

# 覆冰输电线路脱冰跳跃高度理论算法\*

伍川<sup>1</sup>, 严波<sup>1,2</sup>, 张亮<sup>1</sup>, 张博<sup>3,4</sup>, 李清<sup>3,4</sup>

- (1. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044;  
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;  
3. 河南省电力公司 电力科学研究院, 郑州 450052;  
4. 国家电网公司 输电线路舞动仿真技术重点实验室, 郑州 450052)

(本刊编委严波来稿)

**摘要:** 建立连续档线路脱冰理论分析简化模型,基于导线脱冰跳跃过程中的能量关系、应力弧垂关系、变形关系和平衡关系,给出求解导线最大脱冰跳跃高度的理论计算方法.利用算例与数值模拟方法和 Morgan 理论算法进行比较,验证了方法的正确性.进而针对典型输电线路的脱冰跳跃问题,利用获得的理论算法、数值模拟方法与现行输电线路设计规程中的脱冰跳跃高度计算公式的计算结果进行比较分析,讨论了该理论算法的实用性.采用所获得的冰跳高度理论算法,可在冰区输电线路的设计中快速确定导线冰跳时的绝缘间隙.

**关键词:** 覆冰线路; 脱冰; 跳跃高度; 理论算法; 数值模拟

**中图分类号:** TM751; O39 **文献标志码:** A

**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.02.001

## 引言

冰区输电线路的覆冰在温度等自然条件下脱落会引起导线上下振动,工程中称为“冰跳”.冰跳过程中各相导线之间及导地线之间的间隙可能小于相应的绝缘间隙值,导致闪络、烧伤甚至烧断导线等电气事故.因此,在线路设计中确定导线脱冰的最大冰跳高度具有重要意义<sup>[1]</sup>.

已有的关于覆冰导线脱冰问题的研究主要包括实验、数值模拟和简化理论 3 种方法.实验研究方面,文献[2-4]利用模型实验模拟研究了导线脱冰跳跃过程,文献[5-6]在实际线路上进行了脱冰模拟实验,这些实验研究几乎都是采用释放集中载荷的方法模拟脱冰过程.基于模拟实验难以快速确定各种参数条件下导线的冰跳高度.近年来,采用数值模拟方法研究输电线路脱冰动力响应问题受到了广泛重视<sup>[7-15]</sup>,这些工作大多研究各种参数对导线脱冰跳跃高度的影响规律,并关注线路脱冰后导线的张力变化和杆塔的应力变化等.Yan(严波)等<sup>[10]</sup>基于数值模拟结果,采用数据拟合方法,给出脱冰跳跃高度的工程简化公式,尚缺乏理论解释.

采用简化理论方法具有计算简单方便的优点,Oerli<sup>[16]</sup>假设脱冰跳跃过程中悬垂绝缘子串下端不发生偏移以及脱冰档导线张力不发生变化,仅考虑档距中央单位长度导线在脱冰跳跃

\* 收稿日期: 2015-10-21; 修订日期: 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(51277186)

作者简介: 伍川(1989—),男,博士生(E-mail: wuchuan77415@aliyun.com);

严波(1965—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: boyan@cqu.edu.cn).

过程中的能量变化,得到脱冰跳跃高度计算公式,Lips<sup>[17]</sup>假设最大冰跳高度时导线悬挂点位于脱冰后的平衡位置以及相邻档导线张力不发生变化,考虑相邻档导线做功和导线脱冰前的应变能,给出理论计算公式.此外,Morgan等<sup>[5]</sup>针对奇数连续档导线中间档覆冰和脱冰的情况,考虑覆冰状态与脱冰跳跃最高点之间的能量关系,得到相应的冰跳高度理论计算方法.然而,这些理论模型都过于简单,与线路的设计条件相差较大.

本文通过分析脱冰跳跃过程中导线在脱冰前状态与脱冰跳跃最高位置之间的能量关系,考虑导线运动过程中比载的变化、绝缘子串的偏摆、相邻档导线的相互作用以及导线的变形和平衡关系,给出一种导线脱冰跳跃高度的理论计算方法.利用算例验证方法的正确性,并讨论该方法在工程设计中的实用性.

