

基于悬链线方程的配网导线紧线方法研究

郭亮, 范瑞祥, 李升健, 安义, 李博江

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要: 为提高配网导线紧线的准确性, 针对现有弧垂观测法紧线的不足, 提出一种基于精确控制导线长度进行紧线的新方法。首先通过幂级数展开法, 求解出紧线前导线弧形的双曲余弦方程; 再由目标弧垂值, 利用迭代逼近法推导出目标弧形的方程; 在判定目标方程的最大应力不超过标准限值后, 根据所求的紧线前后方程, 计算导线需要紧线的长度。考虑到在拉紧导线的过程中, 导线的应力增大会引起导线形变, 最后利用等效替代法, 对导线的紧线长度进行修正, 使修正后的紧线长度更加精确。在某 10 kV 线路上利用此方法进行紧线, 验证了该方法的精确性。

关键词: 电气工程; 紧线方法; 迭代逼近法; 弧垂; 幂级数展开法

中图分类号: TM75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2018)20-2040-09

Study on wire-tightening method of distribution network based on catenary equation

GUO Liang, FAN Ruixiang, LI Shengjian, AN Yi, LI Bojiang

(State Grid Jiangxi Electric Power Company Limited Electric Power Research Institute,
Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the wire-tightening in the distribution network, a new wire-tightening method based on precisely controlling wire-length is proposed to overcome the shortcomings of the existing wire-tightening method based on sag observation. Firstly, through the power series expansion method, the hyperbolic cosine equation for the arc wire before tightening is derived. Then according to the target sag of tightened line, the corresponding wire arc equation of the target sag is calculated using iterative approximation method. After determining the maximum stress of the target equation does not exceed the prescribed value, the length of wire-tightening is calculated according to the equations before and after tightening operation. Taking into account that increasing stress of the wire will lead to the deformation in the process of straining the wire, finally, using the equivalent substitution method, the length of wire-tightening is modified, so that it is more accurate. The method in this paper is applied to a 10 kV line, and the accuracy of the method is verified.

Key words: electric engineering; wire-tightening method; iterative approximation method; sag; power series expansion method

0 引言

输电导线悬挂于两端电杆上, 会自然下垂形成弧垂, 导线的弧垂大小对导线安全稳定运行具有重要作用。当弧垂过大时, 导线下垂过大, 与周边的物体距离过小, 容易使导线触碰物体, 存在安全隐患; 且线路受到风力作用时易发生舞动或引起放电、跳闸事故。弧垂过小, 可能会由于电力线承受过大应力而发生线路断股甚至断线。因此, 弧垂过大、过小都会给输电线路的正常运行带来不利影响, 弧垂应控

制在一个合理的范围之内^[1-6]。

配网运维经验表明,配网导线常出现弧垂过大的现象,需对弧垂过大的导线进行紧线操作。目前,导线紧线的方法主要为观测弧垂调整法,即在紧线过程中,随时观测弧垂,当弧垂达到规定值时,立即停止紧线。但观测弧垂调整法的效率低、人为误差大,容易造成观测弧垂过大或过小^[7-9],特别是针对存在高度差的导线,观测难度更大。针对观测弧垂调整法的不足,文献[10]提出了一种基于控制紧线张力进行紧线的方法,但这种方法需要另外加装张力计,增加了紧线操作的工序。

为提高配网导线紧线的准确性,针对现有导线紧线方法的不足,提出一种基于精确控制导线长度进行紧线的新方法。本方法只需测量紧线前导线长度、档距和悬挂点高度差,给定紧线的目标弧垂值,并考虑改造时的环境温度,便可精确计算出导线紧线的长度,并保证应力不超标,而无需在紧线过程中观测弧垂或应力。在某 10 kV 线路上利用此方法进行紧线,紧线后精确实测导线弧垂,并与目标弧垂进行对比,以验证本文方法的精确性和有效性。

