

# 福建省高速公路沿线雷电活动特征分析

郑君亮<sup>1,2</sup> 刘隽<sup>2</sup> 应达<sup>2</sup>

(1 福建省灾害天气重点实验室,福州 350001; 2 福建省气象灾害防御技术中心,福州 350001)

**摘要** 为了揭示福建省高速公路沿线雷电活动特征,做好高速公路机电设施的防雷工作,本文利用 2015—2018 年福建省三维闪电监测数据以及福建省高速公路路网资料进行统计分析。分析了高速公路沿线地闪的月、日活动特征,得出地闪活动主要分布在 5—9 月和 14:00—18:00。根据高速公路沿线地闪密度绘制雷电活动等级分布图,结果表明高速公路的少雷区、中雷区、多雷区、强雷区路段占比分别为 5.19%、12.65%、63.03%、19.13%。基于雷电流幅值和雷电陡度绘制雷电强度等级分布图,结果表明 89.87% 的路段处于雷电强度等级为三级的区域。最后,统计了高速公路沿线雷电流幅值累积概率分布并分析其拟合函数,拟合结果表明福建省高速公路沿线雷电流幅值累积概率分布符合 IEEE 标准推荐的函数形式。

**关键词** 雷电防护;雷电流幅值;高速公路;地闪密度;累积概率分布;雷电监测

**中图分类号:** P427 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200118 **文献标识码:** A

## 引言

雷电是最严重的气象灾害之一,它是大气中的一种放电现象,发生时伴随有强大的电流、电场、磁场,严重威胁着人身安全和设施安全<sup>[1-3]</sup>。近年来,高速公路路网的不断扩大及高速公路信息化、电子化的不断提升,雷电灾害对高速公路的影响也逐步加大,是造成高速公路机电设施故障的主要危害之一。随着高速公路省界收费站的取消、ETC 的推广,高速公路收费站将更多地采用无人自动化通行,这对机电设备的稳定运行提出更高的要求,更应加强高速机电设备的雷电防护工作,保障高速公路的正常通行。因此,如何提高高速公路机电设施的防雷工作成为了高速机电建设的关注重点。其中,对雷电活动特征进行科学的分析是做好雷电灾害防御工作的重要环节,地闪密度、雷电流幅值、雷电陡度都是反映雷电活动特征的重要参数<sup>[4-6]</sup>。国内学者对高速公路沿线雷电活动特征的研究较少,余田野,文舸一人利用湖北省闪电监测数据,分析研究湖北省主要高速公路沿线雷电活动特征,提出了基于雷电参数的风险区划方法<sup>[7]</sup>。还有学者对高速铁

路、电力线路沿线雷电活动做了相关研究,向念文、谷山强等分析了京沪高铁线路沿线雷电活动特征,分析了高铁线路易受雷击的路段<sup>[8]</sup>。赵淳、雷梦飞等研究了输电线路走廊雷电流幅值分布统计方法,提出一种精细化雷电流幅值累积概率分布统计方法<sup>[9]</sup>。本文将利用 2015—2018 年福建省雷电监测数据分析福建省高速公路沿线雷电活动特征情况。采用线路走廊网格法,通过高速公路沿线地闪次数、雷电流幅值、雷电流陡度分析其雷电活动特征,并对公路沿线雷电流幅值累积概率密度进行拟合分析,找到其适用的分布函数。上述研究是高速公路防雷工作的重要环节,对高速公路机电设施防雷的优化设计和稳定运行是十分重要的。

