

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.10.033

地闪密度及雷电流幅值概率特征讨论

王 贇, 邓国峰, 王淑一

(大连市雷电防护中心, 辽宁 大连 116001)

摘要:文中根据辽宁省2007—2011年闪电定位资料,1962—2011年地面观测资料,采用相关分析法求出地闪密度与人工观测雷暴日之间的最优距离,在此距离上,结合时间权重法来进行地闪密度方法计算,并绘制出辽宁省地闪密度分布图。对雷电流幅值概率进行数理统计分析,结果表明,套用现有经验公式偏差较大,利用EXCEL工具进行数据拟合,得出辽宁省雷电流幅值累计概率的经验公式。上述研究结果为雷击风险评估工作提供基础,为防雷减灾工作提供依据。

关键词:闪电;地闪密度;雷电流幅值;累计概率公式

Discussion About Ground Lightning Density and Cumulative Probability of Lightning Current Amplitudes

WANG Yun, DENG Guofeng, WANG Shuyi

(Lightning Protection Center in Dalian, Liaoning Dalian 116001, China)

Abstract: Based on the lightning location data from 2007 to 2011 and the ground observation data in the period of 1962–2011 in Liaoning Province, the optimal distance between ground lightning density and observed thunderstorms is obtained by using the correlation analysis. With the distance, the time weighting method is adopted to calculate the ground lightning density and draw ground lightning density distribution map of Liaoning Province. The values of the cumulative probability of lightning current amplitudes are analyzed statistically, and the results show that the existing empirical formula is of large deviation. Hence, EXCEL tool is employed to fit the data, and a new empirical formula for calculating the cumulative probability of lightning current amplitudes of Liaoning Province is proposed. This research may provide a basis for lightning risk assessment, and for lightning protection and disaster reduction.

Key words: lightning; ground lightning density; lightning current amplitude; cumulative probability formula

0 引言

雷电灾害是“联合国国际减灾十年”公布的最严重的十种自然灾害之一。全球每年因雷击造成人员伤亡,财产损失不计其数,导致火灾、爆炸,建筑物毁坏等事故频繁发生。雷电参数(雷暴日、地闪密度、雷电流幅值等)是表征某地区雷电活动强弱的物理量,是现有防雷减灾领域中重要的基础数据^[1]。雷电流参数研究是一项基础工作,对于研究雷电特性、分析雷害事故、防灾减灾、探讨防雷对策均具有十分重要的意义。

目前,关于地闪密度 N_g 的计算方法主要是由气

象部门提供的雷暴日 T_d ,通过推荐公式计算得出^[2-4]。雷暴日的观测一般都由测报员在气象观测站中完成,称为人工观测雷暴日。人工观测雷暴日一直存在很多争议,也有很多弊端,如文[5]中研究指出雷暴日受到观测人员、观测范围、观测条件等影响较大,且包含云闪放电的统计;文[6]中指出雷暴日与地闪密度之间的关系是建立在一定经验基础之上的,因而采取通用公式计算得到的地闪密度并不能科学反映实际落雷情况;文[7]中对江苏省地闪密度及雷电流特征做以研究,得出当地分布规律。

雷电流幅值概率分布一直是国内外防雷界非常重视的雷电参数之一,在对电涌保护器的放电电流选择以及在绕击、反击计算中起着非常重要的作

用。目前国内外使用的雷电流累计概率的计算公式各不相同。

近年来,很多学者^[8-11]都先后尝试对各自地区的雷电特征作分析,分析方法与侧重点不尽相同。由于雷电流幅值概率分布与气象、自然条件等因素有关,具有很强的地域性,无论是规程推荐的或者其他学者研究的都无法准确反映本地区的雷电流幅值分布特征。

目前无论是关于东北区域地闪密度的研究,还是关于雷电幅值概率特性研究,几乎没有。文中从实际工作角度出发,着重研究这两个雷电参数,分析其计算方法及分布特征并绘制出图,为今后的防雷减灾工作提供基础依据,为雷击风险评估工作奠定基础。

