

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002896

27.5 kV 电缆金属护层雷击特性的建模与仿真

黄军玲¹ 高强²

(1. 中国民用航空飞行学院 广汉 618307; 2. 中交(武汉)铁路电化电信工程技术有限公司 武汉 430000)

摘要:基于行波理论,通过仿真计算不同分段情况下 27.5 kV 电缆分布式参数等效模型上雷电流波传播的速度,对比验证模型的准确性。通过理论计算确定金属护层装设护层保护器的必要性和护层保护器装设在首端的合理性。在此基础上,采用仿真软件研究雷电流流经接触网入侵电缆芯时电缆长度、金属护层末端接地电阻和线芯末端阻抗对金属护层雷击感应电压的影响。结果表明,长度约为 800 m 的电缆其金属护层雷击感应电压最大值的平均值最小;接地电阻在 2.5~3 Ω 内时,电缆金属护层雷击感应电压最大值的平均值最小,且均低于 25 kV,当接地电阻超过 5 Ω 时,外护套冲击耐受电压小于电缆金属护层雷击感应电压最大值,可导致外护套击穿;当接有较大容性阻抗或电缆末端短路,外护套冲击耐受电压远小于金属护层雷击感应电压,而接有较大感性阻抗或电缆末端开路时,金属护层雷击感应电压低于外护套冲击耐受电压。

关键词: 27.5 kV; 分布式参数; 接地电阻; 阻抗; 雷击

中图分类号: TM863; TN602 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4034

Modeling and simulation of lightning feature on the metal sheath of 27.5 kV cable

Huang Junling¹ Gao Qiang²

(1. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. CCCC (WuHan) Railway Electrification and Telecommunication Engineering Technology Co. Ltd, Wuhan 430000, China)

Abstract: Based on the traveling wave theory, the distributed parameters equivalent model of 27.5 kV cable was built and verified by simulating the speed of lightning wave in different segments. Make sure the necessity of the fitted protector on metal sheath and the reasonableness of protection provided in the first end by theoretical calculations. On this basis, when the lightning current intruded upon the cable core along the catenary, one software was adopted to simulate and study the influence of the cable length, grounding resistance of the metal end and impedance of the core end on the lightning induced voltage of cable metal sheath. The results show that the average of the maximum value of sheath lightning induced voltage may be the smallest when the cable length is 800 m; when the grounding resistance value is in the range of 2.5~3 Ω, the average of the maximum value of sheath lightning induced voltage may be the smallest, and they are lower than 25 kV, if the grounding resistance value is more than 5 Ω, the maximum value of sheath lightning induced voltage may exceed the lightning impulse withstanding voltage of outer sheath, leading to the breakdown of outer sheath; when the cable end is connected to a short circuit or a larger capacitive impedance, the sheath lightning induced voltage may be very large and may go far beyond the lightning impulse withstanding voltage of outer sheath, while the cable end is connected to an open circuit or an inductive impedance, the sheath lightning induced voltage may be smaller.

Keywords: 27.5 kV; distributed parameters; grounding resistance; impedance; lightning stroke

0 引言

据铁路运营有关部门统计显示,大部分电气化铁路

27.5 kV 牵引供电电缆故障是由于电缆外护套遭到损坏引起的,造成外护套损坏的主要原因是金属护层上产生的过电压,雷击感应电压是铁路工程应用中较常发生的一种金属护层过电压。因此,针对 27.5 kV 牵引供电电

缆金属护层雷击感应电压特性开展研究,对保障铁路供电安全意义重大^[1]。

文献[2]研究了避雷器接地电阻和土壤电阻率在接触网避雷器经接地电阻接地、接触网避雷器发生故障导致绝缘子发生雷击闪络两种情况下 27.5 kV 电缆金属护层雷击感应电压特性,但文献[2]存在如下问题:1)仅基于一种单元长度分段方式搭建等效单元模型,仿真计算雷电流波在电缆等效模型上的传播速度,故模型准确性验证具有局限性;2)未详细解释说明仿真前提条件,即金属护层首端装设护层保护器的必要性和合理性。文献[3]建立并求解一种可以考虑任意结构细导体的改进回路电流法,仿真分析电气化铁路桥面 10 kV 贯穿电缆上产生的雷击过电压特性,计算不同电缆端接方式下电缆各层的电位波形,发现金属护层接地不良时,在雷击作用下电缆各层之间将产生较高的电位差,破坏电缆绝缘。文献[4]针对电缆金属护层接地和电缆与外部设备典型接线方式两种电缆系统提出了计算模型,并仿真研究了合闸时线路为空载、单相接地故障、三相甩负荷 3 种电缆系统常见的操作过电压。文献[3-4]均采用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中的 JMarti 模型进行仿真分析, JMarti 模型的稳定性较好,但是其精度不够高,一般仅仅适用于多相对称状况。文献[5]研究了水平电场受有限传导大地的影响,并分析了埋地电缆当处于两层土壤介质时护层上的雷击感应电流。文献[5]仅从理论方面探讨土壤介质层对电缆金属护层雷击感应电流的影响,和实际的工况有合理性和实用性的差异。