## 1 数据资料

### 1.1 福建省地闪资料及高速公路路网资料来源

本文地闪资料采用福建省气象局三维闪电定位系统监测到的地闪数据,选取 2015—2018 年 4 年的地闪数据。

本文福建省高速公路路网资料来源于百度地图,能保证路网更新的及时性、路网数据的准确性。

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

福建省高速公路科技项目(201833)资助

作者简介:郑君亮,男,1989 年生,硕士,工程师,主要从事气象灾害防御研究,Email:dayin0591@qq.com

收稿日期:2020 年 4 月 2 日;定稿日期:2020 年 11 月 16 日

### 1.2 数据处理

为了更细致地分析福建省高速公路沿线的雷电活动特征,首先沿高速公路走向将高速公路按 3 km 距离进行分段。然后,根据《GB/T 21714. 2—2015 雷电防护第 2 部分:风险管理》中雷击线路附近截收面积计算采用的是线路左右两端各取 2 km<sup>[10]</sup>,所以本文将雷电统计半径选取为 2 km。最后,以 3 km 为间距,2 km 为半径对福建省高速公路进行网格划分,并统计分析各网格内的雷电活动特征。本文的总体技术路线如图 1 所示,将划分好的网格和 2015—2018 年福建省雷电数据进行叠加分析。通过统计网格内的地闪次数计算地闪密度,分析得到高速公路雷电活动分级图;通过网格内的雷电流幅值和雷电陡度对福建省高速公路沿线雷电强度进行分级,形成雷电强度等级分布图;通过统计分析高速公路沿线的雷电流幅值分布情况得到雷电流幅值累积概率分布函数。

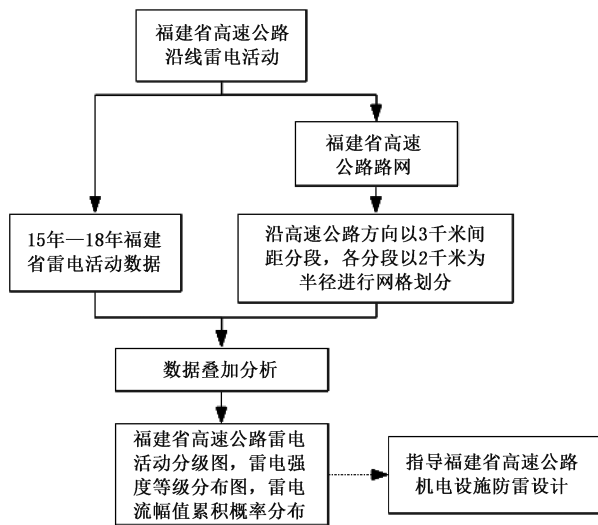


图 1 技术路线

## 2 地闪月、日活动特征

2015—2018 年期间,福建省高速公路沿线总地闪频数为 628592 次。从地闪的年变化上看(图 2),1—8 月地闪活动呈上升趋势,8—12 月地闪活动呈下降趋势。1—4 月有少量地闪活动,5—9 月的地闪频数显著增多,是地闪高发期,10—12 月地闪活动显著下降,只有少量地闪活动。地闪活动主要集中在 5 月至 9 月,分别占全年的 18.01%、19.84%、20.47%、20.50%、15.27%,其中又以 8 月的地闪活

动最为频繁。5—9 月地闪活动较为频繁主要是因为 5—9 月福建省气温较高,更容易产生强对流运动,有助于雷暴天气系统的发生和发展。此外,福建省 5 月天气开始变热,7 月、8 月气温达到最高,9 月气温开始下降,福建省气温的变化趋势与地闪频数的变化趋势一致。

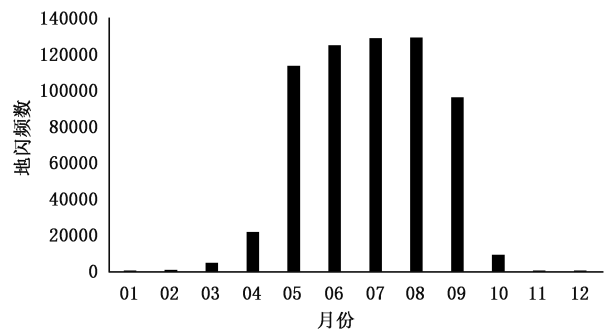


图 2 福建省高速公路沿线地闪频数逐月变化

从雷暴的日变化上来看(图 3),14:00—18:00 是地闪活动最频繁的时段,每小时时段内的地闪频数均占到全天地闪总数的 10% 以上,其中以 16:00 的地闪活动最为频繁,达到全天地闪总数的 14.92%。地闪活动峰值出现在 16:00,主要是因为午后太阳辐射加强,地面温度不断升高,对流活动开始发展,16:00 左右对流活动达到最强。傍晚至夜间,不稳定能量释放后减弱,导致地闪活动减少;上午则由于热力条件不足,不利于雷暴的形成,所以上午地闪活动较弱。

