

A Precise Calculation Method for Unbalanced Tension of Heavy Icing Overhead Transmission Line

Deshun Ren

Sichuan Electric Power Design & Consulting CO. LTD., Chengdu
Email: rends1964@sina.com

Received: Apr. 1st, 2013; revised: Apr. 30th, 2013; accepted: May 9th, 2013

Copyright © 2013 Deshun Ren. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Uneven ice accumulation (or differential wind) will produce some unbalanced tension on both sides of the straight line tower. Unbalanced tension can generate bending moment and torsion moment, and the suspension insulator string will bring about some turning up, which will bring permanent accident. Calculating the unbalanced tension accurately under the catenary model is the foundation of designing overhead transmission line in heavy icing area. This paper introduces a precise calculation method for unbalanced tension of heavy icing overhead transmission line, and the result shows that the method is very precise.

Keywords: Overhead Transmission Line; Unbalanced Tension; Precise Calculation; Heavy Icing Area

重覆冰架空输电线路不平衡张力的精确计算方法

任德顺

四川电力设计咨询有限责任公司, 成都
Email: rends1964@sina.com

收稿日期: 2013年4月1日; 修回日期: 2013年4月30日; 录用日期: 2013年5月9日

摘要: 不均匀覆冰(或不均匀风)会使直线塔两侧出现不平衡张力, 导致铁塔受到弯矩和扭矩或绝缘子串上拔, 产生永久性事故。采用悬链线模型精确计算杆塔的不平衡张力, 是重覆冰地区架空输电线路设计的基础。本文介绍了求解上述问题数值的精确计算方法, 通过与规程对比, 表明计算方法是正确的。

关键词: 架空线路; 不平衡张力; 精确计算; 重覆冰地区

1. 引言

输电线路在架线竣工时, 可以认为悬垂串处于铅垂位置, 直线杆塔不承受电线的纵向张力。但在正常运行中, 由于以下几种情况, 会使耐张段内各档距架空线的张力相差悬殊, 致使直线杆塔承受较大的不平衡张力^[1,2]。

1) 耐张段中各档档距、高差相差悬殊, 当气象条件变化后, 引起各档张力不等。

2) 耐张段中各档不均匀覆冰或不同时脱冰或不

均匀风, 因各档比载不同引起张力不等。

3) 线路在检修时, 采取先松下某悬点的电线或后挂某悬点的电线, 造成两档合一档, 将引起与相邻各档张力不等。

4) 耐张段内某档进行飞车、绝缘爬梯等作业, 集中荷载引起的不平衡张力。

5) 在高差很大的山区, 尤其是重冰区的连续倾斜档, 山上档和上下档的张力不等。

以上各种情况中, 耐张段各档不均匀覆冰或不同

期脱冰是常见的较严重情况，尤其是重冰区。不均匀脱(覆)冰所产生的不平衡张力，有时可成为直线杆塔强度和稳定性设计的控制条件。在重冰区的连续倾斜档中，不平衡张力使悬垂串偏移的结果，可能造成导线对横担的闪络，即绝缘子串上拔^[3,4]。

计算连续档电线张力，常用的计算方法有平抛物线法、斜抛物线法和悬链线法^[2]。

对于重冰区，只有采用悬链线法才能达到最高的精度。本文对悬链线法进行介绍，并编制了计算程序，该计算方法同样适用于轻冰区的计算。

2. 各档的档距变化量与架空线应力的关系

在送电线路中，电线是以杆塔为支持物而悬挂起来的，我们忽略电线材料的刚性，将电线看成是沿长度均匀分布的绳索，其所形成的状态为“悬链线”。架线施工时，补偿架空线初伸长(降温 Δt)后的连续档架线应力(各档水平应力)为 σ_0 ，比载为 γ_1 ，架线气温为 t_0 。竣工后悬垂串处于中垂位置，第 i 档的档距为 L_{i0} 、高差为 h_{i0} ，参见图 1。此时第 i 档的悬挂曲线长度的计算方法如下：

悬链线公式^[2]：

$$L_{i0} = \sqrt{\frac{4\sigma_0^2}{\gamma_1^2} sh^2 \frac{\gamma_1 L_{i0}}{2\sigma_0} + h_{i0}^2} \quad (1)$$

