

近年来关于电线积冰的一些研究

谭 冠 日

（中山大学气象系）

电线积冰是电力、通讯等架空线路的一种垂直荷载。线路积冰不仅形成很大的垂直荷载，还增加了受风面积，承受较大的水平的风力。通过重冰地段的线路，如果缺乏准确的积冰数据而没有按照不同的积冰厚度设计，则投资可能相差百分之几十，其结果或者是浪费了资金，或者是不能保证安全。例如，据武汉电力设计院的研究，华中某输电线路若按冰厚10毫米设计（导线溶冰，按冰厚15毫米验算），每百公里投资63万元；若按冰厚15毫米设计（不溶冰，按冰厚35毫米验算），每百公里需投资102万元。

我国在五十年代陆续介绍了国外有关电线积冰的研究成果，并开始了一些研究和服务工作。但是，六十年代以至"文化革命"期间，电线积冰的研究陷于停顿，对国外的进展也一无所知。近年来才又开始了研究。本文中将扼要介绍七十年代以来国内外有关电线积冰的一些新的观测结果和理论概念。

一、重要的观测事实

据江西省电力设计院的调查，1975年12月1日江西省南昌附近梅岭的洗脚坞（海拔840米）上，每米长度输电线上覆盖的粒状雾凇重量达14公斤，水泥电杆被折断，造成广播电台停电。这是我国迄今测得的经过核实的最大电线积冰记录，它超过了高度达一至三千米的五台山、南岳、庐山、峨眉山、金佛山等高山气象站的电线积冰记录。这个记录有出乎人们意料之外的两个特点：第一、这次积冰是粒状雾凇，而不是密度最大的雨凇或密度比较大的带有雨凇的混合积冰；第二、这个记录出现在江西，而不是出现在积冰十分频繁而且常常比较严重的云南、贵州、四川的山区。它表明在发生积冰不那么频繁的地方，密度不那么大的冰体现象也可能造成极其严重的积冰。这对于线路设计人员和研究电线积冰的人员是一次警钟，同时，也显现了电线积冰问题的极端复杂性。

西南电力设计院在1965年1月1日至1969年3月31日于四川省会东县白龙山（海拔3118米）建立了一架相当规模的模拟线路，在离地2、6、10、15米高度上装置了几种不同直径的电线，进行了四个冬季的积冰观测。这是我国空前规模的，也是迄今未曾再组织过的系统电线积冰观测。由于"文化革命"的影响，这套资料直到七十年代后期才进行了科学的分析，得到了我国有关电线积冰第一手的系统的科学实验数据，从中得到了有意义的结果。

积冰厚度随高度变化的规律，是将雨凇架资料订正到电线悬挂高度以提供设计数据的根据。会东的观测资料表明，冰厚随高度的变化符合乘幂律：

$$\frac{b_z}{b_0}=\left(\frac{z}{z_0}\right)^{\alpha} \qquad (1)$$

b是冰厚，z是离地面高度。带下标z的是z高度上的量，带下标0的是参数高度z_0（即雨凇架，离地2米）上的量。

国外较早的观测也得到乘幂律，但我国会东的幂指数α与国外的不同，比苏联的小，而比国际电工委员会推荐的值大。还发现了α是风速v的减函数：

$$\alpha=me^{-nv} \qquad (2)$$

式中，$0<m<1$，$0<n<1$，因积冰的种类而异。例如，雨凇和雾凇混合积冰$m=0.358$，$n=0.175$。雾凇$m=0.233$，$n=0.219$。

按照这些数据，在风速v＝4米/秒时，离地20米高度处混合积冰的厚度为2米高度处冰厚的1.5倍；离地30米处为2米处冰厚的1.6倍。湖南省统计出电力线上（高度未统一）冰厚为雨凇架（2米高）上的1.8倍。

积冰厚度与电线直径的关系并不简单。按理论，在其他条件相同的情况下，电线粗时冰较薄，但电线越粗时单位长度电线上的冰重则越大。会东的观测资料一般符合这一理论。但是，云南的一条送电线路上观测到相反的现象，直径23.5毫米的导线上积冰直径有280毫米，而直径9毫米的避雷线上积冰直径只有180毫米。虽然据苏联的研究，通电导线对水滴有吸引作用，其积冰厚度比不通电导线要大25—40%，但上述两条电线积冰差异如此之大，不能完全从通电与否得到解释，其原因是有待研究的。

要将冰厚换算成荷载（一米长电线上的冰重），需要积冰密度的数据。我国积冰密度观测甚少，苏联用其欧洲领域一千多个测点计二万五千多次积冰密度观测资料，统计出各种地形上各类积冰的密度，我们仅列出不分地形的总平均值如表1。

表1

积冰种类	雨凇	粒状雾凇	晶状雾凇	混合积冰	湿雪
平均密度（克/厘米^3）	0.56	0.15	0.05	0.25	0.24
观测次数	3946	4505	11998	4129	1231

