

文章编号: 1005-0523(2021)06-0061-06



调整接触网避雷线保护角降低雷电绕击概率的研究

刘继永^{1,2}, 李威龙³

(1. 朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062350; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044;
3. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:为提高线路接触网设备防雷水平,降低雷电绕击概率,在避雷线高度计算过程中额外考虑了保护角大小因素,利用被保护设备与避雷线位置的几何关系推导出了保护角大小与避雷线架设位置的数学关系,建立相应的数学模型。通过改变避雷线架设位置调整避雷线两侧保护角大小,降低线路整体雷电绕击概率。参照准朔铁路接触网数据,对调整后前后线路雷电绕击概率进行计算比较,发现调整后线路的雷电绕击概率降低20.65%,接近理论计算的最小雷电绕击概率,该方法能在不增加成本的前提下有效降低雷电绕击概率。

关键词:接触网;避雷线;保护角;雷电绕击

中图分类号: U226.8+3

文献标志码: A

本文引用格式: 刘继永,李威龙. 调整接触网避雷线保护角降低雷电绕击概率的研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 61-66.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20211210.006

Research on Reducing the Probability of Lightning Shielding Failure by Adjusting the Protection Angle of Catenary Lightning Conductor

Liu Jiyong^{1,2}, Li Weilong³

(1. Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning 062350, China; 2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to improve the lightning protection level of line catenary equipment and reduce the lightning shielding probability, the factor of protection angle is additionally considered in the calculation of lightning conductor height. Using the geometric relationship between protected equipment and lightning conductor position, the mathematical relationship between protection angle and lightning conductor erection position is deduced, and the corresponding mathematical model is established. By changing the erection position of the lightning conductor and adjusting the protection angle on both sides of the lightning conductor, the overall lightning shielding probability of the line is reduced. Referring to the OCS data of Zhun—Shuo railway, the lightning shielding probability of the line before and after adjustment is calculated and compared. It is found that the lightning shielding probability of the line after adjustment is reduced by 20.65%, which is close to the minimum lightning shielding probability calculated in theory. This method can effectively reduce the lightning shielding probability without increasing the cost.

Key words: catenary; lightning conductor; protection angle; lightning shielding failure

Citation format: LIU J Y, LI W L. Research on reducing the probability of lightning shielding failure by adjusting the protection angle of catenary lightning conductor[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 61-66.

收稿日期: 2021-04-17

基金项目: 朔黄铁路发展有限责任公司基金项目(SHTL-19-06)

常见的接触网雷害类型主要为直击雷和感应雷造成的过电压^[1-5]。无论何种雷击造成的过电压都会远远超过接触网设备的绝缘所能承受的数值,是造成接触网绝缘故障和跳闸事故的主要原因之一^[6],同时雷电放电所产生的大电流,有可能使被击物炸毁、燃烧、使导体熔断或通过电动力引起机械损坏,影响接触网的健康及使用寿命^[7]。为了保护接触网沿线设备^[8-9],提升接触网耐雷水平,一般会采用加装避雷线的方法对线路进行保护,同等条件下,接触网线路架设避雷线后,雷电引起的感应过电压可降低20%左右^[10],对AF线和T线保护效果良好^[11]。

在避雷线架设施工中核心的问题是确定避雷线的架设高度,避雷线架设高度的选择将直接影响避雷线保护范围的大小^[12],架设高度过低会导致保护范围不够,架设高度过高又会使得工程投资增加,因此确定合理的避雷线高度是避雷线架设过程中重要的环节。

