# 第3章 输电线路雷电冲击电晕特性

雷电作用于输电线路导线时,导线表面产生冲击电晕后,与施加电压同极性的离子会在 导线附近大量堆积,学者通常称之为电晕套。电晕套的径向导电性能良好,而轴向导电性能 较差,从导线外部特性来看,电晕套相当于增加了导线直径,导致了导线对地电容及对地电 导的增加,但对导线的电感影响非常小。因此,冲击电晕将影响雷电在输电线路上的波传播 过程,对电力系统的电磁暂态过程及输电线路的耐雷水平均有影响。电晕对输电线路上过 电压波形的影响可以追溯到 1931 年 Brune 和 Eaton 的研究<sup>[1]</sup>。Skilling 和 Dykes 指出,电 晕的影响是由于在导体周围形成电晕空间电荷所需的能量损失<sup>[2]</sup>,可以用时间延迟来表 示。该时间延迟适用于雷电或操作冲击的波前部分,而尾部则假定不受电晕的影响。

如果不计冲击电晕进行绝缘配合设计,会对绝缘要求过严。因此在进行输电线路过电压计算及变电站雷电侵入波计算时,有必要考虑冲击电晕的影响,准确地预测过电压值及输电线路的耐雷水平。本章主要内容参考了相关的博士论文<sup>[3-4]</sup>。

## 3.1 雷电冲击电晕特性测试方法

早在 20 世纪初,电晕现象就引起了学者的关注。Peek 在对电晕现象进行了初步的研 究后指出,当外加电场超过了空气介质强度后,电晕就会发生,并在大量实验的基础上,给出 了同轴电极中导线的起晕场强计算公式<sup>[5-6]</sup>。

1954年,Wagner、Gross和 Lloyd首次利用实验线段进行了冲击电晕研究,在长度约为2400m的户外实验线段首端施加雷电冲击,并利用分压器实测了沿线冲击波形的衰减和畸变<sup>[7]</sup>。1955年,Wagner和 Lloyd在高压实验室内,利用内外径分别为0.198cm和 30.5cm的同轴圆筒电极以及间距 3m 的线板电极对导线雷电冲击电晕伏库特性进行了测量<sup>[8]</sup>。

20世纪 60年代, Davis 和 Cook 公布了他们测得的两种同轴电极的冲击电晕伏库特性曲线<sup>[9]</sup>。Бочковский 利用内外径分别为 0.185cm 和 1.5m 的同轴电极进行雷电冲击电晕 实验,并归纳了已有文献的实验结果,提出了导线雷电冲击电晕伏库特性经验公式<sup>[10]</sup>。

20 世纪 70 年代, Ouyang 和 Kendall 在 33kV 线路上进行了雷电冲击电晕实验, 并实测 了沿线冲击电压波形<sup>[11]</sup>。Maruvada 等利用 5.5m×5.5m 的电晕笼对单根导线、四分裂和 六分裂真型导线进行了雷电、操作冲击电晕实验<sup>[12]</sup>,实验中只开展了正极性雷电冲击实验, 没有开展自然界中最为常见的负极性雷电冲击实验。

20世纪80年代,Gary等总结了其在同轴电极中对单导线、2~4分裂导线进行的雷电冲击电晕实验结果,提出了雷电冲击电晕伏库特性曲线经验公式<sup>[13]</sup>。

20 世纪 90 年代, Podporkin 等利用 30m 的架空线段进行了雷电冲击电晕实验,并获得 了相应的导线冲击电晕伏库特性曲线经验公式<sup>[14]</sup>。Noda 等利用实验线段的地线进行了冲 击电晕实验研究<sup>[15]</sup>。

