

中国电机工程学会
1965年全国高压测量及试验技术年会论文

题 目

广州电力系统1957-1965年 雷电流测量结果的综合分析

作 者

广州供电公司 薛磊

1965年10月

目 录

概 述	2
一、雷电流的极性及其振荡情况	2
二、雷电流幅值及其偶然率	5
三、雷电流的分流	10
四、送电线路的雷击次数	12
五、雷击点位置	16
六、防雷设备及有关措施的实际效果	16
七、结 论	23
参考文献	25

报告编写人：薛 磊

审 核：芦励生

批 准：罗文远

广州电力系统

1957—1965年雷电流测量结果的综合分析

广州供电公司 薛 磊

内 容 提 要

本报告是广州电力系统1957~1965年雷电测量工作总结。九年来先后共安装磁网记录器约10000支，被雷电流励磁者近1500支，本报告即就这些数据并结合电压等级、装置类型以及地形地质地貌等情况，对有关问题进行综合分析和较详细的讨论。报告共分六部分：

一、雷电流的极性及其振盪情况——按全部360个较完整的雷电流记录分析，负极性雷佔大部分，某些情况下并有振盪等情况出现。

二、雷电流幅值及其或然率——分别对输电线路及避雷针的雷电流，线路杆塔、导线及避雷线的雷电流，管型、杆型避雷器以及保护间隙的放电电流等共862个记录进行了分析，按地形地质、电流极性，装置类型以及电压等级等绘出相应的或然率曲线，总的情况是电流值偏高，最大值达—250千安。

三、雷电流的分流——以典型例子重点分析了雷电流沿线路杆塔以及沿各类杆塔构件的分流情况。前者说明理论计算值与实测结果相差较大；后者说明各分流系数的分散性较大。

四、输电线路的雷击次数——按实测记录，首先，反推得线路雷击或然率和雷击密度，与“规程”采用值比较一般偏小，分散性较大；其次，提出了雷击的选择性和连续性問題，对线路防雷保护具有重要意义。

五、雷击点位置——线路中雷击杆顶与雷击档内概率的比值接近3:2；绕击率则高达7%，影响因素较多。

六、防雷措施及有关措施的实际效果——根据实测记录，分别对避雷器的可靠性，波的衰减，进线杆的作用，塔顶避雷针的作用，丘陵山区线路降低接地电阻的作用，线路耐雷水平，

耦合地线的作用，易击点的条件以及自动重合闸的重要性等进行了分析，作出肯定结论，并对“规程”的某些规定提出了一些意见。

概 述

广州地处亚热带，雷电活动强烈，年平均86个雷电日，340个雷电小时，为我国强雷地区之一；且广州系统电压等级较多较高，线路较长，系统较大，地形地质条件亦较复杂。据历年运行经验，线路雷击跳闸率较高；变电站等处避雷器动作频繁，雷电为害严重，加上雷电强度较大，破坏力亦较厉害。为了更好地掌握雷电特性和活动规律，以寻求有效的防雷对策，在前水电部技术改进局协助下，1957年起即开展雷电测量工作。

九年来广州电力系统先后共安装了约10000支磁钢记录器（磁钢棒）以及100个左右的悬式电花仪和陡度测量仪。在最初几年，由于安装的面太广，管理工作跟不上，大量设备遗失或损坏，资料零乱，没有及时整理；近年来才加以收拾整顿，将测量设备重点安装于220千伏广新线，110千伏广流——西寨线以及变电站的避雷器等，健全管理。

据不完全统计，九年来，共有约1500条磁钢棒被雷电流所磁化；故患有少数重复磁化，磁化率近15%。经整理后共获得360个有分析价值的雷电流记录，详见表1。但电花仪和陡度仪则尚未获得完整记录。本报告仅就所得雷电流有关数据加以总结分析。

一、雷电流的极性及其振荡情况

实测结果详见表2。在360个记录中，负极性占62.5%，正极性28.8%，周期性振荡1.7%，磁化极弱而极性不清楚7%。

由表2可知，在15.2千伏及以下系统所测得的记录中，正极性所占比例较35千伏及以上者为高；15.2千伏及以下系统中负极性占55.4%，正极性34.6%，周期性振荡4.3%，极性

