



引用格式:赵腾飞,包华,张雷,等.考虑耐张串效应的特高压线路导线弧垂的理论解[J].科学技术与工程,2020,20(30):12512-12519  
Zhao Tengfei, Bao Hua, Zhang Lei, et al. Theoretical solution of conductor sag in ultra high voltage transmission line considering tension string effect[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(30): 12512-12519

## 建筑科学

# 考虑耐张串效应的特高压线路导线弧垂的理论解

赵腾飞<sup>1</sup>,包华<sup>2</sup>,张雷<sup>1</sup>,杨垂玮<sup>2</sup>,周贺<sup>2</sup>,黄模佳<sup>1\*</sup>

(1. 南昌大学工程力学系,南昌 330031; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司,合肥 230601)

**摘要** 在特高压(ultra high voltage,UHV)架空输电线路工程中,导线弧垂的计算必须考虑耐张绝缘子串的影响。随着耐张绝缘子串的串长和串重的增大,传统的抛物线法和力矩平衡法计算导线弧垂的准确性将大大降低。为了得到考虑耐张绝缘子串的悬链线弧垂的计算方法,建立包含耐张绝缘子串导线弧垂的悬链线方程,该方程为精确理论方程,精确度高;并与传统的简支梁法对比分析,最后结合工程现场实测,理论计算结果与实测结果最大相差1.97%,验证了悬链线法的正确性。

**关键词** 特高压;耐张绝缘子串;弧垂;力矩平衡法;悬链线

中图法分类号 TU323.4; 文献标志码 A

## Theoretical Solution of Conductor Sag in Ultra High Voltage Transmission Line Considering Tension String Effect

ZHAO Teng-fei<sup>1</sup>, BAO Hua<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, YANG Chui-wei<sup>2</sup>, ZHOU He<sup>2</sup>, HUANG Mo-jia<sup>1\*</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China)

**[Abstract]** In the construction of a UHV (ultra-high voltage) overhead transmission line, the influence of strain insulator string must be considered in the calculation of conductor sag. With the increase of the string length and weight of the strain insulator string, the accuracy of the traditional parabola method and the moment balance method could be considerably reduced. To obtain the calculation method of catenary sag considering the tension insulator string, a high-accuracy equation of catenary line including the sag of tension insulator string wire was established and compared with the traditional simple-support beam method. The maximum difference between theoretical calculation and field measurement reached 1.97% only, verifying the applicability and effectiveness of the catenary method.

**[Key words]** ultra high voltage; tension insulator string; the sag; moment balance method; catenary

特高压(ultra high voltage,UHV)输电线路中的导线多属于悬索结构,具有高柔性、大位移及非线性的特点<sup>[1-3]</sup>。导线弧垂是高压架空输电线路设计施工阶段的重要参数之一,导线弧垂的大小直接影响到输电线路的安全稳定运行,因此架空电线弧垂的设计是整个架空电线设计的一个重要环节<sup>[4-6]</sup>。在以往高压架空输电线路设计中,文献[7]通过悬链线法计算架空线的导线弧垂,但是仅针对未联有耐张串的架空输电线。对于联有耐张绝缘子串的导线弧垂计算设计人员通常采用简支梁法,该方法

存在假定,如将耐张绝缘子串假定为直棒形状,耐张串的长度近似为在两悬挂点连线(斜档距)上的投影长度,以及耐张串和导线单位长度自重沿导线两端连线均匀分布,在耐张绝缘子串串长和串重较大的特高压线路中,这对导线弧垂的计算势必会产生误差<sup>[8-9]</sup>。文献[10-11]采用有限单元方法对悬链线的线性及内力进行分析研究;文献[12]研究了具有刚性端部的悬链线,并给出悬链线的形状;文献[13-16]研究了悬链线悬索的受力及成形的形式;文献[17-19]对悬链线的成形方法进行研究,给出相

收稿日期:2020-01-16; 修订日期:2020-02-26

基金项目:国家自然科学基金(11572147,51568046)

第一作者:赵腾飞(1990—),男,汉族,山东寿光人,博士研究生,助理工程师。研究方向:输电线路塔架结构设计。E-mail:13870937708@163.com。

\*通信作者:黄模佳(1960—),男,汉族,江西抚州人,博士,教授。研究方向:输电线路塔架结构设计。E-mail:mojiahuang@hotmail.com。

应的计算方法。目前, 对悬链线成形及受力的研究<sup>[12-21]</sup>仅考虑了悬链线为均匀密度分布, 未考虑悬链线两端存在不同密度悬链线的情况(两端存在耐张串)。

根据耐张塔位置的不同, 线路档可分为孤立档和连续档两种。孤立档是指中间没有直线塔两端均为耐张塔的档距, 而连续档则是在耐张塔中间存在着直线塔的档距, 两耐张塔间全部档距构成一个耐张段, 在考虑耐绝缘子串计算导线弧垂时, 分为一端联有耐张绝缘子串时导线弧垂计算和两端联有耐张绝缘子串时导线弧垂计算两种情况。虽然考虑耐张串影响计算连续档中耐张串相邻档导线弧垂的相关计算方法已有很多, 但鲜有采用悬链线法进行导线弧垂计算的文献, 而部分涉及孤立档导线弧垂计算的文献<sup>[22]</sup>计算过程过于简单, 计算结果误差较大。为了提高特高压线路设计中导线弧垂计算的精确性, 通过悬链线理论对导线和耐张串进行分析, 推导出导线弧垂的理论计算表达式, 给出一种特高压线路设计的新思路, 具有一定的指导意义。

