

文章编号:1671-6833(2013)01-0070-05

# 雷击接触网对信号电缆电磁影响分析及防护

徐迎辉, 闫 智, 罗映红

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**对雷电流影响信号电缆的途径进行分析,得到雷电流主要通过空间感性耦合与大地阻性耦合干扰信号电缆.根据线路接触网模型,用电磁暂态软件 ATPDraw 搭建雷击接触网绝缘子闪络雷电流传播仿真电路.研究表明:电缆外皮电流耦合过电压及大地阻性耦合引起的电位升高对信号电缆的影响最大;接触线、贯通地线及保护线中电流耦合到电缆芯线的电压相对较小;信号电缆接地电阻的增大使芯线电压升高.通过降低信号电缆接地电阻、单独设置接地极等措施改善雷击对信号电缆的干扰.参考京沪高速铁路接触网防雷加强实施方案,对复线线路避雷线架设高度进行分析,给出建议架设高度,提高接触网耐雷水平.

**关键词:**雷电流;耦合;信号电缆;接地电阻;地电位升;避雷线

**中图分类号:** U228 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.017

## 0 引言

高速铁路区间大部分区段采用高架桥,距地面十几米高,易遭到雷击;沿线采用贯通地线接地方式,距接触网带电体 5 m 范围内的电气化、电力电缆、通信、信号、环工、给排水等专业的设备及其他金属构筑物都接入贯通地线,形成等电位体,强电接地连接点与弱电接地连接点之间必须保证不小于 20 m 的距离,以减少强电对弱电系统设备的影响<sup>[1]</sup>.当接触网断线或遭受雷击绝缘子闪络时,入地电流急剧增大,使与贯通地线相连的电缆、管道、钢轨等设施的电位升高,严重时造成电缆烧损、设备损坏,危害列车正常安全运行.铁路信号电缆用于传输信号设备和控制装置之间列车控制信息、运行状态监测信息,对列车安全运行有至关重要的作用.笔者以某线路雷击事故致信号电缆保险管熔断为例对雷击过电压进行分析,高架桥接触网导线布置如图 1 所示<sup>[2]</sup>.

## 1 信号电缆耦合途径分析

以某线路雷击事故为例,线路设计最高列车运行速度 250 km/h,跨区间无缝线路,60 kg/m 钢轨,双线线间距 4.6 m,事故区段使用Ⅲ型混凝土

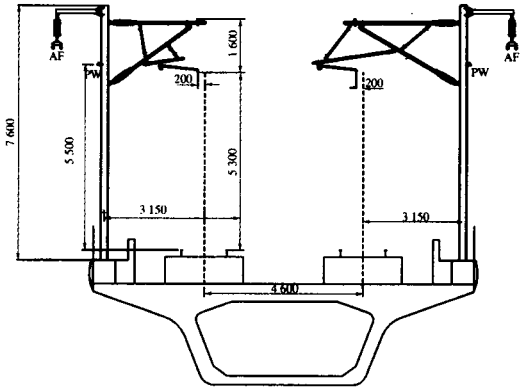


图 1 高架桥接触网导线布置图

Fig.1 Viaduct catenary wire layout

轨枕.选取雷害事故区段 2 km 进行分析.雷电流幅值超过 100 kA 的雷击共出现 11 次,一般情况下,第一次闪击释放的能量最大,对电气设备的威胁最为严重,因此计算中只考虑第一次雷电闪击<sup>[3]</sup>.当雷击支柱时,将支柱看作与接地电阻串联的电感,雷击点对地电位升高,加在接触网绝缘子两端的电压  $U$  随之升高,当其大于绝缘子的  $U_{50\%}$  冲击闪络电压时,绝缘子发生闪络,接触网反击耐雷水平的计算公式<sup>[4]</sup>如下.

收稿日期:2012-10-10;修订日期:2012-12-26

基金项目:甘肃省科技计划资助项目(1112RJZA046)

通信作者:罗映红(1961-),女,广东汕头人,兰州交通大学教授,主要从事电磁防护与电磁兼容方面的研究, E-mail: lyhdd-321@163.com.

$$I = \frac{U_{50\%}}{R + \frac{L}{2.6} + \frac{H}{2.6}} \tag{1}$$

式中: $R$  为支柱的冲击接地电阻, $\Omega$ ; $L$  为支柱的等值电感, $\mu\text{H}$ ; $H$  为承力索高度,m.