雷电流实测记录分类

表 1

类	别	电压 (千伏)	记录个数		类	别	电压 (千伏)	记录个数	
			小计	合计				小计	合计
输电线路 雷电流	色招直去雷 和威芯雷	220	40	100	保护间隙 放电电流	棒状铁角塔 双角 防雷椰线	6-13.2	6	9
		110	35				35	2	
		35	25				35	1	
避雷针 雷电流	变电站 其他		3	5	避雷 管型避雷器 放电电流	PBC 型 变电站	220	6	213
			3				110	1	
							35	98	
管型避雷器 放电电流	变电站进线保护 首端 PT ₁ 进线段末端 PT ₂ 线路中(耐变杆) 保护柱上油开关	35	6	32	避雷 管型避雷器 放电电流	PBC 型 变电站	23-13.2	38	70
		6-13.2	18				6	6	
		35	3				2.3	37	
管型避雷器 放电电流	变电站进线保护 首端 PT ₁ 进线段末端 PT ₂ 线路中(耐变杆) 保护柱上油开关	13.2	4	1	避雷 管型避雷器 放电电流	PBC 型 变电站	6-13.2	27	213
		6	1				6-13.2	27	

以上各项合计 360 个记录

表 2 实测雷电流极性分类统计

分 类	电压 (伏)	记录数	雷 电 流 极 性						电 压 (伏)	记录数	分 类	雷 电 流 极 性												
			+			-						+			-									
			个	%	个	%	个	%				个	%	个	%	个	%							
输电线路及避雷针的雷电流	220	7	1	14.3	6	85.7	0	0	0	0	0	管型避雷器	35	9	4	44.5	5	55.5	0	0	0	0	0	0
	110	5	0	0	5	100	0	0	0	0	0	放电电流	6-132	23	9	49	11	47.8	1	4.4	2	8.8		
	35	14	2	14.3	12	85.7	0	0	0	0	0	合计	32	32	13	40.6	16	50	1	3.1	2	6.3		
	针	2	1	50	1	50	0	0	0	0	0	220	6	0	0	0	6	100	0	0	0	0		
	小计	4	4	100	0	0	0	0	0	0	0	110	1	0	0	0	0	0	0	0	1	100		
	220	33	4	12.1	29	87.9	0	0	0	0	0	杆型避雷器	35	9	4	44.5	5	55.5	0	0	0	0		
	110	30	6	20	24	80	0	0	0	0	0	放电电流	220	6	0	0	6	100	0	0	0	0		
	35	11	1	9	10	91	0	0	0	0	0	合计	32	32	13	40.6	16	50	1	3.1	2	6.3		
	针	4	2	50	2	50	0	0	0	0	0	保护间隙	35	9	1	100	0	0	0	0	0	0		
	小计	78	13	16.7	65	83.3	0	0	0	0	0	放电电流	6-132	8	0	0	8	100	0	0	0	0		
合 计	106	17	16	89	84	0	0	0	0	0	合计	9	9	1	11.1	8	88.9	0	0	0	0			
以上各项总计												360	104	28.8	225	62.5	6	1.7	25	7				

不阻5.7.9%；而35千伏及以上系统中负极性占66.8%，正极性25.5%，-极性不明者7.7%。这主要是由于输电系统受直击雷较多，而配电系统则感应雷较多。这点从“输电线及避雷针雷电流”一类106个记录中反映更为突出：负极性占84%，而正极性仅16%。这与目前国内外测量结果即认为负极性雷占80%左右的结论是一致的。

此外，由表2还可看出，平原水田地区及丘陵山区雷电流极性的比例是相近的。

二、雷电流幅值及其或然率

超过某一雷电流幅值 I_M 的或然率 $U\%$ ，是决定电力系统防雷设计以及检验防雷设备可靠性的主要参数。

I、输电线路及避雷针的雷电流

根据106次雷击35~220千伏输电线路及避雷针的雷电流记录所绘出的各类型雷电流或然率曲线如图1所示。在输电线路100次雷击记录中，包括直击雷和感应雷，但根据统计，即使雷击于线路附近，在35~220千伏线路的避雷线上所感应的雷电流幅值一般均小于5千安，加以电流波沿线及杆塔分流效应的影响，线路上所装设的测量半径为50毫米的磁钢棒难以测得这样小的电流，且实际测得的100次雷击记录中，雷电流幅值一般都在5千安以上，小于5千安者只有5个记录，这很可能是感应，也可能是直击。因此可以大致上认为这100次都是直击雷记录。

