

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.033

# 多跨覆冰输电线路脱冰振动分析

樊勇, 阮少林

(中国能源建设集团 云南省电力设计院有限公司, 昆明 650001)

**摘要:**多跨输电导线系统包含绝缘子、导地线等部分,在脱冰和风荷载作用下的机制和现象均与单跨不同。本文基于大型通用有限元软件 ANSYS,建立了多跨覆冰输电线路的振动分析模型。对多跨覆冰输电线路的振动分析表明,从一跨增加到五跨,脱冰跨的跨中位移跳跃幅值随着跨数的增加而增加。耐-直-耐工况中耐张绝缘子的轴力幅值最大,但是脱冰后的绝缘子轴力也是随跨度增大而变大。悬垂绝缘子的轴力幅值随跨度增加而减小,但是脱冰后的轴力随跨度增大而增大。脱冰跨导线的张力也是在耐-直-耐工况中幅值最大,然而耐-直-直-直-直-耐工况中脱冰后最大。边跨导线张力随跨数增加而降低。

**关键词:**有限元;脱冰;覆冰;多跨;振动

**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0178-05

## Analysis of ice shedding vibration of multi-span transmission line

Fan Yong, Ruan Shaolin

(China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co LTD, Kunming 650051, P. R. China)

**Abstract:** The mechanism and the phenomenon of the ice shedding and wind induced vibration of the multi-span transmission lines system including the insulator, the lead wire and other parts are different from the single span. In this paper, the vibration analysis model of a multi-span transmission line is established based on the large finite element software ANSYS. The vibration analysis of the multi-span transmission line shows that the amplitude of the displacement of the ice shedding is increased with the increase of the number of spans from one span to five spans. The axial force of the resistance insulator in the case of resistance-straight-resistance is the maximum, which is increased with the increase of the span. The amplitude of the axial force of the suspension insulator decreases with the increase of the span, but the axial force after ice shedding increases with the increase of the span. The tensile force of the conductor in the ice shedding span is also the largest in the resistance-straight-resistance case, while the axial force after ice shedding increases is the largest in the case of resistance-straight-straight-straight-straight-resistance. The tension of the edge of the edge is decreased with the increase of the cross number.

**Key words:** finite element; icing shedding; ice; multi span; vibration

输电线路跨越距离大、穿越复杂山地地形,经常暴露在强风、雪、雨等多重复杂荷载及环境作用下。输电线路在覆冰和脱冰的情况下发生振动破坏或者直接导致输电线路塔倒塌的情况时有发生<sup>[1-4]</sup>,造成了

严重的社会影响和经济损失。

关于覆冰输电导线脱冰振动的已有相关研究主要集中在单跨导线的脱冰数值模拟方面<sup>[5-10]</sup>,实验方面相对较少<sup>[11-16]</sup>。由于输电线路一般是由多跨组

成,输电导线系统包含绝缘子、导地线等部分,在覆冰和风荷载作用下的机制和现象均有不同,并且多跨输电线路试验模拟与理论分析十分困难。因此,采用数值模拟方法对多跨输电线路在脱冰作用下的安全性进行系统研究具有重要的工程实用价值。有限元方法是目前公认的非常可靠的数值计算方法,本文研究选用的就是基于有限元原理的大型通用有限元软件 ANSYS 为分析工具,对输电线路覆冰进行仿真模拟计算分析。

## 1 输电线路模型

### 1.1 工程概况

根据云南省某条设计覆冰 30 mm 的 500 kV 线路进行模拟研究,工程概况如表 1 所示。

表 1 工程项目概况

项目	内容
电压等级	交流 500 kV
杆塔型式	酒杯塔
导线	JL/G1A-500/45
地线	GJX-150
悬垂绝缘子	120、210 kN 双联悬垂串
耐张绝缘子	530 kN 双联耐张串

