

# Shielding Failure Risk Assessment for 500kV Typical Transmission Line in Anhui Power Grid

Chun Zhao<sup>1,3</sup>, Shiling Zhen<sup>2</sup>, Yaoheng Xie<sup>1</sup>, Shanqiang Gu<sup>1</sup>, Li Ding<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State grid electric power research institute, Wuhan, China

<sup>2</sup>Anhui electric power research institute, Hefei, China

<sup>3</sup>Wuhan University, Wuhan, China

Email: chunzi207@126.com, aepri@163.com, xieyaoheng@sgepri.sgcc.com.cn; gushanqiang@sgepri.sgcc.com.cn, dingli@sgepri.sgcc.com.cn

**Abstract:** Anhui power grid is located in east China, where the lightning activity occurs frequently. Thus, accurate lightning performance assessment would provide a technical support for the safe and stable operation of power grid. Considering the differences of lightning activities, line's structure, insulation configuration and terrains and topographic features, this paper evaluates the shielding failure risk for 500kV typical transmission line in Anhui power grid. The assessment result is in accordance with the operation experience. The differences of lightning performance of each tower can provide a basis for the lightning protection rebuilding.

**Keywords:** Anhui; 500kV transmission line; shielding failure; lightning characteristics; risk assessment

## 安徽电网 500kV 典型线路绕击闪络风险评估

赵 淳<sup>1,3</sup>, 郑世玲<sup>2</sup>, 谢耀恒<sup>1</sup>, 谷山强<sup>1</sup>, 丁 黎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国网电力科学研究院, 中国, 武汉, 430074

<sup>2</sup>安徽省电力科学研究院, 城市, 合肥, 230022

武汉大学, 武汉, 中国, 430072

Email: chunzi207@126.com, aepri@163.com, xieyaoheng@sgepri.sgcc.com.cn; gushanqiang@sgepri.sgcc.com.cn, dingli@sgepri.sgcc.com.cn

**摘 要:** 安徽电网位于华东腹地, 雷电活动频发, 因此准确评估输电线路的防雷性能对于电网安全稳定运行具有重要意义。本文全面考虑输电线路走廊的雷电分布特征和线路结构、绝缘、地形地貌等特征信息, 针对安徽电网 500kV 典型线路进行绕击闪络风险评估。评估结果能够较好的与运行经验符合, 并能清晰的反映出线路各基杆塔防雷性能的差异性, 为综合防雷治理改造提供依据。

**关键词:** 安徽; 500kV 输电线路; 绕击; 雷电特征; 风险评估

### 1 引言

在我国, 雷击是造成输电线路跳闸的首要原因, 雷击跳闸占总跳闸次数的 40%~70%, 也是导致线路故障停运的第二大因素<sup>[1]</sup>。安徽省位于华东腹地, 雷电活动频发, 近年来, 仅合肥市每年因雷电造成的直接经济损失均在千万元以上。因此, 安徽电网迫切需要建立有效的防雷体系以指导安徽输电线路运行和建设、防雷设计和改造, 提高其抗雷害能力, 增强供电可靠性。深入细致的研究电网雷害分布情况, 并综合考虑雷电活动、线路特征、地理环境因素, 对输电线路雷击闪络风险进行全面评估, 提出针对电网雷害特

点的防雷综合治理技术, 对提升电网雷害防御能力具有重要意义。

传统的输电线路防雷评估, 缺乏对输电线路走廊雷电分布特征和线路结构、绝缘、地形地貌等特征信息的全面考虑, 评估结果不能确切反映线路各基杆塔的雷击闪络风险 (包括绕击闪络风险和反击闪络风险), 无法确定影响雷击闪络风险各因素所起的作用, 因此, 据此做出的防雷综合治理策略针对性不强, 技术经济性不高<sup>[2][3]</sup>。

安徽电网于 1993 年开始建设雷电定位系统, 对安徽省的雷电活动进行监测, 积累了大量有价值的雷电数据, 利用这些数据进行安徽电网输电线路走廊雷电

分布特征研究，并综合考虑输电线路的全信息参数，有的放矢的进行输电线路雷击闪络风险评估，针对性的提出适合于安徽电网的防雷综合治理方案。

本文全面考虑输电线路走廊的雷电分布特征和线路结构、绝缘、地形地貌等特征信息，针对安徽电网某 500kV 典型线路进行逐基杆塔雷击闪络风险评估，为制定针对性较强、技术经济性较高的综合防雷治理策略提供依据。