我国从 20 世纪 80 年代开始对冲击电晕进行相关实验研究。武汉高压研究所在户外实验线段上进行了冲击电晕实验,获得了 500kV 线路 4×LGJ300 s450 导线的雷电冲击伏库特性曲线<sup>[16]</sup>。清华大学利用实验室内的小电晕笼和线板电极对标准雷电冲击以及振荡雷电冲击下导线电晕特性进行了研究<sup>[17-21]</sup>。后来随着特高压建设,我国在武汉和北京都建设了特高压电晕笼和特高压实验线段,开展特高压电晕特性研究。

冲击电晕实验研究主要采用同轴电极、线板电极及实验线段三种方式。实验时同步测量冲击电压值及冲击电晕产生的空间电荷量,获得导线冲击电晕伏库特性曲线,从导线的电晕伏库特性、电晕放电过程中电压与电荷之间的相互关系出发,描述了冲击电晕的放电特性。

3.1.1 同轴电极实验装置

同轴电极实验装置俗称为电晕笼,其典型结构如图 3.1 所示<sup>[22]</sup>。电晕笼外层为屏蔽 笼,直接接地,内层为电晕测量笼,屏蔽笼与电晕测量笼之间利用支柱绝缘子支撑。屏蔽笼 和电晕测量笼均采用金属网格结构。为了防止生锈,电晕笼笼体材料一般选用不锈钢或镀 锌钢。为解决端部效应问题,电晕笼一般分为三段,中间段笼体为测量段,处于该段笼体内 的导线表面电场大小趋于一致,用于相关实验的测量;测量段的两边各有一段笼体与其绝缘,此部分用于克服由于端部效应而引起的导线表面电场畸变,称为防护段。



图 3.1 电晕笼结构示意图<sup>[22]</sup>

实验时,在悬挂于电晕笼中的导线上施加冲击电压,利用安装在冲击电压发生器高压侧的分压器测量电压信号 u,在电晕笼内层和外层之间安装测量电容,根据电容两端电压可以推导空间电荷 q,同步记录电压与电荷信号,即可获得导线的伏库特性曲线<sup>[9,13,17-18]</sup>。这种方法具有实验费用低、占地面积小、实验参数易调整、实验条件易控制等优点,既适用于实验室内的小规模模拟实验,也适用于户外的大型模拟实验研究。此实验方法成本较低,且可以利用同一套实验系统对不同型号的导线进行实验研究。在目前冲击电晕的研究中,电晕笼方法被广泛使用。

如图 3.2 所示,冲击电晕实验系统主要由三部分构成:冲击电压发生装器、电晕模拟装置(电晕笼)和测量装置(包括分压器、测量电容及数据采集系统等)。受电晕笼规模限制,被试导线的分裂数不能过多,分裂间距不能过大。



图 3.2 冲击电晕实验系统<sup>[22]</sup>

我国特高压交流实验基地的特高压电晕笼如图 3.3 所示,其截面为 8m×8m 的方形, 测量段长度选为 25m,防护段长度为 5m。笼体采用单厢式、刚性双层结构设计,笼体上方 装设了淋雨系统,可模拟不同雨量情况对导线电晕效应的影响。电晕笼两端配备通用导线 连接金具,可分别组装 1~12 分裂的导线,进行相应的冲击电晕实验。



图 3.3 特高压电晕笼<sup>[3]</sup>

#### 3.1.2 线板电极实验装置

典型的线板电极结构如图 3.4 所示。它实质上是电晕笼的敞开形式,各构成部分及其 作用与同轴电极相同,两者的实验方式也相似。这种实验装置电极之间的电场分布更接近



图 3.4 线板电极示意图<sup>[3]</sup>

于实际架空线的电场分布,实验结果也更符合实际情况。但是这种实验结构中,电极处于敞 开的空间,周围物体对电场分布有一定的影响,且空间电磁场干扰会给实验增加难度。这种 实验方法多用于研究等比例缩小尺寸的导线冲击电晕特性,但是缩小尺寸的实验结果与实 际导线之间的等效性尚需进一步研究<sup>[8,18]</sup>。