林卫^[13]利用滚球法计算了单线情况下的准朔铁路最小避雷线架设高度,并比较了架设避雷线前后线路耐雷水平的变化;鲁相来等^[14]针对武广高铁单线和复线两种情况分别进行了滚球法的高度计算,给出了参考的架设高度;赵紫辉等^[15]基于电气几何模型分别推导出了单线和复线铁路的接触网避雷线架设高度的计算公式,根据广深铁路接触网的结构特点及参数,计算得出了其3种形式线路的避雷线架设高度的建议值;这些文献中计算校验后的避雷线高度能够确保将范围内的接触网设备保护在内,但是在进行计算的过程中一般默认避雷线架设在支柱正上方对支柱两侧的设备进行保护,这样就忽略了避雷线保护角的问题,避雷线的保护角指的是避雷线与外侧导线的连接线和避雷线对地垂直线的夹角,如果牵引供电采用AT供电等方式,避雷线需要能同时保护支柱两侧的正馈线和承力索,由于两侧设备到支柱的距离不同导致一侧保护角偏大,保护角越大发生雷电绕击的概率也就越大,一旦发生雷电绕击会对接触网设备造成巨大的危害。针对这一点本文在滚球法计算公式中加入了避雷线安装位置到支柱距离参数,该参数的加入可以改变避雷线的架设位置,通过调整避雷线架设位置改变避雷线两侧保护角的大小,使两侧保护角大小相等,避免出现一侧保护角过大的情况。

1 未考虑保护角因素的避雷线架设一般高度校验计算

避雷线的高度计算方法一般有折线法和滚球法^[16-17],由于滚球法相对折线法更切合雷击的实际情况,并能科学地解释防止侧击雷问题,现在国际上大多采用滚球法作为避雷线高度计算方法,我国《建筑物防雷设计规范》^[18]中也推荐使用滚球法,利用该方法可以计算出避雷线的架设高度,避免出现保护范围不足等情况,本文将采用滚球法进行避雷线高度计算。滚球法是利用一个半径为的球体,沿着需要防直击雷的物体进行滚动,滚动过程中只触及避雷设备和地面而不触及被保护的物体,则球体所不能触碰的空间就是避雷设备防护的有效范围。

一般的高度校验计算中避雷线默认安装在支柱正上方,不考虑两侧保护角大小。在AT供电等方式中支柱两侧都有接触网设备存在,即校验的标准是判断在该高度下避雷线能否同时保护支柱两侧的正馈线和承力索等设备,这里着重考虑单线区段利用一根避雷线进行保护的情况,保护范围的确定如图1所示。

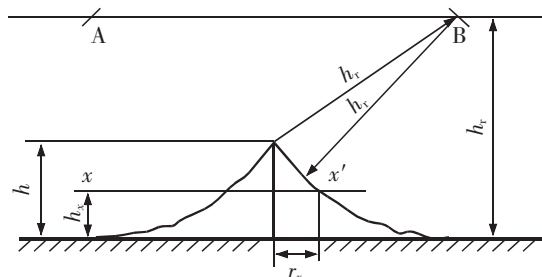


图1 滚球法确定避雷针保护范围

Fig.1 Determination of lightning rod protection range by rolling ball method

图1为单根避雷针的保护范围,避雷线可视作连续排列的避雷针,避雷线上一点即为一个避雷针针尖,要求架设的避雷线能同时保护承力索和正馈线,参照单根避雷针的保护范围计算方法进行避雷线保护范围计算,根据滚球法的定义,要利用该方法进行计算首先要制造一个滚球圆令避雷针针尖位于圆上,且圆与地面相切,以A,B两点为圆心作圆,两圆相切与地面,且避雷针针尖位于圆上,两圆圆弧与地面所围成的区域即为保护范围。避雷针在 h_x 高度的 xx' 平面的保护半径可以由式(1)计算

$$r_x = \sqrt{h(2h_r - h)} - \sqrt{h_x(2h_r - h_x)} \quad (1)$$

式中: r_x 为避雷针在 h_x 高度的 xx' 平面上的保护半径,m; h_r 为滚球半径,按照《建筑物防雷设计规范》中的规定,接触网为一类建筑, h_r 取值30m; h_x 为被