由图1可知：

1、与图1(i)总电流线5相适应的，超过雷电流幅值 I_M 的或然率 $U\%$ 的公式为：

$$\lg U\% = 2 - \frac{I_M}{139}$$

2、雷电流最小值为-2千安，雷电流最大值250千安，或然率1%；超过200千安者有1次（第二次为-237千安及+234千安），或然率3%；超过100千安者17%；超过40千安者50%。广州电力系统所处地势海拔高度一般均在500米

以下。与现行“过电压保护规程”所给出的或即取各国测量结果均值的雷电流或频率曲线（图1（c）曲线K）比较，除最大及最小值以外，一般的升高一倍。这表明，在广州这样的地质不算很坏的湿热带地区，不但雷电活动频繁，雷电日、雷电小时或雷电次数较多，而且雷电强度也较大，幅值较高。这与过去认为雷电活动频繁，年雷电日或雷电小时数较多的地区，其雷电强度（雷电流幅值等）也较大的推断是吻合的。至于雷电流陡度和幅值的关系则尚待实测结果加以证实。

3、丘陵山区所测雷电流幅值及其频率一般均较平原水田地区为高，且最大值—250千安，这记录是在典型的高土壤电阻率（约 20×10^4 以上）山区测得的。虽然（1）几年来雷电测量工作重点放在丘陵山区线路，所得记录较多，而在平原水田线路则较少，代表性较差，（2）在华南丘陵山区，土质变化无常，往往是一杆塔位于土质较差的山上而相邻杆塔则位于土质较好的山坡或水田平地，因之大地电场仍较集中，雷电流幅值仍可能较大，与土壤电阻率 ρ 普遍高的纯粹山区线路有所不同，对分析也会有所影响，但测量结果表明，一方面可以认为 $\rho > 5 \times 10^4$ 欧厘米的山区的雷电流或频率仅相当于 $\rho \leq 5 \times 10^4$ 欧厘米的平原地区的50%的这一结论虽不一定是绝对正确的，另一方面也可以推断，在珠江三角洲土质优良的平原水田地帯，雷电流幅值将有可能达到500千安。这些均有待更多的测量数据加以验证。

4、雷电流幅值随线路电压级的升高而增大，且其上限值亦有明显差异——220千伏线路250千安，110千伏线路140千安，35千伏线路120千安——其原因可能是由于线路电压级越高时，杆塔及避雷线的平均高度增高，其附近电场强度亦随之升高，当雷云与大地间放电时，其上会出现更高更强烈的迎面先导，既提高了吸引雷电的作用，也使雷云对线路的放电距离相应地大大缩短，大气放电间隙绝缘强度不易恢复，雷道波阻减小（不一定是常数），更有利于主放电的发展，使雷云电荷获得较充分的释放，在地形地质等其他条件相同时，雷电流幅值乃相对地有所增大，雷击更为频繁。各国在特高建筑物所测得的雷电流或频率曲线一般亦显著增高，其原因也可能是这样。这一结论在确定各级线路特别是跨越高杆塔的耐雷水平

方面具有重要意义。

至于平原水田地区的110千伏线路实测所得雷电流幅值尚较35千伏线路为小，其原因是110千伏线路所装测量设备较少，因而记录少，代表性不大。

5、负极性雷电流或燃率曲线一般较正极性要高，但上限相差不大。这与国外实测结果（文献5）是近似的。

6、虽然避雷针雷电流记录不多，勉强绘出的或燃率曲线的代表性尚较差，但实测到的最大幅值1234千安是很有意义的。这说明在变电站防雷保护措施方面，绝不能认为避雷针受雷击机会较少而有所放松，相反，超出避雷针计算通用数值（150千安）的雷电流幅值尚会有出现，且或燃率也不会太小，目前按150千安计算的有关安全距离是不能保证绝对安全的。在设计重要变电站时必须认真加以考虑。