## 1 利用平衡条件建立导线和耐张串控制方程

在输电线上除了导线及耐张绝缘子串自重外, 档中一般不存在其他荷载。导线所受均布荷载时一般分为两种形式, 当均布荷载沿着导线弦线均匀分布时导线呈抛物线形状; 当均布荷载沿着导线的弧长均匀分布时导线呈悬链线形状。理论分析结果表明当导线的垂度越小两种形式的差别也就越小<sup>[23-24]</sup>, 为了准确计算出导线弧垂, 采用将导线的形状视为悬链线的方法进行分析。采用简化的力学模型进行分析, 做以下假定。

(1) 导线为既不能受压也不可受弯的理想柔性材料, 耐张串呈悬链线形状, 材料性质和导线等同。

(2) 导线和耐张串上无集中荷载。

(3) 忽略导线和耐张串的横截面面积及其自重在外荷载作用下的微小变化量<sup>[25-26]</sup>。

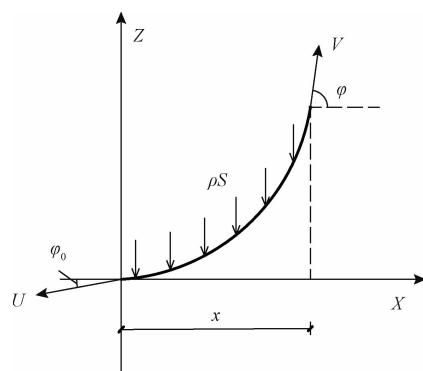
(4) 导线与耐张绝缘子串连接处切线斜率相等, 张力大小一样。

首先推导出悬链线一般方程, 悬链线受力示意图如图1所示, 悬索线在X和Z方向受力的平衡方程分别为

$$\begin{cases} V\cos\varphi - U\cos\varphi_0 = 0 \\ V\sin\varphi - U\sin\varphi_0 = \rho S \end{cases} \quad (1)$$

曲线积分公式为

$$S = \int_0^x \sqrt{1+z'^2} dx \quad (2)$$



$\varphi$  为张力  $V$  与  $X$  轴的夹角;  $\rho$  为悬链线的密度;  $S$  为悬链线的弧长;  
 $\varphi_0$  为张力  $U$  与  $X$  轴的夹角;  $x$  为悬链线在  $X$  轴的投影长度

图1 悬链线受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of catenary force

由式(1)平衡方程可得

$$\tan\varphi = \tan\varphi_0 + \frac{\rho}{U\cos\varphi_0} \int_0^x \sqrt{1+z'^2} dx \quad (3)$$

$$z' = \frac{dz}{dx} = \tan\varphi \quad (4)$$

则导线切线方程为

$$z' = \tan\varphi_0 + \frac{\rho}{U\cos\varphi_0} \int_0^x \sqrt{1+z'^2} dx \quad (5)$$

式中:  $U$  为导线的左端拉力;  $V$  为右端拉力; 导线左端原点切线的斜率为  $\tan\varphi_0$ ; 导线右端切线的斜率为  $\tan\varphi$ ;  $\rho$  为导线单位长度的质量;  $S$  为导线在  $x$  长度上的弧长。

式(4)、式(5)对  $x$  求导, 得

$$\frac{dz''}{\sqrt{1+z'^2}} = \frac{\rho}{U\cos\varphi_0} dx \quad (6)$$

两边积分得

$$\operatorname{arcsh} z' = \frac{\rho}{U\cos\varphi_0} x + C_1 \quad (7)$$

式(7)中:  $C_1$  为任意的某个常数。

$$\operatorname{arcsh}(\tan\varphi) = \frac{\rho}{U\cos\varphi_0} x + C_1 \quad (8)$$

将边界条件  $z'|_{x=0} = \tan\varphi_0$  代入式(8), 得

$$\operatorname{arcsh}(\tan\varphi_0) = C_1 \quad (9)$$

联合式(7)和式(9), 得

$$z' = \operatorname{sh} \left[ \frac{\rho x}{U\cos\varphi_0} + \operatorname{arcsh}(\tan\varphi_0) \right] \quad (10)$$

式(10)积分, 得

$$z = \frac{U\cos\varphi_0}{\rho} \operatorname{ch} \left[ \frac{\rho x}{U\cos\varphi_0} + \operatorname{arcsh}(\tan\varphi_0) \right] + C_2 \quad (11)$$

式(11)中:  $C_2$  为任意的某个常数。

考虑到  $z|_{x=0} = 0$ , 得

$$C_2 = -\frac{U \cos \varphi_0}{\rho} \operatorname{ch} [\operatorname{arcsh}(\tan \varphi_0)] \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 得

$$z = \frac{U \cos \varphi_0}{\rho} \left\{ \operatorname{ch} \left[ \frac{\rho}{U \cos \varphi_0} x + \operatorname{arcsh}(\tan \varphi_0) \right] - \operatorname{ch} [\operatorname{arcsh}(\tan \varphi_0)] \right\} \quad (13)$$