保护物的高度, m ; h 为避雷针针尖高度, m 。

保护角 α 的大小可以由式(2)计算

$$\alpha = \arctan \frac{r_x}{h-h_x} \quad (2)$$

代入相关的避雷线高度等参数即可计算出相应的保护范围,由此可以判断被保护设备是否在保护范围内,从而确定避雷线高度选择是否合理。

2 考虑避雷线保护角因素的改进高度校验计算

利用滚球法对避雷线高度进行计算校验时,默认避雷线架设在支柱正上方,如式(1)中 r_x 为避雷针在 η_x 高度的 xx' 平面上的保护半径,实际上 r_x 取值为被保护设备到支柱的距离,即以支柱作为保护半径的圆心,将避雷针置于此处。避雷线默认架设于支柱正上方时,如果要同时保护支柱两侧设备,例如正馈线和承力索,由于两侧线路到支柱的距离不等,必然会导致一侧的保护角偏大,提高雷电绕击发生的概率。因此对 r_x 参数进行调整,将式(1)中避雷线架设位置由原来的支柱正上方改为使两侧保护角相等处。

1) 令新的避雷线架设位置到支柱即原避雷线架设位置距离为 a , 若 $r_{x1} < r_{x2}$, 则有

$$r'_{x1} = r_{x1} + a \quad (3)$$

$$r'_{x2} = r_{x2} - a \quad (4)$$

式中: r_{x1} 为左侧设备到原避雷线垂直面的距离,即到支柱的距离, m ; r_{x2} 为右侧设备到原避雷线垂直面的距离, m 。

2) r'_{x1}, r'_{x2} 为被保护设备到新的避雷线所在垂直面的距离,通过调整 a 的大小使此时避雷线两侧保护角大小相等。由几何关系可得

$$\frac{r'_{x2}}{r'_{x1}} = \frac{h-h_{x2}}{h-h_{x1}} \quad (5)$$

3) 将式(3)、式(4)代入式(5)中可得 a 与 h 的关系如式(6)

$$a = \frac{[r_{x1}h_{x2} - r_{x2}h_{x1} + h(r_{x2} - r_{x1})]}{2h - h_{x1} - h_{x2}} \quad (6)$$

式中: h_{x1} 为左侧被保护物的高度, m ; h_{x2} 为右侧被保护物的高度, m 。

4) 利用参数 a 调整被保护设备到支柱的距离 r_x , 既可以得到避雷线两侧保护角大小相等条件下的高度计算式(7)

$$r_x \pm a = \sqrt{h(2h_r - h)} - \sqrt{h_x(2h_r - h_x)} \quad (7)$$

5) 对调整后的避雷线两侧保护角大小 β 可由

式(8)进行计算

$$\beta = \arctan \frac{r_x \pm a}{h - h_x} \quad (8)$$

当对利用该方法对避雷线保护角大小进行调整后,不会出现一侧保护角过大的情况,这对降低线路整体的雷电绕击概率是有益的。

3 改进前后雷电绕击概率试验比较

3.1 保护角大小对雷电绕击概率的影响

避雷线的保护不是绝对的,用避雷线来保护线路时,存在一定的雷电绕击概率,即雷电绕过避雷线击中保护线路。保护角和杆塔高度是影响绕击的重要参数,根据规程法的经验公式^[9],绕击率在平原和山区可分别由式(9)、式(10)计算

$$\lg P = \frac{\alpha \sqrt{h_T}}{86} - 3.9 \quad (9)$$

$$\lg P = \frac{\alpha \sqrt{h_T}}{86} - 3.35 \quad (10)$$

式中: P 为绕击概率; α 为避雷线对导线的保护角, ($^\circ$); h_T 为杆塔高度, m 。

接触网支柱高度为 9.2 m , 保护角在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内时,平原与山区地区的保护角与雷电绕击率关系如图2所示。

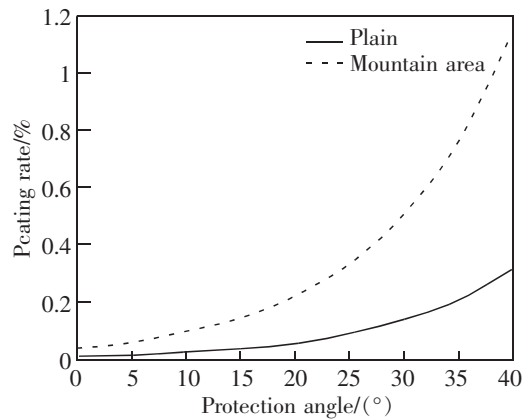


图2 平原与山区地区的保护角与雷电绕击率关系

Fig.2 Relationship between protection angle and lightning shielding rate in plain and mountainous areas