II. 输电线路杆塔的雷电流

杆塔或避雷线受雷击后，雷电流将从附近各接地杆塔分流入地，通过每一杆塔的最大雷电流数值与雷击点、雷击电流以及杆塔结构、高度、档距、接地电阻和土壤情况等许多因素有关，它直接决定着塔顶可能出现的最高电位。因此，确定流经各杆塔的雷电流及其或燃率，不但对判断雷击点，而且对于各种电压级电网的绝缘配合等均有现实意义。

根据277基杆塔雷电流分流数据所绘或燃率曲线如图2所示。杆塔结构包括铁塔（220千伏）、水泥杆（110千伏）及木杆（35千伏）等几种类型。由图可知：

1、流经杆塔的最大雷电流幅值是—135千安，或燃率为0.7%；超过100千安者15%，超过70千安者3.6%；超过10千安者50%；最小为—1千安。

2、与国内外实测结果（文献1）比较，在20千安以下部分，或燃率曲线与我国其他地区以及苏联、美国和德国等的实测结果较接近，比日本的实测结果低50%左右；而在20千安特别是70千安以上部分，则一般较国内外实测结果要高。这与本地区高幅值雷电流出现较多有关。

3、其余规律基本上与上述1之3~5各项分析相同。

III、避雷线及导线的雷电流

雷击杆顶、避雷线或导线时，沿某一方向流过避雷线或导线的雷电流幅值及其或然率，对于了解雷击点电位以及雷电流在线路上的传播特性等均有很大作用。

根据 225 个分流数据所绘或然率曲线如图 3 所示。由图可知：

1、避雷线及导线分流的雷电流最大值为 -152.5 千安，或然率 0.45%，超过 100 千安者 1.3%，超过 50 千安者 2.3%；超过 8 千安者 50%；最小为 -1 千安。

2 与国外实测结果〔文献 1〕比较，我们所得的或然率曲线要高得多。

3、其余规律亦基本上与前述 II 之 3 至 5 各项分析相同。

IV、管型避雷器及保护间隙的放电电流

过去几年，系统中曾广泛采用管型避雷器作为 35 千伏及以下变电站进线保护的主要元件；其次为防止雷劈本杆线路，在部分线路杆上加装了一些保护间隙。由于两者的性能和保护作用相差不大，因此综合加以分析。通过这些分析，可以更好地了解管型避雷器在变电站进线保护中的实际作用以及间隙的防雷效果。

、实测所得各组或然率曲线如图 4 所示。由图可知：

1、对于管型避雷器，放电电流在 40 千安以上的或然率达 10%，25 千安以上者 20%，7 千安以上者 50%，最小值为 +0.2 千安。或然率曲线较我国南方各省电力系统 1957 ~ 1960 年的实测结果〔文献 1〕高 2.5 ~ 4 倍。显然，这与线路雷电流幅值偏高有重要关系，同时说明管型避雷器对于大大减低侵入变电站的雷电波幅，减轻站内伐型避雷器的负担，确保电气设备的安全具有很大作用。

2、管型避雷器放电电流的最大值达 +40 ~ -50 千安，这些高幅值电流一般多在下列情况下出现：(1) 距管型避雷器安装点不远处的线路遭受直击雷，(2) 线路具有较高绝缘水平，例如木杆木担的配电线路或加强绝缘的输电线路河高杆塔等。

3 在 25 千安以上部分，35 千伏系统管型避雷器的放

电电流较13.2千伏及以下者稍大，而在25千伏以下部分，则稍低。也就是说，在高电压线路中，高幅值侵入波出现的或然率相对地比较大，管型避雷器的作用更显得重要。

4、对于35千伏系统，负极性雷电流或燃率曲线较正极性高许多；而在6.3~13.2千伏系统，则两者相差不多。这主要是由于在35千伏系统中，进行波中触导致管型避雷器放电者，以直击雷感应雷为多，而直击雷进行波所引起的放电电流幅值一般要比感应雷为高；但在配电系统中，受感应雷作用较多，而直击雷及感应雷进行波均较容易引起管型避雷器放电，且其放电电流大小又均受线路绝缘水平所限制，即当雷电流太大时在管型避雷器放电以前往往已在前面一些杆塔放电。