3.1.3 实验线段

通常利用实际线路或者实验线段研究冲击电压波形在沿线传输中的衰减和畸变,将冲击电压发生器安装至线路首端施加冲击电压,在沿线不同位置安装分压器,测量各点冲击电压波形<sup>[1,7-8]</sup>,如图 3.5 所示。



图 3.5 实验线段冲击电压衰减畸变实验接线图<sup>[3]</sup>

实验中导线表面电晕状况与实际线路非常接近,测量所得的波形非常直观地展示了冲击电晕的影响,实验得到的数据具有较高的可靠性。但是这类实验需要非常大的实验场地和较高电压等级的实验设备,实验费用也较昂贵。由于电磁波传输速度较快,如果实验线段过短,电磁波在线路端部进行多次折反射,则无法获得准确的冲击电压波形,故需要很长的实验线段。实验中需要沿线安装多组分压器进行测量,成本非常高,且研究对象较为固定,无法对多种型号的导线进行实验,国内外仅有少数单位进行过这种实验<sup>[14-16]</sup>。

## 3.2 输电线路雷电冲击电晕特性

当输电线路导线周围电场强度超过空气击穿场强时,导线附近的空气会产生电晕放电。 输电线路的电晕放电特性与诸多因素有关,随导线结构、分裂数、分裂间距、子导线半径、相 间距离、离地高度、边相或中相等因素的不同而有很大的差异,这些因素通过影响导线表面 电场强度来影响导线电晕特性。

### 3.2.1 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线

冲击电晕伏库曲线是描述导线冲击电晕特性的主要方法,是计算波的衰减变形的基础。 伏库特性是波传播过程中,导线上的冲击电压瞬时值 u 与导线上及其周围电晕套内的总电 荷 q 的关系: q = f(u)。其曲线如图 3.6 所示<sup>[23]</sup>。

伏库特性曲线一般可分为三部分<sup>[23]</sup>:施加在导线上的电压  $u < u_0$  (导线起晕电压)阶



段对应图中的 OA 段,这个阶段导线尚未 起晕,导线电荷随电压值线性上升,曲线的 斜率为导线对地几何电容值 C<sub>0</sub>。当导线 电压 u 超过 u<sub>0</sub> 后(AB 段),导线表面产生 电晕放电,大量的电荷被激发聚集在导线 附近的区域内,表现在伏库特性曲线上为 电荷量增加的速度超过了电压上升的速 度,曲线偏离导线的几何电容线向上翘。 一般将伏库特性曲线的拐点 A 对应的电压 值认为是导线的起晕电压。当导线上的电 压达到冲击电压峰值 u<sub>max</sub> 之后(BC 段), 进入冲击波尾阶段,导线电压值会逐渐下

降,由于冲击电压下降速度较快,空间电荷复合消散很少,主要是导线表面的电荷量随着导 线电压下降而减小,下降的曲线接近于一条直线,直线斜率为C<sub>0</sub>。

包括特高压 8 分裂导线在内的 14 种不同型号导线在不同幅值雷电冲击电压作用下的 伏库特性曲线如图 3.7~图 3.20 所示<sup>[3]</sup>。受实验设备所限,实验中的雷电冲击电压波形为 2.6/60µs。







图 3.8 2×LGJ630/45 s450 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.9 4×LGJ300/50 s450 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.10 4×LGJ500/35 s450 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.11 4×LGJ630/45 s450 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.12 6×LGJ300/50 s375 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.13 6×LGJ400/35 s400 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.14 6×LGJ630/45 s400 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.15 6×LGJ630/45 s450 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.16 6×LGJ630/45 s500 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.17 8×LGJ500/35 s400 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.18 8×LGJ630/45 s400 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.19 10×LGJ630/45 s350 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)



图 3.20 12×LGJ630/45 s300 导线雷电冲击电晕伏库特性曲线<sup>[3]</sup>(见文前彩图)

