

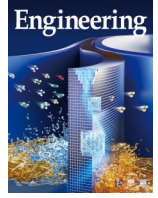


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Electrical and Electronic Engineering—Article

全尺寸交流 500 kV 输电杆塔复合横担的雷电闪络特性

王乾^a, 梁曦东^{a,*}, 沈余峰^b, 刘书明^a, 左周^a, 高岩峰^c

^a State Lab of Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b Shandong Electrical Engineering & Equipment Group Co., Ltd., Jinan 250024, China

^c State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 March 2021

Revised 18 July 2021

Accepted 29 September 2021

Available online 4 April 2022

关键词

复合横担
输电杆塔
雷电闪络
流注放电
耐雷水平

摘要

架空输电线路(OTL)一直以来都是电力传输的主要方式。随着输电电压和输电容量的迅速提高,输电杆塔的尺寸也随之增加,造成土地资源的大量占用。考虑到线路复合绝缘子的优异性能,复合横担有望成为这一问题的解决方案。在本文中,作者制备了一个安装有复合横担的全尺寸交流(AC)500 kV 输电杆塔,并施加了不同极性的雷电过电压。借助高速相机记录了流注-先导放电的过程,确认了闪络的主要路径。通过测量闪络电压并根据空气密度和湿度对结果进行修正,证实了放电的极性效应。继而,根据杆塔结构和闪络特性计算了杆塔的耐雷水平。基于全尺寸试验的结果与分析,确认了复合横担的可行性,并提出了结构优化方案。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在过去的几十年中,由于科学技术的进步和电力需求的增长,远距离大容量输电已取得了长足的发展[1–2]。架空输电线路(OTL)一直以来都是电力传输的主要方式,并且还将在接下来的若干年中发挥主导作用[3]。不过,常规输电杆塔的建设需要消耗大量钢材。同时,随着电压等级的提高,输电杆塔的尺寸也显著增大。以交流(AC) 500 kV 输电线路为例,输电走廊的宽度为 45~60 m。即便采用紧凑型杆塔,也需要 28~43 m,造成土地资源的大量占用[4]。

为了解决这一问题,日本学者在 20 世纪 60 年代提出

在输电杆塔中引入横担,并且目前已在多个国家的不同电压水平下得到了应用。除了节省土地之外,固定的复合横担还可以减少风偏的影响[5–6]。而随着硅橡胶(SR)绝缘子的广泛应用,复合横担逐渐成为主流。与钢基材料相比,以聚合物为基础的材料更加轻便,且耐腐蚀性更优[7–9]。然而,对于在较高电压等级,如 500 kV 下使用的复合横担来说,单根水平的复合绝缘子无法满足承担导线重量所要求的机械强度要求[9–11]。于是,研究人员提出了一种结构更加复杂的复合横担:除了由水平绝缘子保证绝缘所要求的间隙之外,还增加斜拉绝缘子以提高拉伸强度[12]。这一结构目前已被多数学者所认可。

复合横担的外绝缘特性包括运行电压下沿绝缘子表面

* Corresponding author.

E-mail address: lx-d-ea@mails.tsinghua.edu.cn (X. Liang).

的污秽闪络特性以及过电压下导线与杆塔之间的气隙闪络特性。鉴于长距离间隙的闪络特性很难由短间隙的结果直接外推得出,已有学者开展了全尺寸交流 500 kV 复合横担的污闪试验,阐明了盐密与闪络电压之间的负指数关系[5,13]。工频电压下的绝缘配置主要由沿面的污秽闪络特性决定,而过电压下,如雷电过电压和操作过电压,则是导线与杆塔之间的气隙最容易闪络[14–17]。对于简单的电极形式如棒-棒电极和棒-板电极,其闪络特性已有较多的理论和实验研究[18–19]。也有学者对装有横担的杆塔的冲击电压闪络特性进行过探索[20–21]。然而,实际杆塔的气隙无法通过理想模型或者相近结构进行等效。因此,带有复合横担的杆塔过电压闪络特性只能通过全尺寸试验得出。不过,由于试验条件复杂,相关研究仍十分有限,也就使得安装复合横担对杆塔耐雷水平会产生怎样的影响这一问题仍未能得到解决。

在本文中,我们准备了一个安装有复合横担的全尺寸交流 500 kV 输电杆塔模型,对其施加了不同极性的雷电过电压,测量了其闪络特性。同时,记录了流注-先导放电的发展过程,确认了闪络的主要路径。并且,通过对修正后测量结果的分析,确认了雷电闪络的极性效应。进而,根据实验数据计算了带有复合横担的杆塔的耐雷水平,确认了复合横担的可行性,并提出了结构优化方案。

2. 实验设置

2.1. 输电杆塔模型

实验用的全尺寸交流 500 kV 非对称输电杆塔模型总高 53 m,如图 1 (a) 所示,其中, R 为 3.7 m, L_1 和 L_2 分别为 6.4 m 和 6.9 m。实验杆塔根据安装悬式绝缘子的常规“上”字形输电杆塔设计,其尺寸已通过仿真进行了验证[9]。由于杆塔的下方两相是对称的,实验时只保留了位于同侧的两相并安装了复合横担,下文分别称之为“上相”和“下相”。已有的研究表明,省略的一相对于其他两相的电场分布和对杆塔(或地)的杂散电容可以忽略[9,12]。与常规杆塔相比,安装复合横担之后可以节省 2~3 m 的输电走廊。为了更好地模拟实际运行条件,复合横担末端还安装了至少 10 m 的四分裂导线。并且,复合横担两端各安装了一组均压环,导线旁还安装了屏蔽环。另外,为了减轻杆塔的高度、方便试验的开展,杆塔只保留了偏上的部分,底部离复合横担较远的部分被移除。于是,杆塔模型的实际高度被缩减到 17 m。除此之外,根据实验标准的要求[22],导线与接地线之间的距离应不小于 1.5 倍的闪络距离,在对下相进行实验时会