## 2 绕击闪络风险评估方法

综合雷电活动情况、地形地貌情况、线路结构情况等特征考虑线路的防雷特性，对其绕击闪络风险进行评估，评价线路的绕击防雷性能。绕击闪络风险评估的具体流程分为 3 个阶段<sup>[4]</sup>：

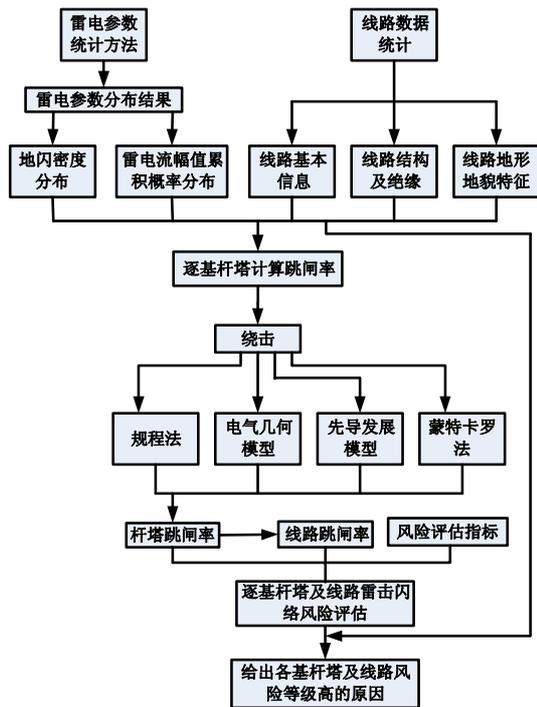


Figure 1. Flow diagram of shielding failure risk assessment

图 1. 绕击闪络风险评估流程图

### (1) 参数统计

参数统计包括线路走廊雷电参数统计和线路特征参数统计两部分。

雷电参数统计是基于雷电监测系统运行积累的雷电资料，以网格的形式对线路走廊进行划分，统计、分析并获取能反映该线路走廊不同时间、不同区域雷电活动特征的地闪密度、雷电流幅值累积概率分布等

雷电参数。

线路特征参数即线路基本信息、杆塔结构及绝缘、走廊地形地貌等参数，这些参数主要通过线路运行或设计部门获取。

### (2) 防雷计算分析

在参数统计的基础上，综合考虑线路的地形地貌特征、绝缘特征等因素，采用合适的绕击防雷计算分析模型对线路逐基杆塔进行防雷计算，得到每基杆塔的绕击跳闸率。

### (3) 防雷性能评估

输电线路防雷性能评估即根据设定的评估标准，结合逐基杆塔绕击跳闸率的计算结果，评估每基杆塔的耐雷性能，并结合杆塔所处地区雷电活动参数、杆塔结构、绝缘配置、地形地貌特征给出耐雷性能弱的杆塔易闪络的原因。

本文采用的绕击闪络风险评估方法如图 1 所示，其中绕击防雷性能计算采用电气几何模型<sup>[5][6]</sup>。

## 3 参数统计

### 3.1 线路概况

安徽电网某 500kV 线路，全长 112.44km，全线采用单回路架设，共有 282 基杆塔，线路全线架设耦合地线。根据实际运行经验，2000~2008 年线路雷击跳闸率为 0 次/百公里·年，线路绕击跳闸率为 0 次/百公里·年，反击跳闸率为 0 次/百公里·年。由于该线路目前采取的防雷措施是全线架设耦合地线，而耦合地线主要用来提高反击防雷性能，因此绕击闪络风险在采取措施前后几乎不变。

### 3.2 雷电特征参数统计

#### 3.2.1 地闪密度

根据安徽省雷电监测网 2005 年~2009 年的监测数据，采用线路走廊网格法对线路走廊的雷电参数进行统计。这里将 500kV 输电线路走廊宽度取为  $0.02^\circ$  (约 2km)，径向按  $0.04^\circ$  等间隔划分网格，即每个网格为  $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ 。沿杆塔号将这些网格依次编号，对每个网格进行雷电参数统计，从而详尽的表示出沿线随地理及气候变化的雷电活动特征<sup>[7]</sup>。某 500kV 线路共 282 基杆塔，被划分为 29 个杆塔段，线路走廊沿线地闪密度分布如图 2 所示，2005~2009 年平均年地闪密度分布柱状图如图 3 所示。