由图2可知雷电绕击率与保护角大小的关系,可见保护角越大发生雷电绕击的概率也越大,如果发生绕击,将会引起雷击事故,因此保护角不宜过大,一般在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内,平原地区雷电绕击率不超过 0.4% ,山区地区雷电绕击率不超过 1.2% 。

对于一根避雷线保护两侧设备的情况,两侧的保护角大小存在一侧偏大一侧偏小的情况,较大侧的保护角会使线路整体的雷电绕击概率偏大,不利

于防雷保护,因此需要通过改变避雷线架设位置来调整避雷线两侧的保护角大小,使两侧保护角大小相近或相等,从而降低线路整体的雷电绕击概率。

3.2 改进前的雷电绕击概率计算

在平原与山区地区,保护角对雷电绕击概率的影响程度不同,由于山区的雷击环境更加恶劣,这里以山区条件为例进行后续计算,式(10)可以分别计算出调整避雷线位置前后承力索侧和正馈线侧的雷电绕击率。

利用淮朔铁路^[13]实际接触网数据进行计算,支柱一侧正馈线高 8.15 m,距离支柱 1.35 m,支柱另一侧承力索高 8.2 m,距离支柱 3.1 m;接触网支柱高 9.2 m,避雷线安装于距离接触网支柱顶端 2.5 m 处,即避雷线的安装高度为 11.7 m,要求对该高度进行校验计算,判断能否同时保护支柱两侧的正馈线和承力索,完成校验后计算在该位置的避雷线保护角大小,并以此计算雷电绕击概率。

1) 避雷线保护角调整前的高度校验计算。

对正馈线进行保护范围校验:正馈线高 $h_x=8.15$ m,距离支柱 1.35 m,由式(1)可得避雷线在该高度下保护范围 $r_x=3.22$ m,因此正馈线在保护范围内。

对承力索进行保护范围校验:承力索高 8.2 m,距离支柱 3.1 m,由式(1)可得避雷线在该高度下的保护范围 $r_x=3.16$ m,因此承力索也在保护范围内。由以上校验结果可知,避雷线安装高度 11.7 m 能满足对下方接触网设备的保护要求。

2) 由式(2)计算避雷线两侧保护角大小。

正馈线侧保护角为

$$\alpha_1 = \arctan \frac{1.35}{11.7-8.15} = 20.82^\circ$$

承力索侧保护角为

$$\alpha_2 = \arctan \frac{3.1}{11.7-8.2} = 41.53^\circ$$

由以上计算发现,承力索侧保护角明显偏大,一般要求接触网避雷线保护角大小在 0 到 40° 之间,承力索侧保护角大小以及超出了这个值。

3) 由式(10)计算避雷线位置调整前的雷电绕击率。

正馈线侧的雷电绕击率为

$$P_{\alpha 1} = 10^{\left(\frac{20.82\sqrt{9.2}}{86} - 3.35\right)} \times 100\% = 0.242\ 3\%$$

承力索侧的雷电绕击率为

$$P_{\alpha 2} = 10^{\left(\frac{41.53\sqrt{9.2}}{86} - 3.35\right)} \times 100\% = 1.302\ 4\%$$

由承力索侧和正馈线侧分别的雷电绕击率可以求出整个避雷线保护范围内的雷电绕击的概率

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \quad (11)$$

式(11)中 P_1, P_2 为避雷线两侧的雷电绕击概率。

由式(11)可得避雷线位置调整前整个线路的雷电绕击的概率为

$$P_{\alpha} = 1 - (1 - P_{\alpha 1})(1 - P_{\alpha 2}) = 1.541\ 5\%$$

3.3 改进后的雷电绕击概率计算

由前一节的方法可以计算出调整后的避雷线架设位置,在此基础上对调整后的避雷线高度进行校验,计算保护角大小和雷电绕击概率。

1) 避雷线保护角调整后的高度校验计算。

r_{x1}, h_{x1} 为正馈线到支柱距离及正馈线距地面高度, r_{x2}, h_{x2} 为承力索到支柱距离及承力索距地面高度,将参数代入式(6)可得 $a=0.891$ m,即新的避雷线位置距离支柱 0.891 m 位于承力索侧, $r'_{x1}=2.241$ m, $r'_{x2}=2.09$ m,由式(7)校验,确定避雷线调整后两侧设备仍在其保护范围内。