将杆塔吊起,如图 1 (b) 所示,以确保导线与接地线之间的距离在 10 m 以上。需要说明的是,上相和下相在进行实验时会被吊起到相同的高度。

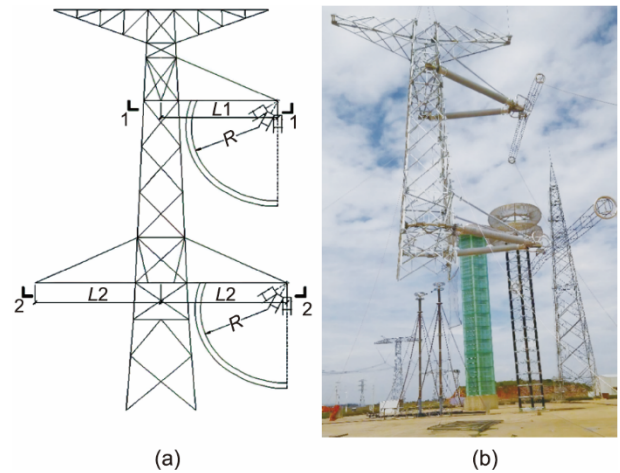


图 1. 实验中使用的在同一侧装有两套复合横担的输电杆塔模型。(a) 示意图; (b) 实际照片。

每套复合横担包括四支绝缘子,如图 2 (a) 所示。一对常规的线路绝缘子用于斜向拉伸,其总长为 5032 mm。同时,一对大直径的绝缘子用于水平支撑,其绝缘距离为 4689 mm。水平绝缘子的直径为 320 mm,其伞套由具备憎水性迁移能力的硅橡胶复合材料制成。绝缘子及其尺寸选择已经通过了电磁环境仿真和污秽闪络实验的检验[5,9]。不过,水平绝缘子的芯体由聚氨酯 (PU) 填充而成,以取得更好的密封效果和更轻的重量,而非像线路绝缘子一样为玻璃纤维增强塑料。水平绝缘子的横截面如图 2 (b) 所示。

2.2. 电压波形设定

用于过电压实验的冲击电压发生器额定电压为 7200 kV,其实际输出的正极性雷电过电压波形如图 3 所示。根据测得的波形可知,幅值时间和半峰宽的偏差分别为 29.2% 和 -17.4%,电压过冲为 8%,这些都满足国际电工委员会 (IEC) 标准的要求[22]。与此同时,冲击电压发生器的内部电容为 18.75 pF,外接电容为 1400 pF 左右,包括分压器的自身电容以及分压器、高压引线、设备和电压均衡器的接地电阻[23–24]。

2.3. 闪络过程的拍摄

雷电闪络的过程为典型的流注-先导放电。本文所使用的观测系统如图 4 所示。当感应到冲击电压时,闭合线圈可以产生信号来触发示波器。一旦示波器被触发,高速相机便立即被触发对放电过程进行拍摄,并将图像传输到计算机中。

