

文章编号:1672-058X(2011)01-0046-06

求证避雷针雷电防护机理的新探索

王代新¹, 李家启^{2,3}, 江孟蜀¹

(1. 重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067; 2. 南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044;
3. 重庆市防雷中心, 重庆 401147)

摘要:在已求得了避雷针尖端与地面电场强度对比率的基础上,提出了避雷针雷电防护中的点电荷与针地引力对比度引雷理论,由其得出的保护角和保护半径的理论值与避雷针保护角法的经验值相符;理论与实际的相符表明,理论是对避雷针雷电防护过程中本来就存有的一些本质特征的如实反映,丰富和拓展了避雷针雷电防护理论基础。

关键词:避雷针;保护范围;保护角法;遭雷击概率

中图分类号: O316

文献标志码: A

已知^[1],避雷针尖端电场强度 $E_{尖}$ 与地面电场强度 $E_{地}$ 的对比率

$$\frac{E_{尖}}{E_{地}} \geq 10^3 \quad (1)$$

并由导体表面电场强度 E 与电荷面密度 σ 存有 $\sigma = \epsilon_0 E$ 关系得到了避雷针尖端电荷面密度 $\sigma_{尖}$ 与地面电荷面密度 $\sigma_{地}$ 之比

$$\frac{\sigma_{尖}}{\sigma_{地}} \geq 10^3 \quad (2)$$

拟在此基础上进而探求用于计算避雷针保护范围如图 1 所示的保护角法的形成机理和过程,对其保护角和保护半径的形成原由给出物理解释;还拟探求避雷针保护域遭雷击概率 $p \geq 0.1\%$ 的形成机理和过程对其经验值 ($p \leq 0.1\%$) 给出物理解释以丰富避雷针雷电防护的理论基础。

1 计算避雷针保护范围的经验保护角法

1.1 避雷针的保护范围

1777 年伦敦附近普夫里特镇的一座火药库遭到雷击,而这一仓库的防雷恰恰是包括富兰克林在内的几位科学家设计的。事后发现避雷针并未接闪。这是第一次发生避雷针保护范围的问题。

避雷针上方为引雷区。避雷的保护范围是指位于针下方的某一特定的锥形区,在这一特定范围之内的被保护物,因避雷针把雷电从其上方引向自身并安全导入大地而免遭雷击得到保护。但在此范围内免遭雷击得到保护是相对某一很小的遭雷击概率 P 而言的,并非绝对保险。按照我国电力行业 DL/T620-1997 标准,

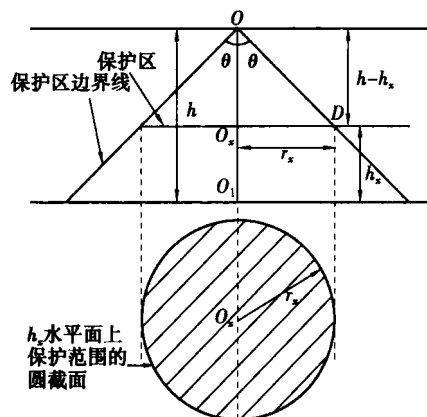


图 1 避雷针提供保护角 θ 的锥形保护区
 h —避雷针尖 O 离地面高度; h_x —被保护物高度; r_x — h_x 水平面上保护半径。

$$r_x = O_2D = OO_2 \cdot \tan\theta = (h - h_x) \tan\theta$$

(图中 $\theta = 45^\circ$)

收稿日期:2010-07-18;修回日期:2010-09-02.

作者简介:王代新(1970-),重庆市巴南区人,讲师,从事物理研究.