本文依据文献[2]单位长度电缆电气参数计算公式搭建电缆分布式等效模型,仿真计算不同单元长度分段方式下雷电流波的传播速度,与雷电流波在交联聚乙烯电缆中的理论传输速度相比较,从而验证所搭建分布式等效模型的准确性;结合算例分析确定金属护层装设护层保护器的必要性,并得出护层保护器装设在首端比在末端更有利于延长护层保护器寿命的结论;基于已搭建的模型和理论计算结论仿真分析电缆长度、金属护层末端接地电阻和线芯末端阻抗对金属护层雷击感应电压特性的影响。

1 验证分布式等效模型准确性

依据文献[2]单位长度电缆电气参数计算公式计算出每 1 cm 长度搭建电缆分布式等效模型电缆电气参数如表 1 所示。

本文依据文献[2]单位长度电缆电气参数计算公式搭建电缆分布式等效模型。雷电流波在电缆线芯上传输具有一定传输速度^[6-7]。本文基于行波理论,通过仿真计算雷电流波传播速度来验证模型的准确性。仿真单

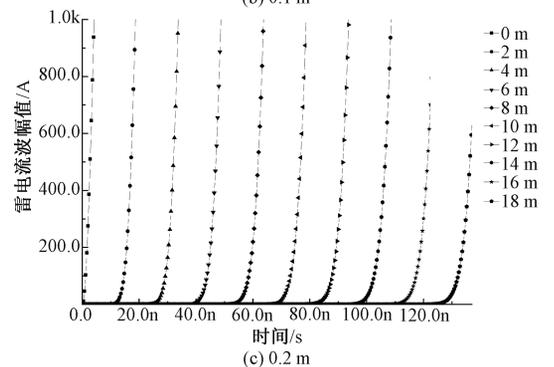
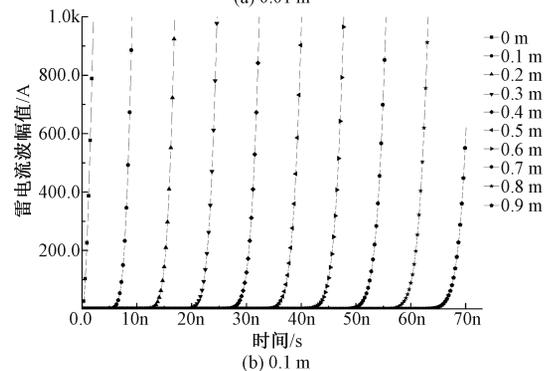
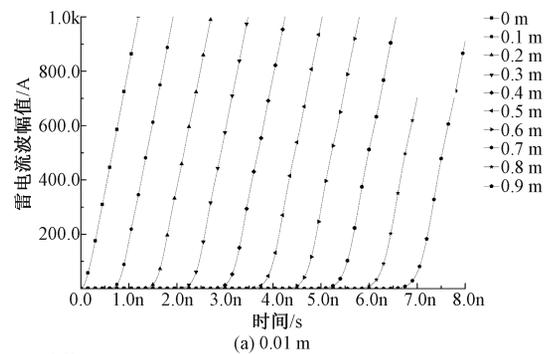
表 1 每 1 cm 长度的电气化铁路 27.5 kV 电缆电气参数

Table 1 Electrical parameters of 27.5 kV cable of electrified railway per cm

线芯电阻 $R_c/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)	线芯电感 $L_c/$ ($\text{H} \cdot \text{cm}^{-1}$)	线芯导体对 金属护层 电容 $C_{CS}/$ ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$)	金属护层 电阻 $R_s/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)	金属护层 电感 $L_s/$ ($\text{H} \cdot \text{cm}$)	金属护层对 地电容 $C_{SE}/$ ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$)
5.75×10^{-12}	4.06×10^{-9}	1.83×10^{-12}	9.19×10^{-17}	1.62×10^{-9}	1.09×10^{-11}

相回路 2 根 27.5 kV 电缆,分别以每段长度为 0.01、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10 m 搭建 1 个等效单元模型,仿真分析雷电流波在对应分布式参数等效模型上的特性。不同分段情况所对应的分布式参数等效模型上雷电流波的传输特性^[8],如图 1 所示。