电力行业标准推荐:取雷电流的波头时间 $2.6\text{ }\mu\text{s}$ ,在电网防雷设计计算中,雷电流冲击电流采用 $2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ 波形<sup>[5]</sup>.棒式绝缘子雷电冲击闪络电压 $U_{50\%}$ 为 $270\text{ kV}$ ,接地电阻 $10\text{ }\Omega$ ;铁塔等值电感 $0.5\text{ }\mu\text{H/m}$ ,高度 $7.6\text{ m}$ ;承力索距地面高度 $6.9\text{ m}$ .代入上式计算得: $I\approx 21.34\text{ kA}$ .

1.1 感性耦合

雷电压波在被击点沿接触网的两个方向进行传播,复线综合接地网并联分流,取雷电流 $25\text{ kA}$ ,大于接触网耐雷水平.当主放电开始后,雷电通道中的雷电流在周围空间产生强大的磁场,主放电通道与接触网各导线垂直,因此在导线中产生的感应过电压很小,通常在计算中忽略.但雷直击接触网时,由于雷电流变化很大,在接触网导线周围会产生强大的磁场,通过空间互感耦合在信号电缆产生过电压.对于地下电缆线路,由于大地具有良好的静电屏蔽作用,容性耦合只对架空线路及无金属护套的架空电缆产生影响,而对埋设地下电缆或接地金属护套的电缆可以完全不考虑其影响<sup>[6]</sup>.线路参数如表 1 所示.

表 1 线路线材规格参数表

Tab.1 Line wire specifications table

名称	规格	有效电阻/ ( $\Omega\cdot\text{km}^{-1}$ )	等效半径/ mm
承力索	JTMH120	0.242 0	7.00
接触线	CTS120	0.158 6	7.20
钢轨	P60	0.135 0	12.79
保护线	LGJF-120	0.214 3	7.71
正馈线	LGJF-240	0.113 6	10.26
综合地线	TJ-70	0.280 0	4.06

建立雷击接触网模型如图 2 所示,模型中杆塔绝缘子发生闪络,通过跳线将部分雷电波引入保护线中进行传输,至接地点雷电流入地;部分通过引下线引入贯通地线.每隔 $1\text{ km}$ 钢轨的泄漏电阻接地,通过辅助连接线 CPW 每隔 $2\text{ km}$ 将轨道与保护线相连.高速铁路设计规范中要求综合接地系统的接地电阻应不大于 $1\text{ }\Omega$ ,仿真中贯通地线接地电阻设置为 $0.5\text{ }\Omega$ .

雷电流波形及保护线、综合贯通地线及信号电缆外皮分流情况如图 3 所示,从图中可以看出,

保护线和贯通地线承担了大部分雷电流,但电缆外皮的分流也达到了数千安,不利于信号电缆的安全运行.

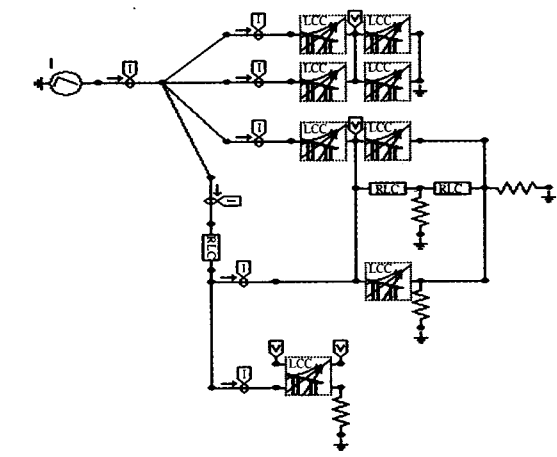


图 2 雷击接触网模型  
Fig.2 Lightning catenary model

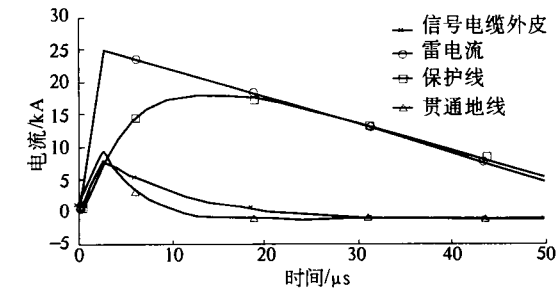


图 3 雷电流、保护线、综合贯通地线  
及信号电缆外皮电流波形  
Fig.3 Lightning current, protection line and  
comprehensive through ground and signal  
cable sheath current waveform