令

$$\begin{cases} \tan \varphi_0 = \operatorname{sh} k \\ \operatorname{ch} k = \frac{1}{\cos \varphi_0} \\ k = \operatorname{arcch} \frac{1}{\cos \varphi_0} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中:k 为简化计算过程中的替换变量。

则 z 的积分公式为

$$z = \frac{U \cos \varphi_0}{\rho} \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{\rho}{U \cos \varphi_0} x + k \right) - \operatorname{ch} k \right] \quad (15)$$

悬链线长度 S 为

$$S = \int_0^x \sqrt{1 + z'^2} dx = \frac{U \cos \varphi_0}{\rho} \times \left[ \operatorname{sh} \left( \frac{\rho x}{U \cos \varphi_0} + \operatorname{arcsh} \tan \varphi_0 \right) - \tan \varphi_0 \right] \quad (16)$$

## 2 联有耐张串导线弧垂的计算方法研究

当导线联有耐张绝缘子串后, 由于耐张绝缘子串单位长度自重比导线单位长度自重大得多, 此时耐张串的状态可以等效于悬链线, 利用导线和耐张串接点处的一致性, 即导线和耐张串接点处的切线相同, 张力大小也相同, 通过连续性条件求解出联有耐张绝缘子串导线弧垂的精确解。

### 2.1 一端联有耐张串导线弧垂的计算

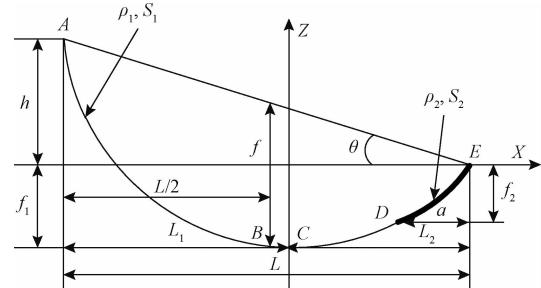
连续档耐张段可分为含三档及其以上的长连续档耐张段和“耐-直-耐”耐张段两种<sup>[27]</sup>, 文献[27-28]验证了耐张串对连续档耐张段中耐张塔相邻档弧垂的影响, 说明了计算导线弧垂时考虑耐张串的必要性。为了便于分析, 先建立导线一端联有耐张串绝缘子的数学模型, 如图 2 所示, A、E 为其中一档导线两悬挂点, AD 为导线, DE 为耐张绝缘子串, B 为档距中点处在导线上一点, C 为导线上最低点。

取导线最低点 C 点为坐标原点进行分析, 此时  $\varphi_0 = 0$ , 由式(15)得

$$z = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch} \frac{\rho_1 x}{U} - 1 \right] \quad (17)$$

对导线局部进行分析, 如图 3 所示。

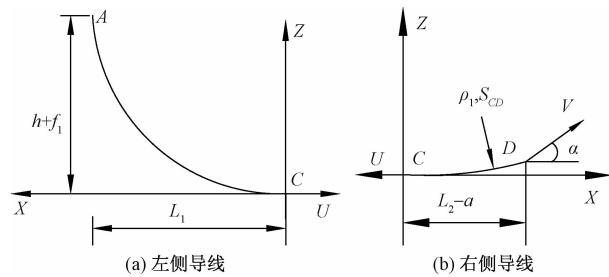
当  $x = L_1$  时, 得



h 为悬链线 A 点到 X 轴的垂直距离; f 为悬链线中点弧垂值;  $f_1$  为悬链线弧垂最低点到 X 轴的垂直距离;  $f_2$  为耐张串 D 点到 X 轴的垂直距离;  $\rho_1, S_1$  为悬链线 ABCD 的密度和弧长;  $\rho_2, S_2$  为耐张串 DE 的密度和弧长;  $L_1$  为悬链线弧垂最低点到悬链线 A 点的水平距离;  $L_2$  为悬链线弧垂最低点到悬链线 B 点的水平距离;  $L$  为悬链线 ABCDE 的水平距离, a 为耐张串 D 点到 E 点的水平距离;  $\theta$  为悬链线 A-E 点连线与 X 轴的夹角

图 2 导线一端联有耐张串绝缘子的模型

Fig. 2 Model of strain string insulator at one end of conductor



$S_{CD}$  为悬链线 CD 的弧长

图 3 导线部分受力示意图

Fig. 3 Part force schematic diagram of wire

$$f_1 + h = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch} \frac{\rho_1 (L - L_2)}{U} - 1 \right] \quad (18)$$

当  $x = L_2 - a$  时, 得

$$f_1 - f_2 = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch} \frac{\rho_1 (L_2 - a)}{U} - 1 \right] \quad (19)$$

对隔离体 CD 导线进行受力分析, 其中导线 CD 长度为

$$S_{CD} = \frac{U \operatorname{sh} \rho_1 (L_2 - a)}{\rho_1} \quad (20)$$

$$\begin{cases} U = V \cos \varphi \\ \rho_1 S_{CD} = V \sin \varphi \end{cases} \quad (21)$$