线路运行过程中，气象条件发生变化，气温变为 t ，比载变为 γ_i ，假定初伸长已释放完毕，各档水平应力为 σ_{i0} ，由于各档水平应力 σ_{i0} 不等，悬垂串偏移使档距增大 ΔL_i ，高差变化 Δh_i ，高差角变为 β_i ，此时第 i 档的悬挂曲线长度为：

$$L_i = \sqrt{\frac{4\sigma_{i0}^2}{\gamma_i^2} sh^2 \frac{\gamma_i (L_{i0} + \Delta L_i)}{2\sigma_{i0}} + (h_{i0} + \Delta h_i)^2}$$

$$\times \left[1 - \frac{\sigma_{i0}}{E \cos \beta_i} + \alpha (t - t_0 + \Delta t) \right] \Delta L_i = L_i - L_{i0} \quad (2)$$

共有 n 档，可列出 n 个方程式。

对于整个耐张段，由于两端为耐张杆塔，所以各档档距增量 ΔL_i 的总和应为零。

计算中的有关物理量含义如下：

n ：耐张段内总档数；

L_{i0} ：悬垂串处于中垂位置时第 i 档的档距，m；

ΔL_{i1} ：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；

h_{i0} ：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；

Δh_{i1} ：不均匀覆冰工况时第 i 档绝缘子串偏移引起的高差增量，m；

α ：电线膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

E ：电线弹性系数， N/mm^2 ；

t_0 ：架线时温度， $^\circ\text{C}$ ；

σ_0 ：架线时每根电线水平应力， $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{mm}^2)$ ；

Δt ：架线时考虑初伸长降温的等值温度(取正值)， $^\circ\text{C}$ ；

γ_1 ：架线时电线自重荷载， N/m ；

t ：计算不均匀覆冰工况时温度， $^\circ\text{C}$ ；

σ_{i0} ：计算不均匀覆冰工况时第 i 档每根电线水平应力， $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{mm}^2)$ ；

γ_i ：计算不均匀覆冰工况时第 i 档每根电线单位荷载， N/m ；

β_i ：第 i 档的高差角， $\text{tg}(\beta_i) = (h_{i0} + \Delta h_{i1}) / (L_{i0} + \Delta L_{i1})$ ，度。

3. 悬垂绝缘子偏移量与架空线应力的关系

各档间应力不等时，悬垂串产生偏移。设悬垂串

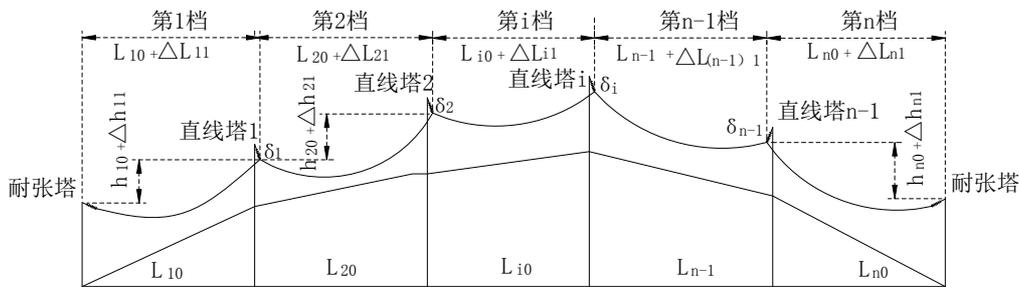


Figure 1. The sketch map of uneven ice
图 1. 不均匀覆冰示意图

为均布荷载的刚性直棒，则第 i 基杆塔的悬垂串受力如图 2 所示。

图 2 中 G_i 为悬垂串的垂向荷载， λ_i 为其长度，架空线作用于悬垂串下端的垂向荷载为 P_i ，左右两档架空线的不平衡张力差为 $A(\sigma_{(i+1)0} - \sigma_0)$ ，在此力作用下悬垂串下端偏移量 δ_{i0} 。对悬垂串上端悬挂点列力矩平衡方程式如下：

$$A(\sigma_{(i+1)0} - \sigma_0)\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2} = P_i\delta_i + G_i \frac{\delta_i}{2}$$

悬垂串偏移量与架空线应力的关系为：

$$\frac{\delta_i}{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}} = \frac{\sigma_{(i+1)0} - \sigma_{i0}}{\frac{G_i}{2A} + \frac{P_i}{A}} \quad (3)$$