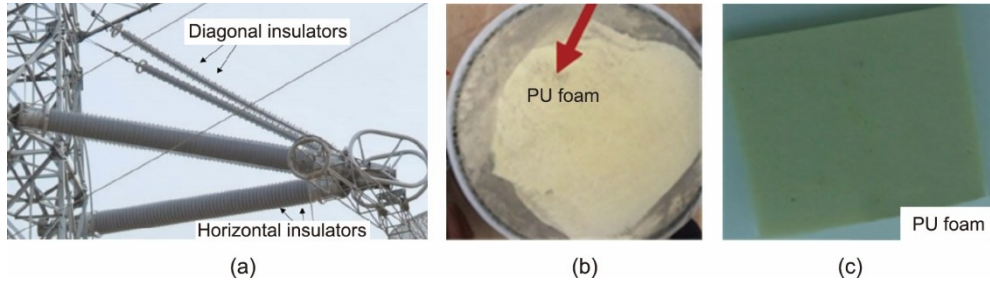


图2. (a) 一套复合横担的结构图；(b) 由聚氨酯填充的水平绝缘子的横截面图；(c) 用于内绝缘的聚氨酯泡沫材料。

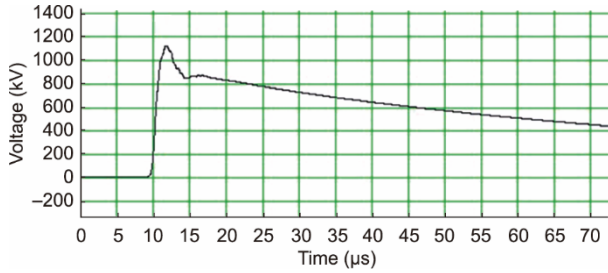


图3. 正极性雷电过电压的波形，峰值时间 $1.50 \mu\text{s}$ ，半峰宽 $41.91 \mu\text{s}$ 。

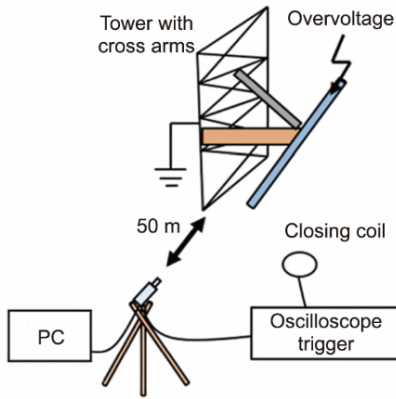


图4. 雷电闪络过程观测系统的示意图。PC：个人电脑。

3. 结果与分析

3.1. 雷电过电压下的闪络路径

根据安装复合横担后的杆塔结构，气隙击穿时有三条可能的路径。在图5中， d_1 表示水平绝缘子内侧均压环与杆塔之间气隙的击穿， d_2 和 d_3 则分别表示水平绝缘子和斜拉绝缘子两端均压环之间的气隙闪络。各条路径的气隙长

度如表1所示。

表1 各条闪络路径的气隙长度

Air gap distance	Upper phase	Lower phase
	d_1 (m)	3.98
d_2 (m)	4.67	4.43
d_3 (m)	4.23	4.56

为了更好地拍摄放电过程，实验均安排在晚上进行。沿三条路径的气隙放电图像如图6所示。实验中对上相和下相均施加了正、负极性雷电过电压各20次[22]。沿各条路径放电的次数如表2所示。结果清楚地表明，水平绝缘子内侧均压环与塔身之间的气隙（即 d_1 ）是最主要的放电路径（占上相的90%，占下相的55%）。这也再次证实了雷电闪络遵循的距离优先规律[25]。并且，不同极性之间的数据差异表明正极性下这一趋势更为明显，而负极性电压下的结果分散性更大。

进一步的观察发现，塔身中部有凸出的螺帽。同时为了方便攀登杆塔，塔身两侧还有长度10 cm左右的螺栓。因此，这些细小的结构在塔身侧面形成若干尖端，进一步缩短了绝缘距离，使得流注-先导放电更容易形成。由尖端引起的闪络的细节如图7所示。

3.2. 雷电过电压下的闪络过程

实验中拍摄了上相和下相复合横担在负极性过电压下的闪络过程，如图8和图9所示。在图8(b)中，随着电压的增加，流注放电首先出现在水平绝缘子均压环靠近导

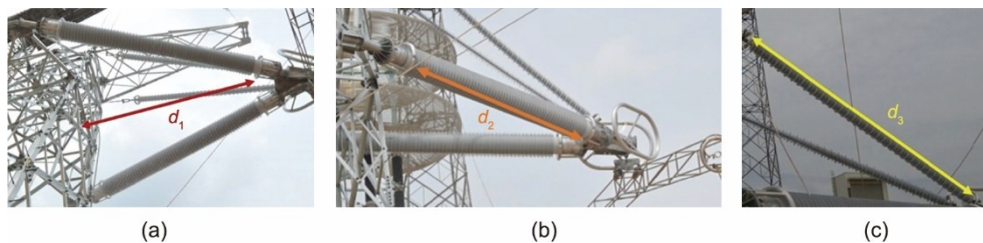


图5. 雷电过电压下可能的放电路径。(a) 水平绝缘子内侧均压环与塔身之间的气隙闪络， d_1 ；(b) 水平绝缘子两端均压环之间的气隙闪络， d_2 ；(c) 斜拉绝缘子两端均压环之间的气隙闪络， d_3 。

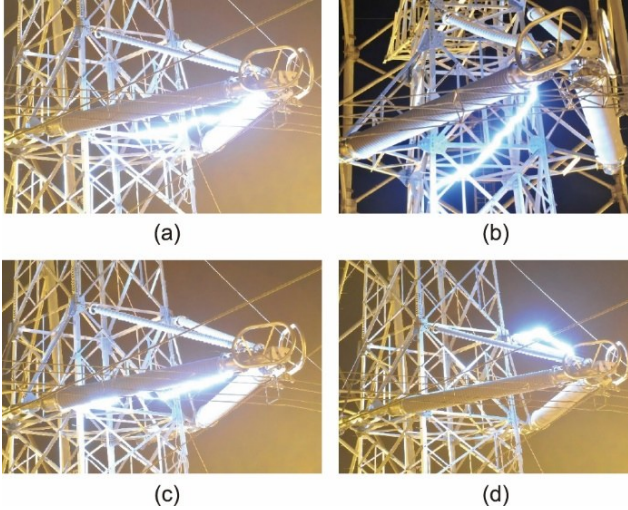


图6. 不同放电路径的典型放电过程图像。(a) d_{1m} (对塔身中部放电); (b) d_{1s} (对塔身侧面放电); (c) d_2 ; (d) d_3 。

表2 不同路径的闪络次数

Number of flashover		
	Upper phase	Lower phase
N_1	36	22
N_2	4 (neg×3 + pos×1)	9 (neg×5 + pos×4)
N_3	0	9 (neg×7 + pos×2)

neg: negative lightning overvoltages; pos: positive lightning overvoltages.