5、对于保护间隙，35千伏线路仅获得+4.2千安一个记录，其余8次均在配电线路铁间隙（间隙距离35、400及1000毫米不等）获得，均为负极性，但幅值不大，原因是一般非直接雷击间隙安装处，也就是说所测值仅为雷电流部分分流数值而已。

V、伐型避雷器的放电电流

通过伐型避雷器放电电流的统计分析，不但可以了解避雷器的特性和保护效果，还可以了解雷电波侵入各变电站的情况以及防雷结线的可靠性。

实测结果如图5所示。由图可知：

1、伐型避雷器最大放电电流为-2.6千伏（变电站内PBC-35）及-2.4千安（配电系统PBII-10），或燃率分别为0.52%及1.05%，5千安以上者27%；1千安以上者173%，0.3千安以上者仅50%；最小值为+0.03千安，与日本及我国其他地区实测结果比较〔文献1〕偏高，但与美国实测结果比较则偏低；特别是上限相差较远（美测得最高值为15~25千安）。这是由于美国大部分记录是在配电系统获得，而我们的记录主要是在变电站母线或进出线避雷器上获得的。显然，高幅值雷电波侵入变电站的机会是不多的，上列-2.6千安的出现主要也是由于当进行波侵入时，进线保护绝缘管型避雷器由于外间隙变动没有动作之故。

2、配电系统PBII型避雷器放电电流或燃率曲线较变电站

PBC型者约高2~3倍，由流幅值较大，这主要是由于配电系统绕柱上变压器等装置没有进线保护段，线路遭受直击雷的机会较多；而相反，变电站进出线一般均有良好的进线保护（均按“规程”考虑，但13.2千伏及以下者对于木杆或木担进出线，一般尚在距站150米左右装有一支管型避雷器），即使进线段以外线路受直击雷侵入时亦将受到很大衰减。

3、对于变电站PBC型避雷器，35~220千伏级的放电电流一般较2.1~13.2千伏者为小，这主要也是由于电压较高线路的进线保护段较完善，因而大大限制了侵入波。

4、负极性放电电流一般较正极性大，这是由于前者大多是线路遭受直击雷引起，而后者则以感应雷较多。

5、有些记录表明放电电流呈周期性振荡（安架两测孔磁钢棒测得极性相反），但由于缺乏校正曲线和有关仪器，因而未能准确地推导出真正的放电电流最大值，而只能粗略地以两磁钢棒所测结果的最大值表示。管型避雷器的个别数据亦同样处理。

6、从表2可见，不论是管型避雷器还是伐型避雷器，都有一些记录极性不明，或者说是避雷器放电后电流很小，磁钢棒测量范围难以测得其具体数值。出现这种情况的另一可能是避雷器放电后，切断续流的过程具有周期性振荡衰减性质，因而产生退磁效应，将磁钢棒的残磁退掉。希有关部门加以研究。

三、雷电流的分流

I. 雷电流沿输电线杆塔分流情况分析

通过测量记录，不但可以判断线路雷击点，而且可以分析雷电流沿线路（避雷线及各杆塔）的分流情况，从而确定避雷器根数，档距，杆塔接地电阻以及杆塔电感等参数对于雷电流分布的影响。这里仅取下例典型例子重点加以分析：

220千伏广新线#141~#148塔——1965年8月16日雷击，单避雷线，录相（双侧测底相）因仅击内相，按分析，雷击于#144~#145档间且靠近#144塔一侧，分流情况如下：

表3

杆. 号	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	合计
塔 型		π_{1a}	π_2	π_2	π_2	π_2	π_2	π_1	π_{1a}		—
档距(米)		442	450	245	170	525	350	355	590	210	—
接地电阻(Ω)		14	18	12	14	15	15	4.5	20		—
实测雷电流(kA)	0	10	12	29	99	53	20	18	9	0	-250
分流%	0	4	4.8	11.6	39.6	21.2	8	7.2	3.6	0	100
计雷电流(kA)	0	0.13	2.87	25	122	91	8.5	0.48	0.02	0	-250
分流%	0	0.05	1.1	10	48.85	36.4	3.4	0.19	0.01	0	100