1 资料与方法

1.1 资料来源

文中所用的资料来源于辽宁省 2007—2011 年接收到的 LD-II 地闪观测数据,每条闪电包含的信息有时间、位置(经度、纬度)、极性、强度、陡度等参数^[12]。雷暴日资料来源于全省序列较完整的 18 个测站的雷暴日数据,资料时段从 1962 年开始,所有测站数据都统计到 2011 年为止。

1.2 研究方法

采用相关分析方法研究人工观测雷暴日与雷电监测网计算得出的地闪密度之间的关系,通过 t 检验来验证关系可靠程度,得出人工观测雷暴日的最优距离。在最优距离条件下,根据人工观测雷暴日与闪电监测网监测的数据,采用时间权重法建立地闪密度计算模型,用插值方法绘制出辽宁省地闪密度分布图。

采用分类统计辽宁省闪电监测网监测的正、负闪电,用 EXCEL 插入趋势线回归方法建立适合辽宁省的雷电流幅值概率累计分布模型公式。

2 结果与分析

2.1 地闪密度分析

地闪密度一般是将地面落雷密度表示为每年每平方公里地面上受到的平均雷击次数。关于地闪密度 N_g 的计算方法主要有 2 种:一是由气象部门提供的雷暴日 T_d ,通过推荐公式计算得出;另外一种按照国家标准,用 GIS 统计仪器监测某一范围内的地闪密度,文[13]中采用的是 $27\text{ km} \times 27\text{ km}$ 区域来统计 1 km^2 的地闪密度。因此,地闪密度与雷暴日与样本区域大小成为重要的因素。

雷暴日是表征一个地区雷暴活动频繁程度的指标,其分布与统计的样本区域有关。传统的统计方法是以气象观测站听到雷声为统计依据。国外科学家研究,听力好的人可以听到 20 km 以外的雷声,听力不好的人连 5 km 处发生的雷电都听不到^[14],另外也和雷声大小、背景噪声及传播路径上有无障碍有关,依据不同的统计方法,得出来的结论相差很大。文中利用闪电定位数据与人工观测雷暴日数据进行分析,找出人工观测雷暴日与仪器监测雷暴日的最优距离。

雷电监测网是近年来建立发展起来的,利用仪器自动监测闪电,客服了人工观测闪电误差大等因素,但是缺点是积累资料年限少。而人工观测闪电资料的年限一般较长,可达 $40\sim 50$ 年。若将上述两种资料综合考虑,合理利用两种资料的优点,采取时间权重法综合计算地闪密度,能有效解决人工观测闪电人为误差大、闪电监测网资料年限短等问题。

对于到底应选择多大区域内闪电进行计算地闪密度,目前没有统一的标准。文[7]中选择 3 km 半径进行统计。文中利用 EXCEL 工具进行分类讨论,分析出最优半径距离。

雷暴日由各人工观测站观测资料统计求出各台站平均雷暴日,地闪密度由所选半径区域内闪电次数与区域面积之比求出。分别按照半径 $1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 19, 20\text{ km}$ 去进行地闪密度统计,统计后将地闪密度数据与人工观测雷暴日数据进行相关性分析,见图 1。

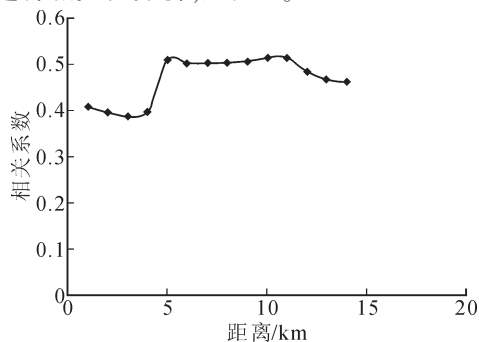


图 1 雷暴日与不同距离观测点的相关系数分布图

Fig. 1 Relations between thunderstorm days and the distance to observation stations

结果表明, 5 km 处相关性最强。对数据进行相关性检验,能够通过显著性水平为 0.1 的检验,说明一定范围内的雷暴日与地闪密度是具有一定联系的。因此,选择 5 km 范围内数据来进行分析。