后侧垂直档距：

$$a_i = \frac{L_i}{2} + \frac{\sigma_{i0}}{\gamma_i} \operatorname{arcsch} \frac{h_i}{L_i}$$

前侧垂直档距：

$$b_i = \frac{L_{i+1}}{2} - \frac{\sigma_{(i+1)0}}{\gamma_{i+1}} \operatorname{arcsch} \frac{h_{i+1}}{L_{i+1}}$$

其中 P_i 可由垂直档距的概念求出。假设架空线比载 γ_i 、 γ_{i+1} 均沿斜档距分布，则：

$$P_i = A\left(\sigma_{i0} \operatorname{sh} \frac{\gamma_i a_i}{\sigma_{i0}} + \sigma_{(i+1)0} \operatorname{sh} \frac{\gamma_{i+1} b_i}{\sigma_{(i+1)0}}\right)$$

计算中的有关物理量含义如下：

M：电线分裂根数；

A：电线截面， mm^2 ；

δ_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；

λ_i ：第 i 基直线杆塔悬垂串长度，m；

G_i ：不均匀覆冰工况时第 i 基直线杆塔悬垂串重

量，N。

有风时，电线既有垂向荷载作用，又有横向荷载作用，悬垂串除产生顺线路方向的偏移外，还产生横向偏移 δ_{hi} ，使计算更为复杂。为简化计算，可假设 $\delta_{hi} = 0$ ，但 γ_i 应考虑风荷载的影响。

4. 档距和高差变化量与悬垂串偏移量的关系

耐张段两端为耐张杆塔，可以认为耐张绝缘子偏移量为零，即 $\delta_0 = 0$ 、 $\delta_n = 0$ 。其他各档的档距变化量为：

$$\Delta L_1 = \delta_1 - \delta_0 = \delta_1$$

$$\Delta L_2 = \delta_2 - \delta_1 = \delta_2 - \Delta L_1, \quad \delta_2 = \Delta L_2 + \Delta L_1$$

.....

$$\text{所以：} \delta_i = \sum_{j=1}^i \Delta L_j \quad (4)$$

$$\Delta h_i = \left(\lambda_i - \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}\right) - \left(\lambda_{i-1} - \sqrt{\lambda_{i-1}^2 - \delta_{i-1}^2}\right) \quad (5)$$

5. 求解步骤

根据设计规范规定^[3]，重冰线路不均匀覆冰工况按未断线、有不均匀冰、10 m/s 风计算。

耐张段内共有 $n - 1$ 基直线杆塔，可以列出如式(3)、式(4)个 $n - 1$ 个方程，按式(2)可列出 n 个方程，共 $3n - 12$ 个方程，已知 $\delta_0 = 0$ ，因此可以求解 σ_{i0} 、 ΔL_i 、 δ_i 共 $3n - 1$ 个未知量。通过 VB 编程求解，步骤如下：

假定一个 $\Delta L_1 = \delta_1$ ，已知 $\delta_0 = 0$ ，由式(5)求出 Δh_1 ，由式(2)求出 σ_{10} 。根据 σ_{10} 、 δ_1 ，由式(3)求出 σ_{20} 。再根据 σ_{20} 、假设 $\Delta h_2 = 0$ ，由式(2)求出 ΔL_2 、由式(4) δ_2 。由式(5)求出 Δh_2 ，再由 Δh_2 ，求出 ΔL_2 、 δ_2 ，反复进行，直到 Δh_2 、 ΔL_2 、 δ_2 无明显变化。

根据 σ_{i0} 、假设 $\Delta h_i = 0$ ，按上述方法求出 ΔL_i 、 δ_i 、 Δh_i 。

.....

最终迭代结束目标： $\delta_n \approx 0$ 。

流程图如图 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，可以计算出不均匀覆冰时的导线线弧垂，进而计算出导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。同时依据计算出的垂直荷载，可以检查是否超杆塔设计条件或绝缘子串是否上拔。

