

# 覆冰纵向张力计算

詹宗东<sup>1</sup>, 熊俊<sup>2</sup>, 吴昊<sup>2</sup>

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要:**重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算,是重冰区输电线路设计的基础。介绍了求解上述问题的数值计算方法,通过对比计算结果,表明计算方法是可靠的。

**关键词:**覆冰;输电线路;张力计算

**Abstract:** The calculation of unbalanced tension of transmission line which is caused by uneven ice accumulation or broken wire condition is the basis of transmission line design in heavy ice area. A numerical method is presented to solve the above-mentioned problems, and the comparison of the existing data and the calculation results prove its accuracy and reliability.

**Key words:** ice accretion; transmission line; tension calculation

中图分类号:TM751 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)03-0012-04

重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算,是重冰区输电线路杆塔强度设计以及不均匀脱冰时的导地线间距计算的基础。目前重冰区输电线路的设计,是按《重冰区架空送电线路设计技术规定》<sup>[3]</sup>(1998 试行),它适用于 220 kV 及以下 20~40 mm 覆冰情况,其中对覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力取值作了具体规定。目前正在修编的架空输电线路重冰区设计技术导则,对适用范围进行了扩充,对各电压等级不同冰区线路计算覆冰断线工况和不均匀覆冰工况的覆冰率提出了要求,但未给出具体的纵向张力取值,需要具体线路设计时作相应计算。

针对以往计算方法的不足,对上述两种典型工况下的纵向张力数值计算方法进行了介绍,并据此编制了计算程序。该计算方法同样适用于轻冰区的计算。

耐张塔的断线和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算方法较为简单,下面介绍直线塔的有关计算。

## 1 断线工况的纵向张力数值计算方法

传统的断线工况的纵向张力计算主要是试凑图解法<sup>[1],[4]</sup>,根据其原理也可编制计算机程序进行试凑求解。但根据实践,发现试凑法在编制程序时存在很多不足,主要是对初始张力取值非常敏感,取值不当将造成无法计算;且计算过程中的张力变化步长取值也很难把握,取值不当也将造成求解失败。

分析其计算原理,可列出等效方程组,用求解非线性方程组的办法进行求解,看似复杂,但用数值计算方法求解则简单有效,可以避免上述计算中的问题。

根据规程规定<sup>[3]</sup>,重冰线路断线工况按断线、有冰、无风计算断线张力。

直线塔断线工况的纵向张力计算有关参数见图 1 所示,计算中的有关物理量含义如下:

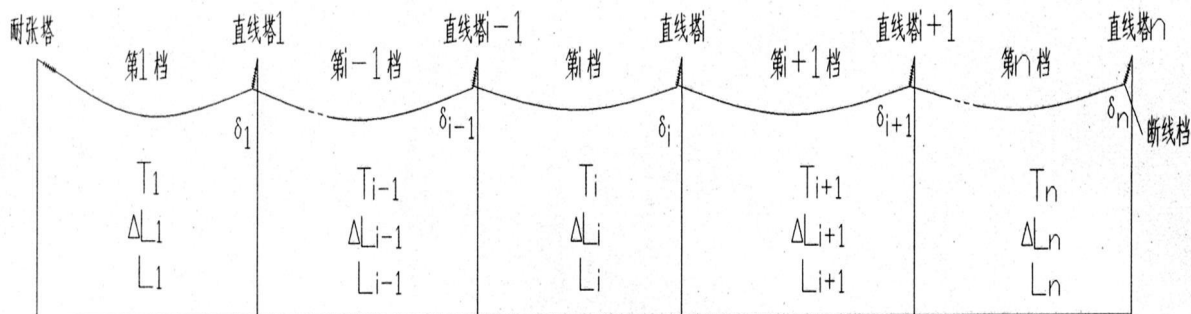


图 1 断线示意图

$n$ ——断线后耐张段内剩余总档数;  
 $T_i$ ——断线后第  $i$  档每根电线的水平张力, N;  
 $T_0$ ——断线前每根电线的水平张力, N;  
 $L_{0i}$ ——断线前第  $i$  档的档距, m;  
 $P_i$ ——断线条件下第  $i$  档的电线单位荷载, N/  
m;  
 $E$ ——电线弹性系数, N/mm<sup>2</sup>;  
 $\Delta L_i$ ——断线后第  $i$  档的档距变化量, 档距缩小