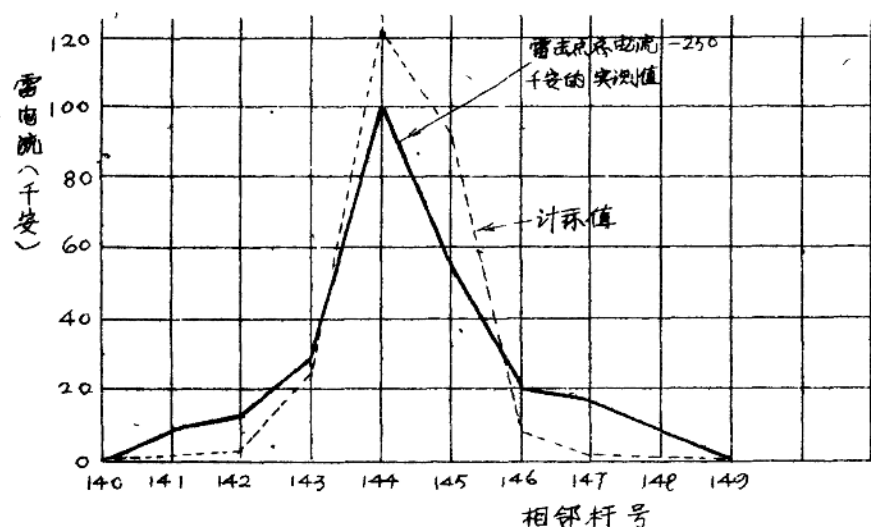


图6 广新线#140~#149杆塔雷电流分布情况

计环是采用“过电压保护规程”附录4台式(2)，但按文献3，杆塔电感均取20微亨；且①相应之雷电流陡度按分流情况分别选取50、30或10千安/微秒，以考虑雷电流波形在传输中的衰减（对计环结果影响不大）。由于#141~#148共8基塔中，除#147塔土质较好外，其余均属高土壤电阻率地区，每基接地装置均敷设12×60米元铁接地带，冲击系数基本相同，为简化计环，所用接地电阻均一律采用事故前不久实测之工频接地电阻数值，这对计环结果不会有多大影响。

由于理论计算公式只考虑相邻档内避雷线的电感，对其他各档的分流作用及相邻杆塔的接地电阻等均忽略不计，且没有考虑导线的耦合作用和内给导线的分流作用，因而与实测结果比较，误差较大。另由图6可见，当杆塔分流电流较大时，计算值偏高，当杆塔分流电流较小时，计算值则偏低。对其他测量结果的分析亦获得相似结论。

II、雷电流沿各类型杆塔构件的分流情况分析

测量雷电流沿杆塔主材、斜材及拉线等分流情况的主要目的是为了取得分流数据，以减少每一杆塔的磁钢棒安装数 and 保证测量准确性。

以广新线为例，各类杆塔大致分流情况如表5所示（表见13页）：

由表5可见，各类杆塔分流情况虽大致有一规律，但分散性一般均很大，这与杆塔所处地质情况，接地电阻，地网布置，杆塔各构件的连接情况，雷电流幅值，电流陡度等均有很大关系。同理，同一杆塔中各个塔脚主材及斜材或各条拉线的分流情况也会有一定分散性。因此从技术经济比较，目前一般所采用的在每一杆塔的一塔脚主材、一侧斜材和一条引下线或拉线上各装一组磁钢棒的测量方式虽属合理，但所得数值仍会有一定误差，某些塔顶避雷针所得雷电流记录与邻近各杆塔分流总和比较也说明了这一点；假若每一杆塔仅在一主材装一组磁钢棒，而以分流比求得杆塔总电流的话，误差将更大，甚至往往会超出容许范围，不宜采用。

四、送电线路的雷击次数

1、输电线路的雷击或燃率

根据磁钢棒励磁情况的分析，可以大致地确定线路所受雷击次数。但是属直击雷抑或感应雷难以判断，只能按前述原则；假定全部均为直击雷，此外运行中因所装磁钢棒遗失或漏装等也往往影响记录的完整性。因此所确定的雷击次数只能当作接近实际情况而已。若线路数据较完整的一些统计年限的磁钢棒励磁情况和相应的雷击次数统计如表6所示。