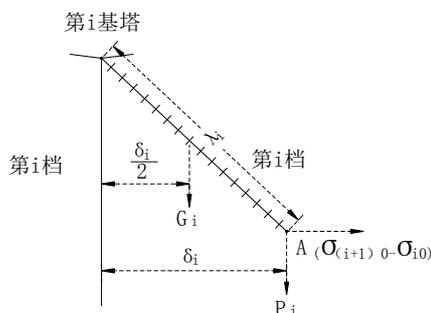


Figure 2. The offset of pendant insulator strained
图 2. 悬垂绝缘子串受力图

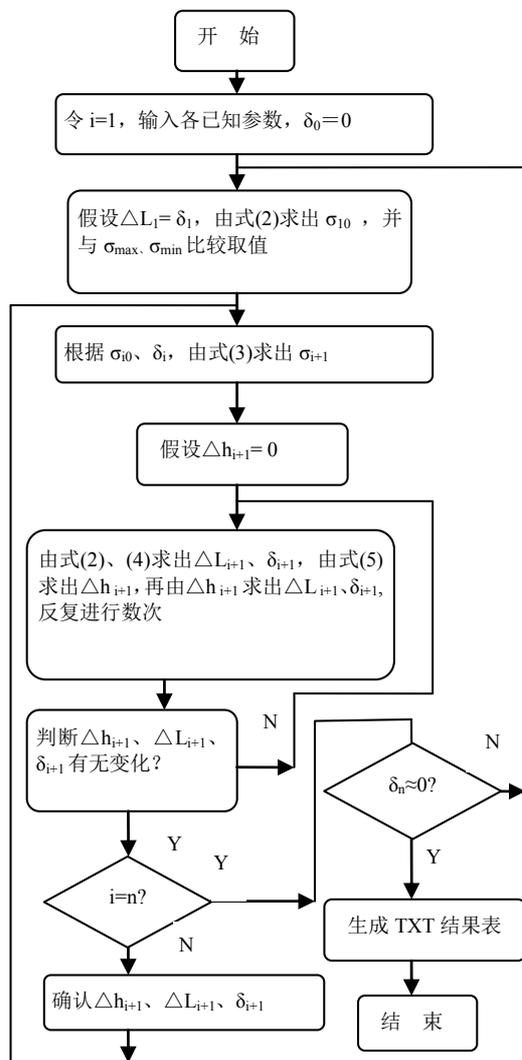


Figure 3. The flowchart of maximal unbalanced tensile force calculation
图 3. 最大不平衡张力程序设计流程图

上述计算方法同样适用于轻冰区的计算。

6. 计算实例

1) 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(1998 试行)”^[4]条文说明的算例结果进行了对比(见表 1)。

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:以最大使用张力为基准;

LGJJ-300: N = 2.5, 串长 2.3 米。

从表 1 对比可知,本文计算结果与规程算例结果基本一致^[4],说明本文计算结果是可信的。二者稍有差异可能与计算参数取值不同有关,比斜抛物线计算值略大^[5]。

2) 本文与“重覆冰架空输电线路设计技术规程”^[3]条文说明 12.0.6 表中的 41 算例结果进行了计算结果对比,见表 2。

从表 2 对比可知,本文计算结果比规程算例值小 0.1%~0.8%,与规程算例值非常接近。

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:各档覆冰厚度取值、耐张段的档数、档距、高差、绝缘子金具串长度、架线张力(大高差按放松后考虑)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) 工程计算实例

西昌变电站 - 沐川变电站 500 千伏线路中^[6],有

Table 1. Uneven iced accumulation unbalanced tension percentage of 220 kV straight line tower
表 1. 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(%)	计算条件	规程算例结果 ^[4]	斜抛物线计算值 ^[5]	本文计算值(悬链线)
20	100/20	档距 450 m, 无高差 导线 LGJJ-300 λ = 2.3 m	17.0%	17.2%	17.5%
	100/30		14.5%		15.1%
	100/40		12.5%		12.8%
30	100/20	档距 350m, 无高差 导线 LGJJ-300 λ = 2.3 m	27.0%	25.3%	27.5%
	100/30		23.5%		23.0%
	100/40		19.0%		19.1%
40	100/20	档距 300m, 无高差 导线 LGJJ-300 λ = 2.3 m	38.5%	37.9%	39.1%
	100/30		32.0%		32.5%
	100/40		26.5%		26.8%