我国设计上采用的积冰比重与上表的实测值有很大差别。我国雨凇密度取0.9（克/厘米^3，下同），比表1列的偏大61%；雾凇取0.225，比表列的粒

状雾凇偏大50%，比晶状雾凇偏大 3.5 倍；混合积冰取0.45，比表列的偏大 80%；湿雪取 0.225，比表列的偏小 6%。可见，我国的取值除湿雪外，均比表列的偏大。这样取值固然偏于安全，但投资也就过大。

苏联还观测了不同直径的电线上的积冰密度的差异，电线越粗，积冰密度越大。

广义的积冰不仅包括电线积冰，还包括构筑物上的积冰。高耸构筑物如电视塔、广播铁塔、跨江电线铁塔的设计需要考虑积冰荷载。苏联设在奥布宁斯克高达 310 米的气象观测桅杆上有一次积冰重量达 1.4 万公斤，占此桅杆自重的4.6%；高500余米的莫斯科奥斯坦竖斯基电视塔一次积冰达 3 万公斤，这种荷载是不能不考虑的。

从上述两个高塔观测到，圆柱形杆件上积冰的直径和荷载都随高度而增大。和近地层积冰情况相仿，粗杆件积冰直径比细杆件的小，但荷载则较大。例如，500米高度上直径 15 毫米杆件上积冰直径为100米高度上的10倍左右。高度503米上积冰荷载的均方差为高度138米上的 10 倍。这是因为低云云高及云中滴谱变化很大的缘故。

二、进一步的理论概念

五十年代末苏联马辛关于飞机积冰的理论研究，后来被引用到电线积冰领域中，得到更加合理而简洁的物理模型。通过它，可以按一个统一的观点来研究电线积冰的各种问题。

$$P = E\beta\varphi w\tau v\sin\theta \qquad (3)$$

$$b = \frac{1}{\pi\rho}E\beta w\tau v\sin\theta \qquad (4)$$

式中 P是积冰荷载。E 是捕获系数，是水滴在电线上实际积聚的水份和假定水滴直线前进不绕过电线而碰撞在电线上的水份之比，它反映水滴的惯性积聚效率，是风速和水滴直径的增函数，是电线直径的减函数，已制备列线图可查。β是冻结系数。ψ是电线直径。w是空气中液态水含水量。τ是积冰时间。v是风速，θ是风与电线的交角。ρ是积冰密度。

由这个模型，近地面层积冰随高度的变化可以写成

$$\frac{b_z}{b_0} = \frac{E_z w_z v_z}{E_0 w_0 v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\alpha_E + \alpha_w + \alpha_v} \qquad (5)$$

带不同下标的α是相应量的幂指数。

不同直径电线积冰荷载的关系为

$$\frac{P_\varphi}{P_0} = \frac{E_\varphi \varphi}{E_0 \varphi_0} \qquad (6)$$

带下标φ的是直径为φ的电线的量，带下标 0 的表示雨凇架电线（直径 5 毫米）的量。

利用这一模型，还可以研究非圆柱体构件的积冰“面荷载”——每一平方米表面积上的积冰重量 p_s。面荷载与荷载的关系为

$$\frac{P_s}{P_\varphi} = \frac{E_s S'}{E_\varphi S\varphi} \qquad (7)$$

S′是非圆柱体构件在垂直于气流的平面上的投影的面积。S是此构件的表面积。

可见，由于模型〔(3)(4)式〕的建立，便可把积冰的一些问题以统一的理论体系进行研究了。

线路设计一般取15年一遇的最大冰厚，特别重要的线路考虑更长重现期的冰厚。设计的冰厚均应按冰厚的概率分布推算。

据我们的推算，利用我国积冰资料年代最长的五台山、南岳、庐山、峨眉山、金佛山、奇台的积冰荷载的频率分布，用几种理论概率分布进行拟合以便第二类错误概率更小的标准并用统计量ω^2进行拟合优度的检验，六站均可认为遵从第Ⅱ型极值分布，分布函数如下：

$$F(x) = e^{-\left(\frac{\delta}{x}\right)^{\gamma}} \qquad (8)$$

上式中x是积冰荷载，γ、δ是参数，由实际资料决定，上述 6 站地理、气候背景迥异，竟然都适于第Ⅱ型极值分布，应该有客观的原因。第Ⅱ型极值分布适于拟合频率分布偏态甚剧的分布，即在不太长的序列中存在一两个特大值的样本。电线积冰是变异极大的现象，前面举出的在国内积冰并不算很频繁的、平时积冰并不很严重的江西，出现了全国最大值，支持了关于第Ⅱ型极值分布能比较广泛地适用于电线积冰的观点。

这种分布还有一个优点，较短重现期下的极值 x_1与较长重现期 T_2 的极值 x_2有简单的联系：

$$\frac{x_2}{x_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \qquad (9)$$

当确定了参数γ，便可由精度较高的x_1推算出不易准确决定的 x_2。上述 6 站的γ值如表 2。

表 2

站　名	五台山	庐山	南岳	峨嵋山	金佛山	奇台
γ	1.73	1.58	2.31	2.44	2.76	1.24

若能证明上述高山测站的积冰的年际变化与邻近低地的积冰同步变动，上述研究结果当可推广而适用于更广泛的地域。

苏联也有用此型分布和皮尔逊曲线族来拟合积冰的频率分布的。

（参考资料略）