

# 高压输电线路防冰雪措施\*

高金峰 王俊昆

(郑州工学院)

**摘 要:** 本文详细讨论了经实践证明非常有效的高压输电线路防冰雪措施——防冰球和防冰环的作用原理与设计。并从复冰和积雪的形成机制, 防冰球和防冰环的受力分析等几个方面进行了定性和定量分析。据此推出了防冰球和防冰环的设计公式。

**关键词:** 高压输电线, 复冰, 积雪, 防冰球, 防冰环。

**中图分类号:** TM863

重冰雪地区的高压输电线路会因严重的复冰和积雪引起断线及倒杆事故。位于河南省南阳地区境内的 110KV 丹栾线(丹江—栾川), 自 1971 年投运以来, 因严重的复冰积雪造成导线落地, 球头折断等事故, 引起线路跳闸停电达八次之多, 直接影响了国防试验和工农业生产, 给国家造成了巨大的损失。为消除复冰积雪的影响, 在分析和比较众多预防和消除复冰积雪的措施后, 并根据高压输电线路所处的地域特点, 吸取法国电力公司预防和消除复冰积雪的经验, 在高压输电线路设计上设计安装了防冰球和防冰环, 经使用取得了较好的效果。性能价格比很高, 在不改变原线路设计的前提下容易推广。本文的目的在于对防冰球及防冰环预防和消除复冰积雪的原理及设计要点进行讨论, 为高压输电线路预防和消除复冰积雪提供一定的参考。

## 1 形成复冰积雪的机制分析

架空导线的复冰和积雪在不同的气候条件下有不同的内容, 为了分析防冰球及防冰环预防及消除复冰积雪的机制, 首先讨论复冰和积雪形成原因及过程。

### 1.1 霜的形成

霜的形成是轻雾或过冷云滴在物体表面, 当温度低于或略高于  $0^{\circ}\text{C}$  时产生的积水, 这些过冷的水滴极小, 其直径约为  $5\sim 50$  微米。实际上水滴在低温( $-15^{\circ}\text{C}\sim -5^{\circ}\text{C}$ )时会迅速冻结。霜一段不透明, 呈白色粒状, 比重很小( $<0.6$ )。在较高温时( $-5^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ ), 水滴冻结较慢, 冻结前有时间渗入冰的空隙, 形成冰霜。冰霜是坚硬的, 表面光滑, 一般透明。

---

\* 收稿日期: 1992-11-03

形成的过程因温度变化而异。当线路处于云或雾（即湿度较高）中时，若环境温度为  $0^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ ，在冬季的山区架空导线上积霜经常发生。湿度越大，则结霜越快，当气象条件有风，且风速小于  $20 \text{ 米/秒}$  时，架空导线结霜只在朝着风向的单面发生。在风速较低，湿度较小时，结霜较为缓慢。

### 1.2 冰和过冷雨的形成

冰由雨滴或过冷雨结在表面温度为  $0^{\circ}\text{C}$  上下的物体表面上形成，坚硬光滑且透明，比重约为  $0.9$ 。当细雨 ( $100\sim 500$  微米) 或雨滴 ( $500\sim 5000$  微米) 穿过足够厚且温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  (一般  $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ ) 的气层时即变为过冷状态。在行程中，若受到阻挡则过冷中止，这些水滴于是缓慢地渗入冰粒间隙中冻结，形成坚硬透明的冰块。过冷雨是由顶部温度  $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$  为之间的气柱，逐渐被相对暖和并带有云和雨的气柱所替代时的扰动所产生的。只要温度在零下又持续有雨，导线上就产生冰柱。在无风的气象条件下，架空导线的结冰呈园柱状。而在有风的气象条件下，架空导线上的结冰会呈朝着风向形状。