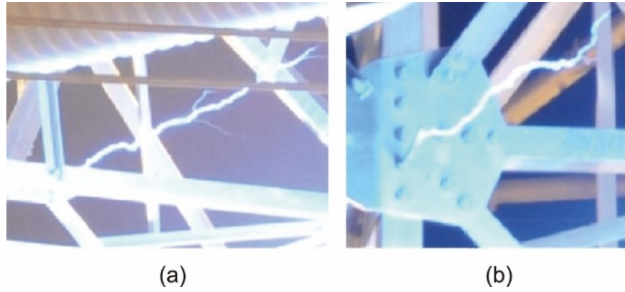


图7. 造成闪络电压下降的尖端结构。(a) 塔身中部的螺帽; (b) 塔身两侧的螺栓。

线的一侧, 并逐渐向着杆塔发展。接下来, 如图8 (c) 所示, 出现了不同方向的五条流注通道。流注放电的亮度较低但分布均匀, 宽度大约为1~1.3 m。随后, 在某些流注通道的两端出现了树枝状的先导, 如图8 (d) 所示。

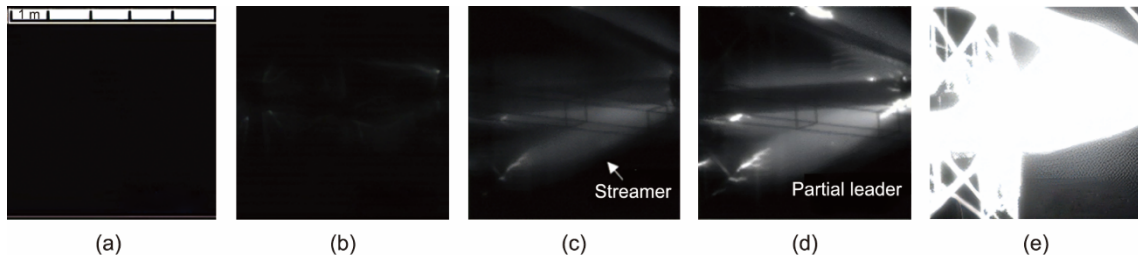


图8. 上相的闪络过程 (拍摄速度: 180 064 fps; 拍摄间隔: 5.55 μs ; 曝光时间: 4.82 μs)。 (a) -3.05 μs ; (b) 2.5 μs ; (c) 8.05 μs ; (d) 13.61 μs ; (e) 19.16 μs 。

最后, 如图8 (e) 所示, 先导沿着流注通道的方向不断发展, 并最终形成了剧烈发光的主放电通道。并且, 考虑到气隙 (长度约4 m) 流注形成的时间约为10 μs , 也就是说负流注的发展速度为 $10^7\sim 10^8 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图9中的闪络过程与图8类似。而三条闪络路径的区别主要在于闪络位置, 其空气击穿的过程是一致的。

3.3. 雷电过电压下的闪络特性

由于单次放电的随机性较大, 通常使用升降法得到的50%概率放电电压 $U_{50\%}$ 进行分析[26]。每组试验包括20次雷电过电压闪络, 图10中包含了全部80次闪络实验的数据, 整理后的实验结果见表2。由于空气状态对闪络特性有着至关重要的影响, 在每组实验开始前、中间和结束后测量了气温 (T)、相对湿度 (RH) 和气压 (P)。三次测量的平均值作为该组数据的空气状态, 如表3所示, 其中, σ 表示闪络电压的方差。

3.4. 实验数据的空气湿度修正

由于空气状态会显著地影响闪络过程, 实验中测得的数据需要修正到标准空气状态 (即温度 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, 气压 $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$, 以及绝对湿度 $h_0 = 11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) 下才能进行比较[28]。一般来说, 沿绝缘子表面或者气隙的闪络电压会随着湿度的上升而增大, 因为湿度越大, 被水分子捕获的电子数量便越多, 电子的平均自由程越小。然而, 一旦相对湿度达到80%或更高, 放电过程会变得十分不规则, 特别是表面放电。根据文献[22], 标准湿度下的闪络电压 $U_{50\%, h_0}$ 可由实际测量结果 $U_{50\%}$ 计算得出:

$$U_{50\%, h_0} = \frac{U_{50\%}}{\left[1 + 0.01 \times \left(\frac{h}{\delta} - 11\right)\right]^\omega} = \frac{U_{50\%}}{k^\omega} \quad (1)$$