### 1.2 塔线体系有限元模型

1.2.1 导、地线及绝缘子建模 所要分析的导线、地线、绝缘子均有一个共同的特点,属于索类结构,只能受拉。因而项目中所有的导线、地线、绝缘子均采用了 ANSYS 中的 LINK10—三维仅受拉或仅受压杆单元。LINK10 单元的刚度矩阵特性是轴向仅受拉或仅受压杆单元。选定受拉选项时,如果单元受压,刚度就消失,以此来模拟输电线的松弛或链条的松弛。这一特性对于将整个输电线用一个单元来模拟的覆冰输电线静力问题非常有用。当需要松弛输电线单元的性能,而不是关心松弛输电线单元的运动时,它也可用于动力分析(带有惯性或阻尼效应)。这里仅采用 LINK10 单元的仅受拉特性进行分析。

1.2.2 导、地线初始形态分析 根据悬索结构的基本理论可知,无初张力的柔性输电线本身不具备一定的形状和刚度,其初始形态和刚度是根据其预应力状态和边界条件由平衡方程计算得到的。初始形态分析在覆冰输电线路结构分析中非常重要。在用有限元分析软件对输电线进行自重荷载作用下的找

形时,输电线从开始的长度到最终的曲线长度有一定的变化量。建模时,先在两悬点间按照导线直线形状建模,两悬点全铰接约束,施加重力荷载,求解后得到重力作用下导线平衡状态,即完成输电线路在自重作用下的找形。覆冰导线的找形是在裸导线自重静力平衡的基础上进行的,在非线性求解选项设定后,求解得到导线在覆冰时平衡状态,即完成覆冰导线在自重情况下的找形。

## 2 覆冰输电体系脱冰分析

### 2.1 导线、地线覆冰比较

当输电线覆冰厚度为  $b$  时,单位长度架空线的覆冰体积为:  $V = \pi b(d+b)$ ,若取覆冰的密度为  $900 \text{ kg/m}^3$ ,重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。则冰重比载为

$$\gamma = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho \pi b(d+b)g}{A} = 27.728 \frac{b(d+b)}{A} \times 10^{-3} \text{ MPa/m} \quad (1)$$

式中:  $b$  为覆冰厚度,  $d$  为架空线外径,  $A$  为架空线截面面积。则在覆冰情况下,架空线的比载为自重比载和冰重比载之和。

### 2.2 多跨线路脱冰分析工况

一条输电线路往往要穿越地形复杂地形和不同气候条件的地区以及不同的路线设计,这些都对输电线路的塔型布置要不同的要求。为了考虑这种塔型布置对输电线路的影响,这里根据实际情况选择了 N-N、N-Z-N、N-Z-Z-N、N-Z-Z-Z-N、N-Z-Z-Z-Z-N (N 表示耐张塔, Z 表示直线塔) 五种塔型布置组合进行对比,分析其对输电线路的影响。

为考虑塔型布置对输电线路的影响,现根据实际情况设计如下的工况进行对比:

表 2 计算工况表

工况	工况描述
工况 1	N-N 组合,每跨 550 m、30 mm 覆冰,第 1 跨 100%脱冰
工况 2	N-Z-N 组合,每跨 550 m、30 mm 覆冰,第 1 跨 100%脱冰
工况 3	N-Z-Z-N 组合,每跨 550 m、30 mm 覆冰,第 2 跨 100%脱冰
工况 4	N-Z-Z-Z-N 组合,每跨 550 m、30 mm 覆冰,第 2 跨 100%脱冰
工况 5	N-Z-Z-Z-Z-N 组合,每跨 550 m、30 mm 覆冰,第 3 跨 100%脱冰

表 2 中所有工况的覆冰前后均采用表 3 的参数。这里为了方便参数比较,所有工况下采用脱冰跨的左边跨为边跨进行考虑,耐张绝缘子则采用离脱冰跨最远的一端,悬垂绝缘子则采用脱冰跨右边的一个。

表 3 覆冰前后对比表

项目	覆冰前	覆冰后
垂度/m	12.835	20.176
跨中张力/kN	55.4	132.7
耐张绝缘子张力/kN	59.5	136.3
悬垂绝缘子张力/kN	16.5	45.1