## 1 冰跳高度理论计算方法

### 1.1 研究对象及基本假设

在输电线路连续档设计中,通常按奇数档耐张段进行验算,文献[5-6,8,10,14,16-17]等均采用奇数档耐张段模型对导线脱冰跳跃高度进行研究,因此本文根据设计需要,也针对奇数档耐张段进行研究.文献[10]采用数值模拟方法对3,5,7档连续档导线脱冰动力响应进行了模拟分析,结果表明,中间档完全脱冰时导线的冰跳高度最大,为导线发生脱冰跳跃时的最恶劣工况,且3档以上奇数档线路的档数对最大脱冰高度影响很小.此外,研究还表明,导线分裂数和高差对导线脱冰跳跃高度的影响也很小.基于以上分析,本文以无高差5档单导线线路各档均匀覆冰且中间档脱冰为研究对象.

为简化起见,理论推导基于如下假设:1) 导线悬挂形状近似采用平抛物线公式进行描述<sup>[18]</sup>,如图1所示;2) 在脱冰跳跃过程中,导线一直处于张紧状态,振动形态为单半波;3) 忽略导线的抗弯刚度,且导线的伸长变形为小变形;4) 忽略阻尼的影响.

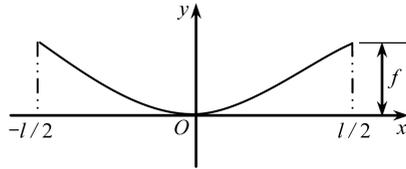


图1 平抛物线导线形状

Fig. 1 A conductor line with flat parabola shape

导线的平抛物线方程为

$$y = \frac{wx^2}{2\sigma_0}, \quad (1)$$

其中, $w$ 为导线的比载; $\sigma_0$ 为导线各点的水平应力.由此可得导线的应力弧垂关系:

$$f = \frac{wl^2}{8\sigma_0}, \quad (2)$$

其中, $f$ 为弧垂, $l$ 为档距.档内导线的长度 $L$ 为

$$L = l + \frac{w^2 l^3}{24\sigma_0^2}. \quad (3)$$

### 1.2 方程推导

5档连续档输电线路如图2所示,该线路无高差,各档的档距均为 $l$ .线路两端导线固定约

束,相邻档之间用悬垂绝缘子串连接,悬垂绝缘子串长度为 $R$ .导线截面积为 $A$ ,若为分裂导线,则 $A$ 表示各子导线的截面积之和.假设脱冰前导线上均匀覆冰,覆冰厚度为 $t_i$ ,在覆冰载荷作用下,各档的弧垂为 $f_0$ ,对应的导线水平应力为 $\sigma_0$ .

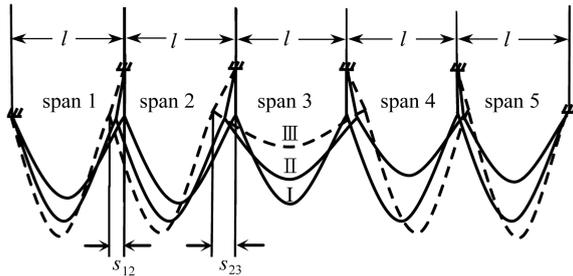


图2 5档连续档线路中间档导线脱冰状态

Fig. 2 States of a 5-span conductor line after ice shedding at the central span

假设中间档即第3档以脱冰率 $\beta$ 脱冰.图2所示为导线脱冰前后的3个典型状态,状态I,II和III分别对应于导线脱冰前的平衡状态、脱冰后静止时的平衡状态、脱冰后导线到达最大高度的状态.导线脱冰后的运动特征可描述如下:在状态I时,应变能最大,动能为0.脱冰后,在惯性力作用下导线向上加速运动,由于相邻档导线上覆冰载荷的作用,悬垂绝缘子串发生偏摆.当导线从状态I上升到达状态II对应的位置时,导线的动能最大,此时加速度为0.导线继续向上减速运动达到状态III,此时导线的动能为0.之后导线上下振动,由于阻尼的作用,最终达到脱冰后的平衡状态II.