** 通讯作者:李家启(1976-),重庆人,高级工程师,从事气象防雷研究.

避雷针的保护范围是指被保护物在此空间范围内遭雷击概率 P 不超过 0.1%, 即在其内遭雷击概率 $P \leq 0.1\%$ 的空间范围方可称为避雷针的保护范围。

1.2 保护角法的保护半径计算式

单支避雷针保护范围计算方法主要有保护角法、折线法和滚球法等。由于避雷针的轴对称性,这3种方法所确定下的保护范围都是以避雷针为轴的圆锥体,保护角法下的避雷针保护范围为如图1所示的直线圆锥体,折线法下的保护范围则为折线圆锥体,滚球法下的保护范围则为曲线圆锥体,因而这些圆锥体与高度为 h_x 水平面相交的所有截面,都是圆截面,所以这3种方法都可以计算这些高度为 h_x 水平面上的截面圆的半径 r_x (用 r_x 来表示避雷针的保护范围)。差异在于:

① 滚球法为国际电工委员(ICE)和我国《建筑物防雷设计规范》GB 50057—1994 采用,其计算保护半径 r_x 的公式为:

$$r_x = \sqrt{h(2h_r - h)} - \sqrt{h_x(2h_r - h_x)}$$

式中 h_r 为滚球半径;

② 折线法为前苏联和我国电力行业标准 DL/T620—1997 采用,其在 $h \leq 30$ m 时计算保护半径 r_x 的公式为:

$$\begin{cases} h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = (h - h_x) \cdot 1 \\ h_x < \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = (1.5h - 2h_x) \cdot 1 \end{cases}$$

当 $h > 30$ m 时,

$$\begin{cases} h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = (h - h_x) \cdot \frac{5.5}{\sqrt{h}} \\ h_x < \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = (1.5h - 2h_x) \cdot \frac{5.5}{\sqrt{h}} \end{cases}$$

③ 保护角法为我国《建筑物防雷设计规范》GBJ 57—83 和日本防雷设计标准 JISA 4201—1992 采用,其计算保护半径 r_x 的公式为:

$$r_{x\text{实}} = (h - h_x) \text{tg}\theta, \text{ 其中 } \theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ \quad (3)$$

式(3)的用法和意义是:首先根据保护对象性质对式中所列 $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ$ 这两个特定保护角进行选择, JISA 4201—1992 对危险物设定 $\theta = 45^\circ$, 然后代回式(3)求得 $r_x = (h - h_x) \text{tg}45^\circ = h - h_x$, 则凡位于斜角为 45° 的锥形体内高度 h_x 水平面上半径为 $r_x = (h - h_x)$ 的圆截面内的各点都可免遭雷击受到保护,因而将此 r_x 称为保护角 $\theta = 45^\circ$ 时 h_x 水平面上的保护半径;对一般建筑物设定其保护角为 60° , 将 $\theta = 60^\circ$ 代回式(3)就再得保护角为 60° 时的 h_x 水平面上的保护半径 $r_x = (h - h_x) \text{tg}60^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}}(h - h_x)$, 等。

式(3)中的 $r_{x\text{实}}$ 是表示此 r_x 是由如下所述的实际观测得到。因保护角、保护半径及由其确定下的锥形保护范围,一般是按照 99.5% ~ 99.9% 的保护率(即 0.5% ~ 0.1% 的遭雷击概率)定出来的,

是以在这些锥形区内遭雷击概率 $p \leq 0.5\% \sim 0.1\%$ 为前提的。而现在实际观测表明,在避雷针高 $h \leq 30$ m 的条件下,在经由保护半径式(3)而得出的 $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ$ 的这两个锥形区内的遭雷击概率 p 的实测值 $p_{\text{实}}$ 均不超过 0.1%, 即:

$$p_{\text{实}} \leq 0.1\% \quad (4)$$

因而式(3)中的 r_x 正是因有式(4)这样的实测结果,方才能被称为保护半径。故将 r_x 的在经由式(4)所示的这样的实测后方才得以出来的这一取值特以 $r_{x\text{实}}$ 表示,以区别于下文中 r_x 的源于理论的理论取值 $r_{x\text{理}}$ 。

由于式(3)源于实践经验的总结,是实际观测的结果,故可将式(3)称为保护角法的经验计算式,或经验保护角法计算式。式(3)在确定条件(针高 $h \leq 30$ m)下的适用性和可靠性是一种客观的存在,不会因时间的流逝和采用标准的人为兴废而改变。