### 2.3 多跨线路脱冰分析

脱冰分析一般可以采用商用软件与二次开发相结合的办法。一般来说,对于动力特性分析,通常采用 LS-DYNA。该软件是世界上最著名的通用显式动力分析程序,能够模拟真实世界的各种复杂问题,特别适合求解各种结构的非线性动力冲击问题。但是笔者在使用过程发现,正因为该软件的特长是显示动力分析,因此对于隐式静力问题(找形等)的求解存在着较大的问题。并且对于绝缘子等单元的刚度难于处理。因此,本文仍然采用传统的隐式分析程序 ANSYS,该软件在隐式静力和动力计算的可靠性在工程应用领域被广泛认可。计算分析的结果如图 1 所示。

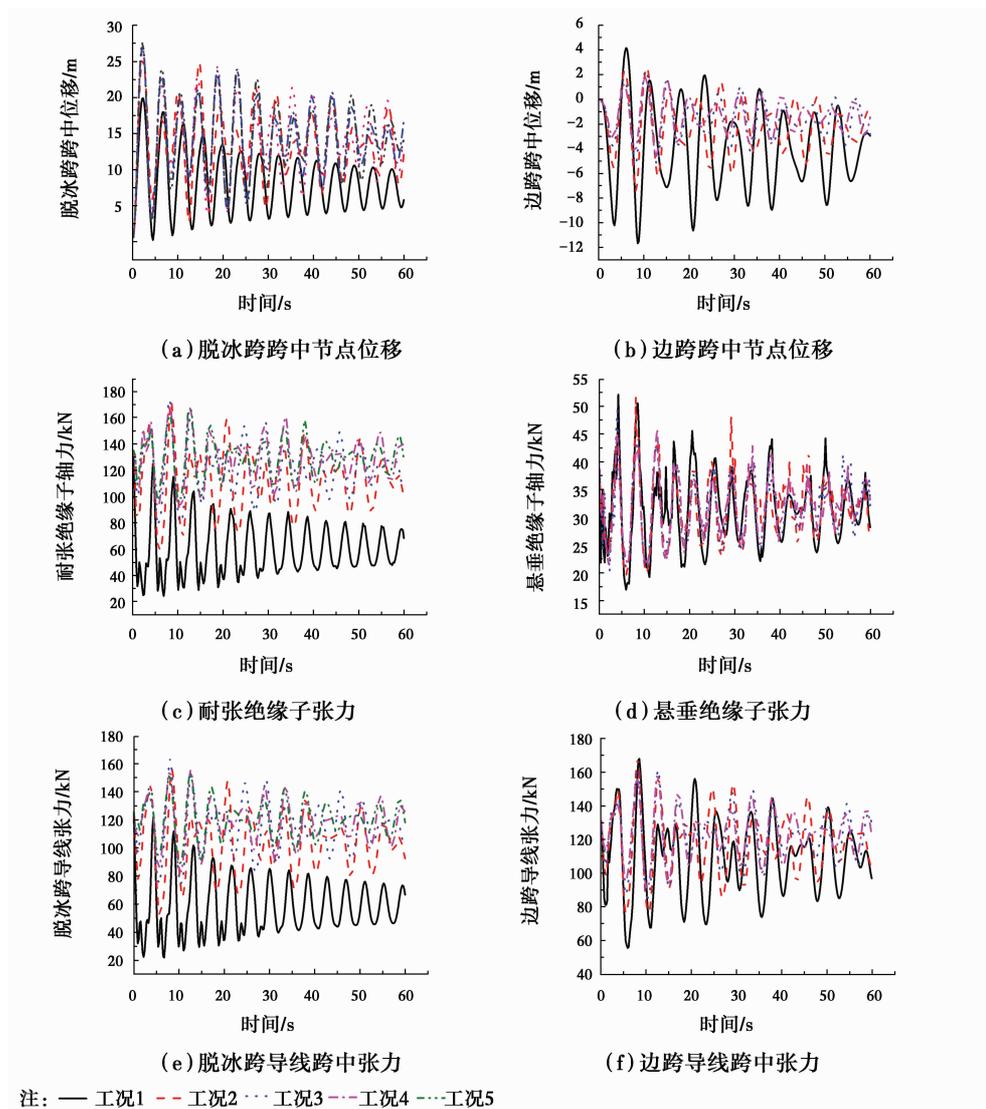


图 1 不同跨度输电线路脱冰动力时程响应

图 1 表明,从一跨增加到五跨,其脱冰跨跨中跳跃幅值和平衡后状态都不一致。从一跨增加到五

跨,其脱冰跨跨中跳跃幅值也从 19.87 m 增加到 27.54 m,脱冰后的位移也逐渐增大。同样边跨跨

