

中电联标准《高压交流架空输电线路起晕场强计算方法》

（征求意见稿）编制说明

一、工作简要过程

（一）任务来源

本标准《高压交流架空输电线路起晕场强计算方法》（计划编号：T/CEC 20222074）是根据中电联标准[2022]287号文的安排制定。本标准计划由全国电磁兼容标准化技术委员会归口，华北电力大学（保定）牵头负责标准起草。

（二）主要参加单位和工作组成员

本标准由华北电力大学（保定）牵头，参与单位有中国电力科学研究院有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、电力规划总院有限公司等。

（三）编制过程

2022年12月，召开启动会。

2023年1月至3月，校验起晕场强随子导线半径及海拔高度的变化规律是否依然遵循 Peek 公式。

2023年4月至6月，确定起晕场强随分裂数的变化规律，编制标准征求意见稿，提交给全国电磁兼容标准化技术委员会征求意见。

二、标准编制原则和主要技术内容

（一）编制原则

标准起草工作组根据我国实际情况，研究国内外有关的先进技术资料并结合实践经验，编制统一的、具有实用价值和易于掌握的测试方法。

本标准按 GB/T 1.1-2020 要求编制，编制格式与 GB/T 1.1-2020 要求一致，语言表达符合汉语习惯。

（二）主要技术内容

提出了输电线路分裂导线起晕场强的计算方法，规定了起晕场强试验判定方法，提供了典型高海拔地区架空线路分裂导线起晕场强计算实例。

本标准主要结构及目次如下：

a) 目次

b) 前言

给出提出单位、归口单位、起草单位及起草人等信息。

c) 正文，共设 4 章

1) 规范性引用文件

DL/T 1178-2012 1000kV 交流输电线路金具电晕及无线电干扰试验方法

2) 术语和定义

给出适用于本文件参考 DL/T 1178-2012 界定的以及新规定的术语和定义。

3) 交流线路送电线路起晕场强计算

给出分裂导线的起晕场强计算公式，并对变量及其范围进行解释限定；对计算结果的适用天气概况、导线几何结构等参数进行说明。

附录 A（资料性） 架空线路分裂导线起晕场强计算举例

以高海拔超高压750kV同塔双回常用6分裂500截面导线为例进行起晕场强计算说明。

附录 B（资料性） 起晕场强判定方法对比

对不同场强-阻性电流、电晕损失、可听噪声、无线电干扰曲线等求取起晕场强判定方法进行对比，并获得最优判定方法。

附录 C（资料性） 起晕场强预测方法评估

对不同海拔地区实测超/特高压输电线路起晕场强数据分别采用本文件计算公式与 Peek 半经验计算式进行对比。

参 考 文 献

列出与本文件相关的参考文献。

三. 主要试验验证情况和预期达到的效果

将国家电网公司武汉特高压交流试验基地海拔 19m 获得的 8×JL/G1A-400、8×JL/G1A-500、8×JL/G1A-630 起晕场强试验值，500kV 超高压用 4×JL/G1A-400 分裂导线在武汉、西宁、格尔木、纳赤台四个海拔点的起晕场强试验值，分别与本文件所提计算公式预测值进行了对比，见表 1。可知，对于 4 分裂及以上分裂数导线，继续采用 Peek 公式则计算结果最大偏差为 19.21%，而采用本文件公式计算最大偏差为 2.4%，与试验结果吻合较好，完全满足工程适用要求。进一步验证了本文件所提计算方法可适用于海拔 19~5000m 范围内分裂导线起晕场强的计算。

表 1 不同海拔地区特高压分裂导线场强计算值与实测值比较

试验地点	海拔高度/m	导线类型	试验值 (kV/cm)	计算值/(kV/cm)		计算偏差/%	
				预测公式	Peek 公式 (m=0.8)	预测公式	Peek 公式
武汉	19	8×JL/G1A400	19.92	19.84	21.89	-0.40%	9.89%
		8×JL/G1A500	18.94	18.93	21.65	-0.05%	12.31%
		8×JL/G1A630	17.96	18.05	21.41	0.50%	19.21%
		4×JL/G1A400	23.08	23.11	21.82	0.13%	-5.46%
西宁	2200	4×JL/G1A400	19.99	19.51	17.68	-2.40%	-11.56%
格尔木	2829		18.80	18.56	16.62	-1.28%	-11.59%

纳赤台	3800		16.94	16.90	12.79	-0.24%	-12.69%
-----	------	--	-------	-------	-------	--------	---------