式中, h 、 δ 和 ω 分别表示绝对湿度、相对空气密度和湿度修正系数, 而 k 是一个中间参数。另外,

$$\delta = \frac{P}{P_0} \times \frac{273.15 + T_0}{273.15 + T} \quad (2)$$

式中, P 和 T 分别代表测量到的气压和气温。接下来, 定

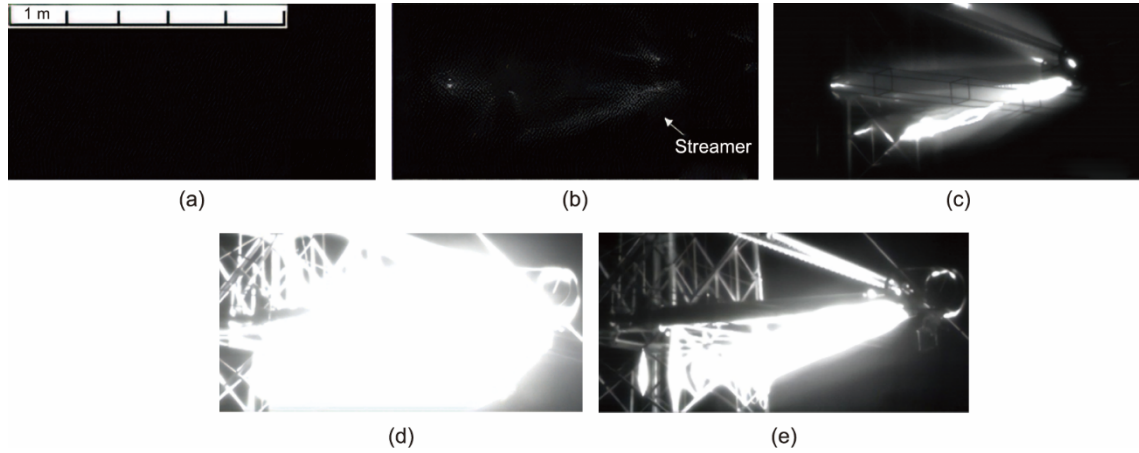


图9. 下相的闪络过程（拍摄速度：130 140 fps；拍摄间隔：7.68 μs ；曝光时间：7.11 μs ）。（a）-3.75 μs ；（b）3.93 μs ；（c）11.61 μs ；（d）19.29 μs ；（e）25.96 μs 。

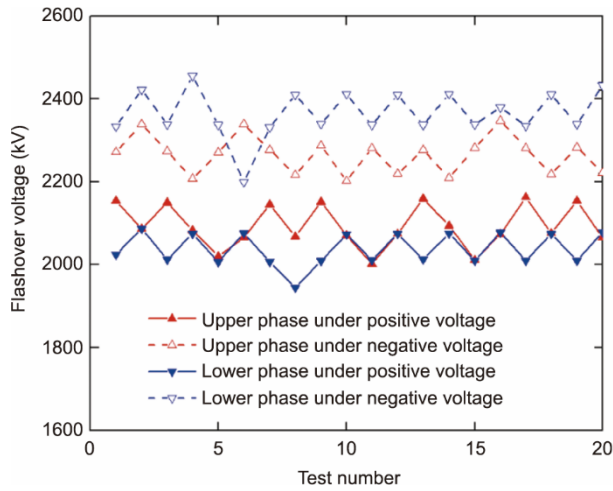


图10. 通过升降法测得的复合横担的雷电闪络特性。

表3 雷电过电压试验中的闪络电压和空气状态

Location	$U_{50\%}$ (kV)	σ (%)	T ($^{\circ}\text{C}$)	RH (%)	P (Pa)
Upper (+)	2090.0	2.4	25.7	62.8	79.24
Upper (-)	2268.6	2.0	28.2	40.9	79.32
Lower (+)	2038.7	1.9	28.4	38.9	79.19
Lower (-)	2372.3	2.8	26.3	47.6	79.25

义另一个中间参数 g ：

$$g = \frac{U_{50\%}}{500L\delta k} \quad (3)$$

然后，根据表4中 g 的大小确定 ω 的取值[22]。 L 表示最短放电路径的长度。根据空气湿度修正后的闪络电压见表5，结果表明湿度在本文中对实验结果的影响较小。

3.5. 实验数据的空气密度修正

与湿度类似，空气密度也会显著影响闪络特性。以往的研究表明空气密度较高时闪络电压也更高[5]。本文中的实验是在昆明进行的，其海拔约为2100 m。IEC标准中

表4 由 g 确定的空气湿度修正系数 ω 和空气密度修正系数 m 的取值

g	ω	m
< 0.2	0	0
$0.2-1.0$	$g(g-0.2)0.8^{-1}$	$g(g-0.2)0.8^{-1}$
$1.0-1.2$	1.0	1.0
$1.2-2.0$	$(2.2-g)(2-g)0.8^{-1}$	1.0
> 2.0	0	1.0

表5 雷电过电压实验中的闪络电压与空气状态

Location	$U_{50\%}$ (kV)	h (g· m^{-3})	δ	k	g	ω	$U_{50\%,h_0}$ (kV)
Upper (+)	2090.0	15.0	0.767	1.085	1.26	0.867	1947.8
Upper (-)	2268.6	11.2	0.762	1.037	1.44	0.527	2226.3
Lower (+)	2038.7	10.8	0.760	1.032	1.27	0.852	1985.1
Lower (-)	2372.3	11.7	0.766	1.043	1.45	0.519	2323.5

介绍了海拔修正系数的确定方法，但只适用于海拔不超过2000 m的地区[22]。目前在更高海拔地区的实验经验较少，仍然缺少被广泛认可的方法。在本文中，由于海拔只是略高于2000 m，这里仍然根据IEC中的修正方法进行外推。因此标准空气密度下的闪络电压 $U_{50\%,\delta_0}$ 为：

$$U_{50\%,\delta_0} = \frac{U_{50\%}}{\delta^m} \quad (4)$$

式中， δ 的定义与前文中相同，而 m 表示空气密度修正系数，也可以通过表4得出。根据空气密度修正后的闪络电压结果见表6。结果表明，在本研究中空气密度对闪络电压的影响比空气湿度要显著得多。作为对比，未安装复合横担时，常规悬式绝缘子的绝缘长度约为4152 mm [27]。已有的研究指出其正极性雷电冲击下的 $U_{50\%}$ 约为2567 kV（校正到标准条件下）。这说明从闪络电压的角度讲，复合横担的应用并不会削弱杆塔的雷电防护能力。