中节点也有同样的规律。耐张绝缘子的规律则有所不同,N-Z-N工况中轴力幅值最大,但是脱冰后的绝缘子轴力也是随跨度增大而变大。悬垂绝缘子的轴力幅值随跨度增加而减小,但是脱冰后的轴力随跨度增大而增大。脱冰跨导线的张力也是在N-Z-N工况中幅值最大,然而N-Z-Z-Z-Z-N中脱冰后最大。边跨导线张力时程表明,张力随跨数增加而降低,可见,由于跨数增多,导线振动的能量被分散了。

对所有工况的时程分析数据进行数据处理,得

出幅值数据,进行比较,如图2所示。图2表明,从一跨增加到五跨,其脱冰跨跨中位移跳跃幅值也从19.87 m增加到27.54 m,整体上脱冰跨的跨中位移幅值随着跨数的增加而增加。从单跨到多跨的变化过程中增加的幅度很大,而最不利的脱冰响应塔型组合为N-Z-Z-Z-Z-N工况。悬垂绝缘子的张力幅值随着跨数的增加而从52.09 kN减小到了45.86 kN;而耐张绝缘子张力、边跨导线张力和脱冰跨跨中张力幅值均出现在N-Z-N工况中,因而最不利的脱冰响应输电线路跨数为N-Z-N线路。