四. 采用国际标准和国外先进标准情况

本标准未引用国际标准。本标准依据近年来华北电力大学（保定）、中国电力科学研究院有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、电力规划总院有限公司关于架空线路分裂导线起晕场强等工作成果起草。本标准提出了高压交流架空线路分裂导线起晕场强通用计算方法，力求做到计算简单与结果准确。

五. 与现行法律、法规、政策及相关标准的协调性

本标准与现行其他相关标准没有矛盾，与现行的法律、法规、政策也无冲突和违背。

六. 重大分歧意见的处理经过和依据

无

七. 本标准作为强制性标准或推荐性标准的建议

建议本标准作为推荐性中电联标准发布。

八. 贯彻标准的要求和措施建议

建议在全国电磁兼容标准化技术委员会的领导下，开展对本标准涉及的内容宣贯工作。

九. 废止现行有关标准的建议

无。

十. 重要内容的解释和其它应予说明的事项

1、关于“前言”

本章按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》要求，给出了本标准与其他标准的关系、提出单位、归口单位、起草单位、起草人等内容。

2、关于“规范性引用文件”

本章列出标准中规范性引用的文件，该文件经过标准条文的引用后，成为标准应用时必不可少的文件。

DL/T 1178—2012 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3、关于“术语和定义”

术语及定义参考 DL/T 1178—2012 等标准中的界定，同时列写了较为关键的术语对本标准中较为关键的术语进行了定义（输电线路分裂导线起晕场强）。

输电线路分裂导线起晕场强 corona onset voltage gradient of bundle conductors on overhead power lines

分裂导线电晕起始电压对应的最大平均标称场强值。电晕起始场强类似“归一化值”，不受试品布置方式的影响。

分裂导线平均最大场强：对于2分裂及以上分裂导线，单根子导线最大场强的算术平均值。如，对于单根子导线最大场强分别为16.5、16.9和17.0 kV/cm的3分裂导线，平均最

大场强为(16.5+16.9+17.0)/3=16.8kV/cm。

4、关于“交流架空线路起晕场强计算方法”

给出分裂导线的起晕场强计算公式，并对变量及其范围进行解释限定。

$$E_c = \begin{cases} 21.92m\delta\left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right), & n = 1 \\ 21.1m\delta\left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}}\right), & n = 2 \\ 35.75\delta\left(\frac{1}{n} + 0.74\frac{\ln n}{\sqrt{\delta nr}}\right) - 1.34, & n > 2 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta = \frac{273+t_0}{273+t} \times \left(1 - \frac{H}{10.7}\right) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

E_c —分裂导线起晕场强，kVrms/cm；

m —导线表面粗糙系数；

δ —相对空气密度；

r —导线半径，cm；

n —导线分裂数；

t —环境温度，°C；

H —海拔高度，km；

t —环境温度；

t_0 —环境温度参考值，25 °C；

同时，对计算结果的适用天气概况、导线几何结构等参数进行说明。

公式推导技术过程如下：

4.1 子导线半径对起晕场强影响规律研究

依据 Peek 公式，起晕场强与子导线半径 r 的平方根成反比，由于当时试验导线的半径较小，为了验证对于更大截面绞线是否依然成立，利用式（3）对不同子导线半径范围内的分裂导线起晕场强进行曲线拟合，运用最小二乘法进行参数 a_1 、 b_1 求解，结果见表 2，起晕场强试验结果与拟合曲线对比见图 1。

$$E_c = a_1 + \frac{b_1}{\sqrt{r}} \dots\dots\dots (3)$$

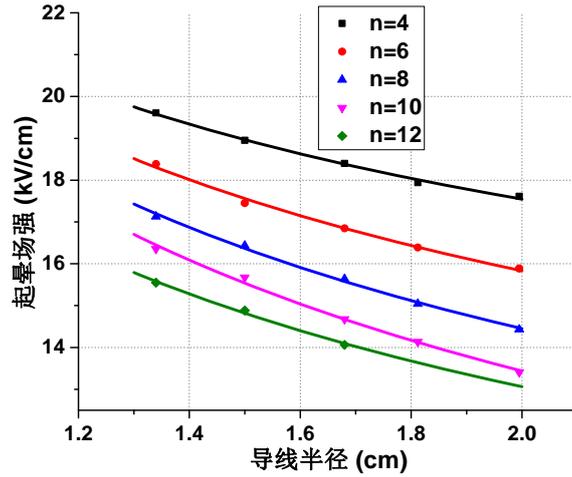


图 1 起晕场强随导线半径变化试验与拟合结果对比

由图 1 可知，用式 (3) 得到起晕场强拟合曲线与试验结果一致性较好。在不同分裂数下，随着子导线半径的增加起晕场强非线性减小，在不同子导线半径范围内起晕场强的减小幅度不一样。

