment should be carried out through lightning impulse testing with gradually increasing voltage amplitudes. The basic criteria for damage determination is the presence of the breakdown phenomenon during the impulse and the abnormal signal level on the communication line. Furthermore, scientific and accurate judgments should be made in conjunction with corresponding testing standards.

**Key words:** high-speed railway; signal equipment; interface device; lightning overvoltage; damage

(编辑 赵 婧)

引用格式: Wang Zhoulong,Xu Jinpeng,Jin Shaoyun,et al.Experimental study on lightning transient overvoltage damage of interface devices of high-speed railway signal equipment[J].*Advanced Engineering Sciences*,2024,56(4):287–296.[王州龙,徐金鹏,靳邵云,等.高速铁路信号设备通信接口雷击过电压损伤试验研究[J].*工程科学与技术*,2024,56(4):287–296.]