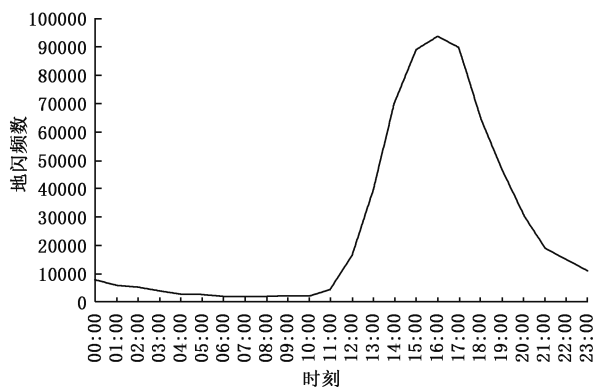


图 3 福建省高速公路沿线地闪频数日变化

## 3 地闪密度

### 3.1 地闪密度计算

地闪密度为每年每平方公里发生的地闪次数。通过前文描述的数据处理方法,将福建省高速公路

路网进行分段,统计每个分段 2 km 范围内的地闪发生次数(2015—2018 年地闪),并将地闪次数除以统计范围的面积和统计年数(式(1)),得到各分段的地闪密度,并将各分段的地闪密度在 GIS 软件中进行可视化展示,形成基于地闪密度的福建省高速公路沿线雷电活动等级分布。

$$N_{gi} = \frac{N_i}{4S_i} \quad (1)$$

其中,  $N_{gi}$  为第  $i$  个分段的地闪密度,  $N_i$  为第  $i$  个分段内 4 年地闪的总次数,  $S_i$  为第  $i$  个分段网格的面积(本文  $S_i$  为常数)。

### 3.2 地闪密度等级划分

国家标准《GB 50343—2012 建筑物电子信息系统防雷技术规范》基于雷暴日将雷电活动等级划分为强雷区、多雷区、中雷区、少雷区四个等级,各等级都有相应的雷暴日取值范围,见表 1。《GB 50057—2010 建筑物防雷设计规范》给出了地闪密度和雷暴日的关系<sup>[11]</sup>,函数关系为  $N_g=0.1T_d$ ,其中  $N_g$  为地闪密度,单位:次/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ );  $T_d$  为年平均雷暴日,单位:天。

利用该函数关系换算出强雷区、多雷区、中雷区、少雷对应的地闪密度值,换算结果见表 1。根据表 1,可以基于地闪密度将雷电活动等级分为 4 个等级。在雷电活动等级分布图上(图 4)将雷电活动水平从强到弱依次用红色、橙色、黄色、蓝色来表示。从图 4 可以直观看出福建省高速公路沿线雷电活动情况,对于指导高速公路机电设施防雷具有重要意义。分布图上大部分路段是橙色的,即属于多雷区路段。表 1 也给出了各雷电活动等级路段占总路段的比例,根据统计结果可知福建省高速公路大部分路段位于多雷区,强雷区次之,少雷区最少,说明福建省高速公路沿线雷电活动整体上较为强烈,应重视高速公路机电设施的防雷工作。

表 1 雷电活动等级与雷暴日、地闪密度关系及各等级路段占比

活动等级	雷暴日	地闪密度	各等级路段占总路段比例/%
少雷区	$T_d \leq 25$	$N_g \leq 2.5$	5.19
中雷区	$25 < T_d \leq 40$	$2.5 < N_g \leq 4$	12.65
多雷区	$40 < T_d \leq 90$	$4 < N_g \leq 9$	63.03
强雷区	$T_d > 90$	$N_g > 9$	19.13