由于线路结构和覆冰载荷的对称性,中间档脱冰后,第1档与第5档、第2档与第4档的运动相同.根据1.1小节中的假设,由方程(2)可得中间档导线脱冰后运动过程中任一时刻的应力弧垂关系式:

$$f_3 = \frac{w_3(l + 2s_{23})^2}{8\sigma_3}, \quad (4)$$

式中, $f_3, w_3, \sigma_3, s_{23}$ 分别为该时刻脱冰档导线的弧垂、比载、水平应力和两端绝缘子串的横向偏摆量.下标3表示第3档;23表示2和3档之间的偏摆.值得注意的是,导线脱冰后运动过程中的比载 $w_3$ 包括了导线自重、覆冰重力以及导线运动产生的惯性力.这些量都是随时间和位置变化的.

忽略导线抗弯刚度的影响,仅考虑导线的线性伸长变形.一方面,由弹性关系,中间档导线脱冰后任一时刻的弹性伸长量 $\Delta L_3$ 为

$$\Delta L_3 = \frac{L}{E}(\sigma_3 - \sigma_0), \quad (5)$$

式中, $L$ 为导线脱冰前的长度, $E$ 是导线的弹性模量.另一方面,导线脱冰后运动过程中处于张紧状态,导线的长度可用方程(3)确定,因此导线相对于脱冰前状态的线长改变量 $\Delta L_3$ 也可由下式确定:

$$\Delta L_3 = \left[ (l + 2s_{23}) + \frac{w_3^2(l + 2s_{23})^3}{24\sigma_3^2} \right] - \left[ l + \frac{w_0^2 l^3}{24\sigma_0^2} \right] = 2s_{23} + \frac{w_3^2(l + 2s_{23})^3}{24\sigma_3^2} - \frac{w_0^2 l^3}{24\sigma_0^2}, \quad (6)$$

式中比载 $w_0$ 由导线脱冰前的自重和覆冰载荷确定.由方程(5)和(6)左边相等,可得

$$\frac{L}{E}(\sigma_3 - \sigma_0) = 2s_{23} + \frac{w_3^2(l + 2s_{23})^3}{24\sigma_3^2} - \frac{w_0^2l^3}{24\sigma_0^2}. \quad (7)$$

类似地,可得到第 1 档和第 2 档导线任一时刻的如下方程:

$$\frac{L}{E}(\sigma_1 - \sigma_0) = -s_{12} + \frac{w_0^2(l - s_{12})^3}{24\sigma_1^2} - \frac{w_0^2l^3}{24\sigma_0^2}, \quad (8)$$

$$\frac{L}{E}(\sigma_2 - \sigma_0) = -s_{23} + s_{12} + \frac{w_0^2(l - s_{23} + s_{12})^3}{24\sigma_2^2} - \frac{w_0^2l^3}{24\sigma_0^2}. \quad (9)$$

通过对第 2 档和第 3 档导线之间绝缘子串的受力分析可知,绝缘子串所受竖向载荷为相邻两档导线重力载荷之和的一半,水平载荷为左右两档导线水平张力之差.由此可得任一时刻该绝缘子串的平衡方程:

$$\sigma_2 A = \sigma_3 A + T_{R23} \frac{s_{23}}{R} = \sigma_3 A + \frac{(w_3 L + w_0 L)s_{23}}{2\sqrt{R^2 - s_{23}^2}} A,$$

式中  $T_{R23}$  为绝缘子串所受拉力,该式可简化为

$$\sigma_2 - \sigma_3 - \frac{(w_3 L + w_0 L)s_{23}}{2\sqrt{R^2 - s_{23}^2}} = 0, \quad (10)$$

同理可得第 1 档和第 2 档导线之间绝缘子串的平衡方程:

$$\sigma_1 - \sigma_2 - \frac{w_0 L s_{12}}{\sqrt{R^2 - s_{12}^2}} = 0. \quad (11)$$