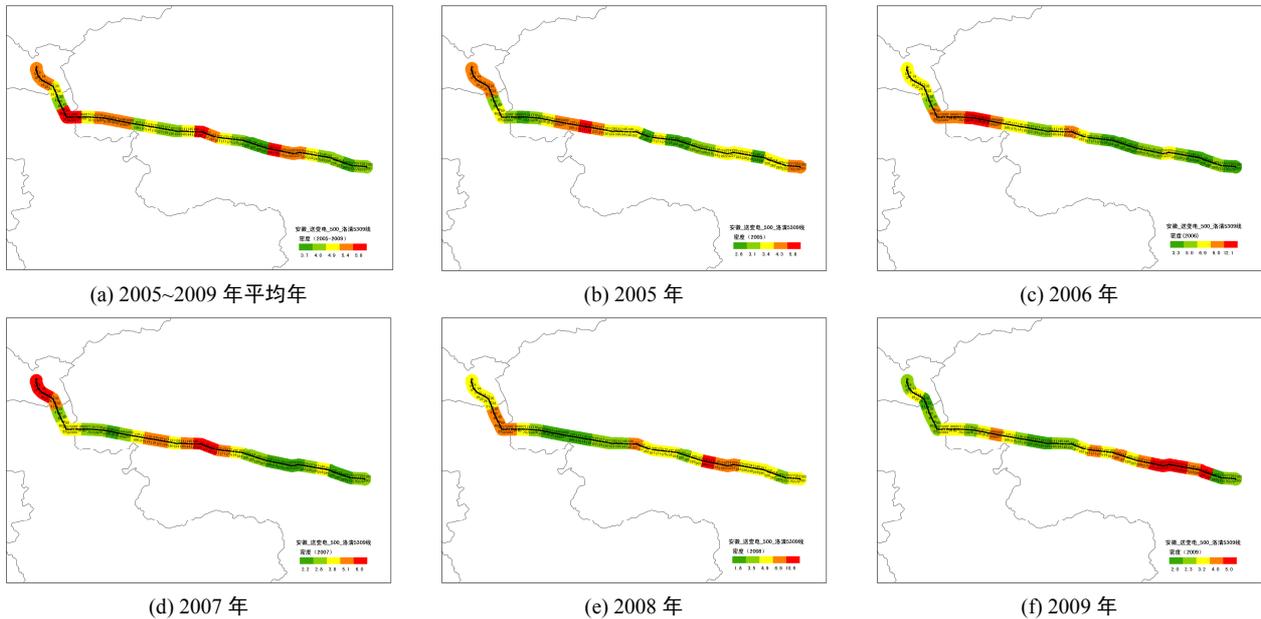


Figure 2. Ground flash densities during the years from 2005 to 2009 along the corridor of the 500kV transmission line in Anhui province  
 图 2. 安徽电网某 500kV 线路 2005~2009 年各年及平均年地闪密度分布

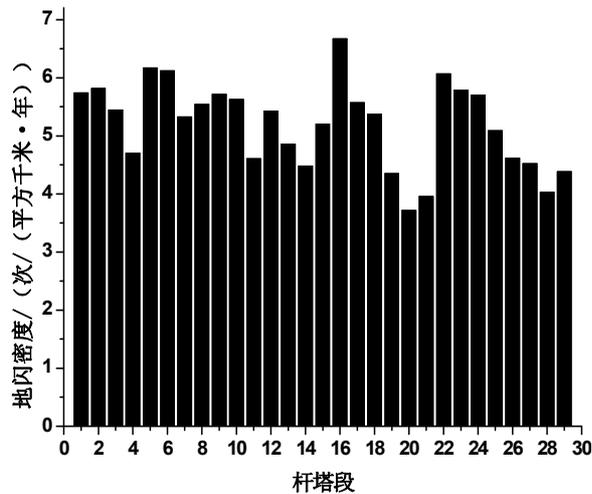


Figure 3. Spatial distribution of the GFD averagely during the years from 2005 to 2009  
 图 3. 某 500kV 线路 2005~2009 年平均年地闪密度分布

如图 3 所示，对于该 500kV 线路，杆塔段 5、6、16、22 为易击段，对应杆塔号分别为 46#-55#、56#-63#、146#-155#、203#-211#。

### 2.2.2 雷电流幅值分布

安徽省 2005~2009 年各年及平均年的雷电流幅值累积概率曲线拟合表达式如表 1 所示。

Table 1. Cumulative probability distribution formulas of lightning current in Anhui province from the year of 2005 to 2009