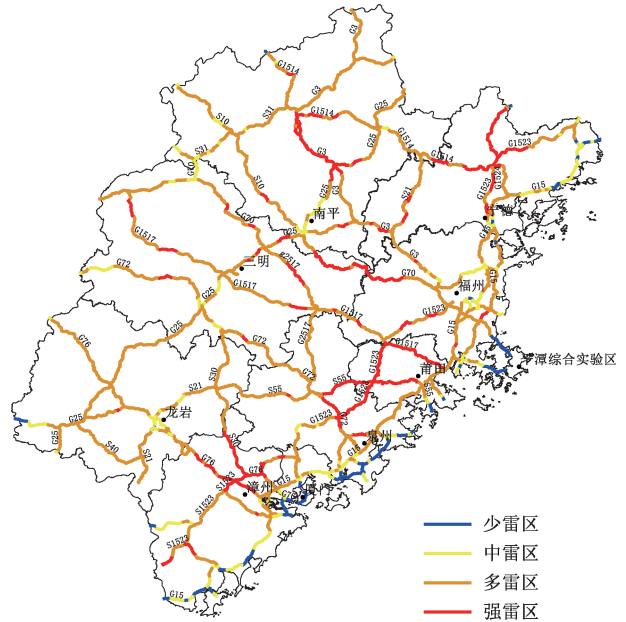


图 4 基于地闪密度的福建省高速公路沿线雷电活动等级分布

从各地市的分布情况上看(表 2),莆田、宁德、漳州、三明、南平、泉州、福州地区的强雷区路段占比较大,强雷区路段占当地高速公路总数的比重均超过 10%。其中,莆田地区的强雷区路段占比最多,占当地高速公路总数的 59.8%;多雷区路段中,除平潭外其余各地市均分布较多,其中以龙岩地区最多,占当地高速公路总数的 87.1%;中雷区路段分布中,厦门地区的占比最大,占当地高速公路总数的 33.3%。少雷区路段中,平潭地区的占比最大,平潭地区的高速路段均属于少雷区。此外,少雷区路段主要集中在福州、厦门、泉州、漳州、莆田、平潭等靠海较近的区域。少雷区路段主要集中在靠海较近的区域是由于受水面影响,近地层气温偏低,不利于形成不稳定层结,无法发生强烈对流运动。

表 2 各地市雷电活动等级分布 %

	强雷区	多雷区	中雷区	少雷区
福州市	11.3	66.9	16.9	4.9
龙岩市	0.4	87.1	10.8	1.7
南平市	17.9	73.5	8.4	0.3
宁德市	33.5	45.4	14.9	6.2
莆田市	59.8	31.5	4.3	4.3
泉州市	16.7	58.3	11.6	13.4
三明市	18.8	71.2	10.0	0.0
厦门市	0.0	48.9	33.3	17.8
漳州市	27.5	43.2	18.3	10.9
平潭综合实验区	0.0	0.0	0.0	100.0

### 4 雷电流幅值和雷电陡度

雷电流幅值和雷电陡度也是反映某区域范围内雷电风险的重要指标<sup>[12]</sup>,在雷电灾害评估工作中有着重要作用。文献[12]基于雷电流幅值和雷电陡度对雷电强度等级进行了分析和验证。本文也参考该方法,通过雷电流幅值和雷电陡度对福建省高速公路沿线雷电强度进行分级。建立雷电强度统计量  $T$ ,根据雷电流幅值和雷电陡度计算出  $T$ ,最后进行等级划分。

$$T = A_1 \frac{L_1 - L_{1(1\%)}}{L_{1(99\%)} - L_{1(1\%)}} + A_2 \frac{L_2 - L_{2(1\%)}}{L_{2(99\%)} - L_{2(1\%)}} = \frac{L_1}{215.1} + \frac{L_2}{62.2} - 0.03961 \quad (2)$$

其中, $L_1$  为雷电流幅值, $A_1$  为雷电流幅值所占权重, $L_2$  为雷电陡度, $A_2$  为雷电陡度所占权重, $L_{1(1\%)}$ 、 $L_{1(99\%)}$  为雷电流幅值累积概率为 1%、99% 处的雷电流幅值大小, $L_{2(1\%)}$ 、 $L_{2(99\%)}$  为雷电陡度累积概率为 1%、99% 处的雷电陡度大小, $A_1$ 、 $A_2$  权重取 0.5。

$T$  的等级划分阈值取 10%、50%、90% 分位点处的数值,将雷电流幅值、雷电陡度累积概率为 10%、50%、90% 处的值带入式(2),即可得到  $T$  的等级阈值,见表 3。最后,利用式(2)计算高速公路各分段的  $T$  统计量,再按表 3 标准进行雷电强度等级划分,形成雷电强度分级图(图 5)。从雷电强度等级分布情况可以看出,福建省高速公路大部分路段的雷电强度等级为三级。对各等级路段数占总路段数的比例进行统计分析,分析结果见表 4,福建省高速公路 89.87% 的路段处于雷电强度等级为三级的区域。雷电强度等级为四级的路段主要分布在,福州、泉州、宁德、平潭离海较近的区域。福建省高速公路大部分路段的雷电强度都较高,雷击危害较大,防雷设计时应适当考虑雷电强度指标。