### 1.3 湿雪的形成

气象学对雪的定义是：“由孤立或聚集的云产生的冰晶”。现在尚无湿雪的正式定义。当处在下雪天，且温度较高时，雪花之间的粘结力较强。当雪花受风的作用与架空导线接触时会形成积雪，且在粘结过程中，由于能量的转化（动能转变为热能），迅速变态渗入形成粘结体。该粘结体坚硬且不透明。一般情况其比重小于  $0.9$ ，从积雪的形成过程来看，架空导线上积雪的多少与形状也与风向和风速有关。

### 1.4 复冰和积雪与风速风向的关系

#### ① 风向与线路平行时

当风向与架空输电线路平行时，可以把导线表面展开后看作一平板，根据空气动力学理论，风速随离开导线的距离的变化关系如图 1 所示。导线表面上的风速为零，离表面远时风速变大，因此风向与导线平行时，空气中的雾雪与导线接触较少。

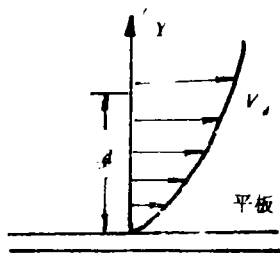


图 1

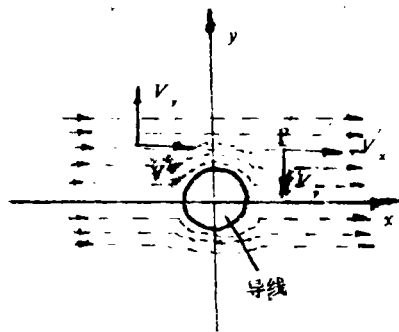


图 2

#### ② 风向与线路垂直时

当风向与架空导线垂直时，风通过线路时可以看作是绕过园柱体无环量的流动。根据空气动力学原理，风的流动途径如图 2 所示，在导线的迎风面（左边）任一点  $P$  的风速可以分解为  $V'_x$  和  $V'_y$  两个分量。同样在背风面（右边）的任一点  $P'$  的风速也可以分为  $V'_x$  和  $V'_y$  两个分量。 $V'_x$  吹向导线而  $V'_y$  背离导线，所以在迎风面上，空气中的雾雪等将与

导线接触, 由于粘结作用而粘结到导线上, 背风面空气中的雾雪等将随风继续前进。因此复冰和积雪在迎风面形成呈单面结冰形状。

从以上两种风向可以看出, 复冰和积雪的多少是和风向有密切关系的。

### ③ 风速与复冰的关系

风速的大小对导线的复冰也起很重要的作用。当风速增大时, 由前面的分析, 接触导线的雾雪等增加, 但当风速增加到一定数值, 会使导线发生振动, 由于导线和复冰的刚度差异此时复冰会自动脱落 (下面详细分析)。

### 1.5 架空导线冰柱的形成

通过以上的分析, 架空导线的复冰和积雪与各种气象因素有关。但架空导线上复冰和积雪的形状又和导线有密切关系。在有风的气象条件下, 复冰和积雪均是单面。当复冰厚度达到一定的程度后, 复冰和积雪由于受重力的作用向下蠕动偏转使迎风面继续复冰和积雪。当又达到一定的厚度后, 导线受复冰和积雪的重力作用继续偏转。如此反复蠕动, 致使复冰呈园柱形, 成为难以脱落的冰栓。

## 2 防冰球的作用原理及设计要点

### 2.1 防冰球防冰机制

2.1.1 根据第二部分高压架空导线复冰和积雪机制的分析, 在有风的气象条件下, 若不考虑高压架空导线受复冰和积雪重力蠕动偏转的影响, 架空导线的复冰和积雪将在导线的迎风面形成呈单面形状。随着时间的推移, 呈单面状的复冰和积雪越来越厚, 理想情况下, 成为图 3 所示的形状。