## 3.2.2 正极性雷电冲击电晕起晕时延

导线伏库特性曲线拐点对应的电压值可以认为是导线的起晕电压。对比前面介绍的特 高压导线在不同幅值雷电冲击下的伏库特性曲线结果可以发现,在负极性雷电冲击下,不同 曲线拐点一致;但在正极性冲击下,曲线拐点均不一致。正极性雷电冲击下,冲击电压幅值 越高,其拐点对应的电压值也越高<sup>[12]</sup>,这个现象在操作冲击电晕实验中并未出现。分析表明,该现象是由正极性冲击起晕时延导致的。在导线电压达到起晕电压后,导线表面并不会 立即产生电晕放电,需经过短暂的起晕时延 $\Delta t$ ,冲击电晕才会激发电荷至附近的区域内。 这个起晕时延的数量级较小,在波头时间较长的操作冲击实验中表现并不明显,但是对波头 时间较短的雷电冲击实验影响较大。雷电冲击电压变化速率快,冲击电压达到导线起晕电 压后经过一定的时延 $\Delta t$ ,空间电荷才开始产生,这段时间内导线电压已上升了 $\Delta u$ ,在伏库 特性曲线上表现为导线的拐点电压比其起晕电压值略高。正极性电晕以空气分子电离为 主,起晕速度较慢, $\Delta u$ 较大;而负极性电晕以导线表面激发自由电子为主,起晕速度较快,  $\Delta u$ 较小。实验中雷电冲击波头时间保持不变,雷电冲击电压的幅值越高,其波头上升速率 越大, $\Delta u$ 越大。因此,在不同幅值的正极性雷电冲击下,导线伏库曲线拐点不一致;而在负 极性冲击下  $\Delta u$ 很小,曲线拐点几乎重合。

为了进一步研究正极性雷电冲击下导线起晕时延特性,本节将几种典型导线的起晕电 压(参考相应的操作冲击实验结果)与伏库特性曲线中拐点对应的视在起晕电压进行对比, 如表 3.1 所示。在正极性雷电冲击下,导线的视在起晕电压  $u'_0$ 比其实际起晕电压  $u_0$  高  $12\% \sim 91\%$ ,故不能简单地将实验中正极性雷电冲击导线伏库特性曲线的拐点对应的电压 值认为是导线的起晕电压。对导线正极性起晕时延对比分析表明,同一种导线的起晕时延 相差不大,不同导线的起晕时延有一定的差别。起晕时延与导线参数之间并没有表现出明 显的规律性,不同导线的起晕时延  $\Delta t$  为 0.4 ~ 0.9 µs。

导线型号	起晕电压	冲击幅值	视在起晕电压	偏差(( $u'_0 - u_0$ )	起晕时延
	$u_0/\mathrm{kV}$	$u_{\rm max}/{\rm kV}$	$u_0'/\mathrm{kV}$	$/u_{0})/\sqrt[9]{0}$	$\Delta t / \mu s$
4×LGJ300/50 s450	410	1026	620	51.2	0.45
		1150	710	73.2	0.59
		1274	780	90.2	0.65
4×LGJ500/35 s450	430	1039	740	72.1	0.74
		1166	780	81.4	0.70
		1298	820	90.7	0.67
4×LGJ630/45 s450	450	980	710	57.8	0.78
		1117	770	71.1	0.76
		1247	810	80.0	0.71
6×LGJ300/50 s375	530	1046	800	50.9	0.76
		1169	870	64.2	0.83
		1291	920	73.6	0.81
6×LGJ400/35 s400	540	910	770	42.6	0.88
		1034	800	48.1	0.75
		1154	840	55.6	0.69
6×LGJ630/45 s400	560	912	760	35.7	0.80
		1037	810	44.6	0.70
		1164	840	50.0	0.62

表 3.1 不同导线的正极性雷电冲击起晕时延<sup>[3]</sup>