2) 由式(8)计算避雷线两侧保护角大小。

调整后正馈线侧保护角为

$$\beta_1 = \arctan \frac{1.35+1.2}{11.7-7} = 32.26^\circ$$

调整后承力索侧保护角为

$$\beta_2 = \arctan \frac{3.1-1.2}{11.7-8.2} = 32.26^\circ$$

调整后两侧保护角大小相等,且原先偏大的承力索侧保护角由之前的 41.53° 减小到了 32.26°,角度明显减小并且处于要求的 0°~40° 范围之内。

3) 由式(10)计算避雷线保护角大小调整后的雷电绕击率。

正馈线侧和承力索侧的雷电绕击率为

$$P_{\beta 1} = 10^{\left(\frac{32.26\sqrt{9.2}}{86} - 3.35\right)} \times 100\% = 0.613\ 5\%$$

$$P_{\beta 2} = 10^{\left(\frac{32.26\sqrt{9.2}}{86} - 3.35\right)} \times 100\% = 0.613\ 5\%$$

由式(11)可得避雷线位置调整后整个线路的雷电绕击的概率,即

$$P_{\beta} = 1 - (1 - P_{\beta 1})(1 - P_{\beta 2}) = 1.223\ 2\%$$

避雷线调整后,线路整体的雷电绕击概率降低了 0.318 3%,为了确定该调整方法是否能较大程度的降低线路雷电绕击的概率,将它与理论计算的最小雷电绕击概率相比较。

为了计算最小雷电绕击概率,将式(11) P_1, P_2 中保护角 γ_1, γ_2 用一个与避雷线调整距离 a 有关的函

数表示,即

$$\gamma_1 = \arctan \frac{r_{x1} + a}{h - h_{x1}} \quad (12)$$

$$\gamma_2 = \arctan \frac{r_{x2} + a}{h - h_{x2}} \quad (13)$$

上式中有 $r_{x1} < r_{x2}$, 将式(12)、式(13)与式(10)代入式(11)中可得雷电绕击概率 P 与避雷线调整距离 a 的函数关系

$$P = 1 - \left(\frac{\arctan(\frac{r_{x1} + a}{h - h_{x1}}) \sqrt{h_T}}{86} - 335 \right) \times \left(\frac{\arctan(\frac{r_{x2} + a}{h - h_{x2}}) \sqrt{h_T}}{86} - 335 \right) \quad (14)$$

式(14)中借助 Matlab 软件绘制相同接触网设备参数下的最小雷电绕击概率与此时的避雷线调整距离大小关系曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,整体雷电绕击概率是先单调递减经过拐点后单调递增,是存在一个最小值的,当避雷线调整距离 a 取值 0.9 m 时,有最小雷电绕击概率 1.223 1%,几乎与保护角相等情况的雷电绕击概率相等,此时的避雷线两侧保护角大小可由式(12)、式(13)计算,正馈线侧保护角大小 $\gamma_1 = 32.37^\circ$,承力索侧保护角大小 $\gamma_2 = 32.15^\circ$ 。

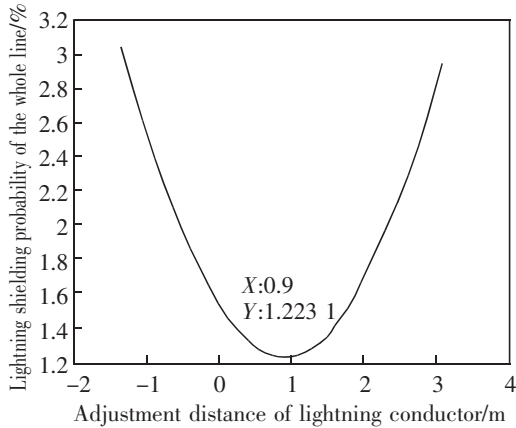


图 3 避雷线调整距离与绕击概率的关系曲线

Fig.3 Relation curve between adjustment distance of lightning conductor and winding probability