依据图 1 计算得出的雷电流波在分布式参数等效模型上的传输速度如表 2 所示。



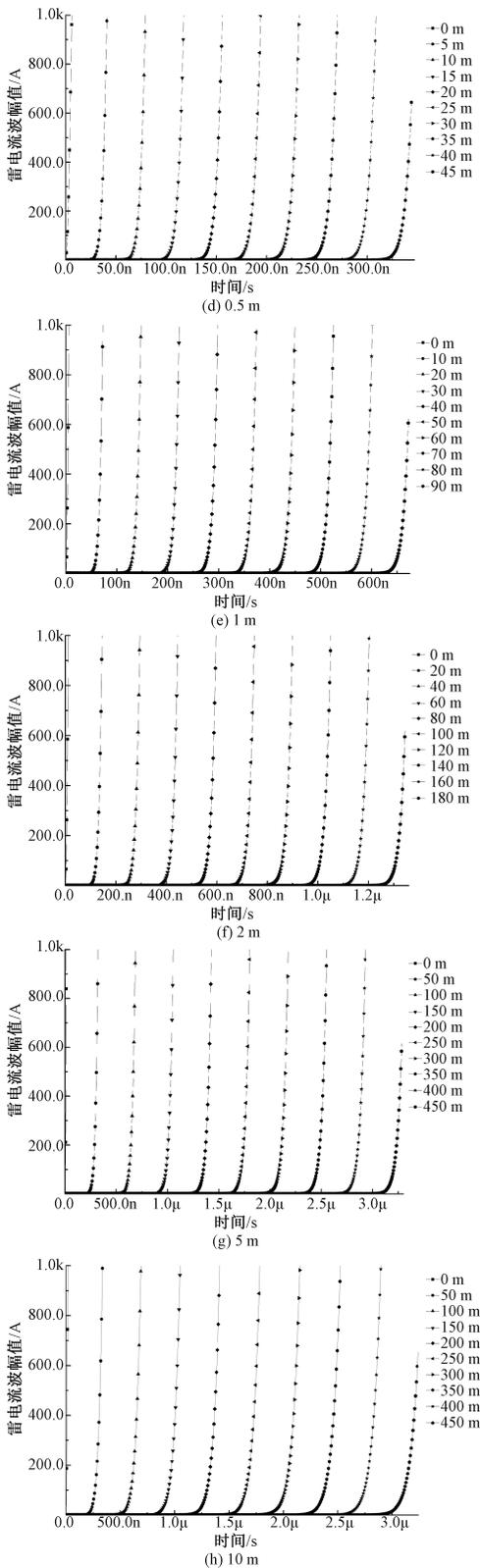


图 1 基于不同单元长度分段情况下分布式参数等效模型上雷电流波的传输特性

Fig. 1 Transmission characteristics of lightning current wave on distributed parameter equivalent model based on different unit length segments

表 2 不同分段情况对应的分布式参数模型上雷电流波的传播速度

Table 2 Propagation velocity of lightning current wave on distributed parameter model

分段方式	0.01 m	0.1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m
传输速度/ ($\times 10^8$ m/s)	1.49	1.43	1.42	1.40	1.36	1.24	1.19

已知雷电流波在交联聚乙烯电缆中的理论传输速度约为 1.5×10^8 m/s。由表 2 可以得出,对比每段长度为 0.1、0.2、0.5、1、2、5、10 m 所对应的分布式参数等效模型,雷电流波在每隔 0.01 m 长度搭建的分布式参数等效模型上的传播速度最接近标准值 1.5×10^8 m/s。由此表明,分段越精细,所搭建的分布式参数等效模型越准确。但是,对于仿真分析长度达数公里 27.5 kV 电缆,分段越精细,单元模型数量则越多,计算机仿真计算工作量将呈指数倍数增长。故综合考量模型准确性、仿真时间以及计算机仿真计算能力,本文采用每隔 1 m 搭建的电缆分布式参数等效模型研究电缆金属护层雷击感应电压特性。

2 金属护层雷击感应电压的理论计算

铁路工程应用中,一般采用接触网装设避雷器或架空地线等措施来减少因雷击而引起接触网跳闸发生的几率,其中装设避雷器措施能将雷击跳闸率降低约 40%^[9]。然而对于电气化铁路 27.5 kV 电缆,因避雷器仅设置在电缆与接触网的连接处,电缆金属护层的雷击感应电压仍可接近甚至大于电缆外护套冲击耐受电压。为了抑制电缆金属护层雷击过电压及金属护层环流,针对长度较短的电缆,工程上一般采取将其金属护层一端接保护器而另一端直接接地进行保护^[10-16]。然而,当金属护层保护器装设在首端和装设在末端时,雷电流在护层保护器上产生的雷击感应电压不同,流过护层保护器的电流也不同,从而护层保护器寿命也会有较大差别。

2.1 金属护层末端直接接地,首端不装设护层保护器

系统接线原理如图 2 所示,等值计算电路如图 3 所示。

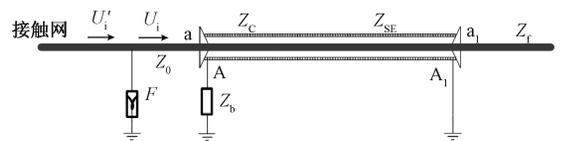


图 2 电缆末端接地原理接线图

Fig. 2 Schematic wiring diagram of cable end grounding

图 3 所示不接地端的金属护层承受的雷击冲击电压 U_{SE} 为:

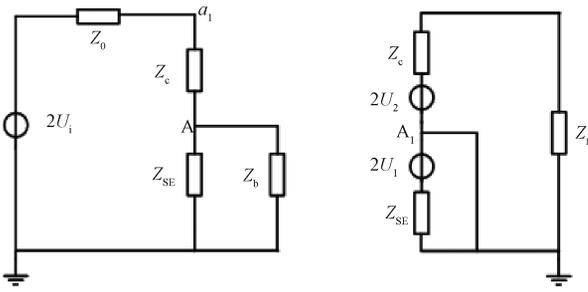


图3 电缆末端接地等值计算电路

Fig. 3 Equivalent calculation circuit of cable end grounding

$$U_{SE} = 2U_i \frac{Z_{SE}}{Z_0 + Z_C + Z_{SE}} \quad (1)$$

式中： U_i 为雷电进行波幅值； Z_0 为接触网的波阻抗，约为 $100 \sim 400 \Omega$ ； Z_C 为金属护层与线芯导体的波阻抗； Z_{SE} 为金属护层与大地之间的波阻抗。本案例中，避雷器设置在电缆线芯与接触网接线处，当接触网上雷击过电压高于避雷器保护电压时， U_i 为避雷器的保护电压值，即残压值；当接触网上雷击过电压低于避雷器的保护电压时，则 $U_i = U_i'$ ，即接触网上雷击进行波的电压幅值。

其中：

$$Z_C = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{u_r}{\epsilon}} \ln \frac{r_s}{r_1} \quad (2)$$

$$Z_{SE} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{u_r}{\epsilon}} \ln \frac{D}{r_s} \quad (3)$$

$$D = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4)$$

式中： r_1 为电缆线芯的半径； r_s 为金属护层的半径； D 为地中流等值深度； ρ 为大地的导电率； f 为工频，50 Hz。

2.2 末端不装设护层保护器，护层首端直接接地

图4所示为接线原理，等值计算电路如图5所示。

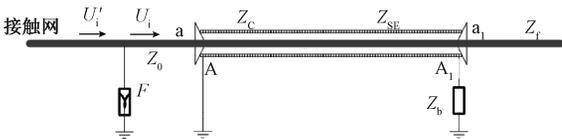


图4 电缆首端接地原理接线图

Fig. 4 Schematic wiring diagram of cable head grounding

由图5可知，此时不接地端金属护层所承受的雷击冲击电压 U_{SE} 为：

$$U_{SE} = 4U_i \frac{Z_C}{Z_0 + Z_C} \times \frac{Z_{SE}}{Z_C + Z_{SE}} \quad (5)$$

式(5)中参数 U_i 、 Z_0 、 Z_C 、 Z_{SE} 的意义及求取同2.1节。

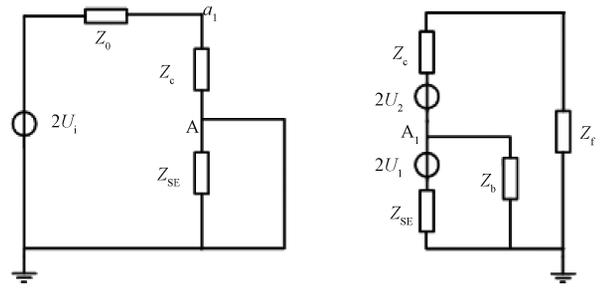


图5 电缆首端接地等值计算电路

Fig. 5 Equivalent calculation circuit of cable head grounding

2.3 案例分析及结论

案例1 电气化铁路 27.5 kV 电缆系统，接触网上雷电进行波的电压幅值 $U_i = U_{50\%} = 400$ kV，接触网波阻抗 $Z_0 = 200 \Omega$ ，则根据式(2)~(4)可得金属护层与线芯导体之间的波阻抗 $Z_C = 19.6 \Omega$ ，金属护层与大地之间的波阻抗 $Z_{SE} = 20.6 \Omega$ ，若护层末端直接接地，则通过式(1)可得护层开路端的雷击过电压 U_{SE} 。

1) 电缆线芯与接触网连接处无避雷器时， U_i 取接触网上雷击进行波的幅值 400 kV：

$$U_{SE} = 2 \times 400 \times \frac{20.6}{200 + 19.6 + 20.6} \approx 69 \text{ kV}$$

2) 接触网与电缆线芯连接处装设避雷器时， U_i 取避雷器的残压值 120 kV：

$$U_{SE} = 2 \times 120 \times \frac{20.6}{200 + 19.6 + 20.6} \approx 20.6 \text{ kV}$$