则

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \left( \frac{\rho_1 S_{CD}}{U} \right) \\ V = \sqrt{U^2 + \rho_1^2 S_{CD}^2} \end{cases} \quad (22)$$

再对隔离体 DE 耐张绝缘子串进行受力分析, 此时取 D 点为坐标原点, 如图 4 所示。

此时

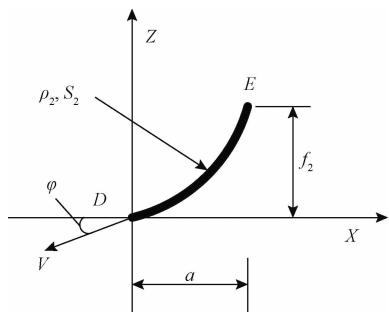


图4 耐张绝缘子串受力示意图

Fig. 4 Force diagram of anti-tensor insulator string

$$k_1 = \operatorname{arccosh} \frac{1}{\cos \varphi} \quad (23)$$

式(23)中: $k_1$ 为简化计算过程中的替换变量。

由式(16)对隔离体DE绝缘子串弧长积分,得

$$S_{DE} = \frac{V \cos \varphi}{\rho_2} \left\{ \operatorname{sh} \left[ \frac{\rho_2 a}{V \cos \varphi} + \operatorname{arcsh}(\tan \varphi) \right] - \tan \varphi \right\} \quad (24)$$

此时  $x = a$ , 有

$$f_2 = \frac{V \cos \varphi}{\rho_2} \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{\rho_2 a}{V \cos \varphi} + k_1 \right) - \frac{1}{\cos \varphi} \right] \quad (25)$$

结合式(18)、式(19)、式(24)及式(25),求解出未知数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $L_1$ 、 $a$ ,即得到导线档距中央弧垂  $f$ ,如式(26)所示:

$$f = \frac{h}{2} + (f_1 - z_{BC}) \quad (26)$$

式(26)中:  $z_{BC}$  为悬链线中  $B$  点和  $C$  点间的垂直距离,计算表达式为

$$z_{BC} = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch} \frac{\rho_1 (L - L_2 - \frac{L}{2})}{U} - 1 \right] \quad (27)$$

## 2.2 两端联有耐张串导线弧垂计算

孤立档由于两端均为耐张塔,所以档内两端都联有耐张绝缘子串,同样为了便于分析,先建立导线两端联有耐张绝缘子串的数学模型,如图5所示,A、F为两悬挂点,C为档距中心处在导线上一点,D为导线最低点,AB和EF为耐张绝缘子串,BE为导线部分。

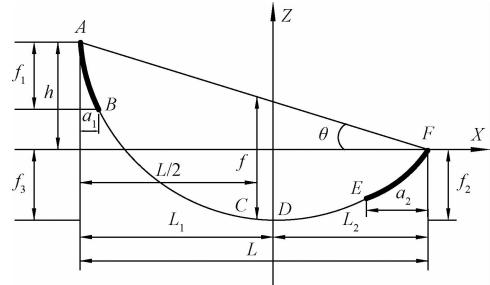
首先对其中隔离体BD及DE导线部分进行分析,如图6所示,此时  $\varphi_0 = 0$ ,利用式(15)、式(16)得以下公式。

当  $x = L_1 - a_1$  时,有

$$S_{BD} = \frac{U}{\rho_1} \operatorname{sh} \frac{\rho_1 (L - L_2 - a_1)}{U} \quad (28)$$

式(28)中: $S_{BD}$ 为悬链线BD的弧长。

$$f_3 + (h - f_1) = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch} \frac{\rho_1 (L - L_2 - a_1)}{U} - 1 \right] \quad (29)$$



$f_3$  为悬链线弧垂最低点到 X 轴的垂直距离;  $a_2$  为耐张串 E、F 点的水平距离

图5 导线两端联有耐张绝缘子串的模型

Fig. 5 Model of anti-tensor insulator strings connected at both ends of conductor

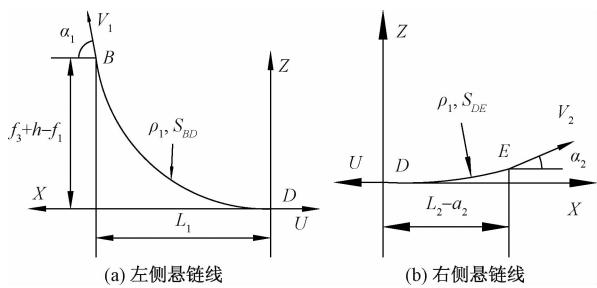


图6 导线部分受力示意图

Fig. 6 Force diagram of anti-tensor insulator string

当  $x = L_2 - a_2$  有

$$S_{DE} = \frac{U}{\rho_1} \operatorname{sh} \frac{\rho_1 (L_2 - a_2)}{U} \quad (30)$$

式(30)中: $S_{DE}$ 为悬链线DE的弧长。

$$f_3 - f_2 = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch} \frac{\rho_1 (L_2 - a_2)}{U} - 1 \right] \quad (31)$$

根据力的平衡方程,有

$$\begin{cases} U = V_1 \cos \varphi_1 \\ \rho_1 S_{BD} = V_1 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} U = V_2 \cos \varphi_2 \\ \rho_1 S_{DE} = V_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (33)$$