下面讨论导线从脱冰前到最大冰跳高度过程中的能量变化.图 3 所示为中间档导线脱冰前和最大冰跳高度时的状态.在状态 I 和 III 时,导线存在应变能.在脱冰跳跃运动过程中,由于绝缘子串发生偏摆,相邻档导线相互做功,同时导线还克服自身重力和剩余覆冰的重力做功.因此根据能量守恒,导线脱冰前状态 I 和最大脱冰跳跃高度状态 III 的能量满足如下关系:

$$V_I + 2W = V_{III} + W_g, \quad (12)$$

式中,  $V_I$  和  $V_{III}$  分别为中间档导线在状态 I 和 III 时的应变能;  $W_g$  为导线运动过程中克服自重和剩余覆冰重力载荷所做的功;  $W$  为一个相邻档导线和绝缘子串所做的功.  $V_I$  和  $V_{III}$  的具体形式如下:

$$V_I = \frac{\sigma_0^2}{2E} AL = \frac{w_0^2 l^4 LA}{128 E f_0^2},$$

$$V_{III} = \frac{\sigma_{3t}^2}{2E} AL_{3t} = \frac{w_{3t}^2 (l + 2s_{23t})^4 L_{3t} A}{128 E f_{3t}^2}, \quad (13)$$

式中,  $s_{23t}$  为最大冰跳高度时绝缘子串下端的水平偏摆量;  $f_{3t}$ ,  $w_{3t}$ ,  $L_{3t}$  分别为此时导线的弧垂、比载和线长.下标 t 表示最大冰跳高度时的量.

假设脱冰后导线的比载为  $w_g$ , 其由导线自重和剩余覆冰重力确定, 剩余覆冰重力与脱冰前覆冰厚度和脱冰率有关. 注意, 比载  $w_g$  不包括惯性力. 因此导线运动过程中克服导线和覆冰重力做功可表达为

$$W_g = w_g AL \left[ \frac{2}{3}(f_0 - f_{3t}) + h_t \right]. \quad (14)$$

上式右端括号中第 1 项为脱冰档导线在状态 I 和 III 时的等效弧垂之差, 第 2 项  $h_t$  为冰跳最大高度时悬垂绝缘子串偏摆的垂直分量, 其可表达为

$$h_1 = R - \sqrt{R^2 - s_{23t}^2}.$$

最后,从状态 I 到状态 III 的过程中,一个相邻档导线和绝缘子串对脱冰档所做的功由下式确定:

$$W = \int_0^{s_{23t}} \sigma_3 A ds_{23} + \frac{1}{2} \int_0^{h_1} w_3 AL dh,$$

$$h_1 = R - \sqrt{R^2 - s_{23t}^2},$$

式中  $h$  为导线上升过程中任一时刻悬垂绝缘子串偏摆的垂直分量。

利用方程(7)~(11)可将  $\sigma_3$  和  $w_3$  用  $s_{23}$  表达,另外,利用几何关系可将  $h$  也用  $s_{23}$  表达,则上式可表达为

$$W = \int_0^{s_{23t}} F_1(s_{23}) ds_{23} + \int_0^{s_{23t}} F_2(s_{23}) ds_{23}. \quad (15)$$

进一步,将方程(13)~(15)代入式(12)可得

$$\begin{aligned} \frac{w_0^2 l^4 LA}{128 E f_0^2} + 2 \left( \int_0^{s_{23t}} F_1(s_{23}) ds_{23} + \int_0^{s_{23t}} F_2(s_{23}) ds_{23} \right) = \\ \frac{w_{3t}^2 (l + 2s_{23t})^4 L_{3t} A}{128 E f_{3t}^2} + w_g AL \left[ \frac{2}{3} (f_0 - f_{3t}) + R - \sqrt{R^2 - s_{23t}^2} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

式中积分函数  $F_1(s_{23})$  和  $F_2(s_{23})$  可利用 MATLAB 软件推导获得显式表达式,该表达式非常复杂,限于篇幅,这里未给出具体形式.方程(16)中包含的未知变量为最大冰跳高度时的  $s_{23t}$ ,  $f_{3t}$ ,  $w_{3t}$ .为了求解,可基于式(4)、(7)~(11)写出在导线最大冰跳高度时的方程式:

$$\begin{cases} 8\sigma_{3t} f_{3t} - w_{3t} (l + 2s_{23t})^2 = 0, \\ \frac{L}{E} (\sigma_{3t} - \sigma_0) - 2s_{23t} - \frac{w_{3t}^2 (l + 2s_{23t})^3}{24\sigma_{3t}^2} + \frac{w_0^2 l^3}{24\sigma_0^2} = 0, \\ \frac{L}{E} (\sigma_{1t} - \sigma_0) + s_{12t} - \frac{w_0^2 (l - s_{12t})^3}{24\sigma_{1t}^2} + \frac{w_0^2 l^3}{24\sigma_0^2} = 0, \\ \frac{L}{E} (\sigma_{2t} - \sigma_0) + s_{23t} - s_{12t} - \frac{w_0^2 (l - s_{23t} + s_{12t})^3}{24\sigma_{2t}^2} + \frac{w_0^2 l^3}{24\sigma_0^2} = 0, \\ \sigma_{2t} - \sigma_{3t} - \frac{(w_{3t} L + w_0 L) s_{23t}}{2\sqrt{R^2 - s_{23t}^2}} = 0, \\ \sigma_{1t} - \sigma_{2t} - \frac{w_0 L s_{12t}}{\sqrt{R^2 - s_{12t}^2}} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

方程(16)和(17)总共 7 个方程,7 个未知数,即  $s_{12t}$ ,  $s_{23t}$ ,  $f_{3t}$ ,  $w_{3t}$ ,  $\sigma_{1t}$ ,  $\sigma_{2t}$ ,  $\sigma_{3t}$ , 可用数值方法求解.参见图 3,导线脱冰跳跃最大高度可由下式确定:

$$H = f_0 + h_1 - f_{3t} = f_0 + R - \sqrt{R^2 - s_{23t}^2} - f_{3t}. \quad (18)$$

### 1.3 方程组数值求解

方程(16)为含有积分项的非线性方程,方程(17)包括 6 个非线性方程,采用解析法求解该 7 个非线性方程组十分困难.为此,利用 MATLAB 软件,采用 fsolve 求解器求解该方程组,其中非线性积分方程(16)采用梯形法数值积分.在数值求解时,需要设定所有 7 个未知量的初始值.初始值可选择脱冰后平衡状态 II 时对应的数值,其中  $w_{3t}$  的初始值可选择状态 II 时的比载,

其他 6 个未知量的初始值则可由状态 II 时对应的方程组 (17) 求解得到。数值算例分析表明, 采用这一求解方法效率高, 收敛性好。

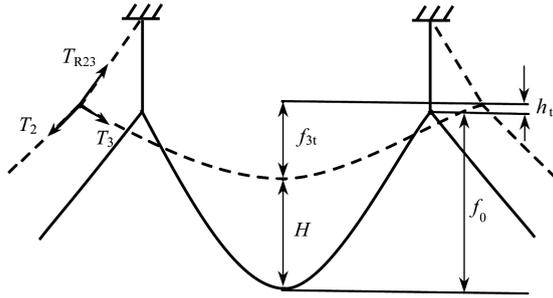


图 3 中间档导线脱冰状态受力分析

Fig. 3 Force analysis of the central span after ice shedding

## 2 算法的验证及其实用性

### 2.1 算法验证

Yan 等<sup>[10]</sup>给出了覆冰导线脱冰动力响应数值模拟方法, 并利用已有的模型实验结果验证了方法的正确性, 在本文后续分析中, 将采用该数值模拟方法的计算结果作为验证本文理论算法的重要依据。Morgan 等<sup>[5]</sup>利用理论模型研究了导线脱冰冰跳高度的计算方法, 其忽略了中间档导线脱冰过程中比载的变化、绝缘子串下端的竖向位移以及从状态 II 到状态 III 的横向偏移, 且仅考虑了奇数连续档中间档导线覆冰和脱冰的情况, 未考虑整个连续档覆冰的情况。

为了验证本文方法的正确性, 利用算例与文献[10]的数值模拟方法和 Morgan 的理论方法<sup>[5]</sup>进行比较。假设一 5 档线路, 各档档距为 500 m, 悬垂绝缘子串长 10.225 m, 导线型号为 JLHA1/G1A-1250/100, 其参数如表 1 中所列。导线的初始安装应力 49.09 MPa, 覆冰厚度为 20 mm。计算中间档分别以 50%, 60%, 80%, 100% 脱冰率脱冰时的冰跳高度。在此算例中忽略阻尼比的影响。