Table 2. Uneven iced accumulation unbalanced tension percentage of 500 kV straight line tower
表 2. 500 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(%)	计算条件(七档)	规程算例结果 ^[3]	规程规定最小值 ^[3]	本文计算值(悬链线)
10	100/20		11.2%	10%	11.1%
	100/30	档距 550 m, 高差 15%, 导线 LGJ-400/50 $\sigma_m = 10.59$ $\lambda = 5.4$ m 四分裂	9.8%		9.6%
	100/40		8.4%		8.2%
	100/50		7.0%		6.8%
100/20	17.4%		15%	17.2%	
15	100/30	档距 500 m, 高差 15%, 导线 LGJ-400/50 $\sigma_m = 10.59$ $\lambda = 5.4$ m 四分裂	15.1%		14.8%
	100/40		12.8%		12.6%
	100/50		10.7%		10.4%
	100/20		23.4%	25%	23.0%
20	100/30	档距 450m, 高差 15%, 导线 LGJ-400/50 $\sigma_m = 10.59$ $\lambda = 5.4$ m 四分裂	20.1%		19.8%
	100/40		17.0%		16.7%
	100/50		14.0%		13.7%
	100/20		24.6%	29%	24.2%
30	100/30	档距 400m, 高差 15%, 导线 A3/S1A-465/60 $\sigma_m = 13.85$ $\lambda = 5.4$ m 四分裂	21.0%		20.5%
	100/40		17.7%		17.2%
	100/50		14.5%		14.1%
	100/20		36.2%	33%	35.6%
40	100/30	档距 400 m, 高差 15%, 导线 A3/S3A-465/60 $\sigma_m = 15.04$ $\lambda = 5.4$ m 四分裂	30.5%		30.0%
	100/40		25.4%		24.9%
	100/50		20.8%		20.3%
	100/20		39.9%	38%	39.0%
50	100/30	档距 350 m, 高差 15%, 导线 A3/S3A-465/60 $\sigma_m = 16.23$ $\lambda = 5.4$ m 四分裂	33.5%		32.7%
	100/40		27.9%		27.1%
	100/50		22.7%		22.1%

一由 4 档组成的耐张段, 通过 40 mm 覆冰区, 采用 4*A3/S3A-465/60 导线, 计算条件及结果见表 3。

从表 3 可以看出, 虽然该耐张段只有 4 档, 但 N4 塔的不平衡度已经达到 38.32%, 超过规程规定的最小值, 需按不小于计算值进行铁塔设计; 表中计算出的“串长+弧垂”是检查该档交叉跨越的重要数据; 表中计算出的“垂直荷重”是检查该塔是否存在上拔的重要数据。

7. 结论

1) 本文所述的重冰区输电线路在不均匀覆冰工

况下的纵向张力计算方法, 适合于用计算机进行数值求解。经编程序进行计算, 并与规程对照, 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。同时依据计算出的垂直荷载, 可以检查是否超杆塔设计条件或绝缘子串是否上拔。

Table 3. The calculation result of some tension section in Xichang substation-Muchuan substation 500 kV line
表 3. 西昌变电站 - 沐川变电站 500 千伏线路某耐张段计算数据

塔号	N1	N2	N3	N4	N5
档距(m)	305	320	300	650	
高差(m)	22.3	62.7	52.5	-132.5	
覆冰率	0.2	0.2	0.2	1	
串长(m)		5.4	5.4	5.4	
串重(N)		3500	3500	3500	
冰厚(mm)	13.04	13.04	13.04	40	
串偏移(m)		0.78	1.7	2.63	
张力(N/根)	43226	44,032	47,719	91,924	
张力差(N/相)		3227	14,745	136,420	
不平衡度(%)		0.91	4.14	38.32	
串长 + 弧垂(m)	11.6	14.9	12.8	63.4	
垂直荷重(N)		19,720	42,008	241,678	

4) 本文所述算法同样适用于轻冰区线路的相关计算。

5) 本方法在西昌变电站 - 沐川变电站 500 千伏线路 20 mm~50 mm 重冰区段设计中具体运用，收到了较好的效果。

参考文献 (References)

[1] 孟遂民. 架空输电线路设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[2] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
 [3] DL/T 5440-2009, 重覆冰架空输电线路设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
 [4] SDJ 3-79, 重冰区架空送电线路设计技术规定(1998 试行)[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
 [5] 詹宗东, 熊俊, 吴昊. 覆冰纵向张力计算[J]. 四川电力技术, 2008, 6: 55-58.
 [6] 四川电力设计咨询有限责任公司. 西昌变电站 - 沐川变电站 500 千伏输电线路工程施工图设计[R]. 成都: 四川电力设计咨询有限责任公司, 2010.