1 幂级数展开法求紧线前的弧线方程

本文计算配网导线的紧线长度,需先测量紧线之前两电杆间的导线长度 s 、档距即两电杆间的水平距离 l 及两悬挂点的竖直高度差 h 。

导线悬挂于两 endpoint,可等效于一条柔线,在重力作用下自然下垂,形成一条悬链线,即双曲余弦曲线^[11],若以水平方向为 x 轴、竖直方向为 y 轴,且使双曲余弦弧线的最低点在 y 轴上,并选择合适的坐标系,可使该函数变为最简形式:

$$y = a \cosh \frac{x}{a}, \quad (1)$$

其中, $a = \frac{\sigma_0}{\gamma}$, σ_0 为导线弧垂最低点的应力 (Pa), γ 为导线单位长度重力引起的比载 (Pa/m),该值可以通过查询导线型号的参数计算得到。显然,在该标准方程的坐标系中,最低点坐标为 $(0, a)$ 。

设两悬挂点坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,且导线长度为 s ,档距为 l ,高度差为 h 。则对该曲线函数在区间 $[x_1, x_2]$ 的弧长进行积分可以得到线长:

$$s = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + y'^2} dx = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{a}} dx = \int_{x_1}^{x_2} \cosh \frac{x}{a} dx = a(\sinh \frac{x_2}{a} - \sinh \frac{x_1}{a}) = 2a \sinh \frac{x_2 - x_1}{2a} \cosh \frac{x_2 + x_1}{2a}. \quad (2)$$

高度差即两悬挂点纵坐标之差:

$$h = y_2 - y_1 = a \left(\cosh \frac{x_2}{a} - \cosh \frac{x_1}{a} \right) = 2a \sinh \frac{x_2 - x_1}{2a} \sinh \frac{x_2 + x_1}{2a}, \quad (3)$$

做变换如下:

$$s^2 - h^2 = 4a^2 \sinh^2 \frac{x_2 - x_1}{2a} \left(\cosh^2 \frac{x_2 + x_1}{2a} - \sinh^2 \frac{x_2 - x_1}{2a} \right) = 4a^2 \sinh^2 \frac{x_2 - x_1}{2a} = 4a^2 \sinh^2 \frac{l}{2a}, \quad (4)$$

两边开方后除以 l , 变形得

$$\frac{\sinh \frac{l}{2a}}{\frac{l}{2a}} = \frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{l}, \quad (5)$$

其中, s 、 l 、 h 已通过测量得到,这是一个关于未知数 a 的方程。

该方程为超越方程, 不能直接求解 a , 由于一般情况下 $l < 2a$, 即 $l/2a < 1$, 则式(5)左边可以利用幂级数展开, 忽略高阶部分后代入原式, 可转化为多项式方程。

将 $\sinh \frac{l}{2a}$ 进行幂级数展开, 得

$$\sinh \frac{l}{2a} = \frac{l}{2a} \left[1 + \frac{1}{3!} \left(\frac{l}{2a} \right)^2 + \frac{1}{5!} \left(\frac{l}{2a} \right)^4 + \frac{1}{7!} \left(\frac{l}{2a} \right)^6 + \dots \right],$$

忽略9阶及以上部分, 代入式(5), 得

$$1 + \frac{1}{3!} \left(\frac{l}{2a} \right)^2 + \frac{1}{5!} \left(\frac{l}{2a} \right)^4 + \frac{1}{7!} \left(\frac{l}{2a} \right)^6 = \frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{l}. \quad (6)$$

令 $\left(\frac{l}{2a} \right)^2 = k \geq 0$ 及 $\frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{l} - 1 = t$, 代入式(6), 得到一元三次方程如下:

$$k^3 + 42k^2 + 840k - 5\,040t = 0. \quad (7)$$

令 $A=1$ 、 $B=42$ 、 $C=840$ 、 $D=-5\,040t$ 分别为该一元三次方程的各项系数, 且令

$$r = k + \frac{B}{3A} = k + 14,$$

式(7)可化为

$$r^3 + 3pr + 2q = 0,$$

其中, $3p = \frac{3AC - B^2}{3A^2} = 252$; $2q = 2 \left(\frac{B}{3A} \right)^3 - \frac{BC}{3A^2} + \frac{D}{A} = -6\,272 - 5\,040t$.