式中: $V_1$ 、 $V_2$ 分别为悬链线B点、E点的张力, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别为悬链线B点、E点的切线与X轴的夹角。

则  $a_1 = \arctan \left( \frac{\rho_1 S_{BD}}{U} \right)$ ,  $V_1 = \sqrt{U^2 + \rho_1^2 S_{BD}^2}$ ,

$a_2 = \arctan \left( \frac{\rho_1 S_{DE}}{U} \right)$ ,  $V_2 = \sqrt{U^2 + \rho_1^2 S_{DE}^2}$ 。此时

$$k_1 = \operatorname{arccosh} \frac{1}{\cos \varphi_1}, k_2 = \operatorname{arccosh} \frac{1}{\cos \varphi_2}.$$

对隔离体AB、EF耐张绝缘子串进行受力分析,如图7所示,利用式(14)对隔离体AB和EF绝缘子串弧长积分,得

$$S_{AB} = \frac{V_1 \cos \varphi_1}{\rho_2} \left[ \operatorname{sh} \left( \frac{\rho_2 a_1}{V_1 \cos \varphi_1} + \operatorname{arcshtan} \varphi_1 \right) - \right]$$

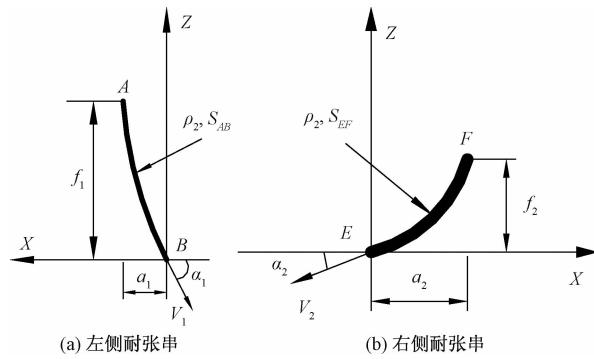


图 7 耐张绝缘子串受力示意图

Fig. 7 Force diagram of anti-tensor insulator string

$$\tan\varphi_1 \quad (34)$$

$$S_{EF} = \frac{V_2 \cos\varphi_2}{\rho_2} \left[ \operatorname{sh}\left(\frac{\rho_2 a_2}{V_2 \cos\varphi_2} + \operatorname{arctan}\varphi_2\right) - \tan\varphi_2 \right] \quad (35)$$

当  $x = a_1$ , 有

$$f_1 = \frac{V_1 \cos\varphi_1}{\rho_2} \left[ \operatorname{ch}\left(\frac{\rho_2 a_1}{V_1 \cos\varphi_1} + k_1\right) - \frac{1}{\cos\varphi_1} \right] \quad (36)$$

当  $x = a_2$ , 有

$$f_2 = \frac{V_2 \cos\varphi_2}{\rho_2} \left[ \operatorname{ch}\left(\frac{\rho_2 a_2}{V_2 \cos\varphi_2} + k_2\right) - \frac{1}{\cos\varphi_2} \right] \quad (37)$$

结合式(29)、式(31)、式(34)~式(37), 求解出未知数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $L_2$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ , 即得到导线档距中央弧垂  $f$  为

$$f = \frac{h}{2} + (f_3 - z_{CD}) \quad (38)$$

式(38)中:  $z_{CD}$  为悬链线  $C$  点和  $D$  点间的垂直距离, 计算表达式为

$$z_{CD} = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch}\left(L - L_2 - \frac{L}{2}\right) - 1 \right] \quad (39)$$

### 2.3 悬链线法的验证

为了验证悬链线法计算弧垂推导过程和结果的准确性, 假设耐张绝缘子串单位长度质量和导线单位长度质量相等, 则此时导线一端联有耐张绝缘子串和两端联有耐张绝缘子串计算得到的档距中央弧垂相等, 且等于无耐张串时导线档距中央弧垂。

先利用悬链线法推导无耐张串导线弧垂, 如图 8 所示,  $A$ 、 $D$  为两悬挂点,  $B$  为导线中点,  $C$  为导线最低点。

由式(17)可得

$$f_1 = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch}\left(\frac{L}{2} + a\right) - 1 \right] \quad (40)$$

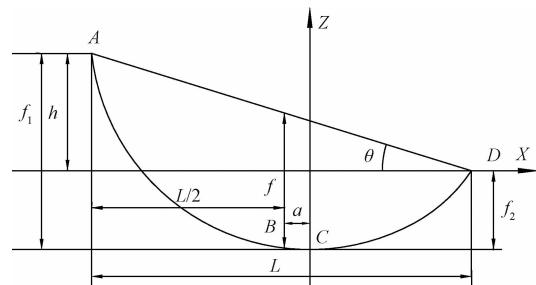


图 8 导线示意图

Fig. 8 Conductor diagram

$$f_2 = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch}\left(\frac{L}{2} - a\right) - 1 \right] \quad (41)$$

$$f_1 = f_2 + h \quad (42)$$

根据式(40)~式(42)平衡方程求解出 3 个未知量  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $a$ , 则

$$f = \frac{h}{2} + f_2 - z_{BC} \quad (43)$$

式(43)中:  $z_{BC}$  为悬链线  $B$  点和  $C$  点间的垂直距离, 计算表达式为

$$z_{BC} = \frac{U}{\rho_1} \left[ \operatorname{ch}\left(\frac{\rho_1 a}{U}\right) - 1 \right] \quad (44)$$