表 2 起晕场强随子导线半径变化公式的拟合系数

分裂数	a_1	b_1	相关系数 R	标准差 σ_s
4	8.36	12.99	0.9964	0.0555
6	2.68	15.77	0.9946	0.0818
8	2.06	17.53	0.9967	0.0713
10	-0.15	19.22	0.9948	0.0985
12	1.698	16.07	0.9943	0.0794

由表 2 可知，相关系数整体大于 0.9943，标注方差小于 0.0985 kV/cm，证明起晕场强随子导线半径变化拟合公式的准确性。

4.2 分裂数对起晕场强影响规律研究

Peek 公式由于是在同轴圆柱结构对单根导线进行大量试验的基础上提出的，不包含分裂数对起晕场强的修正项，根据分裂导线在不同分裂数下的起晕场强试验结果，提出了起晕场强随分裂数变化的拟合公式，见式 (4)，并对不同分裂数范围内分裂导线起晕场强值进行曲线拟合，运用最小二乘法对参数 a_2 、 b_2 值进行求解，结果见表 3，起晕场强试验结果与拟合曲线对比见图 2。

$$E_c = a_2 \cdot \frac{1}{n} + b_2 \cdot \frac{\ln n}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

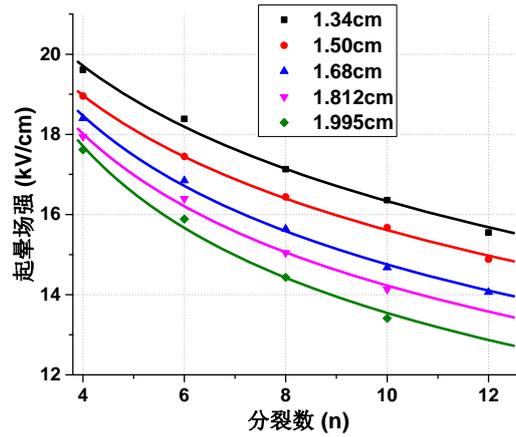


图 2 起晕场强随分裂数变化试验与拟合结果对比

由图 2 可知，用式 (4) 得到起晕场强拟合曲线与试验结果一致性较好。对于子导线半径 1.32cm-1.995 cm 范围内，随着分裂数的增加起晕场强非线性减小且具有一定的饱和趋势，同样，与子导线半径随起晕场强变化相似，在不同分裂数范围内起晕场强的减小幅度不一样，例如，在分裂数 4-9 范围内，起晕场强关于子导线半径的快速减小，且减幅较大；在分裂数 10-12 范围，起晕场强随导线半径增加减幅变缓且具有一定的饱和趋势。

表 3 起晕场强随分裂数变化公式拟合系数

导线半径 (cm)	a_2	b_2	相关系数 R	标准差 σ_s
1.34	26.88	18.74	0.9935	0.1504
1.50	26.56	17.79	0.9986	0.0687
1.68	28.56	16.34	0.9972	0.1057
1.812	28.89	15.57	0.994	0.1574
1.995	31.1	12.33	0.9923	0.1966

由表 3 可知，相关系数整体大于 0.9923，标注方差小于 0.1966 kV/cm，证明起晕场强随分裂数变化拟合公式的准确性。

4.3 海拔高度对起晕场强影响规律研究

采用式 (5) 将海拔高度 H 归一化，可得到类似相对空气密度的参数，记为 δ' ，依据 Peek 公式，起晕场强与相对空气密度 δ 及相对空气密度的平方根成正比，由于当时试验导线为单根，为了验证对于分裂是否依然成立，利用式 (5) 对 6×LGJ400 和 6×LGJ500 起晕场强进行曲线拟合，运用最小二乘法对参数 a_3 、 b_3 进行求解，结果见表 4，起晕场强试验结果与拟合曲线对比见图 3。

$$\delta' = 1 - \frac{H}{k_1} \quad (5)$$

式中： H 为海拔高度，km； k_1 为常数，10.7。

$$E_c = a_3 \cdot \delta' + b_3 \cdot \sqrt{\delta'} \quad (6)$$

表 4 起晕场强随海拔变化公式的拟合系数

导线半径 (cm)	a_3	b_3	相关系数 R	均方差 σ_s
1.34	9.351	12.28	0.9873	0.252
1.50	6.539	13.37	0.9941	0.1481

由图 3 可知，用式 (6) 得到起晕场强拟合曲线与试验结果一致性较好。随着海拔增加起晕场强非线性减小。表 4 可知，相关系数整体大于 0.9873，标准方差小于 0.252 kV/cm，证明起晕场强随分裂数变化拟合公式的准确性。