显然判别式 $\Delta = q^2 + p^3 > 0$, 故该一元三次方程有一个实根和两个共轭复数根, 解得其唯一实数解为

$$r = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}}.$$

将已知的 s 、 l 、 h 代入以上各式, 可得到 t 、 p 、 q 、 r 、 k , 即可求得 $a = l/2\sqrt{k}$, 从而求得函数方程。

2 导线紧线可行性判别

求得 a 后, 可算得此时的导线最低点应力为

$$\sigma_0 = a\gamma.$$

2.1 两悬挂点等高的导线

此时即 $h=0$, 对照文献[12], 查询配网导线应力弧垂表中对应的导线型号和气象条件下的最低点应力限值 σ_s , 与所求应力直接进行比较。若 $\sigma_0 \geq \sigma_s$, 则不能进行紧线操作; 若 $\sigma_0 < \sigma_s$, 则可以紧线。

2.2 两悬挂点不等高的导线

由于上述应力弧垂表是在悬挂点等高条件下, 对于不等高的情况, 不能直接使用查询的最低点应力。本文提出通过导线全线最大应力对比进行判别的方法, 即先计算标准中规定的对应的全线最大应力, 再计算悬挂点不等高导线的全线最大应力, 二者对比, 保证后者不大于前者才能紧线。

2.2.1 标准中规定的对应全线最大应力

在相同导线型号和气象条件下查询某档距下的应力值 σ_0 和对应的比载 γ , 得到其曲线方程的参数 $a = \frac{\sigma_0}{\gamma}$, 该方程关于 y 轴对称, 再根据档距 l 的大小, 求得在悬挂点处切线的斜率:

$$k_{l/2} = y'_{l/2} = \sinh \frac{l}{2a}$$

再通过悬挂点切线斜率求得悬挂点导线应力的大小。如图 1 所示，导线在悬挂点 N 的应力 σ_N 可以分解为水平应力 σ_0 和竖直应力 σ_v ，即

$$k_{l/2} = \tan \theta = \frac{\sigma_v}{\sigma_0},$$

其中， σ_N 与水平轴的夹角 θ 为 N 点切线的斜率角。

因此，等高悬挂点处的应力为

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_v^2} = \sigma_0 \sqrt{1 + \tan^2 \theta}, \quad (8)$$

由于 σ_0 已查得， $\tan \theta$ 已求出，因此标准对应的全线最大应力值 σ_N 便可确定。

2.2.2 两悬挂点不等高导线的全线最大应力

悬挂点不等高的导线曲线方程同样为双曲余弦函数^[11]，即

$$y = a_1 \cosh \frac{x}{a_1},$$

其中， $a_1 = \frac{\sigma_1}{\gamma}$ ， σ_1 为导线弧垂最低点的应力大小 (Pa)； γ 为导线单位长度重力引起的比载 (Pa/m)。

如图 2 所示，悬挂点不等高导线的应力最大值出现在高悬挂点，该处的切线斜率为

$$k_{x_B} = \tan \theta_1 = \sinh \frac{x_B}{a_1},$$

其中， θ_1 为 B 点切线与水平轴的夹角； x_B 为高挂点 B 的横坐标。

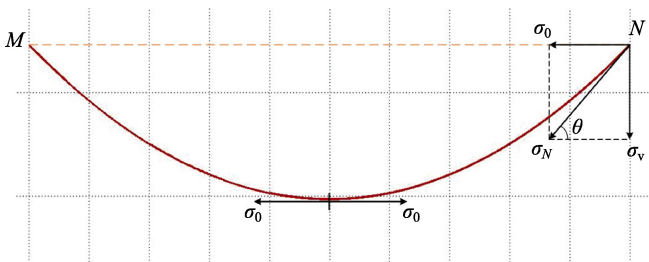


图 1 导线的应力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the wire stress

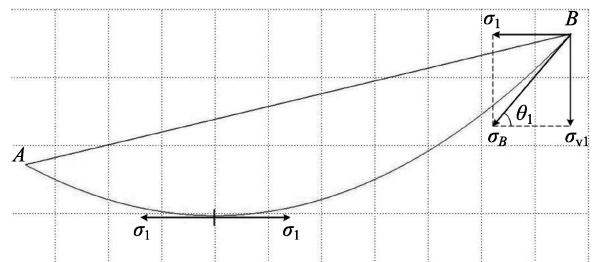


图 2 悬挂点不等高导线的应力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the stress of wire with suspension points at different height