2 形成保护角法经验公式的机理求证

2.1 地面点被雷击的电场强度描述及点电荷描述

雷电(闪电)是带电雷雨云对地的放电。整个雷电过程中的每一次云地之间的放电称闪击。一次闪电经常可记录到数次闪击,有的多达十次以上。每次闪击的持续时间约为 20 ~ 100 μs。闪击一般包含下行先导和上行先导两个过程。通常的闪电(云地放电)是云中负电荷对地的放电,称负地闪。在全部闪电中负地闪约占 90% 以上,以下均以下行负地闪为例说事,首先讨论云端下行先导和地面上行先导的产生。

对云地电场所做的描述是:由于静电感应,云层下部负电荷将大量与之相反的感应正电荷吸引到自己正下方的地面区域,这些正负电荷类似于无穷大平行板电容器中的电荷,在云层下部和地面之间形成于上下相对的层状结构,产生一均匀电场 E 。但这种均匀分布的电荷很难产生闪电,闪电产生于雷云电荷在此层状均匀基底上的时有起伏。情况如下:当雷云下部某局域的负电荷大量积累到可使其局域电场的强度达到和超过空气击穿场强 E_{Ab} (Airbreakdown intensity E_{Ab}) 时,该处所积负电荷向被击穿电离了的空气放电,形成下行负电荷放电流,称下行负电荷先导。下行先导不断向下伸展,将云中负电荷不断移向被击穿电离了的空气。在接近地面时,其下方的一个或几个地面点因高度和形状的不同,均将被感应产生不同的电场强度,其中,电场强度首先达到和超过空气击穿场强 E_{Ab} 处的已积正电荷,即向被击穿电离了的空气产生放电,形成上行正电荷放电流,称正电荷上行先导。极性相反的上行、下行先导相互吸引汇合,遂形成云地两电极间全部被电离了的短路通道,云对地就产生火花放电,该地面点即被雷电击中。以上所用的地面点一词,既指地平面上的点,也指地物面上的点,其中地物包括地面建筑物、接地避雷针、地面树木、行人等,凡和大地同为零电势的地平面上和地物面上的各点在本文中均称为地面点,差别只在于它们各自的离地高度 h_x 不同。以上所述就是雷电(地闪)的产生,地面点被雷击的电场强度描述。

现再用假设点电荷模型来描述地面点的被雷击;其关键是视下行先导和地物均为点电荷。即,第一,视电荷量为 dq 的下行负电荷先导的前部端点为点电荷,以这个头部点电荷 dq 来等效代替尾随其后的下行负电荷先导,并称这个头部点电荷 dq 为先导头部 dq ,简称先导 dq 。然后,第二,再视包括避雷针尖端在内的各地面点,也都是电荷量各为 σds 的点电荷, σ 为该地面处的电荷面密度, ds 为该处的面元值。这样地面点被雷击的点电荷模型即为:当下行负电荷先导头部 dq 逐渐接近地面并达到一定距离时,电量为 dq 的先导头部 dq 受到来自其下方的电荷量分别为 σds 的各地面点的库仑引力:

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma ds \cdot dq}{r^2}$$

r 为先导 dq 与 σds 地面点之间的距离,先导 dq 将被吸向对其所施引力为最大的点,在向引力最大点不断移近的过程中,先导 dq 在该点集中感应产生的电场的强度,将随两者间距 r 的不断减小,按库仑平方反比定律不断增强,直至达到和超过该处的空气击穿场强 E_{Ab} ,引发空气击穿电离,产生一上行正电荷放电流,上行正电荷放电流(上行先导)与下行负电荷放电流(下行先导)汇合,形成云地两电极间短路,于是产生云地火花放电,该地面点即被雷击中。

2.2 求证形成保护角的机理和过程

图 2 为下行负电荷先导被吸向避雷针的理论分析图,图中地平面上的 O_1 点为 Z 坐标轴原点, O_1O 为高度为 h 的避雷针, O 为避雷针尖端,位于 $z = h$ 水平面上; P 为下行负电荷先导头部 dq , O 与 P 沿 Y 轴位于同一 $z = h$ 水平面上, O 与 P 间距 $OP = r_1$; D 为 P 正下方 $z = h_x$ 水平面上高度为 h_x 的地面点(高度为 h_x 的地物顶点) D 与 P 间距 $DP = r_2$,在图 2 中有:

$$r_2 = h - h_x \tag{5}$$

将 2.1 节已述的点电荷假设,用于图 2,就是视 P 处电荷量为 dq 的下行先导头部为点电荷 dq ,称这个代表整个下行闪电先导的头部点

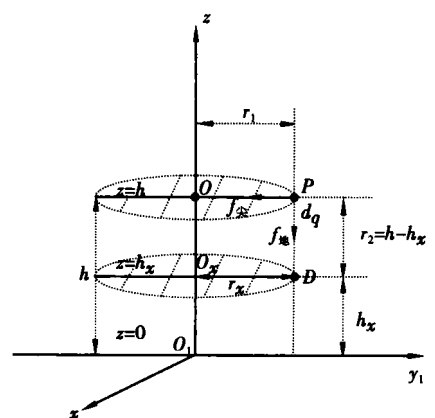


图 2 下行负电荷先导被吸向避雷针的理论分析图

电荷 dq 为先导 dq ; 视 O 处的避雷针尖端的荷电量为 $\sigma_{\text{尖}} ds$ ($\sigma_{\text{尖}}$ 为尖端处的电荷面密度, ds 为面元值); 它们间的相互作用遵守库仑定律。于是, 电量为 $\sigma_{\text{尖}} ds$ 的避雷针尖端 O 对 P 处先导 dq 的引力 $f_{\text{尖}}$ 为(图2):

$$f_{\text{尖}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma_{\text{尖}} ds \cdot dq}{r_1^2} \quad (6)$$

电量为 $\sigma_{\text{地}} ds$ ($\sigma_{\text{地}}$ 为地面点处的电荷面密度, ds 为面元值) 的地面点 D 对 P 处先导 dq 的引力 $f_{\text{地}}$ 就为:

$$f_{\text{地}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma_{\text{地}} ds \cdot dq}{r_2^2} \quad (7)$$

式(6)除以式(7)得:

$$\frac{f_{\text{尖}}}{f_{\text{地}}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}} \quad (8)$$

称 $\frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}}$ 为针地电荷面密度之比。在式(8)两端同除以 $\frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}}$, 得:

$$\frac{f_{\text{尖}}}{f_{\text{地}} \cdot \frac{f_{\text{尖}}}{f_{\text{地}}}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (9)$$

式(9)在左侧中的分子 $f_{\text{尖}}$ 是闪电先导所受避雷针的引力, 分母 $f_{\text{地}} \cdot \frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}}$ 是闪电先导所受地面点的引力 $f_{\text{地}}$ 乘以针地电荷面密度之比 $\frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}}$, 因而 $\frac{f_{\text{尖}}}{f_{\text{地}} \cdot \frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}}}$ 就是闪电先导所受针的引力 $f_{\text{尖}}$ 与所受地面点引力 $f_{\text{地}}$ 乘以针

地电荷面密度之比 $\frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}}$ 的比率, 现以 k 表示, 即闪电先导所受针地引力对比度的定义式为:

$$k = \frac{f_{\text{尖}}}{f_{\text{地}} \cdot \frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}}} \quad (10)$$

在式(10)已给出所受针地引力对比度定义的基础上, 提出引雷假设:

$$k \geq \frac{1}{3} \quad (11)$$

即只要 $k \geq \frac{1}{3}$, 则该闪电先导将被吸向避雷针, 故式(11)可被称为“引雷准则”。

回到图2, 已由式(9)知:

$$k = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

又由式(5)知, 在图2中有 $r_2 = h - h_x$, 代入上式即得:

$$k = \frac{(h - h_x)^2}{r_1^2} \quad (12)$$

于是, 由式(12)可知:

$$r_1 = \frac{1}{\sqrt{k}}(h - h_x) \quad (13)$$

于是, 这些在 $z = h$ 平面上的 $r_1 = \frac{1}{\sqrt{k}}(h - h_x)$ 的先导 dq 就会因其 $k \geq \frac{1}{3}$, 而被引向避雷针 O ; 从而, $z = h_x$ 平面上的同一半径 $r_x = \frac{1}{\sqrt{k}}(h - h_x)$ 的圆平面内的各地面点就被免遭雷击。因而, 由上述点电荷针地引力对比度理论所得出的 h_x 水平面上的保护半径 r_x 的理论值 $r_{x\text{理}}$ 就为:

$$r_{x\text{理}} = \frac{1}{\sqrt{k}}(h - h_x) \quad \left(k \geq \frac{1}{3}\right) \quad (14)$$