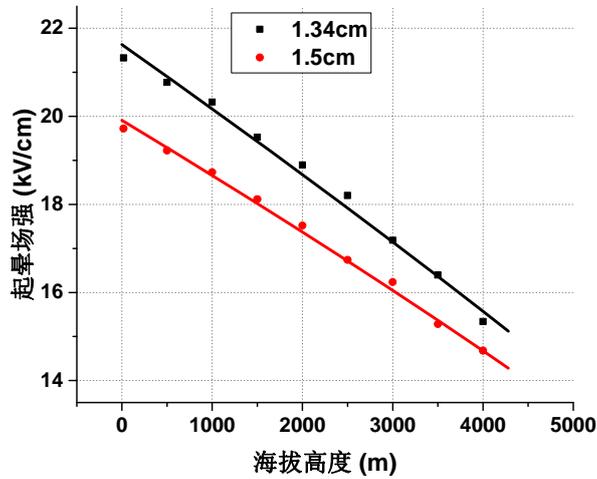


图 3 起晕场强随海拔变化试验与拟合结果对比

4.4 起晕场强预测公式

综合 4.1 至 4.3 节分析，将起晕场强随子导线半径、分裂数及海拔高度变化拟合公式中的稳健项保留，并引入常数项 c 进行整体修正，提出了起晕场强预测公式见式 (7)：

$$E_c = a_4 \cdot \delta' \left(\frac{1}{n} + b_4 \cdot \frac{\ln(n)}{\sqrt{\delta' \cdot n \cdot r_0}} \right) - c \quad (7)$$

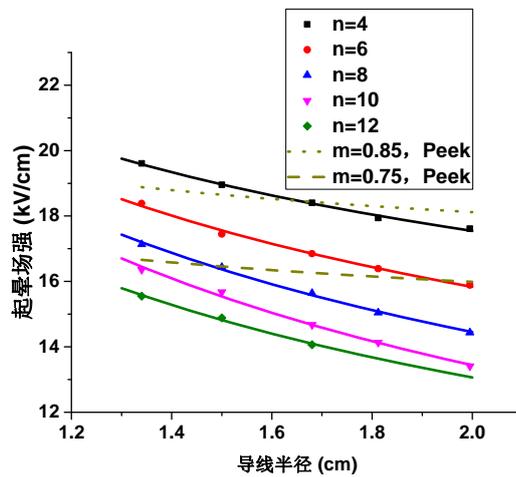
对所有起晕场强试验数据进行多元非线性曲线拟合，得到起晕场强预测公式见 (8)。

$$E_c = 35.75 \cdot \delta' \left(\frac{1}{n} + 0.74 \cdot \frac{\ln(n)}{\sqrt{\delta' \cdot n \cdot r_0}} \right) - 1.34 \quad (8)$$

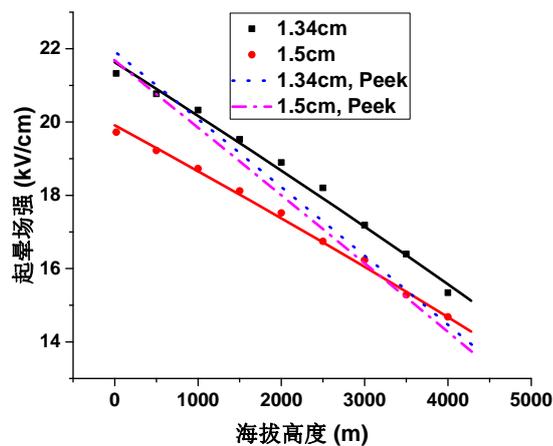
对于 R 曲线拟合度检验，R2 为 0.9852，证明该预测公式逼近效果非常好。

分析分裂数和子导线半径对起晕场强影响时，在 8-25 °C 范围内，温度对相对空气密度影响很小，因而对起晕场强影响不大，根据试验现场的温度范围，取计算温度为 15 °C。对于分裂绞线，粗糙系数在 0.75-0.85 之间，因此取粗糙系