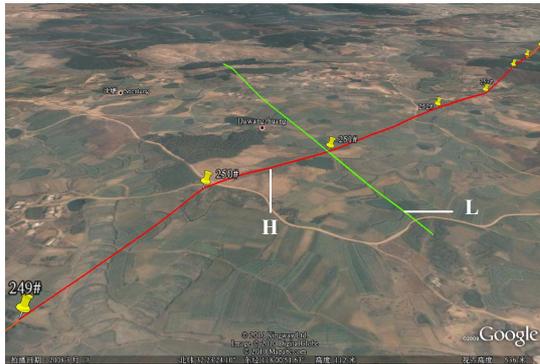
表 1. 安徽省雷电流幅值累积概率曲线拟合表达式

年份	雷电流幅值累积概率公式
2005	$P(> I) = \frac{1}{1+(\frac{I}{18.6})^{1.9}}$
2006	$P(> I) = \frac{1}{1+(\frac{I}{20.4})^{1.9}}$
2007	$P(> I) = \frac{1}{1+(\frac{I}{23.2})^{2.1}}$
2008	$P(> I) = \frac{1}{1+(\frac{I}{30.4})^{2.4}}$
2009	$P(> I) = \frac{1}{1+(\frac{I}{24.3})^{2.2}}$
2005-2009 年	$P(> I) = \frac{1}{1+(\frac{I}{23.0})^{2.1}}$

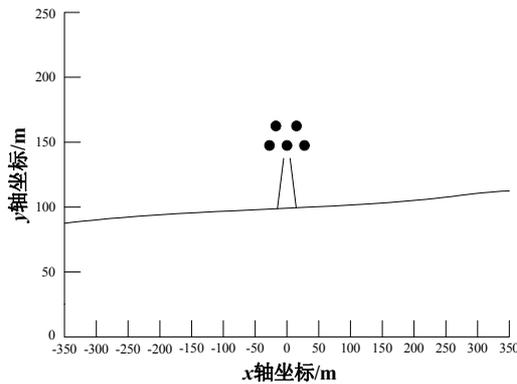
### 2.3 线路特征参数统计

线路特征参数即线路基本信息、杆塔结构及绝缘、走廊地形地貌等参数，这些参数是进行线路雷击闪络风险评估，实现差异化雷电防护技术的重要基础。线路走廊地形地貌可以通过三维 GIS 系统全信息扫描获取<sup>[8]</sup>。如图 4(a)所示，H 曲线表示线路走向，对于每一基杆塔如 251#杆塔，在该杆塔处沿垂直于线路走向

做切线（L 曲线）并提取相对高差数据，即可得到该杆塔的详细地貌参数，如图 4(b)所示。



(a) 三维 GIS 线路走向



(b) 251#杆塔详细地貌曲线

Figure 4. Precise curve of topographic features of the tower  
图 4. 杆塔详细地貌曲线

安徽电网某 500kV 线路，在杆塔类型上，转角塔占 7.8%；在地形上，平原占 92.8%，丘陵占 7.2%；在地貌上，平地占 3.5%，沿坡占 92.5%，山顶占 2.2%，爬坡占 1.4%，跨山谷占 0.4%。在接地电阻分布上，全线各基杆塔接地电阻测量值均在  $7\Omega$  以内。

### 3 线路绕击闪络风险评估

本文利用安徽某 500kV 线路 2005~2009 年各年平均的雷电参数统计结果以及杆塔特征参数，逐基杆塔进行防雷计算，以针对性的指导线路防雷改造。运行经验表明 500kV 线路由于绝缘水平较高，雷击跳闸主要为绕击，因此本文只对绕击闪络风险进行等级评估。

#### 3.1 绕击闪络风险评估标准

风险评估标准以国家电网公司发布的《110 (66) kV~500 kV 架空输电线路管理规范》为依据，参考线

路的实际运行经验等因素来确定。风险评估等级划分采取如下分级指标：

绕击跳 闸率	$Pr < Sr * 0.5$	$Sr * 0.5 \leq Pr < Sr * 1.0$	$Sr * 1.0 \leq Pr < Sr * 1.5$	$Pr \geq Sr * 1.5$
等级	A	B	C	D