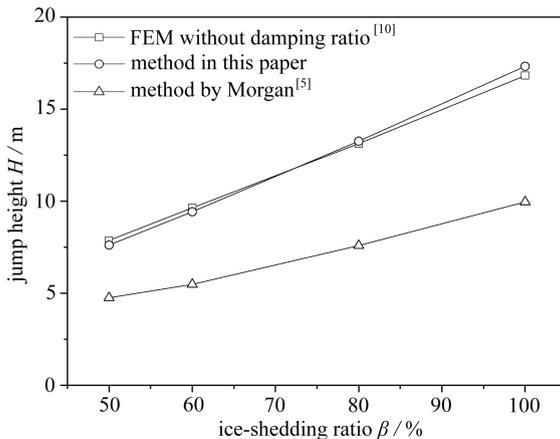


图 4 不同算法得到的冰跳高度随脱冰率的变化

Fig. 4 Variation of the jump height with the ice-shedding ratio according to different methods

采用文献[10]、文献[5]以及本文所提出的理论方法分别计算得到的导线最大脱冰高度随脱冰率的变化规律如图 4 所示。由图可知, 本文理论算法与数值模拟结果非常接近, 其最大

误差仅为 3.25%；而 Morgan 理论算法与数值模拟及本文算法的结果相差较大，其最大误差达到 43.13%。究其原因，这是由于 Morgan 方法没有考虑相邻档覆冰载荷的作用，忽略了中间档导线脱冰过程中比载的变化、绝缘子串下端的竖向位移以及从状态 II 到状态 III 的横向偏移等，使计算得到的冰跳高度偏小。

结果表明，本文方法在忽略导线阻尼影响的情况下具有很高的计算精度。

表 1 JLHA1/G1A-1250/100 导线参数

Table 1 Parameters of conductor JLHA1/G1A-1250/100

diameter $d / \text{mm}$	cross-sectional area $A / \text{mm}^2$	Young's modulus $E / \text{MPa}$	weight per unit length $w / (\text{kg/m})$	Poisson's ratio $\nu$
47.85	1 350.04	65	4.252 3	0.3

## 2.2 实用性讨论

现行输电线路设计规程中给出的冰跳高度公式如下<sup>[19]</sup>：

$$H = m(2 - l/1\ 000)\Delta f, \quad (19)$$

式中， $\Delta f$  为导线脱冰前后的弧垂差， $m$  为考虑局部脱冰引入的系数，为 0.5~0.9。

下面利用本文理论算法、数值模拟方法和设计规程公式(19)计算不同档距和不同覆冰厚度情况下导线的冰跳高度，讨论本文计算方法的实用性。在实际输电线路中由于绞线间的轴向摩擦，导线具有结构阻尼，在脱冰跳跃过程中将直接影响导线的脱冰跳跃高度。Barbieri 等<sup>[20]</sup>结合实验与数值模拟数据研究了导线的阻尼，指出导线的阻尼可用 Rayleigh 阻尼进行描述。Fekr 等<sup>[7]</sup>在模拟输电线脱冰时，提出裸导线的阻尼比为临界阻尼的 2%。如果导线 100%脱冰，脱冰后导线成为裸导线，此时其阻尼比可取 2%。

分别考虑 300, 400, 500 m 档距，20, 30, 40, 50 mm 覆冰，100%脱冰情况。采用数值模拟方法时，阻尼比分别取 0 和 2%。由于考虑覆冰导线整档均匀脱冰，故采用式(19)计算时， $m$  取 1.0。

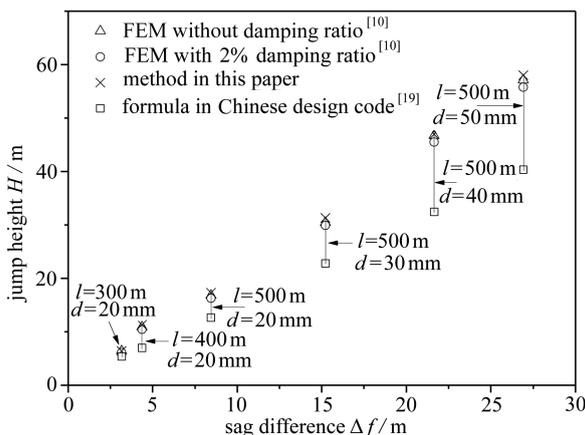


图 5 不同算法得到的冰跳高度的比较

Fig. 5 Comparison of jump heights determined with different methods

图 5 所示为分别采用本文理论算法、数值模拟方法和设计规程公式(19)所示方法得到的各种不同参数条件下的计算结果。从图中结果可见，在各种参数条件下，本文算法与数值模拟结果吻合很好。在无阻尼情况下与数值模拟结果的最大误差为 3.7%；在阻尼比取 2% 时，最大误差为 8.1%。由于本文给出的理论计算方法没有考虑阻尼的影响，随着阻尼比的增大，计算误