数为 0.75 和 0.85 代入 Peek 公式对分裂导线起晕场强进行计算，并与本文件所提预测公式起晕场强计算结果进行了对比，见图 4(a)。发现 Peek 公式起晕场强计算值整体范围在 4 分裂与 6 分裂导线起晕场强试验值之间，显然不能给出相对精确的起晕场强值，对于 8、10、12 分裂，则不能采用 Peek 公式进行起晕场强计算，而采用本文所提预测公式在不同分裂数和不同子导线半径下起晕场强计算结果与试验结果吻合较好。



a) 起晕场强随分裂数、子导线半径变化对比



b) 起晕场强随海拔变化对比

图 4 本文件预测公式与 Peek 公式起晕场强计算结果对比

分析海拔高度对起晕场强影响时，同样取计算温度为 15 °C，取粗糙系数为 0.8，对 19–4000 m 下分裂导线的起晕场强采用 Peek 公式进行计算，并与本文所提预测公式起晕场强计算结果进行了对比，见图 4(b)。发现对于子导线半径 1.34 cm 和 1.5 cm 的六分裂导线，Peek 公式起晕场强计算结果基本重合，与试验结果偏差较大。且在海拔 1000 m 以下，Peek 公式起晕场强计算值与子导线半径为 1.34cm 导线起晕场强试验结果吻合较好，在海拔 1000–3000 m 范围内，Peek 公式起晕场强计算值与实验结果偏差较大，当海拔大于 3000 m 时，Peek 公式起晕场强计算值与子导线半径为 1.5 cm 导线起晕场强试验结果吻合较好。而采用本文件所提计算公式不同海拔下起晕场强计算结果与试验结果吻合较好。

附录 A（资料性附录） 架空输电线路分裂导线起晕场强计算举例

以高海拔超高压750kV同塔双回常用6×JL/G1A500导线为例进行起晕场强计算说明。

附录 A 架空输电线路分裂导线起晕场强计算举例

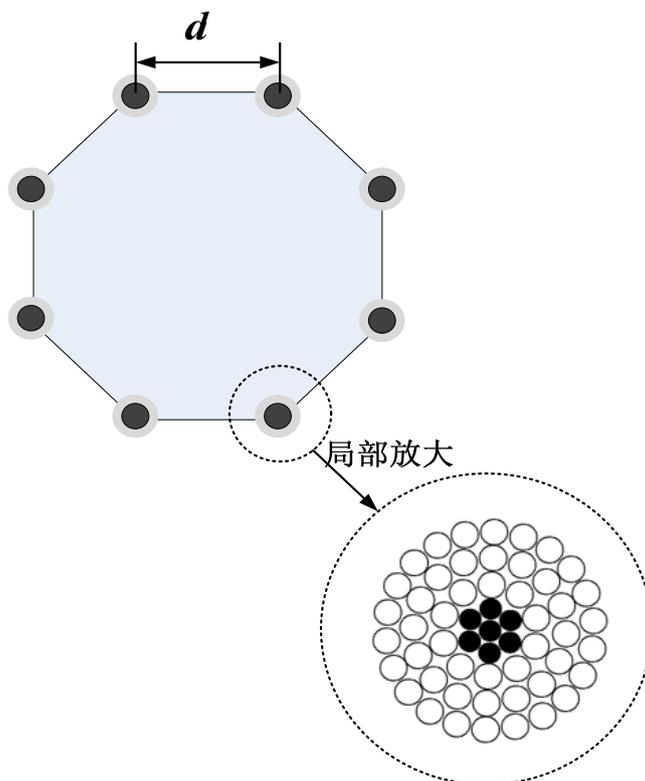


图 A.1 分裂导线结构示意图

对于高海拔地区超高压750kV同塔双回常用的6×JL/G1A500导线，其参数为：

- 子导线半径 r ：1.5 cm；
- 海拔高度 H ：2.2 km；
- 分裂间距 D ：400 mm；
- 分裂数 n ：6。

由计算可得 E_c ：17.42 kV/cm。

从而得到分裂导线起晕场强值为17.42 kV/cm

附录 B（资料性附录） 起晕场强判定方法对比

对五种常用起晕场强试验判定方法进行技术对比，并得到本文件所采用的最优起晕场强判定方法。

根据相关研究，瑞安和亨兰提出好天气下导线阻性电流 I 的计算公式，

$$I = k_0 f C (E - E_0) \quad \text{..... (B.1)}$$

式中：

k_0 ——常数；

f ——施加电压的频率；

C ——对地电容；

E_0 ——起晕场强；

根据Peek公式，好天气下导线电晕损耗 P 的计算公式为

$$P = \alpha f (E - E_0)^2 \dots\dots\dots (B. 2)$$

式中：

α ——常数；

瑞安公式 (B. 1) 给出了等效电晕电流和场强、起晕场强的计算关系式，Peek半经验公式 (B. 2) 给出了好天气下电晕损失与导线场强、起晕场强的平方定律。由上式可知可知，曲线在横轴上的截距即为起晕场强值。因此，对场强—阻性电流 ($E-I$) 曲线和场强—电晕损耗根号值曲线 ($E-\sqrt{P}$) 采用切线法可获得起晕场强。具体操作步骤：对场强-阻性电流曲线分别在起晕前和起晕后分别作切线，2条切线的交点即为电晕起始点，如图B. 1所示，即两条直线的交点在横坐标上的投影即为起晕场强。