注：Pr 表示计算的绕击跳闸率；Sr 为绕击风险控制指标；Sr 取国家电网公司发布的《110(66)kV~500kV 架空输电线路管理规范》（以下简称“规范”）中第八十九条中跳闸率规定值(规范中为地闪密度  $2.78 \text{次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ )；归算到该 500kV 线路平均地闪密度  $5.20 \text{次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，绕击风险控制指标 Sr 为  $0.262 \text{次}/(100\text{km} \cdot \text{a})$ ，因此风险评估等级标准如表 2 所示。

Table 2. Evaluation grade of the shielding failure rate of the 500kV line in Anhui province

表 2. 某 500kV 线路绕击闪络风险评价标准

绕击跳 闸率	$P < 0.131$	$0.131 \leq P < 0.262$	$0.262 \leq P < 0.393$	$P \geq 0.393$
等级	A	B	C	D

#### 3.2 绕击闪络风险评估结果

按照 3.1 节确定的绕击闪络风险评估标准并结合防雷计算分析结果对该 500kV 线路逐基杆塔进行了绕击闪络风险评估。线路绕击跳闸率为  $0.188621 \text{次}/\text{百公里} \cdot \text{年}$ ，全线不同绕击闪络风险等级杆塔分布如图 5 所示。杆塔数目在 A 级的占 57.8%，在 B 级的占 16.7%，在 C 级的占 15.1%，在 D 级占 10.6%。处于风险等级 A 和 B 的杆塔数量最多，占到总杆塔数的 74.5%，与运行经验吻合；但是仍有处于风险等级 D 的杆塔，造成绕击闪络风险等级较高的原因有：1) 杆塔较高，多在 40m 以上；2) 雷电活动较强烈，地闪密度大。这些杆塔需要进行防雷改造，以满足运行要求。

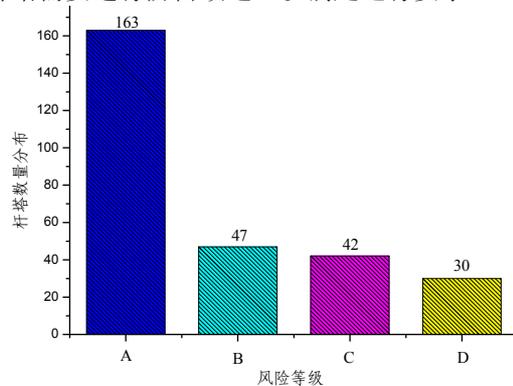


Figure 5. Distribution of different shielding failure risk levels  
图 5. 不同绕击闪络风险等级的杆塔数量分布图

由于全线有二百多基杆塔，因此按照地闪密度网格划分的顺序将各网格段计算所得跳闸率取平均值分段统计，方便管理。计算结果如表 3 所示，其中绕击跳闸率的单位是次/百公里·年。全线各杆塔对应网格段绕击跳闸率结果分布如图 6 所示，其中蓝色虚线表示的是绕击风险控制指标 0.262 次/百公里·年。

**Table 3. Shielding failure rate of each section of the 500kV line**  
**表 3. 某 500kV 线路各杆塔对应网格段绕击跳闸率计算结果**

杆塔段号	段内杆塔号	绕击跳闸率	杆塔段号	段内杆塔号	绕击跳闸率
1	1#~13#	0.498595	15	136#~145#	0.210847
2	14#~24#	0.270420	16	146#~155#	0.203291
3	25#~35#	0.149914	17	156#~165#	0.092957
4	36#~45#	0.203872	18	166#~174#	0.070437
5	46#~55#	0.252519	19	175#~183#	0.144142
6	56#~63#	0.480299	20	184#~193#	0.023660
7	64#~73#	0.167226	21	194#~202#	0.103687
8	74#~82#	0.155682	22	203#~211#	0.251012
9	83#~91#	0.094548	23	212#~220#	0.182964
10	92#~100#	0.078926	24	221#~229#	0.125980
11	101#~109#	0.159274	25	230#~238#	0.245836
12	110#~118#	0.180892	26	239#~249#	0.299050
13	119#~126#	0.098391	27	250#~261#	0.145817
14	127#~135#	0.120925	28	262#~272#	0.135901
			29	273#~282#	0.199129

从上图可以看出等级 D 的杆塔主要分布在第 1、6 和 26 段内，即分布在 1#~13#、56#~63#和 239#~249# 杆塔中，因此，这些区段内杆塔为后期重点防雷治理对象，也可以为运行管理提供针对性的指导。