根据式 (2)、式 (3)，且 $x_2 - x_1 = l$ ，得

$$h = 2a_1 \sinh \frac{l}{2a_1} \sinh \frac{2x_2 - l}{2a_1},$$

因此，可求得 B 点的横坐标

$$x_B = \frac{l}{2} + a_1 \sinh^{-1} \frac{h}{\sqrt{s^2 - h^2}}.$$

则其高悬挂点即最大应力处的应力为

$$\sigma_B = \sigma_1 \sqrt{1 + \tan^2 \theta_1} . \quad (9)$$

最后通过比较 σ_B 与 σ_N 来判别是否能紧线, 若 $\sigma_B \geq \sigma_N$, 则不能进行紧线操作; 若 $\sigma_B < \sigma_N$, 则可以紧线。

3 迭代逼近法求导线的目标方程

先根据实际情况和相关约束条件确定紧线目标弧垂值 f_r , 再根据该目标弧垂值, 求得对应导线弧线方程的参数 a_r , 为求得该值, 需先求得二者的关系式。

3.1 两悬挂点等高的导线

将目标弧垂值 f_r 代入等高悬挂点的弧垂公式, 即得二者关系式:

$$f_r = a_r \left(\cosh \frac{l}{2a_r} - 1 \right) . \quad (10)$$

3.2 两悬挂点不等高的导线

悬挂点不等高弧垂有最低点弧垂、中档弧垂和最大弧垂等, 不妨假设所讨论的为最低点弧垂, 设最低点的目标弧垂值为 f_r , 最低点位于纵坐标轴上点 $(0, a)$, 令低悬挂点坐标为 (x_1, y_1) , 高悬挂点坐标为 (x_2, y_2) , 导线档距为 l , 则

$$y_2 - y_1 = a \left(\cosh \frac{x_1 + l}{a} - \cosh \frac{x_1}{a} \right) = h . \quad (11)$$

两悬挂点连线方程为

$$y = \frac{h}{l}(x - x_1) + a \cosh \frac{x_1}{a} .$$

则最低点弧垂值 f_r 为该直线和最低点 $(0, a)$ 与 y 轴交点的纵坐标之差, 即

$$f_r = a \cosh \frac{x_1}{a} - \frac{h}{l} x_1 - a . \quad (12)$$

联立式 (11)、式 (12), 得目标弧垂与方程参数的关系为

$$a \cosh \frac{x_1 + l}{a} = h + f_r + a + \frac{h}{l} x_1 . \quad (13)$$

3.3 迭代逼近法求目标方程

式 (10)、式 (13) 为目标弧垂值 f_r 与弧线方程参数 a 的关系式, 均为超越方程, 难以用直接方法解出。本文注意到紧线过程的弧垂和参数的单方向性变化特点, 即导线拉紧的过程中线路长度越来越短、参数 a 越来越大、而最低点弧垂越来越小的特点, 提出利用迭代逼近法解式 (10) 和式 (13)。

对于式 (10), 先任取一个参数值 a_1 , 代入式 (10) 中的 a , 求得一个新的最低点弧垂值 f_0 , 若新的弧垂值 f_0 小于目标弧垂值 f_r , 则继续取更大的 a 值, 否则取更小的值, 重复以上步骤, 直到新求得的最低点弧垂值与目标弧垂值的差值足够小, 此时的 a 值即为所求值, 记为 a_r 。

对于式 (13), 先任取一参数值 a_1 , 代入式 (11) 中, 求得一个新的 x_1 , 再将 a_1 和 x_1 代入式 (12), 求得一弧垂值 f_0 , 若新的弧垂值 f_0 小于目标弧垂值 f_r , 则继续取更大的 a 值, 若新的弧垂值 f_0 大于目