取正值, m;  
 $M$ ——电线分裂根数;  
 $A_0$ ——一根电线的截面, mm<sup>2</sup>;  
 $A = MA_0$ ——电线总截面, mm<sup>2</sup>;  
 $\delta_i$ ——断线后第  $i$  基直线杆塔的电线悬挂点偏  
移距离, m;  
 $\lambda_i$ ——第  $i$  基直线杆塔悬垂串长度, m;  
 $G_{Si}$ ——断线时第  $i$  基直线杆塔悬垂串重量, N;  
 $L_{Vi}$ ——断线时第  $i$  基直线杆塔电线垂直档距,  
m;  
 $G_{Ci}$ ——断线时第  $i$  基直线杆塔电线总垂直荷  
载,  $G_{Ci} = MP_i L_{Vi}$ , N.

需要求解的未知数有  $3n$  个, 即:  $T_1 \sim T_n$  共  $n$  个  
 $\Delta L_1 \sim \Delta L_n$  共  $n$  个  
 $\delta_1 \sim \delta_n$  共  $n$  个

可以列出的方程有:

(1) 各档档距变化量  $\Delta L_i$  与张力  $T_i$  之间的关  
系:

$f(T_i, \Delta L_i) = 0 \quad i=1 \sim n$  共  $n$  个方程

具体的表达式(1)为:

$$T_i^2 \left[ T_i + \left( \frac{EP_i^2 L_{0i}^2 A_0}{24 T_0^2} - T_0 + \frac{E \Delta L_i A_0}{L_{0i}} \right) \right] - \frac{A_0 EP_i^2 (L_{0i} - \Delta L_i)^3}{24 L_{0i}} = 0$$

(2) 各直线塔绝缘子串偏移量  $\delta_i$  与其前后两档  
张力  $T_{i+1}$ 、 $T_i$  之间的关系:

$f(T_{i+1}, T_i, \delta_i) = 0 \quad i=1 \sim n$  共  $n$  个方程

根据受力分析, 得出的表达式为:

$$\delta_i - \frac{\lambda_i (T_i - T_{i+1}) M}{\sqrt{(G_{Ci} + \frac{G_{Si}}{2})^2 + (MT_i - MT_{i+1})^2}} = 0$$

断线档  $T_{n+1} = 0$

(3) 各直线塔绝缘子串偏移量  $\delta_i$  与其后侧档距  
变化  $\Delta L_i$ 、后侧直线临塔绝缘子串偏移量  $\delta_{i-1}$  之间的  
关系共  $n$  个方程:

$$\delta_1 - \Delta L_1 = 0$$

$$\delta_i - \delta_{i-1} - \Delta L_i = 0 \quad i=2 \sim n$$

以上共  $3n$  个方程,  $3n$  个未知数, 可以用求解非  
线性方程组的数值解法进行求解。这里采用“牛顿迭  
代结合列主元高斯消元法(2)”进行求解, 各变量初值  
取为:  $\Delta L_i = 0.3$ 、 $\delta_i = \Delta L_i$ 、 $T_i = 0.7 T_0$ , 迭代结束目  
标: 连续两步之间各变量绝对值差异  $\leq 10^{-7}$ , 实例证  
明该计算方法是有效的, 一般迭代不超过 10 次即满  
足要求。

根据覆冰率计算对应覆冰厚度的公式为:

$$b_f = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \frac{1000 P_2}{9.80665 \times 0.9 \pi} - \frac{d}{2}}$$

$b_f$ ——覆冰率  $f$  对应的覆冰厚度, mm;

$$P_2 = f \times P_{02};$$

$P_{02}$ ——标准覆冰厚度对应的冰荷载, N/m;

$f$ ——覆冰率, 指对应所在冰区标准覆冰重量的  
比例;

$P_2$ ——覆冰率  $f$  对应的冰荷载, N/m;

$d$ ——无冰时电线直径, mm。

## 2 不均匀覆冰工况下的纵向张力数值 计算方法

不均匀覆冰工况下的纵向张力计算原理与上述  
断线张力计算基本相同, 用求解非线性方程组的数值  
计算方法进行求解, 也是很有效的。

根据规程规定<sup>[3]</sup>, 重冰线路不均匀覆冰工况按未  
断线、有不均匀冰、无风计算。

直线塔不均匀覆冰工况下的纵向张力计算有关  
参数见图 1 所示, 计算中的有关物理量含义如下:

$n$ ——耐张段内总档数;

$L_i$ ——悬垂串处于中垂位置时第  $i$  档的档距,

m;

$\alpha$ ——电线线膨胀系数, 1/°C;