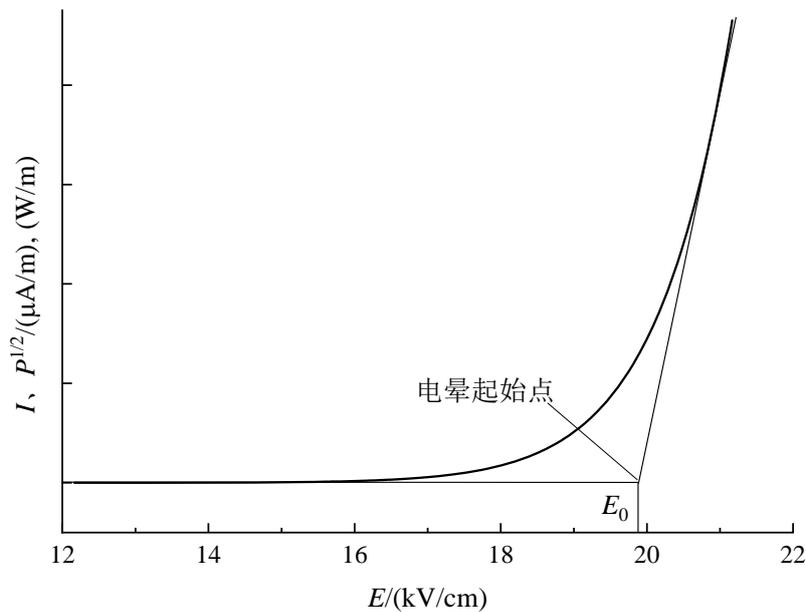
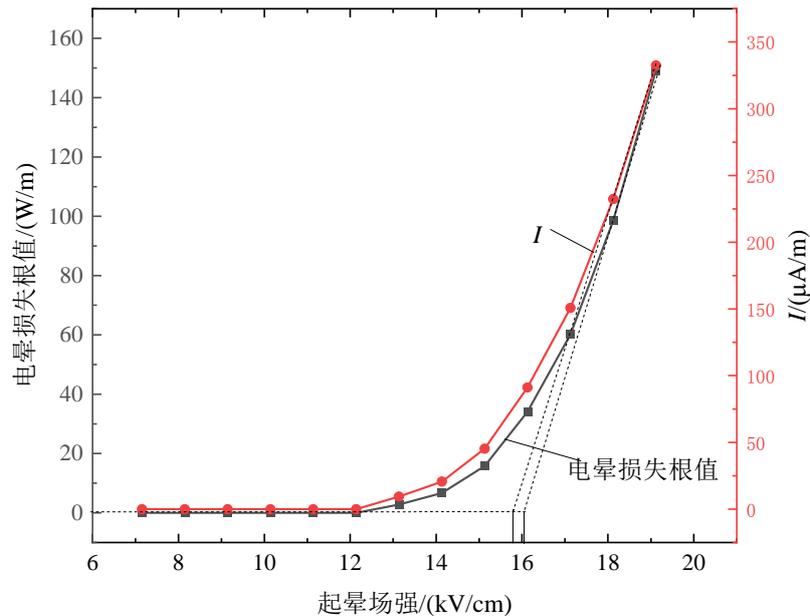


图 A. 2 切线法判定起始电压示意图

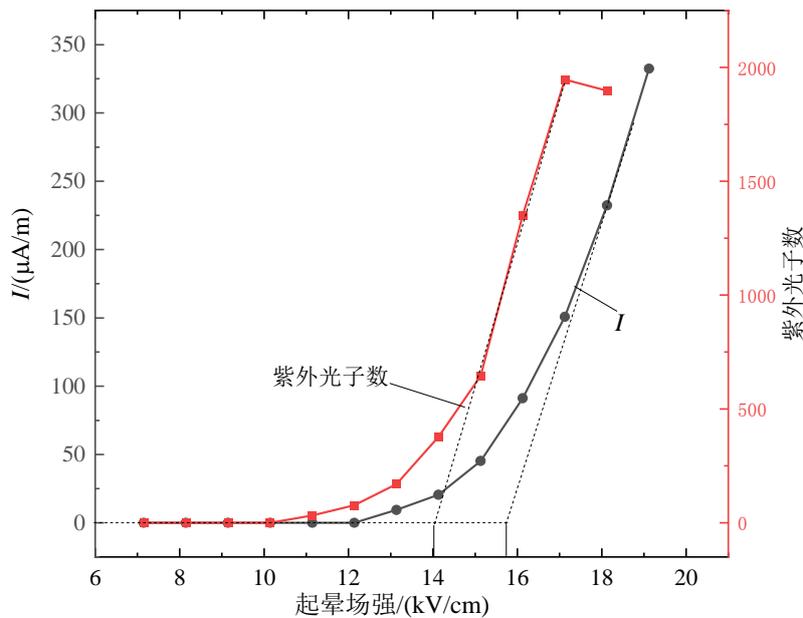
国内外学者通过大量的工程应用验证了 $E-I$ 、 $E-\sqrt{P}$ 切线法的可行性，如国外的Peek、Chartier等，国内的刘有为、何津云、胡其秀、黄世龙等。而淋雨、涂污导线则采用双切线求取起晕场强。但实际测量过程中，由于电晕放电的非均匀性，户外环境的即变性、及测量仪器本身引入的误差，使得测量原始数据表征高阶特性，但可以通过多次测量求平均的方法来消除，切线法所求取的起晕电压完全满足工程误差范围。后续学者发现采用 $E-P$ 和 $E-\sqrt{P}$ 曲线获得起晕场强结果偏差不大，因此多采用 $E-P$ 曲线求取起晕场强。同时引申紫