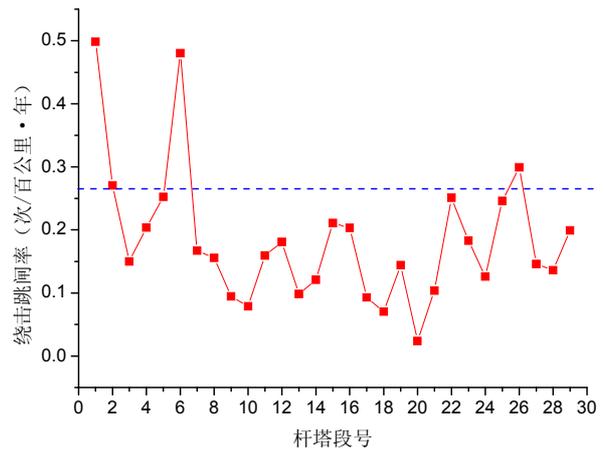
### 4 结论

本文基于安徽电网雷电定位系统监测数据和线路特征参数，针对某 500kV 典型线路进行绕击闪络风险评估，并得到以下结论：

1) 基于雷电定位系统长期监测数据，统计分析输电线路全线走廊雷电分布规律，结合线路特征参数等，选择电气几何模型，逐基杆塔进行绕击防雷性能和安

全评估，确定各级杆塔绕击闪络风险等级及其决定因素。

2) 本文计算得到的全线绕击闪络风险评估结果与实际运行经验吻合较好，能够很好的反映 500kV 线路的实际绕击防雷性能。



**Figure 6. Distribution of shielding failure rate of each section**  
**图 6. 全线各杆塔对应网格段绕击跳闸率结果分布图**

3) 采用本文提出的方法评估各基杆塔绕击闪络风险，能较清晰的反映出线路防雷性能差异性，容易确定风险等级偏高、有较大潜在雷害风险的杆塔，并且能较好的符合运行经验。

### References (参考文献)

[1] ZHANG Zhijin, SIMA Wenxia, JIANG Xingliang, et al, Study on the Lightning Protection Performance of Shielding Failure for EHV&UHV Transmission Lines[J], *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(10), P1-6 (Ch).  
 张志劲, 司马文霞, 蒋兴良, 等, 超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J], *中国电机工程学报*, 2005, 25(10), P1-6.

[2] CHEN Weijiang, CHEN Jiahong, GU Shanqiang, et al, Key Technologies of Lightning Detection and Protection in China Power Grid[J], *High Voltage Engineering*, 2008, 34(10), P2009-2014 (Ch).  
 陈维江, 陈家宏, 谷山强, 等, 中国电网雷电监测与防护亟待研究的关键技术[J], *高电压技术*, 2008, 34(10), P2009-2014.

[3] GU Shanqiang, CHEN Jiahong, CHEN Weijiang, et al, Evaluation Method of the Time-space-difference of Lightning Protection Performance of Transmission Lines[J], *High Voltage Engineering*, 2009, 35(2), P294-298 (Ch).  
 谷山强, 陈家宏, 陈维江, 等, 输电线路防雷性能时空差异化评估方法[J], *高电压技术*, 2009, 35(2), P294-298.

[4] ZHANG Rui. Lightning Flashover Risk Assessment for Transmission Lines[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009 (Ch).  
 张瑞. 输电线路雷击闪络风险评估研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.

- [5] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning-Performance of Transmission Lines[S], 1997.
- [6] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Line. A Simplified Methods on Estimating Lightning Performance of Transmission Line[J], *IEEE Trans on Power Apparatus and System*, 1985, 104(4), P919-931.
- [7] CHEN Jiahong, FENG Wanxing, WANG Haitao, et al, Statistical Method of Lightning Parameters[J], *High Voltage Engineering*, 2007, 33(10), P6-10 (Ch).  
陈家宏, 冯万兴, 王海涛, 等, 雷电参数统计方法[J], 高电压技术, 2007, 33(10), P6-10.
- [8] CHEN Jiahong, LV Jun, QIAN Zhiyin, et al, Differentiation Technology and Strategy of Lightning Protection for Transmission Lines[J], *High Voltage Engineering*, 2009, 35(12), P2891-2902 (Ch).  
陈家宏, 吕军, 钱之银, 等, 输电线路差异化防雷技术与策略[J], 高电压技术, 2009, 35(12), P2891-2902.