表 5 220 千伏广新线各类型杆塔构件雷电分流统计

塔型	杆号	主材(引下线, 电流(千安)		斜材电流(千安)		拉线电流(千安)		杆塔分流		分流比	
		单脚	总计(1 ₁)	单支	总计(1 ₂)	单支	总计(1 ₃)	12/2 ₁	13/2 ₁	1 ₁ /1	1 ₂ /1
Π ₁	14	3.7	4×3.7=14.8	0.33	3.7	0.33	12×0.33=4	0.25	0.27	0.53	0.197
	45	3.7	4×3.7=14.8	0.15	3.7	0.15	12×0.15=2.2	0.25	0.149	0.15	0.179
Π ₂	49	7.6	4×7.6=30.4	0.8	7.6	0	0	0.25	0	0.8	0.2
	120	4.2	4×4.2=16.8	0.25	4	0.25	12×0.25=3	0.25	0.61	0.52	0.1
Π ₃	21	6.6	4×6.6=26.4	1	6.6	1	12×1=12	0.25	0.405	0.59	0.45
	29	10.1	4×10.1=40.4	1.3	10.1	1.3	12×1.3=15.6	0.25	0.25	0.68	0.148
Π ₄	142	3	4×3=12	0	0	0	0	0.25	0.29	0.65	0.168
	143	4.2	4×4.2=16.8	1.2	8×1.2=9.6	1.2	8×1.2=9.6	0.51	0.67	0.33	0.33
Π ₅	144	16.1	4×16.1=64.4	4	8×4=32	4	8×4=32	0.48	0.48	0.32	0.32
	203	14.8	4×14.8=59.2	5	8×5=40	5	8×5=40	0.675	0.675	0.6	0.4
Π ₆	204	5.4	4×5.4=21.6	2.2	8×2.2=17.6	2.2	8×2.2=17.6	0.81	0.81	0.55	0.47
	205	0.23	4×0.23=0.92	8	8×1.3=14.4	8	8×1.3=14.4	0.794	0.794	0.51	0.43
Π ₇	206	2.9	4×2.9=11.6	0.9	8×0.9=7.2	0.9	8×0.9=7.2	0.62	0.62	0.42	0.38
	207	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₈	212	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	213	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₉	214	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	215	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₁₀	216	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	217	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₁₁	218	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	219	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₁₂	220	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	221	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₁₃	222	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	223	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₁₄	224	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	225	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₁₅	226	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	227	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₁₆	228	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	229	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₁₇	230	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	231	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₁₈	232	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	233	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₁₉	234	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	235	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₂₀	236	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	237	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₂₁	238	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	239	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₂₂	240	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	241	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₂₃	242	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	243	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₂₄	244	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	245	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₂₅	246	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	247	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₂₆	248	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	249	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₂₇	250	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	251	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₂₈	252	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	253	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₂₉	254	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	255	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₃₀	256	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	257	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₃₁	258	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	259	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₃₂	260	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	261	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₃₃	262	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	263	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₃₄	264	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	265	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₃₅	266	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	267	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₃₆	268	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	269	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₃₇	270	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	271	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₃₈	272	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	273	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₃₉	274	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	275	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₄₀	276	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	277	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₄₁	278	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	279	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₄₂	280	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	281	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₄₃	282	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	283	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₄₄	284	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	285	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₄₅	286	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	287	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₄₆	288	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	289	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₄₇	290	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8	0.1	8×0.1=0.8	0.08	0.08	0.13	0.17
	291	6.7	4×6.7=26.8	0.2	8×0.2=1.6	0.2	8×0.2=1.6	2.26	2.26	0.412	0.588
Π ₄₈	292	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
	293	2	4×2=8	0.3	8×0.3=2.4	0.3	8×0.3=2.4	0.25	0.25	0.62	0.38
Π ₄₉	294	3.6	4×3.6=14.4	0.1	8×0.1=0.8</						

按规程反推得 40 个雷电日每百公里年平均雷击次数的经验公式为：

$$\text{平原水田地区} \quad N_1 = 0.52 k_{cp}$$

$$\text{丘陵山区} \quad N_2 = 0.48 k_{cp}$$

均较规程采用式 $N = 2.4 k_{cp}$ 为小。与东北等地实测结果较接近；但 N_1 分散性则较大，其中 35 千伏线路较接近规程采用式，而 110 千伏及 220 千伏线路则相差很大。