表 3 雷电强度等级阈值

一级	二级	三级	四级
$T \leq 0.041$	$0.041 < T \leq 0.159$	$0.159 < T \leq 0.379$	$T > 0.379$

表 4 雷电强度各等级占比

等级	占比/%
一级	0.00
二级	9.15
三级	89.87
四级	0.98

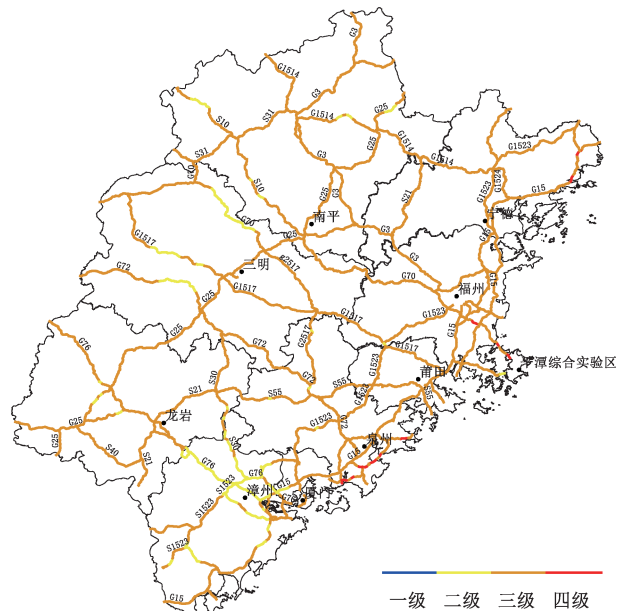


图 5 福建省高速公路沿线雷电强度等级分布

### 5 雷电流幅值累积概率分布

雷电流幅值累积概率分布是雷击计算分析的重要参考数据之一,它可以从宏观上体现雷电的活动规律。得到准确的雷电流幅值累积概率分布,对于了解雷电活动规律和特征、指导防雷工程设计具有重要意义<sup>[14]-[15]</sup>。中国电力行业标准《DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐了雷电流幅值累积概率分布函数,表达式见式(3)。在国际上,通常采用的是 IEEE 协会推荐的雷电流幅值累积概率分布函数,表达式见式(4)。根据福建省高速公路沿线实际的雷电监测数据,统计并绘制高速公路沿线雷电流幅值累积概率分布图,见图 6 中的短点虚线。图 6 还给出了式(3)和式(4)的函数曲线,通过 3 条曲线的对比可以看出福建省高速公路沿线的雷电流幅值累积概率分布曲线的走向与式(4)的函数图像走势较为一致,说明实际的累积概率分布函数更接近式(4)的函数关系。

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{1 + (\frac{I}{31})^{2.6}} \quad (4)$$

式中, $I$  为雷电流幅值(kA), $P$  为雷电流幅值大于  $I$  的概率。

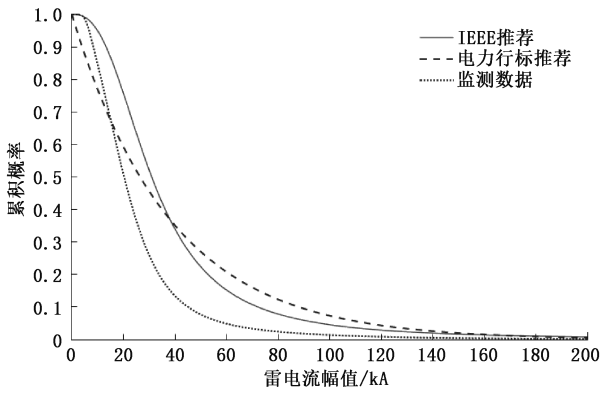


图 6 雷电流幅值累积概率曲线对比

利用式(3)和式(4)的函数关系,通过调整函数中的参数去拟合实际的累积概率分布曲线。函数的拟合曲线和实际监测数据的对比见图 7,拟合得到的函数见式(5)和式(6),拟合相关系数分别为 0.9330 和 0.9997,说明后者(IEEE 标准推荐的函数关系)的拟合效果更好。从图 7 可以直观看出,利用中国电力行业标准推荐的函数关系进行拟合的结果并不理想,曲线前段部分的拟合数值小于实际数值,曲线后段部分的拟合数值要大于实际数值,说明