表 1 避雷线保护角调整前后雷电绕击概率比较

Tab.1 Comparison of lightning shielding probability before and after lightning protection angle adjustment

Protection angle sizing	Protection angle at positive feeder side/(°)	Protection angle of messenger cable side/(°)	Lightning shielding probability/%
Before protection angle adjustment	20.82	41.53	1.541 5
After protection angle adjustment	32.26	32.26	1.223 2
Minimum value of theoretical calculation	32.37	32.15	1.223 1

避雷线保护角调整前后雷电绕击概率如表 1 所示。由表 1 可知,避雷线位置调整后的雷电绕击概率比避雷线直接架设于支柱正上方时的雷电绕击概率减少了 0.318 3%,该方法将雷电绕击概率从之前很低的水平 1.541 5%进一步减小到了 1.223 2%,降低了 20.65%,调整后的雷电绕击概率已经接近理论计算的最小值,可见令两侧保护角相等的调整方法有非常好的效果。

4 结论

考虑保护角大小对雷电绕击概率的影响,提出一种考虑保护角大小因素的避雷线高度计算方法,通过调整避雷线架设位置与支柱之间的距离改变避雷线两侧保护角的大小,降低线路整体的雷电绕击概率。通过实际接触网线路的参数计算与理论仿真结果比较对方法的有效性进行了研究,得到如下结论:

1) 该方法能有效降低线路整体的雷电绕击概率,参照准朔铁路接触网数据,利用该方法调整后线路雷电绕击概率降低了 20.65%。

2) 理论仿真计算发现雷电绕击概率大小与避雷线调整距离近似一个开口向上的二次函数抛物线,即雷电绕击概率理论上存在一个最小值,雷电绕击概率随着偏大侧的保护角减小、偏小侧的保护角增大而向着雷电绕击概率理论最小值移动,由于不是标准抛物线,在两侧保护角大小接近的时候就取得最小值,而在两侧保护角相等的情况下非常接近最小值。

3) 仿真中雷电绕击概率随两侧保护角大小的变化情况说明考虑保护角因素的避雷线改进计算方法中令两侧保护角大小相等从而求取近似的雷电绕击概率最小值的思路是正确的。利用避雷线改进计算方法得到的线路雷电绕击概率近似理论计算得出的最小值,说明了方法的有效性。

4) 在实际的工程中,通过调整避雷线架设位置即可改变保护角大小,从而可以有效的降低雷电绕击概率且不需要额外的成本。

参考文献:

[1] 包甲. 武广高铁武汉至咸宁段接触网防雷改造研究[D]. 南昌:华东交通大学,2017.
BAO J. Research on lightning protection of catenary in Wuhan—Xianning section of Wuhan—Guangzhou high speed railway[D]. Nanchang:East China Jiaotong University,2017.