从修正到标准条件后的实验数据来看，下相的闪络电

表6 空气密度修正后的闪络电压

Location	$U_{50\%,h_0}$ (kV)	δ	g	ω	$U_{50\%,\delta_0}$ (kV)
Upper (+)	1947.8	0.767	1.26	1.0	2539.5
Upper (-)	2226.3	0.762	1.44	1.0	2921.7
Lower (+)	1985.1	0.760	1.27	1.0	2612.0
Lower (-)	2323.5	0.766	1.45	1.0	3033.3

压略高于上相，因为上相的主要放电路径的气隙距离(d_1)比下相的要稍短一些。另外，负极性下的闪络电压明显高于正极性下(高约15%)。这些结论也与其他学者从简化电极或缩放电极中得出的结论一致[28]。

在雷电过电压下，气隙的击穿不仅需要足够的电压，还需要足够的时间。在本研究中，击穿发生在雷电冲击的波尾部分，如图11(a)所示。击穿电压与闪络时间之间的关系如图11(b)所示，也印证了电压越低，间隙击穿所需的时间越长。同时，正、负极性结果间的显著差异也再次证实了极性效应的存在。此外，由于不同放电路径的伏秒特性各异，实验数据也表现出明显的差异，特别是对上相施加正极性电压时。

3.6. 耐雷水平

根据前文的实验结果以及输电杆塔的结构，即可得到耐雷水平与雷击跳闸率[29]。运行经验表明，雷击以负极性雷为主，并且多数情况下集中于塔身，也就相当于给导线施加了正极性过电压[28]。因此，接下来将根据上相的正极性闪络电压进行计算。一般来说，雷击位置可分为两

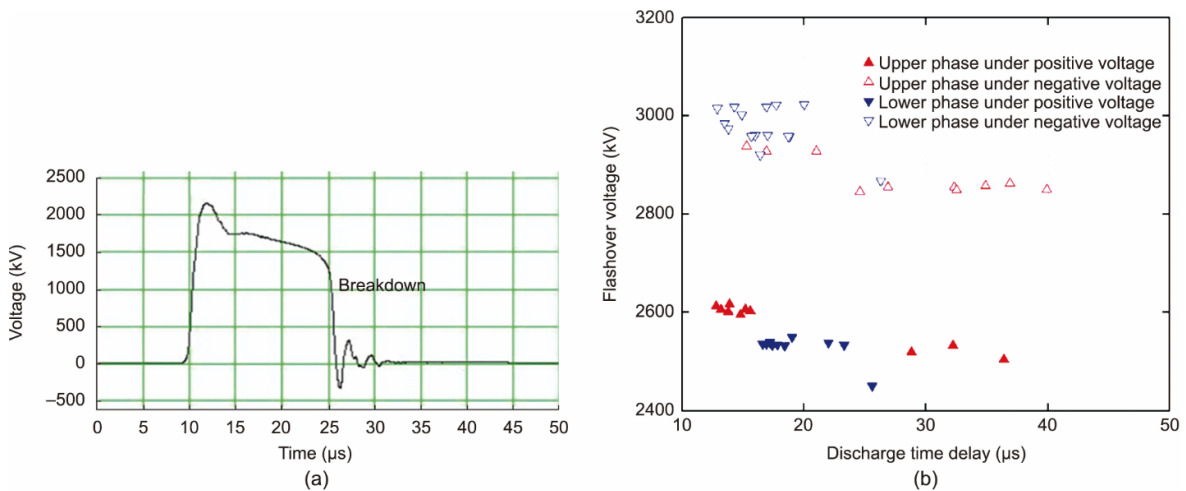


图11. (a) 对上相施加正极性过电压时的雷电闪络波形；(b) 击穿电压与闪络时间之间的关系。

$$I_1 = \frac{2539.5}{\left[(1 - 0.256) \times 0.88 \times 7 + \frac{26.5 \times 0.88}{2.6} \left(\frac{38}{53} - 0.256 \right) + \frac{30}{2.6} \left(1 - 0.20 \times \frac{46.7}{30} \right) \right]} = 152.4 \quad (11)$$

种：雷击塔身和雷击导线。对于本文中研究的安装有复合横担的杆塔来说，其雷击塔身时的耐雷水平 I_1 可按如下方法计算[28,30]：

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{(1 - k) \beta R_g + \frac{\beta L_t}{\tau_f} \left(\frac{h_s}{h_t} - q \right) + \frac{h_c}{\tau_f} \left(1 - q_0 \frac{h_g}{h_c} \right)} \quad (5)$$

式中， q 为地线和导线的耦合系数，对本研究中的杆塔而言，

$$q = q_0 q_1 = 0.20 \times 1.28 = 0.256 \quad (6)$$

式中， q_0 和 q_1 分别表示双地线对外侧导线的耦合系数以及雷击塔顶的电晕修正系数，其具体数值参见文献[24]。另外， β 表示雷击导线时的分流系数，也就是流过塔身的电流占总电流的比例。 R_g 则表示杆塔的接地电阻，对于本研究中的交流500 kV杆塔来说，

$$\beta = 0.88, R_g = 7 \Omega \quad (7)$$

除此之外， L_t 表示杆塔的等效电感，其大小与杆塔的高度有关。本文中，

$$L_t = 53 \times 0.5 = 26.5 \quad (8)$$

式中， τ_f 为波前时间，在雷电防护时通常取 $2.6 \mu\text{s}$ ； h_s 表示导线悬挂点的高度，本文中为38 m，也就是复合横担的高度； h_t 表示杆塔的高度，本文中为53 m； h_c 和 h_g 则分别表示导线和地线的平均高度，这里取

$$h_c = h_2 - \frac{2}{3} f_c = 38.0 - \frac{2}{3} \times 12.0 = 30.0 \quad (9)$$

$$h_g = h_1 - \frac{2}{3} f_g = 53.0 - \frac{2}{3} \times 9.5 = 46.7 \quad (10)$$