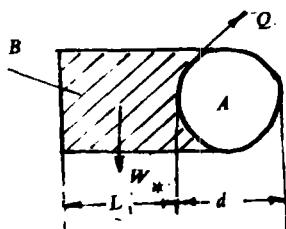


图 3 单面复冰截面图

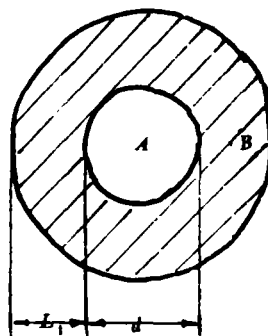


图 4 冰栓截面图

图 3 中 A 为导线; B 为复冰,  $d$  为导线直径,  $L_1$  为复冰的厚度。对图 3 进行受力分析可知, 当复冰厚度  $L_1$  增加, 复冰形成的力矩大于冰和导线之间的粘结力, 即图 3 中的剪切力  $Q$  时, 复冰会随复冰厚度增加而自动脱落。

2.1.2 若架空导线受单面复冰和积雪重力作用发生向下蠕动而扭转, 由第二部分分析可知, 架空导线将形成冰栓如图 4 所示。图 4 中 A 为导线截面, B 为冰栓截面。非常显然, 不论经过多长时间, 架空导线上的复冰和积雪只会越来越多, 而不会在复冰的过程中自动脱落。当然湿度增加使复冰和积雪融化除外。

为防止冰栓形成而保持复冰和积雪呈图 3 所示的单面形状, 唯有增加导线的抗扭强度, 保证架空导线在一定的复冰厚度内不发生向下蠕动。而防冰球的作用就量增加架空导线的抗扭强度, 起到防冰脱冰的作用。

### 2.1.3 防冰球的结构及安装方法

防冰球由两部分组成, 如图 5 所示, 图 5 中 A 为球杆, B 为金属球。将防冰球按图 6 所示结构, 夹紧固定在架空导线上。

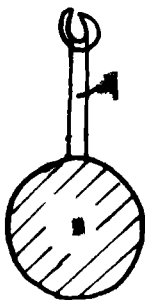


图 5 防冰球的结构

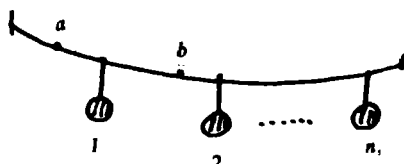


图 6 防冰球的悬挂方式

2.1.4 为分析防冰球增加导线抗扭强度和脱冰的厚理, 分两种情况进行:

① 以图 6 中 ab 段导线为分析对象, 如图 7(a)所示。图 7(b)中, A 为复冰,  $W_A$  为复冰重量,  $W_c$  为球及杆重量,  $L$  为球杆长度,  $L_1$  为复冰重心距导线轴心的长度,  $\alpha$  为冰重使球转动偏离垂直线的角度, 并设  $M$  为导线自身的抗扭力矩。

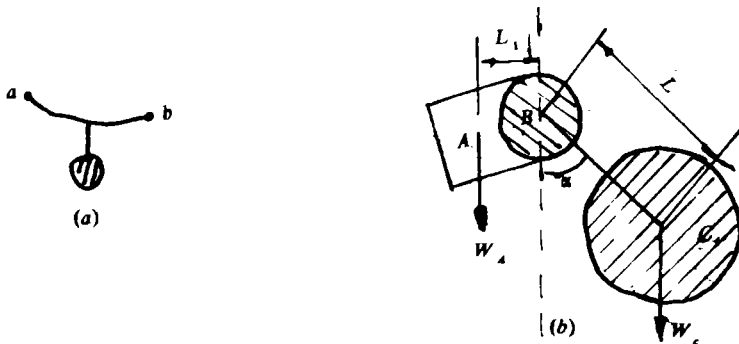


图 7 分析对象

由图 7(b)可知, 当导线处于平衡状态时, 有:

$$M_A = M_c + M \quad (1)$$

其中:  $M_A = W_A \cdot L_1$

$$M_c = W_c \cdot L \sin \alpha$$

将参数代入(1)后有

$$W_A \cdot L_1 = W_c \cdot L \sin \alpha + M \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, 在  $M$  和  $W_c L$  一定时,  $W_A L_1$  越大, 即  $\alpha$  越大, 这就意味着复冰增加, 会引起  $\alpha$  增加, 但始终保持图 7(b) 中的分析对象保持平衡, 显然, 随着  $\alpha$  的增加, 防冰球的作用逐渐消失。