目前常见的利用人工观测雷暴日计算地闪密度的公式主要有以下几种,见表 1。

将样本站点的人工观测雷暴日代入表 1 中公

表 1 地闪密度与雷暴日之间的经验关系

Table 1 Relationship of lightning density and thunderstorm days

国家	地闪密度	作者	国家	地闪密度	作者
印度	$0.1T_d$	Aiya	全球(温带气候)	$0.15T_d$	Golde
中国	$0.024T_d^{1.3}$	GB 50057—1994	前苏联	$0.036T_d^{1.0}$	Kolokolov and Pavlova
国际	$0.1T_d$	IEC 62305-2—2010	前苏联	$0.1T_d^{1.3}$	Kolokolov and Pavlova

式,其结果与实际监测闪电密度进行比对,结果显示 GB 50057—1994 中公式相对误差较小,因此,选

取此公式分析样本台站地闪密度值。表 2 为样本台站雷电监测网与人工观测的年平均地闪密度值。

表 2 两种算法下的年平均地闪密度

Table 2 Annually average lightning density of two algorithms

台站名称	大连	旅顺	金州	普兰店	瓦房店	庄河	皮口	沈阳	鞍山	本溪	丹东	锦州	营口	阜新	朝阳	彰武
雷暴日/(d·a ⁻¹)	20.4	18.8	17.4	21.6	24.9	24.2	23.8	25.9	26.9	33.7	27.3	28.8	30.0	27.7	36.9	39.3
雷电监测网年平均地闪密度 $N_{g1}/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$	1.258	2.468	1.696	1.668	2.088	2.154	4.244	0.635	1.756	0.834	0.952	1.186	1.810	2.758	0.712	0.272
人工观测年平均地闪密度 $N_{g2}/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$	1.21	1.09	0.98	1.30	1.57	1.51	1.48	1.65	1.73	2.32	1.77	1.89	2.00	1.80	2.61	2.84

考虑时间权重,将上述数值代入时序多指标决策 TOPSIS 中的时间权重法公式^[15]:

$$N_g = \frac{N_{g1} \times T_1 + N_{g2} \times T_2}{T_1 + T_2} \quad (1)$$

式(1)中: N_g 为年平均地闪密度; N_{g1} 为雷电监测网监测地闪密度; N_{g2} 为人工观测雷暴日地闪密度; T_1 为雷电监测网监测年限时间; T_2 为人工观测雷暴日年限时间; N_{g2} 为人工观测雷暴日计算的地闪密度。

大连站的地闪密度计算式为:

$$N_g = \frac{1.258 \times 4 + 1.21 \times 50}{4 + 50} = 1.214 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})。$$

其余站点采用此方法进行计算,得出相应 N_g 值,见表 3。利用 GIS 软件,采用克里金插值方法,绘制出辽宁省地区地闪密度图。

2.2 雷电流幅值特征分析

中国目前所用计算方法是电力行业规程《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T 620—1997)^[16]中推荐的表达式。

$$\lg P_1 = -\frac{I}{c} \quad (2)$$

式(2)中: P_1 表示雷电流幅值累积分布概率; I 表示雷电流幅值,kA; c 为常数。

目前,建筑物防雷设计规范采用的是 $c=88$ 来进行计算。

而美国 IEEE Std1243—1997 推荐推荐测雷电流累积概率式为^[17]

表 3 采用式(1)计算的地闪密度

Table 3 Lightning density calculated using the formula (1)