算例2 条件参数同算例1，通过式(5)计算护层首端直接接地时，末端开路的雷击过电压 U_{SE} 。

1) 电缆线芯与接触网连接处无避雷器时：

$$U_{SE} = 4 \times 400 \times \frac{33.5}{200 + 33.5} \times \frac{20.6}{19.6 + 20.6} \approx 117 \text{ kV}$$

2) 接触网与电缆线芯连接处装设避雷器时：

$$U_{SE} = 4 \times 120 \times \frac{33.5}{200 + 33.5} \times \frac{20.6}{19.6 + 20.6} \approx 36 \text{ kV}$$

分析算例1、2的计算结果，得到如下结论。

(1) 当接触网遭受雷击时，即便接触网与 27.5 kV 电缆线芯连接处有避雷器，电缆外护套冲击耐受电压 (37.5 kV) 仍有可能小于电缆金属护层上的雷击感应电压，则无论接触网与电缆线芯连接处是否有避雷器，仍必须在金属护层上加装护层保护器进而抑制金属护层雷击感应电压。

(2) 由理论计算结果可以看出，金属护层末端直接接地时的护层首端雷击感应电压比首端直接接地时的末端雷击感应电压高约 70%。当金属护层一端经护层保护器接地而另一端直接接地时，金属护层首端的护层保护器承受的雷击感应电压要小很多，护层保护器流经的雷

电流也小很多。因此,与护层保护器加装在金属护层末端相比,加装在首段更有利于延长护层保护器的寿命。

3 电缆金属护层雷击感应电压仿真研究

综合考虑模型准确性、仿真所用时间以及计算机仿真能力,研究中每隔 1 m 设置 1 个单位等效模型模块,图 6 所示为电缆分布式参数等效模型;金属护层接地方式设置为金属护层首端接护层保护器,末端经电阻直接接地;用 Simulink 软件中的 Surge Arrester 模块代替护层保护器,并设定保护电压 20 kV;选择国家规定的标准 2.6 μs/50 μs 雷电流波作为雷击源,其函数形式为 $I = 10\,000 \times (e^{-12\,000t} - e^{-1\,860\,000t})$ A,波形如图 7 所示。

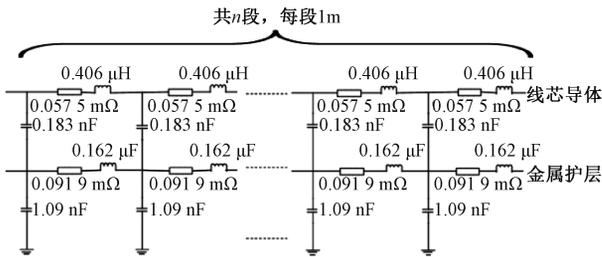


图 6 电缆分布式参数等效模型

Fig. 6 Cable distributed parameter equivalent model

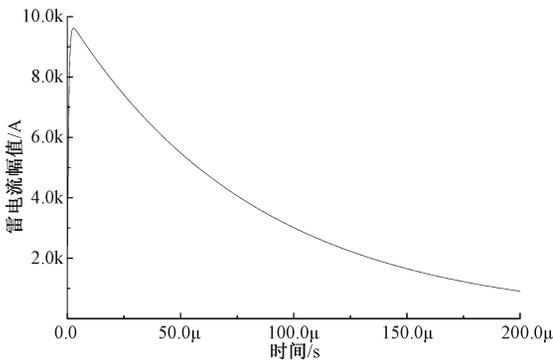


图 7 雷电流波形

Fig. 7 Lightning current waveform

3.1 金属护层末端接地电阻值和电缆长度的影响

在实际的电缆铺设过程中,电缆长度和护层保护器参数都是不确定的量,所以二者对电缆金属护层雷击感应电压的影响都应同时被考虑,图 8 所示为电气化铁路 27.5 kV 电缆牵引供电系统示意图。

本文在不改变其他条件的前提下,仅改变金属护层末端接地电阻值和电缆长度,对金属护层雷击感应电压进行仿真计算。结果表明,金属护层末端接地电阻值和电缆长度对金属护层雷击感应电压都有直接的影响。由于金属护层首端接护层保护器,末端经电阻接地,所以金

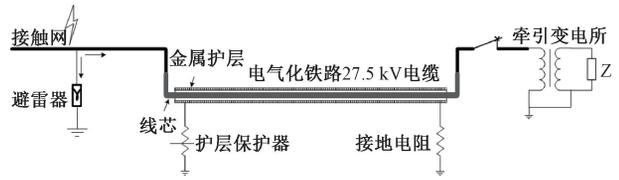


图 8 电气化铁路 27.5 kV 电缆牵引供电系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of 27.5 kV cable traction power supply system of electrified railway

属护层首端的电压即为护层保护器的保护电压,约为 20 kV,而末端经电阻接地,故护层末端电压较小。另外,除首、末两端外,金属护层上各点的雷击感应电压最大值相差较小,所以文章用金属护层雷击感应电压最大值的平均值来衡量。通过仿真计算得出不同接地电阻值和电缆长度所对应的金属护层雷击感应电压最大值的平均值,绘制成三维图,如图 9 所示。