承力索、接触线电流电压波形如图 4(a),(b)所示,实际中承力索、接触线由吊弦进行连接,模型中将二者进行并联等效,不考虑牵引变电所提供电能.由上述仿真可以看出二者承担雷电流相差不大,图 4(b)中电压低于棒式绝缘子雷电冲击闪络电压 $U_{50\%}270\text{ kV}$ ,因此相邻杆塔绝缘子不会发生闪络.

信号电缆屏蔽层接不同接地电阻时,电缆芯线电压如图 5 所示.由图看出,在 $0.5\sim 5\text{ }\Omega$ 范围内<sup>[7]</sup>,信号电缆接地电阻的增大使芯线电压升高.当接地电阻 $5\text{ }\Omega$ 时,芯线感应电压接近 $2\text{ }200\text{ V}$ ,已经超过芯线对护套间绝缘耐压,会使绝缘击穿,危害信号电缆安全.

由上述仿真波形看出保护线和贯通地线分配了较大的雷电流,而接触线中电流较小,因此不考虑接触线中电流对信号电缆影响.国际电话电报

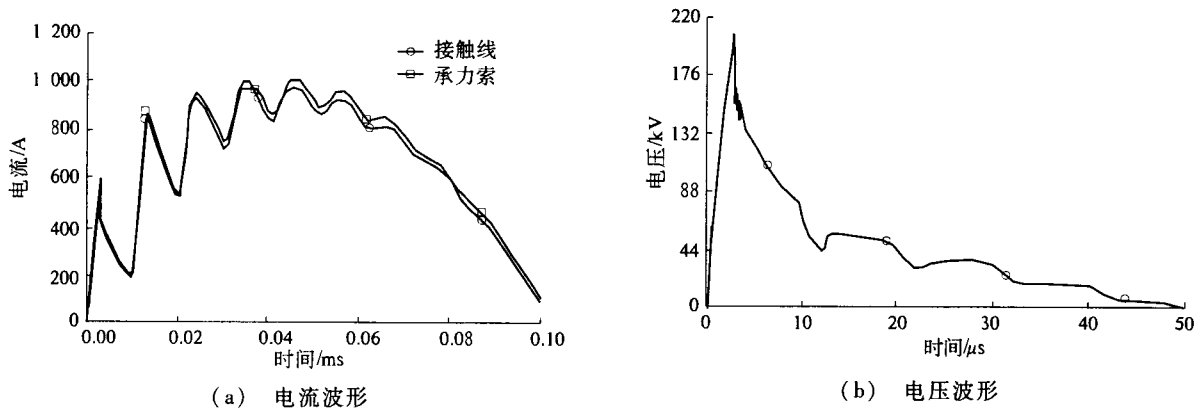


图 4 承力索和接触线波形  
Fig. 4 Catenary and contact wire waveform

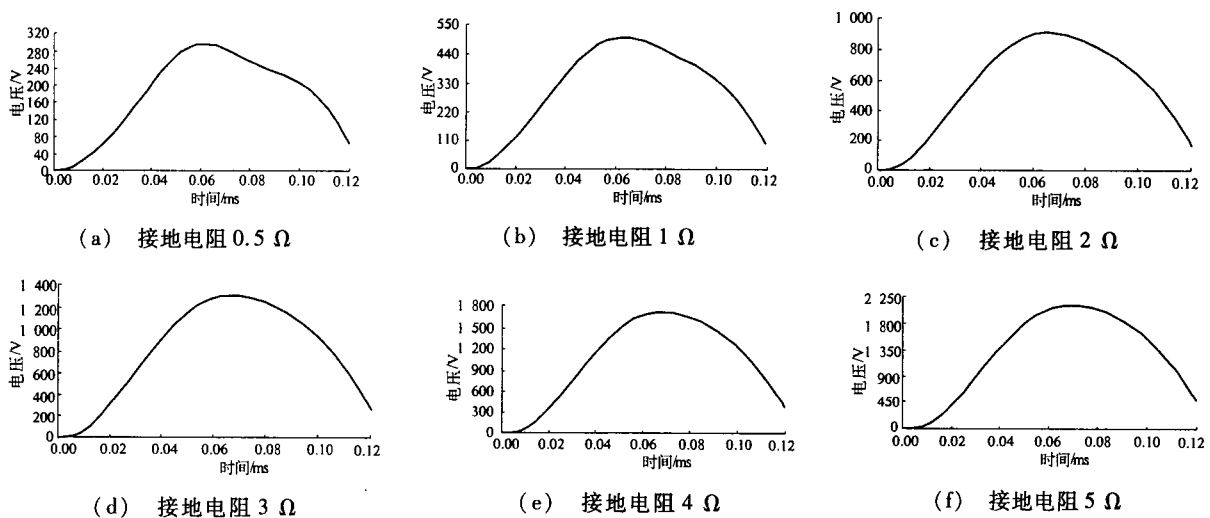


图 5 不同接地电阻电缆芯线感应电压  
Fig. 5 Different grounding resistance cable core induced voltage

咨询委员会在防护导则中给出架空影响线和地下被影响线之间互感系数基本表达式:

$$M_1 = -j \frac{\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} (\sqrt{\lambda^2 + j} - \lambda) e^{-\lambda \partial} e^{-\sqrt{\lambda^2 + j} \partial |c|} \cos \lambda \partial a d\lambda. \quad (2)$$

式中的无穷积分不便数值计算,中国电力科学研究院崔鼎新等<sup>[8]</sup>推导出了互感系数表达式中的无穷积分,可以用已知的聂曼函数和斯特鲁夫函数的互感系数来表示,简化计算公式如下.

$$M_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ 2 \ln \frac{2}{\gamma \partial \sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{2\sqrt{2}}{3} \partial(b - |c|) + j \frac{2\sqrt{2}}{3} \partial(b + 2|c|) \right]. \quad (3)$$

式中: $a$  为保护线和信号电缆间距; $b$  为保护线距信号电缆高度(6.23 m); $c$  为信号电缆敷设深度(0.5 m); $\partial = \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$ ;  $\mu_0$  为真空导磁率; $\sigma$  为大地导电率;传播常数  $\gamma = 1.781 \text{ 1}$ .