站名	经度/(°)	纬度/(°)	地闪密度/(次·a ⁻¹ ·km ⁻²)
大连	121.633 3	38.900 0	1.210 0
旅顺	121.233 3	38.816 6	1.088 0
金州	121.700 0	39.083 3	0.984 0
普兰店	121.966 6	39.400 0	1.303 0
瓦房店	122.016 6	39.633 3	1.568 0
庄河	122.950 0	39.716 6	1.511 0
皮口	122.366 6	39.416 6	1.478 0
沈阳	123.520 0	41.730 0	1.650 0
鞍山	123.000 0	41.080 0	1.733 0
本溪	123.780 0	41.320 0	2.323 0
丹东	124.330 0	40.050 0	1.767 0
锦州	121.120 0	41.130 0	1.894 0
营口	122.270 0	40.670 0	1.997 0
阜新	121.720 0	42.080 0	1.801 0
朝阳	120.450 0	41.550 0	2.614 0
彰武	122.530 0	42.420 0	2.837 0

$$P_1 = -\frac{1}{1 + (\frac{I}{a})^b} \quad (3)$$

式(3)中: P_1 表示雷电流幅值累积分布概率; a 表示样本中值电流,kA,即电流幅值大于 a 的概率为 50%; b 为常数; I 属于(2 kA, 200 kA)。

辽宁省地闪密度等值线分布图见图 2。

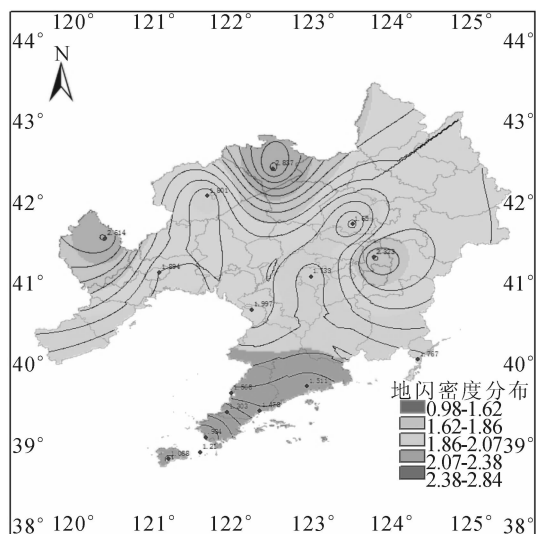


图2 辽宁省地闪密度等值线分布图

Fig. 2 Lightning density contour map in Liaoning

2007—2011年辽宁省闪电总数为645 583次,正闪为38 041次,正闪所占比例为5.89%,最大正闪强度为288.66 kA,负闪总数为607 542次,负闪所占总闪比例为94.10%,见表4。正闪平均强度为31.11 kA,负闪平均强度为22.54 kA,正闪雷电流平均幅值大于负闪,而负闪次数大于正闪,这与研究结论一致^[18],也与Anderson & Jenner和Popolansky^[19]分别在罗得西亚和前捷克斯洛伐克用磁钢棒在线路上测得结果(正极性闪电占6.4%和16.2%),Berger等6位学者^[20]在瑞士等地实测的3 226个雷击数据统计结果(其中正极性雷击368个,占11.4%),基本一致。

表4 辽宁省闪电极性分布特征

Table 4 Distribution characteristics of lightning polarity in Liaoning

闪电总 频数	正闪		负闪	
	频数(比例)	平均强度/kA	频数(比例)	平均强度/kA
645 583	38 041 (5.89%)	31.11	607 542 (94.10%)	22.54

分别将样本数据进行正闪、负闪分类统计分析,在正闪38 041次样本数据中,最大正闪电流幅值为288.67 kA,主要幅值分布范围是10~80 kA,该幅值范围内的正闪次数占到全部正闪次数的97.84%,幅值在10~30 kA范围内闪电频次最多,达到77.5%。

在统计样本负闪607 542次数据中,负闪平均电流幅值为22.54 kA,最大值为314.71 kA,负闪电幅值范围主要分布0~50 kA,所占比例为98.35%。负闪同正闪比较,负闪相对幅值更加集中,0~30 kA负闪频次达到92.31%。