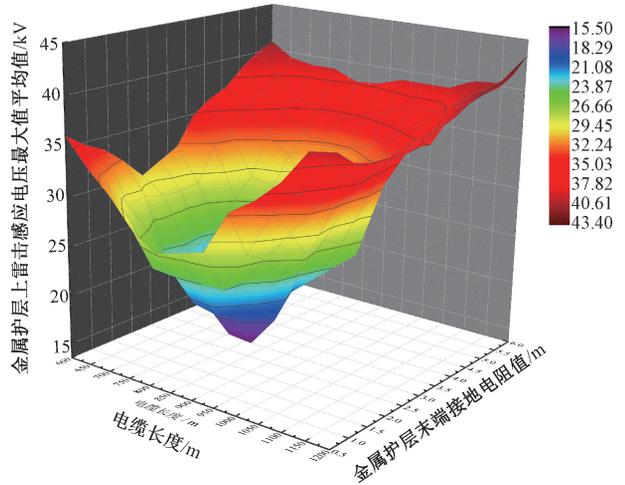


图 9 电缆长度和末端金属护层接地电阻值对金属护层雷击感应电压的影响

Fig. 9 Influence of cable length and grounding resistance value of terminal metal sheath on lightning induced voltage of metal sheath

考虑电缆长度为 600~1 200 m,由图 9 可知,电缆长度在 600~800 m 范围内时,金属护层雷击感应电压最大值的平均值随着长度的增加而减小;电缆长度在 800~1 200 m 范围内时,平均值随着长度的增加而增大;电缆长度约为 800 m 时,金属护层雷击感应电压最大值的平均值最小;而当电缆长度大于 1 150 m 时,金属护层雷击感应电压最大值的平均值接近甚至超出外护套冲击耐受电压 37.5 kV,可能击穿外护套。

由图 9 可知,金属护层末端接地电阻对金属护层雷击感应电压也有直接影响。接地电阻值在 2.5~3 Ω 范围内时,电缆金属护层雷击感应电压最大值的平均值最

小,均低于 25 kV;当接地电阻值大于 5 Ω 时,电缆金属护层雷击感应电压最大值的平均值大于外护套冲击耐受电压 37.5 kV,可能击穿外护套。因此,铁路工程上电缆金属护层经电阻接地时,应避免较大的护层接地电阻,考虑到电气化铁路 27.5 kV 电缆长度的特殊性及其他因素,金属护层接地电阻值取 2 Ω 最佳。

3.2 电缆线芯末端阻抗的影响

实际工程中,因铁路系统运行方式各异,电缆线芯末端连接的阻抗性质及大小亦不同,金属护层雷击感应电压差异性也较大^[17],则需要研究对 27.5 kV 电缆金属护

层雷击感应电压受电缆线芯末端阻抗性质及大小的影响。

1) 电缆线芯末端开路或短路

参数设置如下:雷电流波的最大幅值为 10 kA;避雷器的接地电阻 5 Ω;护层首端直接接地且接地电阻 0.5 Ω,末端接护层保护器且保护电压设为 20 kV。仅改变电缆末端阻抗性负荷大小并保持其它参数不变,经计算表 3 所示电缆金属护层各点的雷击感应电压平均值和最大值,图 10 所示为根据表 3 绘制成的曲线。

表 3 金属护层雷击感应电压受末端电阻的影响

Table 3 Influence of terminal resistance on lightning induced voltage of metal sheath

末端电阻/Ω	护层感应电压最大值/kV										平均值/kV (除去首末两端)	
	0 m	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	900 m		1 000 m
短路	1.09	198.6	200.8	201.7	210.6	208.9	220.8	220.6	224.9	234.1	20.9	213.4
100	1.05	21.62	22.39	22.28	23.17	22.99	23.19	23.31	23.71	24.21	20.81	22.98
300	1.21	20.16	20.1	21.81	21.16	21.57	21.81	22.16	23.31	23.17	19.86	21.69
500	0.98	19.16	19.31	19.51	20.51	21.41	21.78	21.81	22.79	22.38	20.04	20.96
700	1.16	17.01	17.1	17.42	17.66	17.48	18.31	18.49	18.69	18.71	20	17.87
900	1.17	16.8	17.82	18.11	18.09	19.12	18.45	19.41	19.69	19.58	19.79	18.56
开路	1.01	14.3	14.27	14.92	14.83	14.21	14.52	14.59	14.11	14.67	14.92	14.49