为了验证公式的正确性, 令导线与绝缘子串的密度相同(即  $\rho_1 = \rho_2$ ), 设高差为 10 m, 耐张串串长为 20 m, 导线单位长度重量为 40 N/m, 验证有无绝缘子串的计算结果是否相同, 则导线弧垂计算结果如表 1 所示。

表 1 悬链线法计算导线弧垂验证  
Table 1 Verification of catenary method for calculating sag of conductor

设计张力/ 档距/	kN	档距中央弧垂/m		
		一端联有耐张串	两端联有耐张串	无耐张串
10	300	46.389	46.389	46.389
	400	84.380	84.380	84.380
	500	135.790	135.790	135.790
40	300	11.277	11.277	11.277
	400	20.073	20.073	20.073
	500	31.419	31.419	31.419

表 1 数据表明, 当  $\rho_1 = \rho_2$  时, 有无绝缘子串的计算结果是相同的, 证明利用悬链线法计算导线弧垂的公式是正确无误的, 可以用于和简支梁法计算导线弧垂进行对比分析。

### 3 悬链线法和简支梁法差异比较

简支梁法计算一端联有耐张串时档距中央弧垂公式为

$$f_1 = \frac{\lambda^2 (\omega_0 - \omega)}{4F} \cos\theta + \frac{\omega l^2}{8F \cos\theta} \quad (45)$$

两端联有耐张绝缘子串孤立档的档距中央弧垂计算公式为

$$f_2 = \frac{\lambda^2(\omega_0 - \omega)}{2F} \cos\theta + \frac{\omega L^2}{8F \cos\theta} \quad (46)$$

式中: $\lambda$ 为耐张绝缘子串长度,m; $L$ 为悬链线的水平距离; $\omega_0$ 为耐张串单位长度所受质量,N/m; $\omega$ 为导线单位长度所受质量,N/m; $F$ 为导线最低点所受水平张力,N; $h$ 为档内两端导线悬挂点高,m; $\theta$ 为线档两端挂点高差角,°。

取特高压直流线路上处于典型气象区为参照,选取导线型号的气象条件为气温15℃,耐张串绝缘子串长度为18.26 m,质量为7 291 kg。选取500 m为耐张段的代表档距,高差为15 m。

### 3.1 气象条件和设计参数

(1) 导线型号:导线采用JL1/G2A-1250/100钢芯铝绞线,安全系数2.5,单位长度质量4.25 kg/m,平均运行张力占拉断力比值25%。

(2) 气象条件:基本风速27 m/s,覆冰15 mm,年平均气温15℃,最低气温-15℃,最高气温40℃。

(3) 耐张串:选用串长18.26 m(孤立档时设两端耐张串串长相等)、串重7 291 N的耐张绝缘子串。

### 3.2 档距中央弧垂计算表达式

架空工况取15℃,选取500 m为耐张段的代表档距。采用简支梁法和悬链线法分别计算不同档距下一端和两端联有耐张绝缘子串的档距中央导线弧垂,计算结果如表2、表3所示。

表2 不同档距下的连续档耐张段内耐张塔相邻档弧垂对比

Table 2 Comparison of the conductor sag of tension tower in continuous stage tension section of different spans

设计张 力/kN	高差/ m	档距/ m	档距中央弧垂/m		差值/ m
			简支梁法	悬链线法	
78.177	0	300	6.652	6.646	0.006
		400	11.320	11.318	0.002
		500	17.321	17.330	0.009
		600	24.655	24.687	0.032
		700	33.323	33.394	0.071
		800	43.325	43.458	0.133
78.177	15	300	6.659	6.660	0.001
		400	11.327	11.330	0.003
		500	17.328	17.342	0.014
		600	24.662	24.700	0.038
		700	33.330	33.406	0.076
		800	44.332	44.470	0.138
78.177	50	600	24.736	24.784	0.048
		700	33.405	33.491	0.086
		800	43.406	43.555	0.149

表3 不同档距下的孤立档竣工弧垂对比

Table 3 Comparison of isolated span conductor sag in different spans

档距/m	高差/m	张力/kN	档距中央弧垂/m		差值/m
			简支梁法	悬链线法	
300	0	88.368	6.461	6.450	0.011
		84.564	11.067	11.055	0.012
		82.183	17.096	17.089	0.006
		80.679	24.521	24.532	0.011
		79.696	33.327	33.371	0.044
		79.029	43.502	43.604	0.102
300	15	88.362	6.467	6.456	0.011
		84.562	11.073	11.061	0.012
		82.183	17.102	17.096	0.006
		80.679	24.529	24.539	0.010
		79.696	33.334	33.378	0.044
		79.029	43.509	43.611	0.102
600	50	80.678	24.599	24.610	0.011
		79.696	33.405	33.450	0.044
		79.029	43.582	43.683	0.101