标弧垂值 f_r ，则取更小的 a 值；重复以上步骤，直到新求得的最低点弧垂值与目标弧垂值的差值足够小，此时的 a 值即为所求值，记为 a_r 。

4 目标方程的应力核准与紧线长度计算

4.1 目标方程的应力核准

对紧线后的情况进行应力核准，确保紧线后导线最大应力不超过配网导线应力弧垂标准规定的导线最大应力值。应力核准判别方法同 2 节。

若判断紧线后的导线应力值超过应力的最大标准值，则紧线过紧，表明单靠紧线不能安全达到目标弧垂，则需要配合其他改造措施对线路进行综合改造，如增大导线的间距、中间加设电杆或进行导线绝缘化改造等方式改造线路。若判断紧线后的导线应力值小于应力的最大标准值，说明紧线合适，即参数值 a_r 是适当有效的。

4.2 紧线长度计算

应力核准判别有效的参数值 a_r 后，可以求得目标导线的紧线长度。

1) 对于悬挂点高度相等的情况，求得新参数 a_r 后，代入下式^[11]，可求得等高悬挂点下的导线拉紧后长度为

$$s_r = 2a_r \sinh \frac{l}{2a_r},$$

则紧线的长度为

$$\Delta s_1 = s - s_r = 2a \sinh \frac{l}{2a} - 2a_r \sinh \frac{l}{2a_r}. \quad (14)$$

2) 对于悬挂点高度差为 h 的情况，求得新参数 a_r 后，代入下式^[11]，可求得不等高悬挂点下的导线拉紧后长度为

$$s_r = \sqrt{\left(2a_r \sinh \frac{l}{2a_r}\right)^2 + h^2},$$

则紧线的长度为

$$\Delta s_1 = \sqrt{\left(2a \sinh \frac{l}{2a}\right)^2 + h^2} - \sqrt{\left(2a_r \sinh \frac{l}{2a_r}\right)^2 + h^2}. \quad (15)$$

4.3 紧线后的长度修正

考虑到在拉紧导线的过程中，导线的应力增大引起导线形变，最后利用等效替代法，对导线的紧线长度进行修正，使修正后的紧线长度更加精确。为求得二者之间的关系，本文提出等效替代法进行求解。

假设紧线后的长度 s_r 等效于紧线前的长度 s_{r0} ，为求得紧线前对应的导线长度，通过两者之间的关系满足架空线的基本状态方程^[11, 13]：

$$s_r \left[1 - \frac{\sigma_{cp}}{E} - \alpha(t_1 - t_0) \right] = s_{r0} \left[1 - \frac{\sigma_{cp0}}{E} - \alpha(t_1 - t_0) \right], \quad (16)$$

其中， E 为导线的弹性系数； α 为热膨胀系数； t_0 为架空线的制作温度，根据国家标准^[14]该温度为 15°C ；

t_1 为紧线操作时的环境温度； σ_{cp0} 为导线紧线前的平均应力； σ_{cp} 为导线紧线后的平均应力，

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_0}{2s_r} \left[l + \frac{s_r^2 + h^2}{\sqrt{s_r^2 - h^2}} \cosh \frac{l}{2a_r} \right].$$

考虑到水平应力远大于竖直应力，平均应力主要由水平应力决定，因此可认为紧线前后平均应力与水平应力成正比，即

$$\sigma_{cp0} = \sigma_{cp} \frac{\sigma_0}{\sigma_1}.$$

代入式 (16)，即可求得 s_{r0} ：

$$s_{r0} = \frac{s_r \left[1 - \frac{\sigma_{cp}}{E} - \alpha(t_1 - t_0) \right]}{1 - \frac{\sigma_{cp0}}{E} - \alpha(t_1 - t_0)}, \tag{17}$$

修正后的紧线长度

$$\Delta s_1 = \sqrt{\left(2a \sinh \frac{l}{2a} \right)^2 + h^2} - s_{r0}.$$

记所紧线的导线段含有的直线杆线段数为 n ，则对应紧线总长度为

$$\Delta s = n\Delta s_1.$$

在计算得到了最后的紧线总长度后，则只需将该段导线拉紧 Δs 长度即可。

5 紧线实例分析

1) 紧线前导线数据并求导线方程。

为对以上方法的精确性进行验证，在某 10 kV 荷塘线上选取等高悬挂点导线#60~#65 杆共 5 段导线，和不等高悬挂点的导线#54~#55 共 1 段导线，各段参数如表 1 所示。