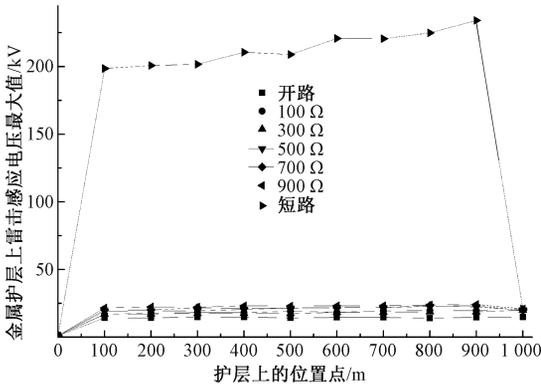


图 10 金属护层雷击感应电压受末端电阻的影响
Fig. 10 Influence of terminal resistance on lightning induced voltage of metal sheath

根据表 3 和图 10 可知,当金属护层首端接地末端接保护器时,若电缆末端开路,末端金属护层上的雷击感应电压较低。根据行波理论若电缆线芯末端开路,线芯末端会发生电压波正的全反射,反射波所到之处线芯导线上的电压比入射波加倍,同时在线芯上也发生电流波负

的全反射,使电流发射波所流过的线芯段上的总电流为零,则较高的雷击感应电压无法在电缆金属护层上产生^[18-20]。若线芯末端短路(即电缆末端发生短路故障的同时有雷电流侵入电缆线芯),该情况最为严重,故障过电流和雷电流波到达末端,发生电流波的全反射,线芯上的电流变为入射波的 2 倍,此时线芯上的电流最大,电缆金属护层的感应电压也最大。

2) 线芯末端阻抗性质的影响

维持电缆末端工频下阻抗 400 Ω 不变,改变阻抗性质,通过计算得到表 4 所示的电缆金属护层雷击感应电压最大值。由表 4 可知,当金属护层末端接保护器且首端接地时,若末端阻抗为较大的容性阻抗,末端金属护层雷击感应电压的最大值较大,远大于外护套冲击耐受电压。因入侵雷电流波的等效频率很高,末端所接的容性阻抗可等效为末端线芯短路,则电缆末端接容性阻抗等效于电缆末端短路情况。若末端阻抗为较大的感性负荷,针对等效频率很高的雷电流波,该阻抗等效于线芯末端开路,金属护层上的雷击感应电压较小。

表 4 金属护层雷击感应电压最大值与阻抗性质的关系

Table 4 The relationship between the maximum induced voltage of lightning stroke and the impedance property of metal sheath

末端负载电阻/Ω	-j400	100-j387	200-j346	300-j265	400	300+j265	200+j346	100+j387	j400
护层电压最大值/kV	261.9	91.4	52.7	35.2	19.0	10.1	10.7	9.7	9.73

4 结 论

为了保护电气化铁路牵引供电系统,工程上一般在铁路沿线支柱上装设避雷器。但是,当雷电流波沿接触网入侵电缆线芯时,即使装设了避雷器,金属护层上产生的雷击感应电压仍然可能接近甚至超出外护套冲击耐受电压(37.5 kV),所以,在 27.5 kV 电缆金属护层上装设护层保护器是十分必要的。而且,护层保护器装设在金属护层首端比装设在末端,更有利于延长护层保护器的寿命。

同时,考虑电缆金属护层雷击感应电压的影响,电气化铁路 27.5 kV 电缆长度建议选择约 800 m,但不能超过 1 150 m;电缆金属护层接地电阻取 2Ω 最佳。