II、雷击密度

利用上述实测雷击次数，按规程引用的方法推算所得各级线路的雷击密度，即在一雷电日中每一平方公里面积平均雷击次数，如表 6 所示。在平原水田地区平均 0.013，分散性亦较大，其中 35 千伏线路为 0.053，比较接近规程采用值 0.06；但 110 千伏及 220 千伏线路则相差很大。至于丘陵山区，平均 0.012，与规程推荐值 0.01 ~ 0.02 比较接近。

应指出，这一数据是按公式反推出来，仅作参考。因为影响雷击密度的因素许多，例如地形、地质及其他气象条件等，且公式中对于避雷线屏蔽宽度为 $10 k_{cp}$ 的假定是否正确尚值得研究；同时雷击次数的增长亦不一定恰与雷电日成正比。

III、雷击的选择性

由表 6（见 14、1 页）可见，线路雷击或然率或某一地区的雷击密度均随具体情况而有所不同。对雷击选择性起主要作用的是土壤电阻率。土壤电阻率和接地电阻较低（ $\rho \leq 10^4$ 欧·厘米， $R_3 \leq 10 \Omega$ ）的平原水田地区的雷击或然率及雷击密度一般较之由阻率和接地差的丘陵山区为高；但某些线路由于近处或远处地形地质和气象条件等影响，结果却恰恰相反，分散性较大。如前所述，即使同是平原水田地区，雷击也会有明显的选择性：有些地区雷电活动较强，线路受雷击机会较多；有些则较弱。事实上，如前述表 6 中平原水田地区的 110 千伏和 220 千伏两线段，历年未都极少发生雷击事故；而 35 千伏线路则较多。在 220 千伏广新线山区线段中，由于地形地质等影响，某些线段如 #19 ~ #30，#160 ~ #176，#192 ~ #202 杆等雷击特多，该三段共长约 17 公里线段中，一年共落雷 13 次。

折称为40个雷电日的雷击或然率高达 $\lambda = 1.53 \text{ kcp}$ ，而雷击密度则高达0.038。

总之，通过雷电测量也可以较容易地确定多雷线路或杆塔。一般来说，局部多雷区在丘陵山区较多。

IV. 雷击的连续性

雷击除具有重复性即每次雷击包含若干次冲击放电以外，雷测尚发现雷击过程往往还具有明显的连续性，即在一次雷暴中沿线路若干杆塔范围连续落2~5个雷不等。按35~220千伏线路全部100次雷击记录统计结果如表7所示，平均每次雷暴沿线连续落雷2.9个，前后涉及杆塔12.7基，相立线段长3.64公里。这当中除包括一次雷击的若干次重复放电以外，尚包括在很短时间范围内连续发生的若干次雷击。

表7 送电线路连续雷击记录统计

地区性质		平原水田地区				丘陵山区				总
线路电压级(千伏)		35	110	220	小计	35	110	220	小计	计
有连续雷击现象的次数		2	0	0	2	2	5	7	14	16
在上述次数中连续落雷总数		4	0	0	4	5	14	24	43	47
平均每次连续落雷个数		2	0	0	2	2.5	2.8	3.4	3.1	2.9
线路平均档距(米)		160	240	430	160	160	240	430	234	286
每次连续雷击前后涉及杆塔基数 线路长度(公里)	最大	7 1.12	0	0	7 1.12	13 2.08	73 17.5	12 5.16	73 17.5	13 17.5
	最小	6 0.96	0	0	6 0.96	10 1.6	4 0.96	6 2.58	4 0.96	4 0.96
	平均	6.5 1.04	0	0	6.5 1.04	11.5 1.84	20.8 5	9.1 3.91	13.6 4	12.7 3.64

对雷击连续性形成的原因可粗略作这样解释。广州地区雷电路活动较强，雷云面积及积蓄能量较大，雷云中包含有许多“雷电源点”，每次放电将引起连续反应——雷击次数及每次雷击的重复放电次数多，延续时间长，涉及面积广，甚至成树枝状多点向大地放电；加上电力线路有一定屏蔽范围，对雷有“吸引”作用，乃造成沿线多点落雷现象。