外光子数、可听噪声、无线电干扰等电晕参数也作为判断起晕场强的方法，这三种参量仅可以得到粗略的起晕电压，且无理论依据。紫外光子数，其测量结果受仪器本身特性如增益、同时受外部环境如观测距离、观测角度等因素影响太大。而无线电干扰，其测量结果本身具有饱和特性，故无法得到准确的起晕场强。

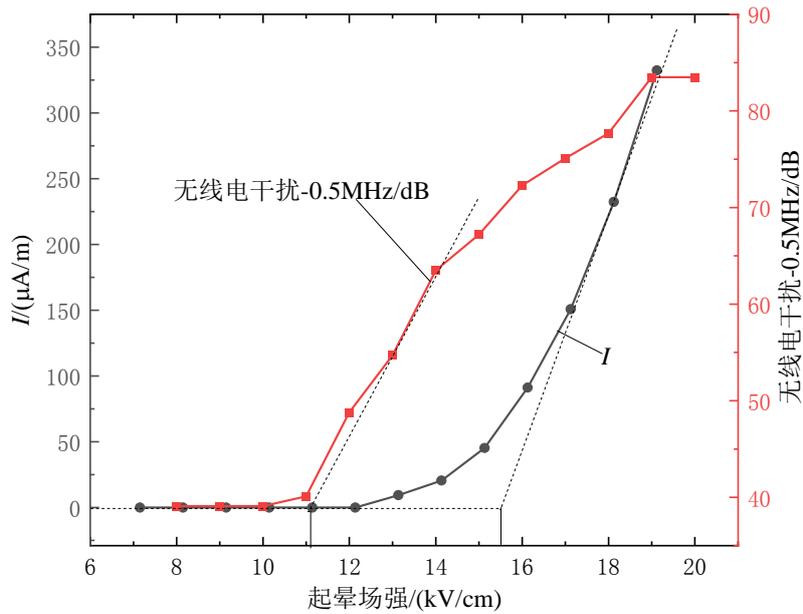
以8×JL/G1A630分裂导线在干燥下起晕场强求取为例，利用切线法对E-I曲线、E-√P曲线、E-PH紫外光子数曲线、E-RI无线电干扰曲线和E-AN可听噪声曲线分别求取起晕场强并进行对比，如图B.2所示。起晕场强对比结果见表B.1。