从表2、表3可以看出,不论是连续档耐张段内耐张塔相邻档还是孤立档利用2.1节和2.2节中悬链线法计算导线弧垂和简支梁法计算导线弧垂所得的弧垂值基本一致,差值较小。对于连续档耐张段内耐张塔相邻档,当超过一定档距后,其中弧垂差值随着档距的增大随之增大,且高差越大,弧垂差值也越大;而对于孤立档,当超过一定档距后,其中弧垂差值随着档距的增大也随之增大,而高差对弧垂差值几乎无影响。

### 3.3 档距中央弧垂与工程测量结果的对比

利用全站仪对4基耐张塔相邻档导线弧垂进行现场测量,如图9所示。

采用悬链线法对现场测量的4基耐张塔相邻档导线弧垂进行计算,基准温度均选取本次现场测量时温度。计算值与现场实测值进行对比结果,如表4所示。根据表4的对比结果,悬链线法与实测结果最大相差1.97%,理论计算精确度高,证明了悬链线法计算两端联有耐张绝缘子串导线弧垂的可靠性。

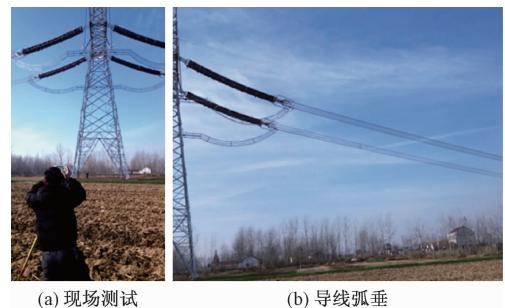


图9 弧垂测量现场

Fig. 9 Sag measurement site

**表4 档距中央弧垂对比**  
**Table 4 Sag comparison of center span**

导线档名称	高差/m	实测温 度/℃	代表档 距/m	导线张 力/kN	档距/m	档距中央弧 垂悬链线法 计算值	现场测 量值
N6628-N6629	10.3	9.5	563	70.784	319	8.31	8.27
N6629-N6630	1.8	9.5	499	70.991	506.7	17.14	17.10
N6631-N6632	10	8.5	499	71.198	412	11.62	11.64
N6632-N6633	17	8.5	410	71.753	450.5	13.23	13.38
N6644-N6645	3.75	5	513	71.863	512	17.33	17.31
N6645-N6646	4.1	5	545	71.664	557	21.47	21.25
N6648-N6649	1.5	10	545	70.757	530	19.39	19.78
N6649-N6650	5	10	536	70.742	499	16.74	16.95

## 4 结论

利用悬链线模型的平衡条件建立导线和耐张串控制方程,并进一步建立导线一端和两端分别联有耐张串绝缘子的数学计算模型,推导得到相应导线弧垂的理论计算方法,并结合工程实际,得到以下结论。

(1)通过与工程实际结合,验证了悬链线法导线弧垂的理论计算公式的正确性,为一端或两端联有耐张串绝缘子串导线弧垂的计算提供了一种更符合实际的方法。

(2)在档距较大且高差较大的情况下,通过与简支梁法的计算结果比较,推导得到的导线弧垂的理论计算公式,对一端或两端联有耐张串绝缘子串导线弧垂的计算结果更加准确。

(3)提出的联有耐张串绝缘子串导线弧垂的计算公式更加符合实际情况,通过对比分析验证了其正确性及可行性,具有一定的工程参考价值。

## 参 考 文 献

- Riabi A R N, Shooshtari A. A numerical method to material and geometric nonlinear analysis of cable structures [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2015, 43(4): 407-423.
- Wu Z, Wei J. Nonlinear analysis of spatial cable of long-span cable-stayed bridge considering rigid connection[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(5): 2148-2157.
- Tarasiewicz E J, Rimmer F, Morched A S. Transmission line arrester energy, cost, and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 919-924.
- 梁超. 架空线路弧垂公式的推导[J]. 机械管理开发, 2010, 25(3): 65-67.  
Liang Chao. Sag formula derivation of overhead transmission line[J]. Mechanical Management and Develop, 2010, 25(3): 65-67.
- 吕永乐,牛昱明. 孤立档距架空导线应力与弧垂计算分析[J]. 甘肃科技, 2008, 24(13): 58-60, 105.  
Lü Yongle, Niu Xianming. Calculation and analysis of the stress and sag of overhead wire with isolated pitch [J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24(13): 58-60, 105.
- Huang M J, Zhang L, Chen Y, et al. Oscillation periods of electric transmission lines with and without effect of bending deformation energy [J]. Journal of Engineering Mathematics, 2019, 119 (1): 241-254.
- 李博之. 高压架空输电线路架线施工计算原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
Li Bozhi. Calculation principle of overhead transmission line construction [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- 孟遂民,孔伟. 架空输电线路设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
Meng Suimin, Kong Wei. Overhead transmission line design [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- 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, 2002.  
Zhang Diansheng. Design manual of high-voltage transmission line for power engineering [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- Gambhir M L, Batchelor B. A finite element for 3-D prestressed cable nets[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1977, 11(5): 1699-1718.
- 梁立农,韩大建. 索的非线性有限元与调索方法研究[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 146-152.  
Liang Linong, Han Dajian. A study on nonlinear finite element analysis for cable and adjustment method of cable forces[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 146-152.
- Yang Y B, Tsay J. Two-node catenary cable element with rigid-end effect and cable shape analysis[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2011, 11(3): 563-580.
- 陈太聪,马海涛,苏成. 拉索静力状态的高精度无迭代求解方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 244-250.  
Chen Taicong, Ma Haitao, Su Cheng. Study on high-accuracy and non-iteration methods for determining static status of a cable[J], Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 244-250.
- 肖汝诚,贾丽君,王小同. 确定大跨径悬索桥主缆成桥线形的虚拟梁法[J]. 计算力学学报, 1999, 16(1): 107-113.  
Xiao Rucheng, Jia Lijun, Wang Xiaotong. Fictitious beam method for determination of main cable shape of long-span suspension bridges[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1999, 16(1): 107-113.
- 张志国,邹振祝,赵玉成. 确定悬索桥主缆成桥线形的参数方程法[J]. 计算力学学报, 2005, 22(3): 305-309.  
Zhang Zhiguo, Zou Zhenzhu, Zhao Yucheng. Parameter equation methods for determination of main cable's profile of suspension bridges[J]. Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(3): 305-309.
- 宋晓东,邓旭辉,金星,等. 竖向集中力作用下水平悬链线构形和张力的计算及试验验证[J]. 计算力学学报, 2019, 36(2): 255-260.  
Song Xiaodong, Deng Xuhui, Jin Xing, et al. Horizontal catenary configuration and tension caculation subjected to a vertical concentrated force as well as test verification[J]. Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(2): 255-260.
- 景天虎,李桅,李青柠,等. 悬索桥主缆线形确定的常用精确解析算法比较及电算高效实现方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(6): 821-830.