[2] 曹保江,陈力生,李瑞芳,等. 基于分形理论的高速铁路高架桥接触网系统雷击率分布研究[J]. 铁道学报,2021,43

- (1):77-84.
CAO B J, CHEN L S, LI R F, et al. Study on lightning strike rate distribution of overhead contact system of high-speed railway viaduct based on fractal theory[J]. Journal of railways, 2021, 43(1): 77-84.
- [3] LI R F, CHEN K, CHEN L S, et al. Study on enhancing lightning protection scheme of Catenary in subway viaduct section[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017, 12(2): 950-958.
- [4] 张血琴, 陈奎, 李瑞芳, 等. 高架桥段地铁接触网的改进防雷措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1527-1534.
ZHANG X Q, CHEN K, LI R F, et al. Improved lightning protection measures for Metro catenary in Viaduct Section [J]. High voltage technology, 2016, 42(5): 1527-1534.
- [5] BIALO A, ADAMSKI D, ZAWADKA L. Investigations of disturbances from overvoltages and lightning strikes in the catenary[C]//23rd International Scientific Conference on Transport Means Palanga; Scopus, 2019:1029-1032.
- [6] YANG Y X, ZHANG Y P. Research on lightning protection simulation of high-speed railway catenary based on ATP-EMTP[J]. Journal of Information and Computational Science, 2015, 12(4): 1511-1521.
- [7] 刘仕兵, 仇智圣, 马志方. 基于变权物元可拓模型的接触网健康状态综合评价[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(1): 125-132.
LIU S B, QIU Z S, MA Z F. Comprehensive evaluation of catenary health status based on variable weight matter-element extension model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(1): 125-132.
- [8] 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 for traction power supply system of high speed railway [J]. High Voltage Technology, 2013, 39(2): 399-406.
- [9] 王林. 高速铁路接触网与架空输电线路防雷规范差异对比分析[J/OL]. 铁道标准设计: 1-7[2021-10-13]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202102220008>.
WANG L. Comparison and analysis of lightning protection specifications between OCS and overhead transmission lines of high-speed railway[J/OL]. Railway Standard Design: 1-7 [2021-10-13]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202102220008>.
- [10] 曹道勇, 陈纪纲. 避雷线提高接触网耐雷水平分析[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(6): 23-26.
CAO D Y, CHEN J G. Analysis of improvement of lightning withstand level of OCS by overhead ground wire[J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(6): 23-26.
- [11] 王宇, 王思华, 陈天宇, 等. 川藏铁路牵引供电接触网直击雷防护初探[J]. 电瓷避雷器, 2021(4): 41-46.
WANG Y, WANG S H, CHEN T Y, et al. Preliminary study on direct lightning protection of catenary for traction power supply of Sichuan-Tibet Railway [J]. Electric Porcelain Arrester, 2021(4): 41-46.
- [12] 曹晓斌, 田明明, 李瑞芳, 等. 高速铁路接触网避雷线高度设计方法研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 50-55.
CAO X B, TIAN M M, LI R F, et al. Study on design method of lightning conductor height of OCS of high-speed railway[J]. Journal of railways, 2020, 42(6): 50-55.
- [13] 林卫. 准朔铁路接触网耐雷水平分析及加装避雷线方案研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(4): 90-93.
LIN W. Analysis of lightning resisting level and the research on installation of lightning conductor for Zhungeer-Shuozhou railway OCS[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(4): 90-93.
- [14] 鲁相来, 陈军喜, 豆强. 架空避雷线在武广高铁接触网防雷系统的应用[J]. 电气化铁道, 2015(4): 1-3.
LU X L, CHEN J X, DOU Q. Application of overhead lightning conductor in OCS lightning protection system of Wuhan Guangzhou high speed railway[J]. Electric Railway, 2015(4): 1-3.
- [15] 赵紫辉, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 基于电气几何模型的接触网避雷线架设高度计算方法[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(6): 89-93.
ZHAO Z H, WU G N, CAO X B, et al. EGM based calculation method for the installation height of catenary ground wire[J]. China Railway Science, 2011, 32(6): 89-93.
- [16] 王思华, 王宇, 李萍, 等. 高速铁路高架桥区段接触网避雷线架设高度研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1715-1722.
WANG S H, WANG Y, LI P, et al. Study on the erection height of OCS lightning conductor in Viaduct section of high speed railway[J]. Journal of Railway Science and engineering, 2021, 18(7): 1715-1722.
- [17] 孙少江. 高速铁路接触网防雷技术[J]. 电气化铁道, 2017, 28(3): 43-48.
SUN S J. Lightning protection technology of high speed railway catenary[J]. Electric Railway, 2017, 28(3): 43-48.
- [18] 中国中元国际工程公司. 建筑物防雷设计规范: GB 50057-2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
CHINA IPPR INTERNATIONAL ENGINEERING CORPORATION. Code for design of lightning protection of buildings: GB 50057-2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [19] 电力工业部科学技术司. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620-1997[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
Department of Science and Technology, Ministry of Electric Power Industry. Overvoltage Protection and Insulation Coordination for AC Electrical Installations: DL/T 620-1997 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.



第一作者: 刘继永(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为牵引供电新技术, 2004年本科毕业于华北电力大学, 2011年硕士毕业于华北电力大学, 2021年至今北京交通大学电气工程学院博士在读。E-mail: 1981jy@163.com。

(责任编辑: 李根 姜红贵)