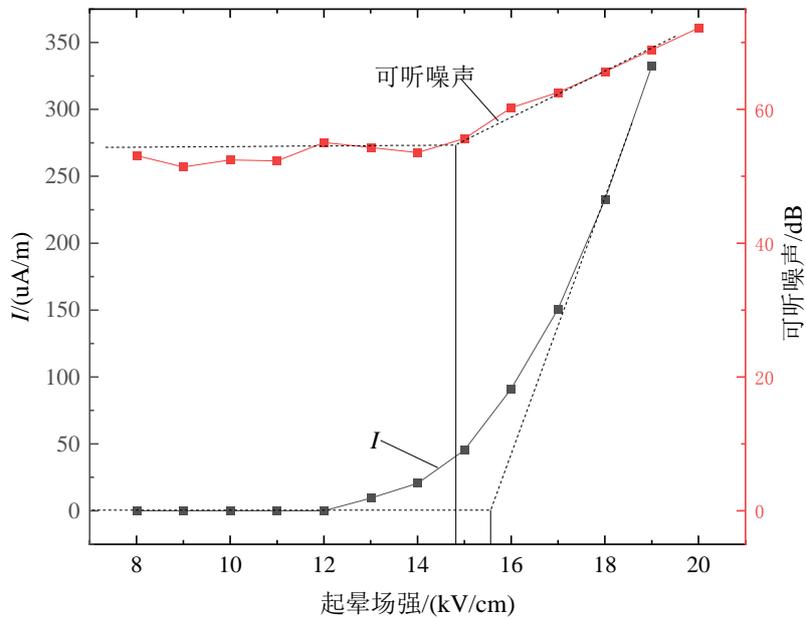
a) E-I、E-√P曲线对比图



b) E-I曲线、场强-紫外光子数曲线



c) $E-I$ 曲线、 $E-RI$ (0.5MHz) 曲线对比



d) $E-I$ 曲线、 $E-AN$ 曲线对比

图 A.3 五种方法求取起晕场强结果对比

表 A.1 五种方法起晕场强结果对比

单位为千伏每厘米 (kV/cm)

$E-I$ 曲线	$E-\sqrt{P}$ 曲线	$E-PH$ 曲线	$E-RI$ 曲线	$E-AN$ 曲线
15.64	15.88	14.02	10.96	14.75

以干燥条件下场强-阻性电流曲线获得的起晕场强为基准，由表B.1可知： $E-I$ 曲线曲线、 $E-\sqrt{P}$ 曲线得到的起晕场强结果基本一致，偏差约为1.5%；而通过 $E-RI$ 曲线得到的起晕场强偏差约为10.4%。采用 $E-RI$ 曲线获取的起晕场强计算结果明显偏小，该场强下导线阻性电流很小，应为导线毛刺、划痕及金具连接处随机、离散的电晕放电点所致，而在Peek

定律也定义，其实该处场强仅为E爆发性点放电，此时分裂导线阻性电流很小，而场强-阻性电流曲线获得的场强才是较为真实的E visual discharge，此时导线全线表面已经出现较弱的放电点，随着场强的进一步增大，导线表面放电点的电晕活动更剧烈，阻性电流呈指数形式增加。而从图B. 2中可以看出场强较高时，紫外光子数发生明显的拐点，原因可能是当导线场强过大时，电晕放电加剧，而紫外相机观测到的光斑面积是重叠的，且此时进一步增大场强紫外相机光子计数基本保持不变甚至略有下降趋势，紫外测量结果受拍摄角度、拍摄距离、相机本身的增益及其他参数影响较大。因此，本文件计算方法推导分析中采用E-I曲线求取导线起晕场强。

附录 C（资料性附录） 起晕场强预测方法评估

将国家电网公司武汉特高压交流试验基地海拔 19m 获得的 8×JL/G1A-400、8×JL/G1A-500、8×JL/G1A-630 起晕场强试验值，500kV 超高压用 4×JL/G1A-400 分裂导线在武汉、西宁、格尔木、纳赤台四个海拔点的起晕场强试验值，分别与本文件所提计算公式预测值进行了对比。

将国家电网公司武汉特高压交流试验基地海拔 19 m 获得的 8×JL/G1A-400、8×JL/G1A-500、8×JL/G1A-630 起晕场强试验值，500kV 超高压用 4×JL/G1A-400 分裂导线在武汉、西宁、格尔木、纳赤台四个海拔点的起晕场强试验值，分别与本文件所提计算公式预测值进行了对比，见表 C. 1。可知，对于 2 分裂及以上分裂数导线，继续采用 Peek 公式则计算结果最大偏差为 19. 21%，而采用本文件计算方法则最大偏差仅为 2. 4%，与试验结果吻合较好，完全满足工程适用要求。进一步验证本文件所提计算方法可适用于海拔 19 m~5000 m 范围内分裂导线起晕场强的计算。

表 C. 1 不同海拔地区特高压分裂导线场强计算值与实测值比较

试验地点	海拔高度/m	导线类型	试验值/(kV/cm)	计算值/(kV/cm)		计算偏差/%	
				预测公式	Peek 公式 (m=0.8)	预测公式	Peek 公式
武汉	19	8×JL/G1A400	19.92	19.84	21.89	-0.40%	9.89%
		8×JL/G1A500	18.94	18.93	21.65	-0.05%	12.31%
		8×JL/G1A630	17.96	18.05	21.41	0.50%	19.21%
		4×JL/G1A400	23.08	23.11	21.82	0.13%	-5.46%
西宁	2200	4×JL/G1A400	19.99	19.51	17.68	-2.40%	-11.56%
格尔木	2829		18.80	18.56	16.62	-1.28%	-11.59%
纳赤台	3800		16.94	16.90	12.79	-0.24%	-12.69%

标准编制工作组
2023 年 5 月 31 日