保护线电流产生纵向感应电动势:

$$E_1 = \omega M_1 I_1 S_1 \quad (4)$$

式中: $M_1$  为保护线与信号电缆互感 H/km; $l$  为保护线与信号电缆平行架设长度 km; $I_1$  为保护线电流 A; $S_1$  为综合屏蔽系数.

把上述参数代入(4)式,计算保护线电流在信号电缆上产生纵向感应电动势为

$$E_1 = 129.43 \text{ V}.$$

小隔距地下线缆间互感系数简化计算公式为

$$M_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ 2 \ln \frac{2}{\gamma \partial a} + 1 - \frac{2\sqrt{2}}{3} (1+j) \partial |b+c| \right]. \quad (5)$$

式中: $a$  为贯通地线和信号电缆间距; $b, c$  为贯通地线和信号电缆敷设深度; $\partial = \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$ ;  $\mu_0$  为真空导磁率; $\sigma$  为大地导电率;传播常数  $\gamma = 1.781 \text{ 1}$ .

贯通地线电流产生纵向感应电动势为

$$E_2 = \omega M_2 I_2 S_2. \quad (6)$$

式中: $M_2$  为贯通地线与信号电缆互感, H/km; $l$  为贯通地线与信号电缆平行敷设长度, km; $I_2$  为贯

通地线电流, A;  $S_2$  为信号电缆外皮屏蔽系数。

把上述参数代入(6)式,计算贯通地线电流在信号电缆上产生纵向感应电动势大小:

$$E_2 = 38.27 \text{ V}.$$

## 1.2 大地阻性耦合对信号电缆影响

由于空间限制,接地体距离信号电缆较近,不能满足电力接地装置对邻近地埋通信电缆的最小隔距有关规程规定。当雷电流通过引下线引入贯通地线时,接地体周围混凝土电位升高,向四周传播。此时,接地体可视为点电极,接地体附近地电位升高计算公式<sup>[9]</sup>为

$$U_x = \frac{I_g \rho}{2\pi r_c} \times \frac{r_c}{x}. \quad (7)$$

式中:  $I_g$  为经接地体入地雷电流;  $\rho$  为土壤电阻率;  $r_c$  为接地体计算半径;  $x$  为接地体边缘至信号电缆距离。

由于  $\gamma\gamma \leq 0.1$ , 耦合到信号电缆上的电位为

$$U_y = \frac{I_g \rho \gamma s}{2\pi} (\gamma\gamma + 0.12 - \ln \gamma\gamma). \quad (8)$$