差会增大,但从绝缘设计的角度看,计算结果偏于安全。

此外,从图 5 中的结果还可知,采用设计规程中计算公式(19)得到的冰跳高度在小档距时与本文算法和文献[10]中方法数值模拟计算所得结果较接近,而在大档距时差别较大,并且档距越大,差别也越大。究其原因,这是由于现行设计规程中的冰跳高度公式参考前苏联的文献所得,并未给出相应的理论依据,主要考虑档距和弧垂差的影响,而根据本文算法推导过程可知,导线的冰跳高度应受导线的应力、档距以及绝缘子串下端偏移量等参数共同影响。因此,设计规程中计算公式(19)在仅考虑档距和弧垂差影响的条件下,容易导致其计算结果产生较大误差。

值得一提的是,前述方法还可以推广到 3 档和 7 档等其他奇数档线路情况,限于篇幅不再给出相应的结果。计算分析表明,档数对冰跳高度的影响很小,可以忽略不计,和文献[10]基于数值模拟结果得到的结论一致。

### 3 结 论

本文建立连续档线路脱冰分析简化模型,得到导线脱冰跳跃高度的理论计算方法。得到如下结论: 1) 本文得到的理论算法与数值模拟方法相比,具有简单快捷的优点; 2) 在不考虑阻尼的情况下,本文算法与数值模拟方法计算结果一致,计算精度远高于 Morgan 等提出的理论算法; 3) 在阻尼比取 2% 时,本文算法在不同参数条件下与数值模拟结果吻合较好,能满足工程设计要求; 4) 当档距较大时,我国现行设计规范计算公式与本文算法以及数值模拟方法相比,存在较大误差。

**致谢** 作者衷心感谢国家电网公司科技项目(521702140013)对本文的资助。

### 参考文献(References):

- [1] 刘和云. 架空导线覆冰防冰的理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. (LIU He-yun. *Theories and Applications of Ice Ccretion and Anti-Icing on Overhead Transmission Lines* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [2] 王璋奇, 齐立忠, 杨文刚, 王孟. 集中质量法模拟覆冰在架空线脱冰动张力实验中的适用性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1982-1988. (WANG Zhang-qi, QI Li-zhong, YANG Wen-gang, WANG Meng. Research on the applicability of lumped mass method for cable's dynamic tension in the ice shedding experiment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(12): 1982-1988. (in Chinese))
- [3] Kollar L E, Farzaneh M. Modeling sudden ice shedding from conductor bundles[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 28(2): 604-611.
- [4] Jamaleding A, McClure G, Rousselet J, Beauchemin R. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using Adina[J]. *Computers & Structures*, 1993, 47(4/5): 523-536.
- [5] Morgan V T, Swift D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1964, 111(10): 1736-1746.
- [6] MENG Xiao-bo, HOU Lei, WANG Li-ming, Mark M A, FU Guan-jun, SUN Bao-qiang, GUAN Zhi-cheng, HU Wei, CHEN Yong. Oscillation of conductors following ice-shedding on UHV transmission lines[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 30: 393-406.
- [7] Fekr M R, McClure G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on elec-