参考文献

- [1] 牛海清,王晓兵,刘毅刚,等. 高压单芯电缆金属护套雷电过电压仿真和参数分析[J]. 高电压技术,2009,35(4):784-788.
NIU H Q, WANG X B, LIU Y G, et al. Simulation and parameter analysis of sheath lightning over-voltage of single-core cable [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4):784-788.
- [2] 周利军,高强,黄军玲,等. 高速铁路 27.5kV 电缆金属护层的雷击感应电压[J]. 中国铁道科学,2015,36(4):87-92.
ZHOU L J, GAO Q, HUANG J L, et al. Lightning induced voltage in the metal sheath of 27.5kV cable for high speed railway [J]. China Railway Science, 2015, 36(4):87-92.
- [3] 王顺超,何金良,陈维江. 高速铁路桥面 10 kV 电缆雷击过电压的仿真分析[J]. 高电压技术,2011,37(3):613-621.
WANG SH CH, HE J L, CHEN W J. Simulation and analysis of lightning overvoltage of 10 kV cable on the bridge of high speed railroad [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3):613-621.
- [4] 郭兴军,牛海清,王晓兵,等. 高压单芯电缆护套操作过电压计算及冲击试验[J]. 高电压技术,2007,33(10):147-150.
GUO X J, NIU H Q, WANG X B, et al. Calculation and test of sheath overvoltage of single-core cable [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10):147-150.
- [5] SALDANHA PAULINA J O, FONSECA BARBOSA C, DO COUTO BOAVENTURA W. Lightning-induced current in a cable buried in the first layer of a two-layer ground [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(4):956-963.
- [6] 周利军,高峰,李瑞芳,等. 高速铁路牵引供电系统雷电防护体系[J]. 高电压技术,2013,39(2):399-406.
ZHOU L J, GAO F, LI R F, et al. Lightning protection system of traction power supply system for high speed railway [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):399-406.
- [7] ANTONINI G, CRISTINA S, ORLANDI A. PEEC modeling of lightning protection systems and coupling to coaxial cables [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4):481-491.
- [8] 高强. 电气化铁路 27.5kV 电缆金属护层雷击感应电压特性的研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
GAO Q. Research of lightning induced voltage characteristics on metal sheath of electrified railway 27.5kV cable [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [9] 张雪原. 接触网安装避雷器的防雷效果研究[J]. 铁道工程学报,2010,27(9):69-73.
ZHANG X Y. Research on lightning protection effect of lighting arrester on catenary [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(9):69-73.
- [10] 李文豪,崔校玉,陈维荣,等. 客运专线 10kV 单芯电缆接地方式的研究[J]. 铁道工程学报,2009,26(4):39-42.
LI W H, CUI X Y, CHEN W R, et al. Study on the grounding mode of 10 kV single conductor cables on the passenger dedicated lines [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(4):39-42.
- [11] 敖振浪,敖进华,龚志鹏. 电缆铺设对气象设备的防雷效果对比分析[J]. 电子测量技术,2017,40(7):1-5.
AO ZH L, AO J H, GONG ZH P. Comparative analysis of lightning protection effect of cable laying on meteorological equipment [J]. Electronic Measurement Technology, 2017,40(7):1-5.
- [12] 周利军,梅诚,古维富,等. 杆塔接地装置冲击散流的测试技术研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):192-199.
ZHOU L J, MEI CH, GU W F, et al. Study on measurement technology of impulse dispersing current in tower grounding device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2019,40(1):192-199.
- [13] 张金玉,季鑫源,何贵先,等. 风电机组多重雷击暂态过电压分析[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(3):153-160.
ZHANG J Y, JI X Y, HE G X, et al. Transient overvoltage analysis of wind turbine under multiple lightning strokes [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(3):153-160.

- [14] 程子霞,薛文彬,周远翔,等. 电气化铁路 27.5 kV 单相单芯交联聚乙烯电缆载流量计算[J]. 高电压技术,2012,38(11):3067-3073.
CHENG Z X, XUE W B, ZHOU Y X, et al. Ampacity calculation of 27.5 kV single phase singles-core cross linked polyethylene power cables in electrified railways[J]. High Voltage Engineering,2012,38(11):3067-3073.
- [15] 陈妹敏,杨兰均,张乔根,等. 110 kV 电缆护层连接方式对护层过电压的影响[J]. 高电压技术,2006,32(3):37-39.
CHEN M M, YANG L J, ZHANG Q G, et al. Effect of sheath-bonding method on induced over-voltages in 110 kV XLPE cable system in the case of ground fault surge [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (3) : 37-39.
- [16] 易志兴,曹晓斌,吴广宁,等. 高速铁路电缆接地方式对护层感应电压的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(6):109-115.
YI ZH X, CAO X B, WU G N, et al. Influence of high-speed railway cable grounding mode on the induced voltage of the cable sheath [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2014,11(6):109-115.
- [17] 范海江,罗健. 铁路客运专线接触网防雷研究[J]. 铁道工程学报,2008(8):80-83.
FAN H J, LUO J. Research on the lightning protection of OCS in passenger dedicated lines [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(8):80-83.
- [18] 孙抗,郭景蝶,马星河. 高压电缆局部放电小波包-峰度法在线检测与定位[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(7):1099-1106.
SUN K, GUO J D, MA X H. On line partial discharge detection and localization based on the wavelet packet-kurtosis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7):1099-1106.
- [19] 杨世武,张旭,梁伊模,等. 铁路信号电缆接地方式研究和纵向电动势测试[J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):254-259.
YANG S W, ZHANG X, LIANG Y M, et al. Study on grounding of railway signal cable and test of longitudinal electromotive force [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2013,34(2):254-259.
- [20] 葛健玮,张航,毛水强,等. 谐波交流电对交联聚乙烯电缆的树状放电的影响[J]. 电子测量技术,2019,42(21):76-81.
GE J W, ZHANG H, MAO SH Q, et al. Effect of harmonic AC on dendritic discharge of XLPE cables [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 (21) : 76-81.

作者简介



黄军玲,2006 年于中国民航大学获得学士学位,2016 年于西南交通大学获得硕士学位,现为中国民航飞行学院高级实验师,主要研究方向为电缆雷击防护。
E-mail:hjlcafuc@163.com

Huang Junling received her B. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2006, M. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2016. Now she is a senior experimenter in Civil Aviation Flight University of China. Her main research interest includes lightning protection of cables.