令其中的 $\frac{1}{\sqrt{k}} = \text{tg}\theta$, 即:

$$\theta = \text{arctg} \frac{1}{\sqrt{k}} \quad \left(k \geq \frac{1}{3}\right) \quad (15)$$

即得:

$$r_{x\text{理}} = (h - h_x) \text{tg}\theta \quad \left(\theta = \text{arctg} \frac{1}{\sqrt{k}}, k \geq \frac{1}{3}\right) \quad (16)$$

令式(16)中的 $k=1, k=\frac{1}{3}$, 由 $\theta = \text{arctg} \frac{1}{\sqrt{k}}$ 即得相应的 $\theta=45^\circ, \theta=60^\circ$, 代入式(16)即得与 $\theta=45^\circ, \theta=60^\circ$ 相应的保护半径 r_x 的理论值 $r_{x\text{理}}$ 的表达式:

$$r_{x\text{理}} = (h - h_x) \text{tg}\theta \quad \left(\theta = \text{arctg} \frac{1}{\sqrt{k}}, k = 1, \frac{1}{3}\right) \quad (17)$$

因式(15)中的 $\theta = \text{arctg} 1/\sqrt{k}$, 当 $k=1$ 时, $\theta=45^\circ$; 当 $k=1/3$ 时, $\theta=60^\circ$, 所以保护半径 r_x 的理论表达式(17)与 r_x 的实测表达式(3)相符一致。

因该理论表达式(17)是由 2.1 节的点电荷假设和 2.2 节的按所受针地引力对比度引雷假设得出的, 所以对理论式(17)和实测式(3)相符一致的最好解释就是: 所提出的点电荷针地引力对比度理论是对计算避雷针保护范围的保护角法的形成机理和过程的如实反映, 所以由此简单理论所得出的理论结果才能与实际已有的实际结果即经验保护角法相符一致。

2.3 关于保护角法相关问题的讨论

2.3.1 保护角法中的保护角 45° 和 60° 如何形成

根据 k 的原始定义式(10)和式(13), 式(17)中的大小为 $\theta = \text{arctg} 1/\sqrt{k}$, 当 $k=1$ 时 $\theta=45^\circ$ 的保护角系由一族所受针地引力对比度不小于 $k=1$ 的闪电先导被引向避雷针所致; 而“不小于 1”就是“最小为 1”, 故也可表述为: 式(16)中的 θ 为 45° 的保护角系由一族所受针地引力对比度最小为 $k=1$ 的闪电先导被引向避雷针所致。

同理, 由 $\theta=60^\circ$ 的保护角则是由一族所受针地引力对比度最小为 $k=1/3$ 的闪电先导被引向避雷针所致。显然, 虽同为保护角, 但 45° 的有效性就比 60° 要高, 所以日本 JISA4201 规定危险物必须以 45° 为保护角。

2.3.2 理论保护角法与经验保护角法的差异

经验保护角法是指以经验式(3)作为保护半径计算避雷针的保护范围, 其特点是将一些特定的角为保护角, 例如在式(3)中, 就只认为保护角 $\theta=45^\circ, \theta=60^\circ$; 而理论保护角法的式(16)则认为, 凡由 $k (k \geq 1/3)$ 按照公式 $\theta = \text{arctg} 1/\sqrt{k}$ 所确定出的一系列角, 均可为保护角, 其相应的保护半径 r_x 都可由式(16)确定。这是式(16)的物理意义所在也是由理论得出的保护角法式(16)与经验保护角法式(3)的差异所在。

2.3.3 “引雷准则”式(11)的力学实质

未按常理将 $f_{\text{尖}}/f_{\text{地}}$ 作为所受针地引力对比度的定义, 而是以式(10)作为其定义式, 并进而以式(11)作为假设的“引雷准则”, 其原因是这样做可方便计算, 不影响问题的实质。

现对“引雷准则”式(11)的力学实质分析如下:

已知“引雷准则”式(11)为 $k \geq 1/3$, 又由式(2)知, $\frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}} \geq 10^3$, 取 $\frac{\sigma_{\text{尖}}}{\sigma_{\text{地}}} = 10^3$, 代入式(10)和式(11)得 $\frac{f_{\text{尖}}}{f_{\text{地}}} \geq \frac{1}{3} \times 10^3$, 即 $f_{\text{尖}} \geq 0.3 \times 10^3 f_{\text{地}}$ 。

因而“引雷准则”式(11)的实质是: 只要其所受针的引力 $f_{\text{尖}}$ 比所受地的引力 $f_{\text{地}}$ 大 2~3 个数量级, 该闪电先导就将被引向避雷针, 也才能被引向避雷针, 而不被吸向地面点。

2.3.4 保护角法的适用条件

已知经验保护角法式(3)的一般适用条件是避雷针高 $h \leq 30$ m。又知与经验式(3)相符的理论式(16)

是在图 2 中的 D 为 P 在 $z = h_x$ 水平面上的正投影点,从而是在没有考虑雷电先导还可从避雷针针尖的上、下两侧袭来的情况下得出的。因而,这种主要来于正投射而未考虑侧击的式(16)也就只能适用于遭侧击概率很小,小到遭侧击概率 $p \leq 0.1\%$ 的情况。观测表明,建筑物越高遭侧击的概率越大,当 $h \geq 30$ m 时,遭侧击概率将可能大过 0.1% ,因此 $h \leq 30$ m 就是式(16)的适用条件。而经验式(3)在 $h \geq 30$ m、侧击难于忽略时就自然难于适用了。应指出 $h \leq 30$ m 是一个比较严厉的要求,国际电工委员会(IEC)在 IEC62305 - 32005 的保护角法中规定,IV 类防雷建筑物针高 h 为 20、30、45、60 m 时对应的保护角分别为 55° 、 45° 、 35° 、 25° ,即当 $h > 30 \sim 60$ m 时仍可适用保护角概念,用式(16)来计算,此时的保护半径 $r_x = (h - h_x) \operatorname{tg}25^\circ = (60 - h_x) \operatorname{tg}25^\circ$ 。

3 结 论

目的是探索避雷针雷电防护的形成机理和过程。为此,提出了点电荷与针地引力对比度引雷假设,由此简单理论得出的保护角和保护半径的理论公式式(16)、(17)与经验公式(3)相符;理论和实际的相符表明,由该理论所描述的保护角法经验公式(3)的形成机理和过程,是对该事物的本质特征的如实反映,从而丰富和拓展了避雷针雷电防护的理论基础。

参考文献:

- [1] 王代新,江孟蜀. 避雷针电场与地面电场的相关性及其科学价值[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2009(1):70-75
- [2] 蔡圣善,朱耕. 经典电动力学[M]. 上海:复旦大学出版社,1985
- [3] J. D 杰克逊. 经典电动力学[M]. 北京:人民教育出版社,1978
- [4] 邱金桓,陈洪滨. 大气物理与大气探测学[M]. 北京:气象出版社,2006
- [5] 劳动部职业安全监察局. 安全用电[M]. 北京:劳动人事出版社,1990
- [6] 陈洪滨,吕达仁. 从空间探测闪电的综述[J]. 气象学报,2001,59:350-355

New Exploration for Proving Lightning Rod Mechanism of Lightning Protection

WANG Dai-xin¹, LI Jia-qi^{2,3}, JIANG Meng-shu¹

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing Information Engineering University, Nanjing 210044; 3. Chongqing Thunder Prevention Center, Chongqing 401147, China)

Abstract: On the basis of obtaining the electrical field strength ratio of lightning rod peak to the earth, this paper proposes lightning theory of gravitation contrast between point charge and the rod in the process of electricity prevention of lightning rod, and the theoretical value of prevention angle and prevention radius obtained from the theory matches up to the empirical value of the prevention angle method of lightning rod. The fact that the theory matches up to the practice indicates that this theory really reflects the essence characteristics existed in the process of electricity prevention of lightning rod and enriches and develops the theoretical basis of lightning prevention of lightning rod.

Key words: lightning rod; prevention range; prevention angle method; lightning strike probability

责任编辑:代晓红

校 对:田 静