- trical transmission lines[J]. *Atmospheric Research*, 1998, **46**(1/2): 1-11.
- [8] 陈将, 严波, 陈科全. 重冰区架空输电线路脱冰振动的数值模拟研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, **30**(S): 46-48.(CHEN Jiang, YAN Bo, CHEN Ke-quan. Numerical simulation of the dynamic response of ice-shedding on overhead electrical transmission in cold regions[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2007, **30**(S): 46-48.(in Chinese))
- [9] 李黎, 夏正春, 付国祥, 梁政平. 大跨越输电塔-线在线路脱冰作用下的振动[J]. 振动与冲击, 2008, **27**(9): 32-34.(LI Li, XIA Zheng-chun, FU Guo-xiang, LIANG Zheng-ping. Ice-shedding induced vibration of a long-span electric transmission tower-line system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, **27**(9): 32-34.(in Chinese))
- [10] YAN Bo, CHEN Ke-quan, GUO Yue-ming, LIANG Ming, YUAN Qi. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, **28**(1): 216-225.
- [11] 陈勇, 胡伟, 王黎明, 侯镭. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, **29**(28): 115-121.(CHEN Yong, HU Wei, WANG Li-ming, HOU Lei. Research on ice-shedding characteristic of icing conductor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, **29**(28): 115-121.(in Chinese))
- [12] 侯镭, 王黎明, 朱谱轩, 关志成. 特高压线路覆冰脱落跳跃的动力计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(6): 1-6.(HOU Lei, WANG Li-ming, ZHU Pu-xuan, GUAN Zhi-cheng. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, **28**(6): 1-6.(in Chinese))
- [13] 杨风利, 杨靖波. 重冰区覆冰导线脱冰跳跃荷载分析[J]. 振动与冲击, 2013, **32**(5): 10-15.(YANG Feng-li, YANG Jing-bo. Analysis on loads form ice shedding conductors in heavy icing areas[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, **32**(5): 10-15.(in Chinese))
- [14] Kollár L E, Farzaneh M, Van Dyke P. Modeling ice shedding propagation on transmission lines with or without interphase spacers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, **28**(1): 261-267.
- [15] Mirshafiei F, McClure G, Farzaneh M. Modelling the dynamic response of iced transmission lines subjected to cable rupture and ice shedding[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, **28**(2): 948-954.
- [16] Oertli H. Oscillations de cables electriques aeriens apres la chute de surcharges[J]. *Bull Assoc Suisse Elect*, 1950, **41**: 501.
- [17] Lips K. Die Schnellhohe von Freileitungsseilen nach abfallen von Zusatzlasten[J]. *Bull Assoc Suisse Elect*, 1952, **43**: 62.
- [18] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2003: 185-188.(SHAO Tian-xiao. *Mechanics Calculation of Overhead Transmission Lines*[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 185-188.(in Chinese))
- [19] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.(ZHANG Dian-sheng. *Design Manual of High Voltage Transmission Lines for Electric Engineering* [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003.(in Chinese))
- [20] Barbieri N, de Souza Júnior O H, Barbieri R. Dynamic analysis of transmission line cables—part 2: damping estimation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, **18**(3): 671-681.

# A Theoretical Algorithm for Jump Heights of Iced Transmission Lines After Ice Shedding

WU Chuan<sup>1</sup>, YAN Bo<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>3,4</sup>, LI Qing<sup>3,4</sup>

(1. *College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China;*

2. *State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(Chongqing University), Chongqing 400044, P.R.China;*

3. *Electric Power Research Institute, Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, P.R.China;*

4. *Key Laboratory of Galloping Simulation Technology for Transmission Lines, State Grid Corporation, Zhengzhou 450052, P.R.China)*

(Contributed by YAN Bo, M. AMM Editorial Board)

**Abstract:** An analytical model for multi-span transmission lines to estimate jump heights after ice shedding was set up, and an algorithm for the jump heights was developed by means of the energy equation, stress-sag relation, deformation and balance relation of the lines during the motion after ice shedding. The algorithm was verified through the comparison of the line jump heights determined respectively with the present algorithm, the finite element method and the Morgan theoretical algorithm. Furthermore, the present algorithm, the finite element method and the formula proposed in the Chinese design code for transmission lines were employed to evaluate the jump heights of typical transmission lines with different parameters after ice shedding, based on which the practicability of the present algorithm was discussed. It is indicated that the present algorithm could be used easily and quickly to determine the isolation clearance in the design of transmission lines located in icing zones.

**Key words:** iced transmission line; ice shedding; jump height; theoretical algorithm; numerical simulation

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51277186)

---

引用本文/Cite this paper:

伍川, 严波, 张亮, 张博, 李清. 覆冰输电线路脱冰跳跃高度理论算法[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(2): 117-126.

WU Chuan, YAN Bo, ZHANG Liang, ZHANG Bo, LI Qing. A theoretical algorithm for jump heights of iced transmission lines after ice shedding[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(2): 117-126.