$E$ ——电线弹性系数, N/mm<sup>2</sup>;

$t_m$ ——架线时温度, °C;

$T_m$ ——架线时每根电线张力, N;

$\Delta t_e$ ——架线时考虑初伸长降温的等值温度  
(取正值), °C;

$P_m$ ——架线时电线自重荷载, N/m;

$t$ ——计算不均匀覆冰工况时温度, °C;

$T_i$ ——计算不均匀覆冰工况时第  $i$  档每根电线  
水平张力, N;

$P_i$ ——计算不均匀覆冰工况时第  $i$  档每根电线单位荷载, N/m;

$\Delta L_i$ ——不均匀覆冰工况时第  $i$  档的档距变化量, 档距增加取正值, m;

$M$ ——电线分裂根数;

$A^0$ ——一根电线的截面,  $\text{mm}^2$ ;

$A = MA^0$  电线总截面,  $\text{mm}^2$ ;

$\delta_i$ ——不均匀覆冰工况时第  $i$  基直线杆塔的电线悬挂点偏移距离, m;

$\lambda_i$ ——第  $i$  基直线杆塔悬垂串长度, m;

$G_{Si}$ ——不均匀覆冰工况时第  $i$  基直线杆塔悬垂串重量, N;

$h_i$ ——悬垂串处于中垂位置时第  $i$  基塔与后侧塔电线悬挂点高差(比后侧高时为正值), m;

$\beta_i$ ——第  $i$  档的高差角,  $\text{tg}(\beta_i) = h_i/L_i$ , 度。

需要求解的未知数有  $3n-1$  个, 即:

$T_1 \sim T_n$  共  $n$  个

$\Delta L_1 \sim \Delta L_n$  共  $n$  个

$\delta_1 \sim \delta_{n-1}$  共  $n-1$  个

可以列出的方程有:

(1) 各档档距变化量  $\Delta L_i$  与张力  $T_i$  之间的关系:

$f(T_i, \Delta L_i) = 0 \quad i=1 \sim n$  共  $n$  个方程

具体表达式(1)为:

$$\Delta L_i - \frac{L_i}{(\cos^2 \beta_i)(1 + \frac{P_i^2 L_i^2}{8T_i^2})} \left\{ \frac{(L_i \cos \beta_i)^2}{24} \times \left[ \left( \frac{P_m}{T_m} \right)^2 - \left( \frac{P_i}{T_i} \right)^2 \right] + \left[ \frac{T_i - T_m}{A_0 E \cos \beta_i} \right] + \alpha(t + \Delta t_e - t_m) \right\} = 0$$

(2) 各直线塔绝缘子串偏移量  $\delta_i$  与其前后两档张力  $T_{i+1}, T_i$  之间的关系:

$f(T_{i+1}, T_i, \delta_i) = 0 \quad i=1 \sim n-1$  共  $n-1$  个方程

具体表达式(1)为:

$$\frac{T_{i+1} - \left[ \frac{G_{Si}}{2A} + \frac{P_i L_i}{2A_0 \cos \beta_i} + \frac{P_{i+1} L_{i+1}}{2A_0 \cos \beta_{i+1}} + \frac{T_i h_i}{A_0 \delta_i} \right] + \frac{T_i}{A_0 \delta_i} \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\left[ \frac{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} + \frac{h_{i+1}}{L_{i+1}} \right]} = 0$$

(3) 各直线塔绝缘子串偏移量  $\delta_i$  与其后侧档距变化  $\Delta L_i$ 、后侧直线临塔绝缘子串偏移量  $\delta_{i-1}$  之间的关系共  $n$  个方程:

$$\delta_1 - \Delta L_1 = 0$$

$$\delta_{n-1} + \Delta L_n = 0$$

$$\delta_i - \delta_{i-1} - \Delta L_i = 0 \quad i=2 \sim n-1$$

以上共  $3n-1$  个方程,  $3n-1$  个未知数, 同样可以用求解非线性方程组的“牛顿迭代结合列主元高斯消元法(2)”进行求解。各变量初值取为:  $\Delta L_i = 0.1$  (导线)及  $0.02$  (地线)、 $\delta_i = \Delta L_i, T_i = T_0$ , 迭代结束目标: 连续两步之间各变量绝对值差异  $\leq 10^{-7}$ , 一般迭代不超过 10 次即满足要求。

以不均匀覆冰工况下的纵向张力及档距变化计算结果为基础, 可以计算出不均匀脱冰时的导地线弧垂, 进而计算出导地线之间静态及动态接近距离, 为杆塔地线支架高度设计取值提供依据。