根据以上测量参数，按照 1 节的方法，求得各中间量及弧线参数，如表 2 所示。

表 1 导线的测量参数

测量参数	导线杆号	
	#60~#65	#54~#55
导线型号	LGJ-50	LGJ-50
单档档距/m	80.00	102.40
高度差/m	0	9.60
导线长/m	81.00	104.40
环境温度/°C	15	18

表 2 两处导线的计算量

计算参数	导线杆号	
	#60~#65	#54~#55
r	14.074 72	14.090 86
k	0.074 72	0.090 86
a/m	146.33	169.86

即两处导线的弧线方程分别为

$$y = 146.33 \cosh \frac{x}{146.33},$$

$$y = 169.86 \cosh \frac{x}{169.86}.$$

2) 根据所求方程, 查询配网导线弧垂标准, 求得标准对应的最大应力限值。

根据表 1、表 2 的数据, 计算导线最大应力, 计算结果如表 3 所示。由表 3 可知, 导线现有最大应力分别为 5.152, 6.216 MPa, 均小于对应情况下的标准导线最大应力 13.157, 13.432 MPa. 因此导线可以进行紧线操作。

3) 通过目标弧垂值, 推导目标方程。

根据当地风速、温度和配网运维经验, 本文确定#60~#65 的目标弧垂值为 3.50 m, #54~#55 杆间的最低点目标弧垂值为 5.50 m. 采用迭代逼近法, 逼近约束条件为迭代中间量与目标弧垂值的差值在 0.001 m 以内, 得到相应的目标方程参数; 再根据该参数求解导线紧线长度并对该紧线长度进行修正, 如表 4 所示。

表 3 应力计算数值

Tab. 3 Calculated values of stress

计算参数	导线杆号	
	#60~#65	#54~#55
导线型号	LGJ-50	LGJ-50
单档档距/m	80.0	102.4
环境温度/°C	15	18
最低点应力限值/MPa	12.68	12.455
最大应力限值/MPa	13.157	13.432
悬挂点横坐标/m	40.00	66.86
导线最低点应力/MPa	4.965	5.764
导线最大应力/MPa	5.152	6.216

表 4 目标函数应力核准与紧线长度计算值

Tab. 4 Approval of the objective function stress and the calculation value of tightening wire length

计算参数	导线杆号	
	#60~#65	#54~#55
单档档距/m	80.0	102.4
环境温度/°C	15	18
最低点目标弧垂值/m	3.50	5.00
目标方程参数 a/m	229.12	221.37
目标方程最大应力/MPa	7.893	7.909
紧线后导线长度 s_r/m	80.407	103.760
等效紧线前长度 s_{r0}/m	80.401	103.748
修正后单档紧线长度/m	0.599	0.652
紧线总长度/m	2.995	0.652

显然目标方程最大应力仍小于标准最大应力限值, 因此紧线有效。#60~#65 杆之间的导线紧线总长度为 2.995 m, #54~#55 间的导线紧线长度为 0.652 m.

紧线后, 对导线的弧垂进行精确测量, 利用一根长度大于导线电杆的标尺, 在地面确定一水平基准点, 找到最低点弧垂位置, 测量该弧垂最低点位置与地面基准点的高度, 然后分别测量电杆距离基准点的高度, 则可以很精确地测得最低点弧垂值如表 5 所示。

应用该方法紧线后, 弧垂与实际弧垂误差低于 3%, 表明本文的紧线方法结果比较精确。而常规方法弧垂紧线的误差可达 15%.

表 5 导线紧线后弧垂值与目标弧垂值的对比

Tab. 5 Comparison of the target sag and the sag after tightening of the wire

计算参数	导线杆号	
	#60~#65	#54~#55
导线型号	LGJ-50	LGJ-50
单档档距/m	80.0	102.4
最低点目标弧垂值/m	3.50	5.00
紧线后测量弧垂值/m	3.42	4.89
与目标值误差/%	-2.29	-2.20

6 结论

本文提出的精确控制导线长度的紧线方法, 只需测量导线长度、导线档距及环境温度, 悬挂点不等高时还需测量两悬挂点的高度差, 当紧线目标确定后, 便可精确计算导线需要拉紧的对应长度。本文提出的紧线方法, 具有测量数据少、操作简单、紧线精确的特点, 为配网导线紧线提供了一种新思路, 可为配网运维人员提供极大的便利。