现分别将前文中所述雷电流累计概率公式绘制出分布图,见图3。

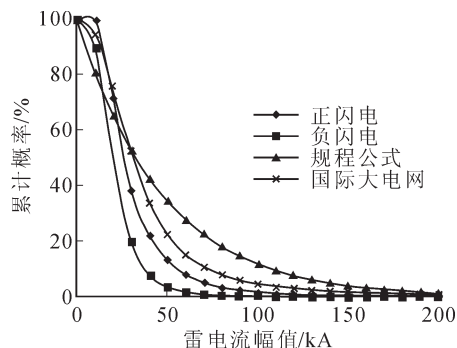


图3 雷电流幅值累计概率分布图

Fig. 3 The cumulative probability of lightning current amplitudes

将辽宁省雷电流幅值累积概率分布统计曲线与中国的雷电流幅值累积概率经验公式、国际大电网会议公式进行比较,结果发现经验概率公式与实际雷电流公式差异较大。从图3可以看出,辽宁省雷电流幅值的累积概率曲线与中国经验曲线与国际大电网会议曲线整体趋势基本是一致的,都是随着雷电流幅值的增大而递减,但具有明显的差异性。辽宁省曲线与中国规程曲线和国际大电网会议曲线吻合程度较差,表现出明显的差异。在20 kA以下,20~80 kA之间,两者趋势基本一致,实际雷电流随着电流幅值的增加迅速递减,而大电网会议公式则递减缓慢,在80 kA以上,则基本一致。从优化的角度考虑,拟合该地区的雷电流累积概率公式是必要的。

采用EXCEL进行数据拟合,得出正闪电指数拟合公式:

$$P=1.0724e^{-0.041I} \quad (4)$$

正闪电幅值累计概率分布图见图4。

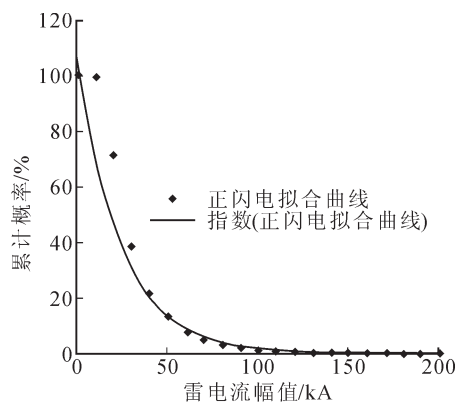


图4 正闪电幅值累计概率分布图

Fig. 4 The cumulative probability of positive lightning current amplitudes

负闪电指数拟合公式:

$$P=1.125e^{-0.062I} \quad (5)$$

负闪电幅值累计概率分布图见图5。

通过拟合发现,利用指数函数拟合的曲线拟合

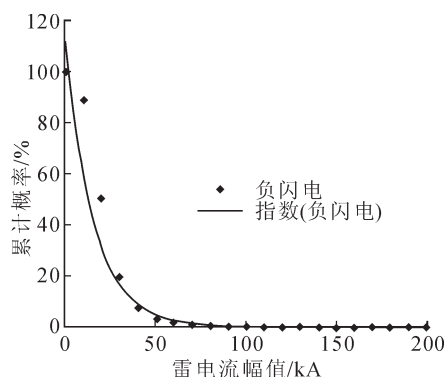


图 5 负闪电幅值累计概率分布图

Fig. 5 The cumulative probability of negative lightning current amplitudes

度更符合实际情况,达 99.36%和 95.38%,具有很好的一致性。

3 结论

1)辽宁省地闪密度的分布趋势是南部比北部少,东部比西部多,四周多,内部少的特点;本溪、彰武、朝阳等地是重点防范区域。

2)辽宁省正闪、负雷电流累积概率曲线存在一定差异,利用规程 DL/T 620—1997 给出的公式与实测数据存在很大的偏差,利用国际大电网会议公式与实际情况差异较小,不能用一个公式去进行理论分析与计算。

3)通过将 5 年来实际监测地闪数据进行分析计算,利用 EXCEL 对实际数据进行拟合,得出辽宁省正闪电雷电流概率累积分布公式为 $P=1.072 4e^{-0.041I}$,负地闪电雷电流幅值累积概率分布公式为 $P=1.125e^{-0.062I}$ 。

4)此外,该研究结论随着资料的不断积累和仪器设备的不断改良,可以不断对研究结果进行修正和调整,更加符合实际情况。

参考文献:

- [1] 刘 刚,唐 军,张 鸣. 根据雷电定位数据对输电线路雷击跳闸率计算方法修正的探讨[J]. 电瓷避雷器,2011(6):95-102.
LIU Gang,TANG Jun,ZHANG Ming. Discussion on correction of transmission line lightning trip-out rate based on lightning location data[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6):95-102.
- [2] 中国机械工业联合会. GB 50057—2010 建筑物防雷设计规范[S]. 北京:中国计划出版社出版,2011.
Chinese Machinery Industry Federation. GB 50057—2010 Design code for protection of structures against lightning [S]. Beijing: China Plan Publishing Company,2011.
- [3] 中国机械工业联合会. GB 50057—1994 建筑物防雷设

计规范[S]. 北京:中国计划出版社出版,2001.

Chinese Machinery Industry Federation. GB 50057—1994 Design code for protection of structures against lightning[S]. Beijing: China Plan Publishing Company,2001.

- [4] 中华人民共和国标准委员会. GB/T 21714.2—2008/IEC 62305-2:2006 雷电防护第 2 部分:风险管理[S].2008.
Standards Committee of the People's Republic of China. GB/T 21714.2—2008/IEC 62305-2:2006 Lightning protection Part 2:Risk management[S].2008.
- [5] 高 磊,潘解祥. 城区与郊区不同地形地貌下云地闪分布规律初步研究[J]. 气象科技,2009,37(6):729-733.
GAO Lei,PAN Jiexiang. Distribution regularities of cloud-to-ground lightning flashes in urban and rural landforms[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(6): 729-733.
- [6] 任 艳,李家启,覃彬全. 雷击大地密度和等效截收面积计算方法[J]. 气象科技,2010,38(6):752-757.
REN Yan,LI Jiaqi,QIN Binqian. Method for calculating equivalent area and ground flash density[J]. Meteorological Science and Technology,2010,38(6): 752-757.
- [7] 徐鸣一,王振会,樊 荣,等. 江苏省地闪密度及雷电流幅值分布[J]. 南京信息工程大学学报,2010,2(6):557-561.
XU Mingyi,WANG Zhenhui,FAN Rong,et al. Distribution of lightning density and lightning current amplitude in Jiangsu province[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology,2010,2(6): 557-561.
- [8] 李家启,李 博,申双和,等. 基于 ADTD 系统的雷电流波头陡度频率分布特征[J]. 气象科技,2010,38(6):741-745.
LI Jiaqi,LI Bo,SHEN Shuanghe,et al. Distribution characteristics of lightning current wave-head gradient based on ADTD system[J]. Meteorological Science and Technology, 2010,38(6):741-745.
- [9] 豆 朋,黄松波. 佛山地区雷电流幅值概率分布研究[J]. 电瓷避雷器,2011,241(3):43-45.
DOU Peng,HUANG Songbo. Research on the probability distribution of lightning current amplitude in foshan area [J]. Insulators and Surge Arresters,2011,241(3):43-45.
- [10] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等. 雷电流幅值概率计算公式[J]. 电工技术学报,2011,26(4):161-167.
LI Ruifang,WU Guangning,CAO Xiaobin,et al. Formula for probability of lightning current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 161-167.
- [11] 刘 畅,赵鹏国,周筠培,等. 复杂地貌区域内的地闪特征分析[J]. 高压电器,2011,47(1):22-28.
LIU Chang,ZHAO Pengguo,ZHOU Junjun,et al. Characteristics of CG lightning over complex landform areas[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(1):22-28.
- [12] 王建华,张 涛,杨雨春,等. 沈阳雷电监测定位系统建设研究[J]. 气象与环境学报,2006,22(6):65-68.