上述结算方法同样适用于轻冰区的计算。

### 3 计算实例

#### 3.1 直线塔断线张力计算

为了检验上述方法的计算结果, 与《重冰区架空送电线路设计技术规定》<sup>(3)</sup> 条文说明中的算例结果进行了对照(见表 1)。

表 1 220 kV LGJJ-300 直线塔断线张力百分数

覆冰率	冰区(mm)	计算档距(m)	规程算例结果 <sup>(3)</sup>	本文计算值
70%	20	350	58.9	57.6
		400	62.2	61.1
	30	300	59.0	57.8
		350	62.8	61.4
		250	59.0	57.2
		400	63.3	61.6
60%	20	350	54.7	53.4
		400	57.5	56.6
	30	300	53.6	52.4
		350	56.9	55.6
		250	52.5	51.0
		400	56.2	54.8
50%	20	350	50.3	49.1
		400	53.0	52.0
	30	300	47.8	46.7
		350	50.8	49.7
		250	46.1	44.8
		400	49.3	48.1

断线张力百分数: 以最大使用张力(=破坏张力/安全系数)为基准

计算条件:LGJJ-300, N=2.5, 串长 2.3 m;

断后剩 5 档, 等档距、无高差。

从表 1 对比可知, 其计算结果与规程(3)说明所附算例结果基本一致, 说明计算结果是可信的。二者稍有差异可能与计算参数取值不同有关(如断后剩的档数、绝缘子串覆冰后重量等)。

表 2 是 500 kV 重冰区线路几种典型导线的计算结果。

表 2 500 kV 线路直线塔断线张力算例

冰区(mm)	覆冰率	计算档距(m)	导线断线张力百分数
50	100%	250	56.3
		300	64.3
		350	70.6
40	90%	250	48.5
		300	55.9
		350	61.9
30	80%	300	44.2
		350	50.0
		400	54.8
20	70%	350	46.4
		400	50.9
		450	54.8

计算条件:

20 mm 冰区:  $4 \times \text{LGJ}-400/50$ ,  $N=2.5$ , 串长 5.842 m, 串重 3 254 N。

30、40 mm 冰区:  $4 \times \text{A}3/\text{S}1\text{A}-465/60$ ,  $N=2.895$ , 串长 6.217 m, 串重 6 111 N。

50 mm 冰区:  $4 \times \text{A}3/\text{S}3\text{A}-465/60$ ,  $N=2.65$ , 串长 6.342 m, 串重 8 114 N。

断后剩 5 档, 等档距、无高差。

影响直线塔覆冰断线张力计算结果的因素很多, 主要有断线时的覆冰厚度、档距、高差、绝缘子串长度、断线前的张力、断后剩余的档数等, 工程设计时需根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

### 3.2 直线塔不均匀覆冰工况下的纵向张力计算

同样, 为了检验上述方法的计算结果, 与《重冰区架空送电线路设计技术规定》<sup>(3)</sup>条文说明中的算例结果进行了对照(见表 3)。

计算条件:

连续 7 档, 等档距、无高差, 第一档覆冰率 20%, 其余档覆冰率 100%;

不平衡张力百分数: 以最大使用张力(=破坏张力/安全系数)为基准;

LGJJ-300;  $N=2.5$ , 串长 2.3 m;

GJ-100(1 270 MPa);  $N=2.73$ , 串长 0.4 m。

从上表对比可知, 其计算结果与规程算例结果<sup>[3]</sup>基本一致, 说明计算结果是可信的。二者稍有差异可能与计算参数取值不同有关(如架线张力、初伸长降温取值、绝缘子串覆冰后重量等)。

表 4 是 500 kV 重冰区线路几种典型导地线的计算结果。

计算条件:

连续 7 档, 等档距、无高差, 第一档覆冰率 20%, 其余档覆冰率 100%;

不平衡张力百分数: 以最大使用张力(=破坏张力/安全系数)为基准。

导线:

20 mm 冰区:  $4 \times \text{LGJ}-400/50$ ,  $N=2.5$ , 串长 5.842 m, 串重 3 254 N;