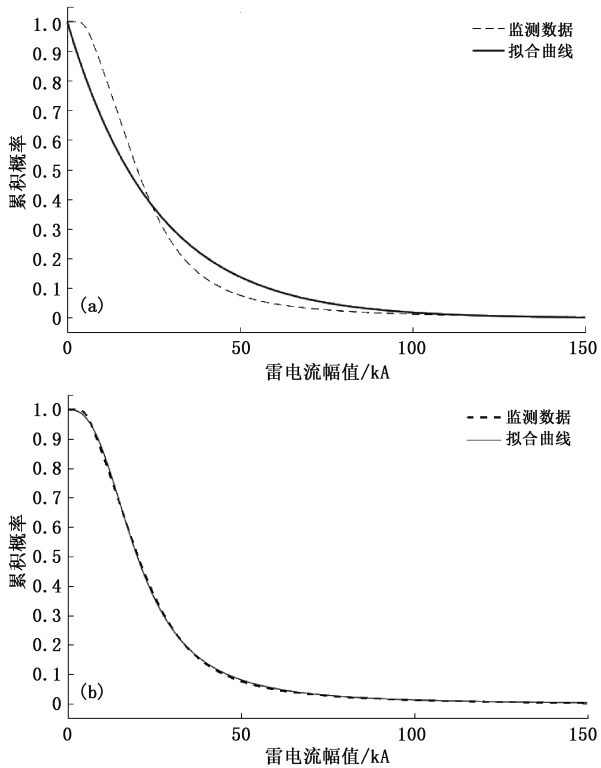


图 7 雷电流幅值累积概率拟合曲线:(a)DL/T 620—1997 推荐函数关系;(b)IEEE 标准推荐函数关系

该函数形式不适用于福建省高速公路沿线雷电流幅值累积概率分布。利用 IEEE 推荐的函数关系拟合的曲线与实际的雷电流幅值累积概率曲线基本重合,说明福建省高速公路沿线的雷电流幅值累积概率分布满足式(4)的函数关系,即满足 IEEE 标准推荐的函数关系,只是函数中的参数有所区别,在实际雷电防护工作中,建议利用式(6)的拟合函数,更符合实际情况,能更有效地起到防护作用。

$$\lg P = -\frac{I}{58.39} \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{20.05}\right)^{2.642}} \quad (6)$$

### 6 结论

本文分析了福建省高速公路沿线的地闪月、日活动特征;利用地闪密度分析高速公路沿线雷电活动等级分布情况;利用雷电流幅值、雷电陡度分析高速公路沿线雷电强度等级分布情况;利用雷电流幅值分析高速公路沿线雷电流幅值累积概率分布函数。得出以下结论:

(1)福建省高速公路沿线 5—9 月的地闪活动较为频繁,其中以 8 月份地闪活动最为活跃。日变化上,14:00—18:00 是地闪活动最频繁的时段,16:00 地闪活动达到峰值。在 5—9 月应加强对高速公路防雷设施的维护,确保防雷装置在雷电高发期的正常运行;在 14:00—18:00 应加强对高速公路机电设施的运行状态监控,以及时处理雷击故障。

(2)雷电活动等级的分析结果表明福建省高速公路大部分路段处于多雷区,强雷区次之,少雷区最少。其中,莆田、宁德、漳州地区的强雷区路段占比较多;多雷区路段除平潭外均分布较多,以龙岩地区占比最大;厦门地区的中雷区路段占比最大;少雷区路段主要分布在沿海较近的地区,平潭地区的高速路段均属于少雷区。

(3)雷电强度等级的分析结果表明福建省高速公路大部分路段处于雷电强度三级区域,占总路段数的比例达 89.87%;雷电强度四级路段比重较小,主要分布在沿海较近的区域。雷电强度等级分布图可以作为雷电活动等级分布图的补充,在雷电强度等级较高路段可以适当提高防雷措施。