据以上分析, 要想保持架空导线复冰呈单面应该增加  $W_c$  或者  $L$ 。

②当分析对象为复冰 A 时, 如图 8 所示, 其中 A 为复冰,  $M_f$  为复冰与导线间的摩擦力矩和抗导线转动的力矩。其最大值与导线和冰间的粘结力大小有关。O<sub>c</sub> 为导线中轴点。

当复冰和导线处于平衡状态时, 有

$$M_A = W_A L_1 = M_f \quad (3)$$

当复冰越来越多时,  $M_A$  增加, 如果  $M_A < M_{fmax}$  时在球和导线反力矩的合力矩作用下, 复冰不会脱落。且处于平衡状态。若复冰增加, 使得  $M_A > M_{fmax}$ , 要么导线蠕动, 要么复冰脱落。

因此, 当导线复冰与导线间的粘结力一定并且导线和防冰球形成的合力矩足够大时, 导线的复冰会在增加过程中自动脱落。

## 2.2 防冰球设计要点

为了讨论方便, 在下面的公式中, 均假设呈单面状的复冰为正方形, 其比重为 0.9。

### 2.2.1 复冰比载与复冰厚度之间的关系

若一档距内导线长度为  $L_0$ , 所要求的复冰比载为  $\gamma_{\text{冰}}$ , 则复冰厚度为  $L_2$  时, 架空导线一档内的冰重为:

$$W_{\text{冰}} = L_2 \cdot L_0 \cdot d \cdot 0.9 \quad (4)$$

其中  $d$  为导线直径。

显然应使复冰的厚度满足:

$$\frac{0.9 L_2 d}{A} < \gamma_{\text{冰}} \quad (5)$$

即

$$L_2 < \frac{A \gamma_{\text{冰}}}{0.9 d} \quad (6)$$

A 为导线的截面积。

### 2.2.2 球重及一档内球的数量限制

图 8 复冰受力情况

若在一档距内悬挂  $n$  个防冰球, 则由防冰球所形成的比载为:

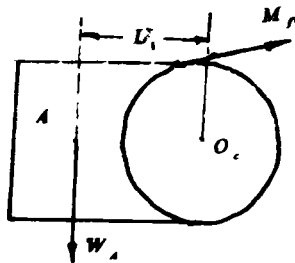
$$\gamma_{\text{冰}} = n \cdot W_c / L_0 \cdot A \quad (7)$$

其中  $W_c$  为球及杆的重量, A 为导线截面积,  $L_0$  为档距长度。

因此在设计防冰球的重量和安装防冰球的数量  $n$  时, 要考虑设计的架空线的总比载限制。由此可知, 虽然说防冰球的重量增加和数量增加对防止导线蠕动有利, 但考虑综合因素, 防冰球的数量和重量应控制在一定范围之内。

### 2.2.3 防冰球臂长与设计指标之间的关系

在考虑架空导线总比载后, 确定了防冰球的重量和数量, 现讨论对臂长的要求。根据



前面的分析, 每一个球所承担的冰重为:

$$W_A = 0.9dL_2L_o/n = W_{\text{总冰}}/n \quad (8)$$

其中  $W_{\text{总冰}}$  为全导线上的复冰总重。

因此, 若要求架空导线在复冰过程中因冰重而导致的转角有:

$$\alpha < \alpha_{\max} \quad (9)$$

则由式(2)和式(8)可知:

$$0.9L_2d\frac{L_o}{n}L_1 = W_cL\sin\alpha_{\max} + M \quad (10)$$

式中  $L_1 = \frac{1}{2}(L_2 + d)$  为复冰等重心到导线中心点的距离。由式(10)可得:

$$L = [0.9L_oL_2d(d + L_2)/2n - M]/W_c\sin\alpha_{\max} \quad (11)$$

即当球重确定后, 可根据式(11)近似地确定球杆的长度。

当然上式是在较理想条件下导出的, 若考虑其它气象条件的影响,  $L$  的长度可能有增减, 但为了使效果更好, 在其它条件相同时, 增加球杆长度是较好的方案。

理论分析和实验结果有相当一致的结论。

### 3 防冰环的作用原理及设计要点

#### 3.1 防冰环的作用原理

在架空导线上使用防冰环, 其主要目的是为了使导线和地线上的复冰一段一段脱落, 从而避免导线和地线上复冰同时脱落, 使导线发生舞动, 造成碰线事故发生。首先就防冰环防止复冰同时脱落的原理进行分析。

##### 3.1.1 防冰环的结构:

防冰环为高 3.5—5mm, 宽 8—12mm, 重 0.5—2.5 克不等的可卡装在导线上的半园形聚乙稀环。

##### 3.1.2 复冰情况下, 防冰环及复冰的静态受力分析

图 9 所示为要分析的两个防冰环之间的导线及复冰的截面。其中  $d$ 、 $c$  为相邻的防冰环,  $D$  为复冰,  $E$  为导线。

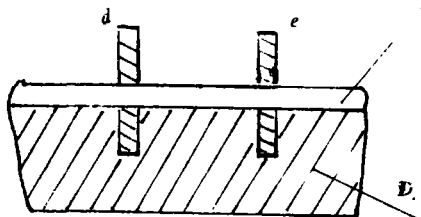


图 9 导线及复冰截面

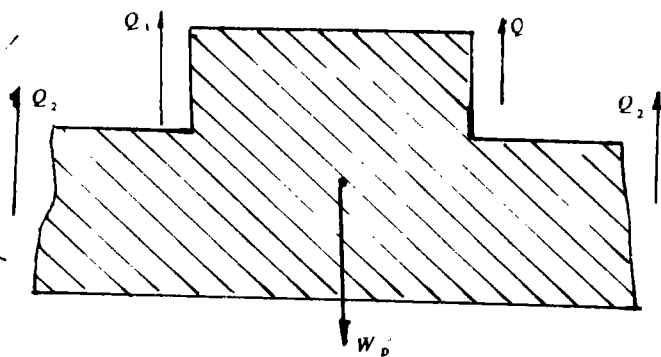


图 10 受力分析对象

图 10 为受力分析对象——复冰, 图中  $W_D$  为冰重,  $Q_1$  为防冰环与冰 D 之间的摩擦力,  $Q_2$  为防冰环下断面处与其它相邻部分复冰间的互相作用剪切力。若复冰 D 因某种原因 (下面分析) 与导线间的粘结力变小直到等于零, 则冰块 D 的受力有两部分: 向下的力:  $W_D$  向上的力:  $2(Q_1+Q_2)$

其中  $Q_1$  的大小与复冰和防冰环间的摩擦系数有关,  $Q_2$  的大小与复冰的剪切力有关。

当  $2(Q_1+Q_2) > W_D$  时, 复冰不会脱落, 处于平衡状态。

当  $2(Q_1+Q_2) < W_D$  时, 复冰将向下脱落, 但脱落过程又有两种情况。若设  $Q_{1\max}$  为使防冰环下截面最小处复冰断裂的最大剪切破坏力, 则当  $Q_1 < Q_{1\max}$  即:

$$\frac{W_D}{2} - Q_2 < Q_{\max} \quad (12)$$

此时复冰会在防冰环下断裂, 导致 dc 间的复冰先行落下, 达到防止导线舞动的目的。

### 3.1.3 防冰环的作用与导线振动之间的关系

当导线受到稳定的横向均匀风的作用时, 导线将按一定的频率发生振动。其中振动频率为:

$$f_F = 200 \frac{V}{d} \quad (\text{周/秒}) \quad (13)$$

式中  $V$ ——垂直于导线的风速, 单位米/秒  $d$ ——导线直径, 单位毫米。

导线的振动波沿整档导线呈驻波分布。导线离平衡位置的距离呈正弦规律变化。导线上不同的位置形成波腹和波节。振动仅在波节处有角位移, 且在一定的频率下波节的位置不变。由于振动的结果, 导线在波节处经常受到反复曲折的动态应力。而复冰后的导线同样会在风的作用下发生振动。由于复冰的刚度比导线的刚度要大的多, 因此, 复冰会在振动的波节处因反复曲折动态应力的影响发生断裂, 使复冰分段脱落。另一方面, 复冰的导线在振动过程中, 波腹处的质点受到的惯性力为最大, 并考虑到导线和复冰的刚度不同, 因此, 复冰会因受力在波腹处与导线分离。分离的结果使导线和复冰之间的粘结力等于零。如上分析, 若防冰环装在波节处, 当(12)式成立时, 复冰会从波节处断裂, 使  $\frac{\lambda}{2}$  长度复冰脱落, 不影响相邻半波长的复冰。

综上所述, 复冰架空导线受风作用发生振动有利于复冰的脱落, 对复冰的脱落有加速作用。但并不是所有的风速都能使复冰的导线发生振动, 只有当风速形成的振动频率与导线复冰后的固有频率相同时, 振动才会发生。导线所具有的固有频率为:

$$f_D = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{9.81T}{P}} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{9.81T}{P}} \quad (\text{周/秒})$$

式中:  $n$  ——档距内振动的半波数, 可以为 1, 2, ...  $L$  ——档内导线长度 (米)

$T$  ——档内导线张力 (公斤)

$P$  ——导线单位重量 (公斤/米)

$\frac{\lambda}{2}$  ——与  $n$  相对应的半波长度 (米)

### 3.2 防冰环设计要点

根据前面分析,设计防冰环时应遵照如下原则。

- ①尽量选用与冰之间的粘结力小的材料。
- ②尽量设计成易于复冰断裂的形状。
- ③防冰环在档距内安装个数等于波节的个数。
- ④安装位置在导线的波节处。

## 4 结 论

- 4.1 对重复冰地区的架空导线使用防冰球和防冰环是有效的,特别适用于有风的气象条件。
- 4.2 结合分析,给出了防冰球和防冰环的设计要点,为其推广和设计奠定了理论基础。
- 4.3 同时分析了架空导线复冰和积雪的机制为探讨更好的防冰雪方法打下了基础。
- 4.4 综上分析,若在无风的条件下,防冰球和防冰环失效,但以统计规律来看(特别在山区)有风结冰的气象条件占主要地位。

## 参 考 文 献

- (1) 南阳地区电业局. 高压输电线路复冰预防措施研制报告. 1989年.
- (2) 电机工程手册第五分册. 机械工业出版社.
- (3) 南京工学院等. 理论力学. 人民教育出版社. 1978年
- (4) 郑州工学院计算机与自动化系. 复冰和积雪预防措施的理論分析.
- (5) 浙江大学等. 材料力学. (上册). 人民教育出版社. 1989年.

## The effective method against icing and snows of the high voltage transmission line —The Principle and design of the anti-icing ball and the anti-icing ring

Gao Jin-feng      Wuan Jun-kun  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, the principle and design of the anticicing ball and the anti-icing ring was presented. This against icing and snows method has been proved was very effective. The paper has discussed the forming mechanism of ice and snows the force analysis of anti-icing ball and antiicing ring, etc. According to the results obtained, the design formula of the anti-icing ball and the anti-icing ring were given.

**Keywords:** High Voltage transmission line, Icing, Snows, anti-icing ball, anti-icing ring.