表 3 220 kV 线路直线塔不均匀覆冰不平衡张力百分数

冰区(mm)	覆冰率	计算档距(m)	规程算例结果 <sup>(3)</sup>	本文计算值	规程算例结果 <sup>(3)</sup>	本文计算值
			(LGJJ-300)	(LGJJ-300)	(GJ-100)	(GJ-100)
20	20/100	350	7.0	7.3	15.5	16.2
		450	17.0	17.2	32.0	32.1
30	20/100	300	16.0	14.9	38.0	40.0
		350	27.0	25.3	47.0	48.3
40	20/100	250	23.0	22.3	52.0	53.1
		300	38.5	37.9	58.0	59.4

(下转第 37 页)

其一是抬高它前面的阀式避雷器冲击电压,使避雷器容易放电,从而保护变压器。其二是降低波前陡度,减小作用于变压器匝间和层间的冲击电压梯度,保护配电变压器的纵绝缘。

实践中,往往采取综合防雷保护措施,为配电变压器的保护设置多道防线,即是上述的有关保护措施加以组合,从多方面来限制侵入配电变压器的雷电波,使配电变压器免遭雷害,达到安全运行的目的。

#### 4.6 加强配电变压器运行管理

在实施以上有关技术措施的同时,必须重视和加强配电变压器运行管理,定期测试变压器的绝缘状况,进行变压器油试验分析,测量接地电阻,检测高、低压避雷器,以保证变压器绝缘水平和保护装置的良好可靠,这些是做好配电变压器防雷的基础。

### 5 结语

(1)配电系统中的正逆变换过电压是导致配电变

压器雷击损坏的根本原因,而防雷保护装置安装设计不当是配电变压器雷击损坏的主要原因;

(2)配电系统中的配电变压器防雷保护应在其高低压侧均应装设金属氧化物避雷器保护,且要求“三位一体”的防雷接地方式,接地电阻符合有关要求。接地引下线,以及避雷器至被保护变压器的连接导线长度应尽可能短,并按规定校核。

#### 参考文献

[1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:中国水利电力出版社,1985.  
[2] 陈化钢等. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京:中国水利电力出版社,2005.

#### 作者简介

方晴(1963—),男,四川重庆人,高级工程师,四川广元电业局生产副局长,从事电力生产管理工作。

罗军川(1966—),男,四川剑阁人,现就职于四川广元电业局生产技术部高级工程师,主要从事电力生产技术管理工作。  
(收稿日期:2008-02-14)

(上接第15页)

表4 500 kV 线路直线塔不均匀覆冰  
不平衡张力百分数算例

冰区 (mm)	覆冰率	计算档距 (m)	导线	地线(1) (双联串)	地线(2) (单联串)
50	20/100	250	5.4	34.1	42.0
		300	10.8	49.1	53.4
		350	19.4	56.4	59.0
40	20/100	250	3.3	17.7	25.1
		300	6.6	34.9	41.6
		350	11.6	46.6	50.7
30	20/100	300	2.7	9.6	13.4
		350	4.9	18.1	24.2
		400	7.9	28.7	34.4
20	20/100	350	4.1	23.4	25.9
		400	6.6	31.7	33.7
		450	9.9	37.4	38.9

30、40 mm 冰区:  $4 \times A3/S1A-465/60$ ,  $N=2.895$ , 串长 6.217 m, 串重 6 111N;

50 mm 冰区:  $4 \times A3/S3A-465/60$ ,  $N=2.65$ , 串长 6.342 m, 串重 8 114N。

地线:

(1)20 mm 冰区:  $GJ-100 (1\ 270\ MPa)$ ,  $N=3.2$ , 双联串长 0.47 m, 串重 180 N;

30、40 mm 冰区:  $GJ-120 (1570\ MPa)$ ,  $N=2.65$ ,

双联串长 0.57 m, 串重 234 N;

50 mm 冰区:  $GJ-150 (1570\ MPa)$ ,  $N=2.7$ , 双联串长 0.57 m, 串重 234 N。

(2)单联串长 0.4 m, 串重 100 N, 其余同(1)。

影响直线塔不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素主要有:各挡覆冰厚度取值、耐张段的档数、档距、高差、绝缘子金具串长度、架线张力等,工程设计时需根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

### 4 结论

(1)所述的重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算方法,适合于用计算机进行数值求解。经编制程序进行计算,并与有关资料对照,表明计算方法是可靠的。

(2)影响直线塔覆冰断线张力及不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素很多,工程设计时应根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

(3)以不均匀覆冰工况下的纵向张力及档距变化计算结果为基础,可以计算不均匀脱冰时导地线之间静态及动态接近距离,为杆塔地线支架高度设计取值提供依据。所述算法同样适用于轻冰区线路的相关计算。  
(收稿日期:2008-03-05)