(4)雷电流幅值累积概率分布分析表明福建省高速沿线雷电流幅值累积概率分布满足 IEEE 推荐

的函数形式,公式为  $P=1/[1+(I/20.05)^{2.642}]$ ,在福建省高速公路机电设施雷电防护工作中采用该函数更符合实际情况。

本次分析是沿高速公路方向以 3 km 距离进行划分,若路段划分的精细程度无法满足要求,则需要对路段再做细分。此外,如何充分利用高速公路沿线雷电活动特征做好高速公路机电设施的防雷措施,需要进一步研究。

### 参考文献

- [1] 谭涌波,张鑫,向春燕,等. 建筑物上侧击雷电的三维数值模拟[J]. 应用气象学报,2017,28(2):227-236.
- [2] 王学良,张科杰,张义军,等. 雷电定位系统与人工观测雷暴日数统计比较[J]. 应用气象学报,2014,25(6):741-750.
- [3] 王学良,张科杰,余田野,等. 湖北省山区与平原雷电分布及其参数特征[J]. 气象科技,2019,47(2):337-348.
- [4] 冯真祯,张焯方,郑栋栋,等. 闪电定位密度数据泰森多边形优化方法[J]. 气象科技,2017,45(6):1011-1016.
- [5] 林溪猛,卢辉林,黄月清,等. 福建古雷石化基地雷电活动特征及对策分析[J]. 气象与环境科学,2016,39(4):109-114.
- [6] 李家启,申双和,廖瑞金,等. 重庆地区雷电流幅值变化特征分析[J]. 高电压技术,2010,36(12):2918-2923.
- [7] 余田野,文柯一,王学良,等. 湖北省高速公路雷电活动特征及风险区划研究[J]. 公路,2019,64(3):187-194.
- [8] 向念文,谷山强,陈维江,等. 京沪高铁沿线临近区域雷电分布特征[J]. 高电压技术,2015,41(1):49-55.
- [9] 赵淳,雷梦飞,陈家宏,等. 输电线路走廊雷电流幅值分布统计方法[J]. 高电压技术,2017,43(5):1609-1614.
- [10] GB/T 21714.2-2015 雷电保护第 2 部分:风险管理[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [11] GB 50057-2010 建筑物防雷设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
- [12] 贺娜,肖稳安,王学良,等. 雷电强度客观分级方法探讨[J]. 气象科技,2018,46(6):1291-1296.
- [13] 邱洋. 河南省雷电流幅值累积概率分布[J]. 气象科技,2020,48(1):121-126.
- [14] 赵淳,雷梦飞,王剑,等. 雷电流幅值累积概率分布曲线拟合方法[J]. 高电压技术,2018,44(5):1598-1604.
- [15] 王学良,张科杰,余田野,等. 雷电流幅值概率分布特征及累积概率分段修订[J]. 气象科技,2016,44(6):1037-1042.

## Characteristic Analysis of Lightning Activities along Fujian Expressway

ZHENG Junliang<sup>1,2</sup> LIU Jun<sup>2</sup> YING Da<sup>2</sup>

(1 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001;

2 Meteorological Disasters Defending Technique Centre of Fujian Province, Fuzhou 350001)

**Abstract:** In order to reveal the characteristics of lightning activities along the Fujian expressway and to make a proper lightning protection of expressway, this paper uses the lightning monitoring data of 2015 to 2018 from the expressway network of Fujian to make statistical analysis. An analysis is made of the monthly and daily changing characteristics of ground lightning, and results show that ground lightning occurs more frequently from May to September, from 14:00 to 18:00. The lightning activity distribution diagram is drawn along the Fujian expressway based on the ground lightning density, and it is concluded that the proportion of less thunder area, middle thunder area, more thunder and strong thunder area are 5.19%, 12.65%, 63.03% and 19.13%, respectively. The lightning intensity level distribution diagram is drawn based on the lightning current magnitude and lightning steepness, and it is concluded that 89.87% of the expressway are classified as Grade 3. Finally this paper makes statistics of cumulative probability distribution of lightning current magnitude and calculates its fitting function, and the results show that the cumulative probability distribution of lightning current magnitude along the Fujian expressway accords with that recommended by IEEE, and the fitting function is  $P=1/[1+(I/20.05)^{2.642}]$ .

**Keywords:** lightning protection; lightning current magnitude; expressway; cloud-to-ground lightning density; cumulative probability distribution; lightning detection