式中， f_c 和 f_g 分别表示导线和地线的弧垂。基于以上数据可以得出：

雷击导线时的耐雷水平 I_2 则可按如下方法得出[24]:

$$I_2 = \frac{4U_{50\%}}{Z} \quad (12)$$

式中, Z 表示架空输电线路的波阻抗, 由导线材料、分裂导线结构等因素共同决定。中国交流 220 kV、330 kV 和 500 kV 输电线路波阻抗的典型值为 400 Ω 、303 Ω 和 278 Ω [28]。于是,

$$I_2 = \frac{U_{50\%}}{Z} = \frac{4 \times 2539.5}{278} = 36.54 \quad (13)$$

中国地区雷电流的幅值超过 I 的概率一般可以由如下公式表示[28]:

$$\lg R = -\frac{I}{88}, \text{ or } R = 10^{-\frac{I}{88}} \quad (14)$$

于是, 在雷击塔身 (R_1) 和雷击导线 (R_2) 两种情况下雷电流超过耐雷水平的概率分别为:

$$R_1 = 10^{-\frac{152.4}{88}} = 1.85\% \quad (15)$$

$$R_2 = 10^{-\frac{36.54}{88}} = 38.44\% \quad (16)$$

如果雷电流超过耐雷水平, 输电线路便会发生闪络。不过, 雷电过电压的持续时间只有几十微秒, 不足以引起高压开关动作。因此, 只有当冲击电压引起的闪络形成稳定的工频电弧时才会造成跳闸, 而这一过程具有一定的随机性。于是, 除了耐雷水平之外, 还需要雷击跳闸率 n 这一综合指数来评价输电线路的雷电防护能力:

$$n = \eta NR \quad (17)$$

式中, η 为建弧率, 也就是过电压下气隙闪络发展为工频电弧的概率。 N 则表示每百公里输电线路每年遭遇的雷击次数的估计值, 对于中国典型平原地区的杆塔来说:

$$\eta = 0.87, N = 36.4 \quad (18)$$

此外, 假设保护角 $\alpha = 14^\circ$, 则雷击塔身的概率 g 以及屏蔽失败的概率 R_a 可以根据杆塔结构由蒙特卡洛方法求得:

$$g = 16.67\%, R_a = 0.19\% \quad (19)$$

因此, 总的跳闸率为雷击塔身和雷击导线引起的跳闸之和:

$$n = \eta NR = \eta N (gR_1 + R_a R_2) = 0.87 \times 36.4 \times (0.1667 \times 0.0185 + 0.0019 \times 0.3844) = 0.098 \quad (20)$$

作为对比, 常规交流 500 kV 输电杆塔的雷击跳闸率为 0.081 次 $(100 \text{ km} \cdot \text{a})^{-1}$, 也就是说, 平均来看, 每 100 km 输电线路每年发生 0.081 次跳闸[28]。这说明安装复合横担之后杆塔的雷电防护能力有所下降。考虑到影响 n 的各个因素, 实际工程中可以采取较小的保护角来提高雷电防护水平。

4. 结论

在本文中, 我们制备了一个安装有复合横担的全尺寸交流 500 kV 输电杆塔, 并对其施加了不同极性的雷电过电压, 较好地模拟了实际运行条件。记录了其放电过程, 测量了其闪络特性。基于修正到标准条件后的实验结果, 计算了杆塔的耐雷水平, 得出了如下几条主要结论:

- 研究证实了雷电闪络会优先选择距离最短的气隙, 且塔身的尖端结构更容易形成流注。
- 空气湿度和空气密度都会影响雷电闪络特性, 而由气温和气压决定的空气密度则对本研究的雷电闪络特性起着主导作用。
- 从全尺寸输电杆塔的实验数据中可以看出非常明显的极性效应, 负极性雷电过电压下, $U_{50\%}$ 比正极性过电压下高 15% 左右。
- 安装复合横担之后输电杆塔的耐雷水平有所下降, 因此保护角的选择应小于 14° 。

致谢

本研究得到国家自然科学基金(51977116)的资助。

Compliance with ethics guidelines

Qian Wang, Xidong Liang, Yufeng Shen, Shuming Liu, Zhou Zuo, and Yanfeng Gao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Liu Y, Yu Y, Gao N, Wu F. A grid as smart as the internet. *Engineering* 2020; 6(7):778–88.
- [2] Liang X, Li S, Gao Y, Su Z, Zhou J. Improving the outdoor insulation performance of Chinese EHV and UHV AC and DC overhead transmission lines. *IEEE Electr Insul M* 2020;36(4):7–25.
- [3] Yu Y, Liu Y, Qin C, Yang T. Theory and method of power system integrated security region irrelevant to operation states: an introduction. *Engineering* 2020; 6(7):754–77.
- [4] Fang Y, Wang L, Li R, Zhang Q, Gao J, Song B. A modified model for discharge voltage of AC transmission line-tower air gaps. *IEEE Access* 2019;7: 71472–80.
- [5] Shen Y, Liang X, Wang J, Wu C, Wang G, Gao C. Pollution characteristics of AC 500 kV composite cross-arm in high altitude area. *High Voltage Eng* 2017; 43(8):2760–8. Chinese.
- [6] Zachariades C, Rowland SM, Cotton I, Peesapati V, Chambers D. Development of electric-field stress control devices for a 132 kV insulating cross-arm using finite-element analysis. *IEEE T Power Deliver* 2016;31(5):2105–13.
- [7] Jahangiri T, Wang Q, Bak CL, da Silva FF, Skouboe H. Electric stress computations for designing a novel unibody composite cross-arm using finite element method. *IEEE T Dielect El In* 2017;24(6):3567–77.