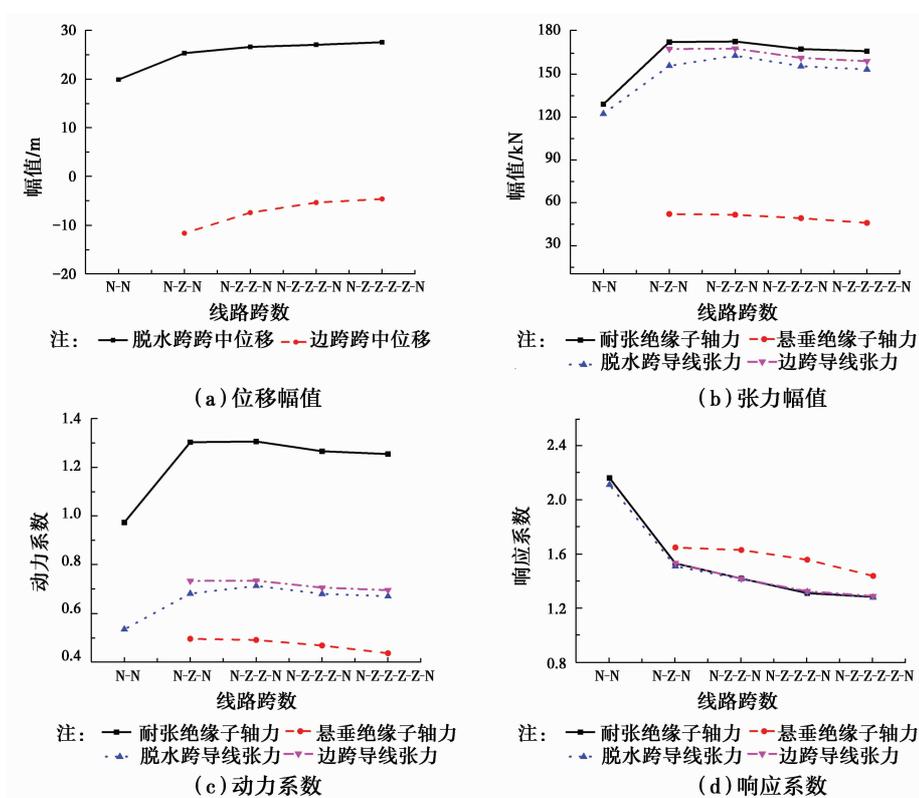


图2 动力响应幅值

若定义动力响应的动力系数为时程分析的最大值除以覆冰后的静力值,则N-Z-N线路的动力系数也为最大,可达1.3。定义脱冰动力时程分析的响应系数为脱冰动力响应除以振动的平均值,则得到的响应系数如图2(d)所示。图中表明,耐张绝缘子的张力响应系数最大可达2.2。最不利工况为N-N工况。

### 3 结论

输电线路一般是由多跨组成,输电导线系统包含绝缘子、导地线等部分,在覆冰和风荷载作用下的

机制和现象均有不同,并且多跨输电线路试验模拟与理论分析十分困难。本文基于大型通用有限元软件ANSYS,建立了多跨覆冰输电线路的振动分析模型。对多跨覆冰输电线路的振动分析表明,从一跨增加到五跨,其脱冰跨跨中位移跳跃幅值随着跨数的增加而增加。导线动力响应的动力系数(时程分析的最大值除以覆冰后的静力值)最不利工况为耐-直-耐线路,可达1.3。覆冰输电线路脱冰动力时程分析的耐张绝缘子响应系数(脱冰动力响应除以振动的平均值)最不利工况为耐-耐工况,张力响应系数最大可达2.2。

参考文献:

- [1] Morgan V T, Swift D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads[C]// Proceedings IEE, 1964,111(10): 1736-1746.
- [2] Jamaledine A, Mcglure G, Rousselet J, et al. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA[J]. Computers and Structures, 1993, 47:523-536.
- [3] Mcglure G, Lapointe M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers and Structures, 2003,81:825-834.
- [4] Roshan Fekr M, Mcglure G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines [J]. Atmospheric Research, 1998, 46:1-11.
- [5] 晏致涛,李正良,汪之松. 重冰区输电塔一线体系脱冰振动的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(1). 209-227.
- [6] 侯镭,王黎明,朱普轩,等. 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, 28:1-6.
- [7] 王璋奇,齐立忠,杨文刚,等. 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.
- [8] 严波,郭跃明,陈科全,等. 架空输电线脱冰跳跃高度的计算公式[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(11): 1306-1310.
- [9] 王昕,楼文娟. 多跨输电线路脱冰动力响应研究[J]. 工程力学,2011,28(1):226-231.
- [10] 黄涛,周敬东,周明刚,等. 覆冰输电线动力特性数值分析[J]. 水电能源科学,2010,28(7): 142-145.
- [11] Jamaledine A, Beauchemin R, Rousseler J, et al. Weight-dropping simulation of ice-shedding effects on an overhead transmission lines model [C]// Proceedings of the 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Quebec, Canada, 1996.
- [12] Morgan V T, Swift D. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads [C]// Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1964,111(10):1736-1746.
- [13] 夏正春. 特高压输电线的覆冰舞动及脱冰跳跃研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [14] Yang W G, Su S B, Wang Z Q. Experiment study on dynamic effects of ice shedding on overhead transmission line [J]. Advanced Materials Research, 2013,710:306-310
- [15] Kollár L E, Farzaneh M. Natural wet-snow shedding from overhead cables [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010,60: 40-50.
- [16] Kollár L E, Farzaneh M. Vibration of bundled conductors following ice shedding [C]// IEEE Transactions On Power Delivery, 2008, 23(2): 1097-1104.

(编辑 吕建斌)