- WANG Jianhua,ZHANG Tao,YANG Yuchun,et al. Research of thunder and lightning monitoring and location system in Shenyang[J]. Journal of Meteorology and Environment,2006,22(6):65-68.
- [13] 樊荣,肖稳安,高 焱,等. 雷击大地密度的计算与软件实现[J]. 气象科技,2011,39(6):709-713.
- FAN Rong,XIAO Wen'an,GAO Yi,et al. Calculation and software implementation of ground lightning-flash density[J]. Meteorological Science and Technology,2011,39(6):709-713.
- [14] 李 博. 重庆雷电时空分布特征及雷灾研究[D]. 南京: 南京信息工程大学,2008.
- LI Bo. Study on the characteristics and spatial distribution of lightning disaster in Chongqing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information,2008.
- [15] 高 焱,劳小青,李健生,等. 雷击风险评估中雷击大地年平均密度的计算[J]. 气象研究与应用,2009,30(3):68-70.
- GAO Yan,LAO Xiaoqing,LI Jiansheng,et al. Calculation of lightning average density in the lightning risk assessment[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2009,30(3):68-70.
- [16] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].1997.
- Ministry of Power Industry of the People's Republic of China. DL/T 620—1997 Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations [S].1997.
- [17] IEEE Std 1243—1997 IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines[S]. New York:IEEE Inc.,1997.
- [18] 张文娟,孟 青,吕伟涛,等. 时间差闪电监测网的误差分析和布局优化[J]. 应用气象学报,2009,20(4):402-410.
- ZHANG Wenjuan,MENG Qing,LYU Weitao,et al. Error analyses and network optimization for time-of-arrival lightning locating system[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2009,20(4):402-410.
- [19] CHISHOLM W A,CUMMINS K L. Lightning parameters: a review, applications and extensions[C]//2005/2006IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition.USA:IEEE,2006:465-470.
- [20] 张元芳,王 建,刘 颖,等. 磁带式雷电流记录仪的研制[J]. 高压电器,1998,34(5):25-28.
- ZHANG Yuanfang,WANG Jian,LIU Ying,et al. Application of magnetic steel remanence method in the measurement of lightning current[J]. High Voltage Apparatus,1998,34(5):25-28.
- 王 赞(1982—),女,硕士研究生,工程师,主要从事雷电风险评估研究。
-
- (上接第198页)
- 32-33.
- [13] 宋人杰,王晓东. 输变电设备状态检修评估分析系统的研究[J]. 继电器,2008,36(9):54-57.
- SONG Renjie,WANG Xiaodong. Research on assessment and analysis system of condition-based maintenance for power transmission and transformation equipment[J]. Relay,2008,36(9):54-57.
- [14] 王德文,阎春雨,毕建刚,等. 变电设备在线监测系统中 IEC 61850 的一致性测试[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):79-85.
- WANG Dewen,YAN Chunyu,BI Jiangang,et al. Conformance testing of IEC 61850 on substation on-line monitoring system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(2):79-85.
- [15] 刘有为,周 华. 智能高压开关设备信息流方案设计[J]. 电工文摘,2011,47(5):27-30.
- LIU Youwei,ZHOU Hua. Information flow scheme designed for smart HV switchgear[J]. Electrician Abstracts,2011,47(5):27-30.
- [16] 任雁铭,秦立军,杨奇逊. IEC61850 通信协议体系介绍和分析[J]. 电力系统自动化,2000,24(8):62-64.
- REN Yanming,QIN Lijun,YANG Qixun. Study on IEC 61850 communication protocol architecture[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(8):62-64.
- [17] 黄巍松,葛 慧. IEC 61850 文件传输模型的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):111-114.
- HUANG Weisong,GE Hui. Application of file transfer model defined in IEC 61850[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):111-114.
- [18] 任雁铭,操丰梅,唐 喜,等. 智能电网的通信技术标准化建议[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):1-4.
- REN Yanming,CAO Fengmei,TANG Xi,et al. Advice on communication standards for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):1-4.
- [19] IEC 61850-7-2—2010 Communication networks and systems in substations-Part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipment-abstract communication service interface (ACSI)[S].2010.
- [20] IEC 61850-8-1—2011 Communication networks and systems in substations-Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM)-mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[S].2011.
- 陈宏辉(1972—),男,高级工程师,硕士,长期从事自动化系统研究。
- 唐 喜(1979—),男,高级工程师,从事变电站自动化、一次设备状态监测研发工作(通信作者)。