本文所提方法可以通过软件编程实现计算机自动计算, 且对于 35 kV 及以上电压等级的导线紧线具有参考作用。

[参考文献] (References)

- [1] 黄小龙. 基于嵌入式图像处理的输电线弧垂在线检测系统研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
HUANG X L. On line detection system for transmission line sag based on embedded image processing[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)
- [2] 张暎, 何青, 魏靖一. 覆冰架空输电线路空间曲线计算[J]. 中国电力, 2016, 49 (4): 49-54.
ZHANG J, HE Q, WEI J Y. Calculation of spatial curve of iced overhead transmission lines[J]. China Electric Power, 2016, 49(4): 49-54. (in Chinese)
- [3] 王孔森, 孙旭日, 盛戈皞, 等. 架空输电线路导线弧垂在线监测误差分析及方法比较[J]. 高压电器, 2014, 50 (4): 27-34.
WANG K S, SUN X R, SHENG G H, et al. Analysis and method of on-line monitoring error of conductor sag of overhead transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 27-34. (in Chinese)
- [4] 桂菲菲, 王振刚, 庞百胜, 等. 基于 LabVIEW 的架空输电线最大弧垂计算方法[J]. 电力建设, 2013, 34 (7): 108-113.
GUI F F, WANG Z G, PANG B S, et al. Calculation method of the maximum sag of overhead transmission lines based on LabVIEW[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 108-113. (in Chinese)
- [5] 刘万夫, 刘涛. J2ME 技术在架空线路弧垂观测角计算中的应用[J]. 电力建设, 2012, 33 (11): 101-103.
LIU W F, LIU T. Application of J2ME technology in the calculation of sag angle of overhead transmission line[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(11): 101-103. (in Chinese)
- [6] 全卫国, 李宝树, 苑津莎, 等. 基于航拍序列图像的输电线弧垂测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 115-120.
TONG W G, LI B S, YUAN J S, et al. Sag measurement method of transmission line based on aerial image sequence[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2011, 31(16): 115-120. (in Chinese)
- [7] 余自强, 王达刚. 连续倾斜地形调整观测弧垂及附件安装位移的计算方法[J]. 电力建设, 2006, 27 (9): 17-19.
YU Z Q, WANG D G. Calculation method of sag and accessory installation displacement of continuous sloping terrain[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(9): 17-19. (in Chinese)
- [8] 卢绍强, 赵学周, 李霖, 等. 基于 Matlab 实现架空输电线路观测弧垂的算法[J]. 华北电力技术, 2016 (7): 1-6.
LU S Q, ZHAO X Z, LI L, et al. An algorithm for observing the sag of overhead transmission lines based on Matlab[J]. North China Electric Power, 2016(7): 1-6. (in Chinese)
- [9] 袁海里. 输电线路紧线施工弧垂观测与调整方法[J]. 低碳世界, 2017, 6 (14): 16-17.
YUAN H L. Observation and adjustment method of sag in transmission line construction[J]. Low Carbon World, 2017, 6(14): 16-17. (in Chinese)
- [10] 高亮, 徐瑞芄, 张晓飞, 等. 基于张力调整弧垂的输电线路架线施工研究[J]. 通信电源技术, 2017, 24 (1): 118-120.
(in Chinese)
GAO L, XU R P, ZHANG X F, et al. Study on transmission line stringing construction based on tension adjustment sag[J]. Telecom Power Technology, 2017, 24(1): 118-120. (in Chinese)
- [11] 孟遂民, 孔伟, 唐波. 架空输电线路设计[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2015.
MENG S M, KONG W, TANG B. Design of overhead transmission lines[M]. 2ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)
- [12] 刘振亚. 配电网工程典型设计(架空线路分册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
LIU Z Y. Typical design of power distribution network (overhead line)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016. (in Chinese)
- [13] 祝贺, 李光辉. 高压架空输电线路施工[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2015.
ZHU H, LI G H. High voltage overhead transmission line construction[M]. 2ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)
- [14] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1179—2008 圆线同心绞架空导线[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Chinese National Committee of Standardization. GB/T 1179—2008 Round wire concentric lay[S]. Beijing: China Standard Press, 2008. (in Chinese)