- Jing Tianhu, Li Wei, Li Qingning, et al. Comparison on common precise numerical analytical algorithms to determine main cables' curve shape in suspension bridges and study on highly effective methods of computation [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(6): 821-830.
- 18 章劲松,王雷.中小跨径悬索桥主缆线形简化计算方法研究[J].工业建筑,2015,45(1):106-108,183.  
Zhang Jinsong, Wang Lei. Study on simplified calculating method of main cable curve of medium span suspension bridge [J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 106-108, 183.
- 19 王邵锐,周志祥,高燕梅,等.悬索桥主缆过三定点的精确线形数值解析计算方法[J].计算力学学报,2015,32(5):627-632.  
Wang Shaorui, Zhou Zhixiang, Gao Yanmei, et al. Analytical caculation method to caculate the precise main cable alignment of suspension bridge [J]. Journal of Computational Mechanics, 2015, 32 (5): 627-632.
- 20 逢焕平,王建国.悬索桥主缆成桥线形的计算方法[J].建筑科学与工程学报,2009,26(4):44-48.  
Pang Huanping, Wang Jianguo. Calculation method for target configuration of main cable of suspension bridge [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 44-48.
- 21 马玉全,吴红林.悬索桥成桥主缆线形计算的混合线形理论法[J].科学技术与工程,2009,9(7):1797-1801.  
Ma Yuquan, Wu Honglin. Mixed line-type method of main cable under dead load state of suspension bridge [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(7): 1797-1801.
- 22 赵全江,刘文勋,黄欲成.基于耐张串等效悬链线形状下的特高压孤立档计算方法研究[J].智能电网,2015,3(2):145-150.  
Zhao Quanjiang, Liu Wenzun, Huang Yucheng. Research of UHV transmission line isolated span calculation based on tension string being equivalent to catenary [J]. Smart Grid, 2015, 3(2): 145-150.
- 23 范会渠.弹性悬链线方程参数变换法及其工程应用[J].力学与实践,2010,32(2):32-34,15.  
Fan Huiqu. The parameter transformation method for elastic catenary equation and it's application in engineering [J]. Mechanics and Practice, 2010, 32(2): 32-34, 15.
- 24 邢富冲.悬链线弛垂度的计算方法[J].数学的实践与认识,2004,34(11):98-101.  
Xing Fuchong. Method of calculation for the difference between ordinates of end points and vertex of catenary [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2004, 34(11): 98-101.
- 25 杨先伟.拦河线的力学分析及其工程应用研究[D].南昌:南昌大学,2015.  
Yang Xianwei. Mechanical analysis and engineering application on overhead warning line [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- 26 邵天晓.架空送电线路的电线力学计算[M].2版.北京:中国电力出版社,2003.  
Shao Tianxiao. Calculation of wire mechanics for overhead power transmission lines [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- 27 周贺,黄健,牛林华.±800 kV 线路中导线耐张串荷载对弧垂、张力的影响[J].中国电力,2018,51(3):49-53,61.  
Zhou He, Huang Jian, Niu Linhua. Influence of wire tension insulator string's load to conductor sag and tension in ± 800 kV transmission line [J]. Electric Power, 2018, 51(3): 49-53, 61.
- 28 卢本初,陆小艺.耐张串对导线弧垂的影响分析[J].红水河,2017,36(6):58-60,67.  
Lu Benchu, Lu Xiaoyi. Influence and analysis of tension string on conductor sag [J]. Hongshui River, 2017, 36(6): 58-60, 67.