式中:  $U_y$  为接地体边缘至信号电缆电位;  $y$  为接地体边缘至信号电缆距离;  $s$  为信号电缆屏蔽系数;  $\gamma$  为信号电缆“护套—大地”回路传播常数,  $\gamma = 1.35 \times 10^{-3}/\text{m}$ 。

$I_g$  取 17 kA; 接地体边缘至信号电缆距离 0.5 m; 信号电缆屏蔽系数 0.5; 计算接地体边缘至信号电缆电位:  $U_y = 1\,355.738 \text{ V}$ 。

通过上述仿真分析可知,雷电流在线缆周围产生强磁场,保护线、贯通地线、信号电缆护套电流通过空间感性耦合在电缆芯线上产生纵向感应电动势,其中信号电缆护套电流影响最大,并且随接地电阻的增大而增大,铁路内屏蔽数字信号电缆电气指标要求线芯对金属护套间绝缘耐压 2 000 V,当接地电阻过大时,会引起电缆外皮过热,造成线芯与金属护套间绝缘击穿,电缆烧损等故障。此外,雷电流通过大地阻性耦合使电缆电位严重升高。因此线缆感性耦合和大地阻性耦合共同作用使信号电缆上产生过电压。

## 2 信号电缆防雷措施

地下防雷线是直埋电缆普遍采用的防雷措施,但高速铁路采用电缆槽敷设电缆方式,无法在信号电缆上方埋设地下防雷线。虽然贯通地线对信号电缆电流进行分流,由于埋设在信号电缆下方,并不能像地下防雷线对信号电缆起到屏蔽作用。

参考京沪高速铁路接触网防雷加强实施方

案,在重雷区及超重雷区地段可以通过塔顶架设避雷线,并单独设置接地极,通过改善接触网的耐雷水平减小绝缘子闪络造成的入地雷电流对信号电缆的影响。当有避雷线存在时,由于避雷线与接触网导线间的耦合作用,避雷线不仅有效降低接触网遭受直击雷的概率,而且也降低了绝缘子因感应过电压而击穿闪络的概率。在复线地段塔顶架设两根等高避雷线<sup>[10]</sup>,如图6所示,两外侧仍按单根避雷线的保护范围确定,两根避雷线之间的保护范围的截面由通过两线及上边缘最低点  $O$  点作圆弧,  $O$  点对地高度为

$$h_0 = h - \frac{D}{4p}. \quad (9)$$

式中:  $h$  为避雷线对地高度;  $D$  为两避雷线之间的水平距离;  $p$  为高度修正系数,当  $h \leq 30 \text{ m}$  时,  $p = 1$ , 当  $30 \text{ m} < h \leq 120 \text{ m}$  时,  $p = \frac{5.5}{\sqrt{h}}$ 。

线路承力索安装高度为 6.9 m, 两避雷线之间的水平距离  $D$  为  $2 \times 3.15 + 4.6 \text{ m}$ 。  $R_0$  为过避雷线顶点 1, 2 及上边缘最低点  $O$  点作圆弧的半径。若要对接触网进行保护,则需满足:

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(R_0 - \frac{D}{4p}\right)^2 = R_0^2; \\ \left(\frac{D}{2} - 3.15\right)^2 + (R_0 + h_0 - 6.9)^2 = R_0^2. \end{cases} \quad (10)$$