- [8] Amir AL, Ishak MR, Yidris N, Zuhri MYM, Asyraf MRM. Potential of honeycomb-filled composite structure in composite cross-arm component: a review on recent progress and its mechanical properties. *Polymers* 2021;13(8):1341.
- [9] Gao Y, Wu C, Liang X, Liu Y, Wang G, Gao C. Electric field and electromagnetic environment analyses of a 500 kV composite cross arm. In: 2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2015); 2015 Oct 18–21; Ann Arbor, MI, USA; Piscataway: IEEE; 2015. p. 399–402.
- [10] Yang X, Wang Q, Wang H, Zhang S, Peng Z. Transient electric field computation for composite cross-arm in 750 kV AC transmission line under lightning impulse voltage. *IEEE T Dielect El In* 2016;23(4):1942–50.
- [11] Huo F, Zhang P, Yu Y, Liu Q, Chu L, Wang X. Electric field calculation and grading ring design for 750 kV four-circuits transmission line on the same tower with six cross-arms. In: The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018); 2018 Jun 28–29; Chengdu, China. Piscataway: IEEE; 2018. p. 3155–9.
- [12] Yang Y, Li N, Peng Z, Liao J, Wang Q. Potential distribution computation and structure optimization for composite cross-arms in 750 kV AC transmission line. *IEEE T Dielect El In* 2014;21(4):1660–9.
- [13] Zhang Z, Zhao J, Zhang D, Jiang X, Li Y, Wu B, et al. Study on the dc flashover performance of standard suspension insulator with ring-shaped non-uniform pollution. *High Volt* 2018;3(2):133–9.
- [14] Sima W, Sun P, Yang M, Wu J, Hua J. Impact of time parameters of lightning impulse on the breakdown characteristics of oil paper insulation. *High Volt* 2016;1(1):18–24.
- [15] Datsios ZG, Mikropoulos PN, Tsovilis TE. Effects of lightning channel equivalent impedance on lightning performance of overhead transmission lines. *IEEE T Electromagn C* 2019;61(3):623–30.
- [16] Jiang X, Hu J, Zhang Z, Yuan J. Switching impulse flashover performance of different types of insulators at high altitude sites of above 2800 m. *IEEE T Dielect El In* 2008;15(5):1340–5.
- [17] Malicki P, Papenheim S, Kizilcay M. Shielding failure analysis of a hybrid transmission line with AC and DC systems on the same tower. *Electr Pow Syst Res* 2018;159:2–8.
- [18] Zeng R, Zhuang C, Zhou X, Chen S, Wang Z, Yu Z, et al. Survey of recent progress on lightning and lightning protection research. *High Volt* 2016;1(1):2–10.
- [19] Chen W, Zeng R, He H. Research progress of long air gap discharges. *High Volt Eng* 2013;39(6):1281–95. Chinese.
- [20] Jiang Z, Wu W, Wang B, Xie P, Li H, Lin F. Design and test of 500 kV lightning protection insulator. *IEEE Access* 2019;7:135957–63.
- [21] Asif M, Lee HY, Khan UA, Park KH, Lee BW. Analysis of transient behavior of mixed high voltage dc transmission line under lightning strikes. *IEEE Access* 2019;7:7194–205.
- [22] IEC 60060: High-voltage test techniques. International Standard. Switzerland: IEC Central Office; 2020.
- [23] Thien YV, Azis N, Jasni J, Kadir MZAA, Yunus R, Yaakub Z. Pre-breakdown streamer propagation and positive lightning breakdown characteristics of palm oil impregnated aged pressboard. *IEEE Access* 2020;8:58836–44.
- [24] Li G, Liao W, Li Q, Ding Y, Sun L. Voltage output performance of 7200 kV/480 kJ impulse voltage generator. *Proc CSEE* 2008;28(25):1–7. Chinese.
- [25] Qiu Z, Wang X, Ruan J. Application of a SVR model to predict lightning impulse flashover voltages of parallel gaps for insulator strings. *IEEJ T Electr Electr* 2019;14(10):1455–62.
- [26] Garolera A, Cummins K, Madsen S, Holboell J, Myers J. Multiple lightning discharges in wind turbines associated with nearby cloud-to-ground lightning. *IEEE T Sustain Energ* 2015;6(2):526–33.
- [27] Liang X. Research on the 500 kV composite insulator [Dissertation]. Beijing: Tsinghua University; 1990. Chinese.
- [28] Liang X, Zhou Y, Zeng R. High voltage engineering. 2nd ed. Beijing: Tsinghua Press; 2015. Chinese.
- [29] IEC 60071: Insulation co-ordination. International Standard. Switzerland: IEC Central Office; 2019.
- [30] Xie G. Overvoltage in power system. Beijing: China Electric Power Press; 2018. Chinese.