根据铁路接触网架设情况,取  $p = 1$ , 计算得  $R_0 = 6.8125 \text{ m}$ ,  $h_0 = 6.5 \text{ m}$ ; 计算结果代入(9)式,得到避雷线对地高度  $h = 9.225 \text{ m}$ 。馈线高度 6.4 m, 距离支柱 0.6 m, 计算保护角为  $\alpha \approx 12^\circ < 20^\circ \sim 30^\circ$ , 完全在避雷线的保护范围内。因此,接触网各导线均受到有效保护时避雷线的架设高度不应低于 9.225 m。当发生雷击时,通过避雷线专设接地极导入大地,减小对信号电缆影响。

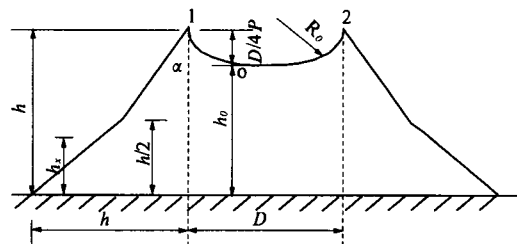


图6 两平行避雷线的保护范围

Fig. 6 The scope of protection of the two parallel lightning conductor

## 3 结论

通过分析信号电缆的耦合途径,可知雷击接触网绝缘子发生闪络后主要通过感性耦合和大地

阻性耦合对信号电缆产生危害. 由于地面及电缆槽盖的屏蔽作用, 不存在架空线和地下电缆之间容性耦合. 通过感性耦合对信号电缆影响仿真可知, 采取降低信号电缆的接地电阻值的措施可以减小电缆芯线过电压. 若信号电缆护层不接入贯通地线, 而采用独立接地方式, 则雷电流对信号电缆只有大地阻性耦合和接触网导线空间感性耦合造成的过电压, 不存在信号电缆护层接入贯通地线分流对芯线产生的耦合影响, 由仿真可知信号电缆护层电流对信号电缆芯线产生过电压影响较大. 因此, 信号电缆也可通过单独设置接地极降低电缆芯线过电压. 此外, 结合线路实际分析得出, 接触网各导线均受到有效保护时, 避雷线架设高度不应低于 9.225 m, 才能有效提高接触网的耐雷水平.

#### 参考文献:

- [1] TB 10621—2009 高速铁路设计规范(试行)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [2] 韩鲁斌. 京沪高速铁路接触网防雷加强实施方案[R]. 天津: 中铁电气化勘测设计研究院有限公司, 2012.
- [3] 吴广宁, 曹晓斌, 李瑞芳. 轨道交通供电系统的防雷与接地[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] TB/T 3199. 2—2008 电气化铁路接触网用绝缘子第2部分: 棒型复合绝缘子[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [5] 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.
- [6] 铁道部工程设计鉴定中心. 通信线路及其他设施电磁干扰防护工程设计指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [7] 孙建明, 鲁铁成. 铁路 10 kV 单芯电力电缆对信号电缆的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 93-94.
- [8] 崔鼎新, 瞿雪弟, 于泓. 架空电力线与地下电信电缆间的互感系数[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 42-46.
- [9] 韩树奎. 接地装置地电位升高对地埋通信电缆的影响及防护[J]. 吉林电力, 2005(4): 1-3.
- [10] 刘明光. 铁道电网过电压分析与防护—电网、暂态、防雷与接地[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2009.

## Analysis and Protection of Lightning Catenary Electromagnetic Impact on the Signal Cable

XU Ying-hui, YAN Zhi, LUO Ying-hong

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The signal cable was interfered by the lightning current mainly via the space inductive coupling and the earth resistive coupling when we analyzed the way that lightning current acted on the signal cable. According to the catenaries model of the route, electromagnetic transient software ATP-Draw was used to establish lightning catenaries insulator flashover lightning current propagation simulation circuit. Studies have shown that: Cable sheath current coupling led to over voltage and the earth resistive coupling caused the potential rise, and both factors have the biggest influence on signal cable. While contact line, protection line and through ground line current coupled to the cable core voltage is small, signal cable core over voltage along with the increase of grounding resistance increases. By reducing the signal cable grounding resistance, separate set of earth electrode and other measures to improve the lightning interference on the signal cable. References to catenary lightning strengthen the implementation program of Beijing-Shanghai high-speed railway; this paper also analyzes the height of ground wire erected, and gives advice erection height to improve the catenary lightning withstand level.

**Key words:** lightning current; coupling; signal cable; grounding resistance; potential rising on earth; ground wire