

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.255

引用格式:王炜, 杨浩, 王强, 等. 特重冰区特高压直流线路导线脱冰跳跃高度及杆塔受力特征研究[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(6): 25-33.



# 特重冰区特高压直流线路导线脱冰跳跃高度及杆塔受力特征研究

王 炜<sup>1,3</sup>, 杨 浩<sup>2</sup>, 王 强<sup>1,3</sup>, 张万义<sup>1,3</sup>, 薛腾磊<sup>1,3</sup>, 虞东旭<sup>1,3</sup>, 高英博<sup>2</sup>, 严 波<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司, 石家庄 050000; 2. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 3. 河北省电力勘测设计技术创新中心, 石家庄 050000)

**摘要:**导线脱冰后的最大跳跃高度和杆塔受力特征是塔头设计关心的核心问题, 特重冰区特高压直流线路导线覆冰厚度可达 60~80 mm, 超过现有设计规程的最大冰厚。建立典型特高压直流连续耐张段线路塔线耦合体系模型, 采用有限元方法模拟研究不同档不同极导线脱冰塔线体系动力响应, 获得导线脱冰后杆塔的应力、纵向不平衡张力以及导线最大跳跃高度, 分析杆塔受力特征及电气绝缘间隙。结果表明杆塔纵向不平衡张力取值大于重冰线路规范要求值, 导线冰跳高度大于现有简化公式的计算值。基于研究结果提出特重冰区杆塔纵向不平衡张力取值建议以及对现有导线冰跳高度公式的修正。

**关键词:**特重冰区; 特高压直流线路; 塔线体系; 冰跳高度; 纵向不平衡张力

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)06-025-09

## Mechanical characteristics of towers and conductor jump height in UHV DC lines in ultra-heavy ice zones following ice-shedding

WANG Wei<sup>1,3</sup>, YANG Hao<sup>2</sup>, WANG Qiang<sup>1,3</sup>, ZHANG Wanyi<sup>1,3</sup>, XUE Tenglei<sup>1,3</sup>, YU Dongxu<sup>1,3</sup>, GAO Yingbo<sup>2</sup>, YAN Bo<sup>2</sup>

(1. Power China Hebei Electric Power Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, P. R. China; 2. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. Hebei Electric Power Design & Survey Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050000, P. R. China)

**Abstract:** The mechanical behavior of transmission towers and the maximum jump height of conductors following ice-shedding are critical factors in tower head design. In ultra-heavy ice zones, ice thickness on ultra-high voltage direct current (UHV DC) line can reach 60 mm to 80 mm, exceeding the maximum values specified in current transmission line design codes. This study establishes finite element models of UHV DC tower-line systems in ultra-heavy ice zones and numerically simulates their dynamic responses under ice-shedding conditions for

收稿日期: 2023-11-30 网络出版日期: 2024-04-30

基金项目: 中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司科技项目(22-KJDW001)。

Supported by Science & Technology Project of Power China Hebei Electric Power Engineering Co., Ltd. (22-KJDW001).

作者简介: 王炜(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事特高压输电线路设计等方向的研究, (E-mail) wangwei@hbed.com.cn。

通信作者: 严波(1965—), 男, 博士, 教授, (E-mail) boyan@cqu.edu.cn。

varying span lengths. The analysis evaluates tower stresses, longitudinal unbalanced tensions, and maximum conductor jump heights to assess both structural performance and electrical isolation clearances. Results indicate that longitudinal unbalanced tensions surpass estimates from current design codes, and maximum conductor jump heights exceed predictions from existing empirical formulas. To enhance design accuracy, the study proposes revised values for longitudinal unbalanced tensions and modifications to the conductor jump height formula.

**Keywords:** ultra-heavy ice zone; UHV DC; tower-line system; maximum jump height; longitudinal unbalanced tension

随着国内特高压及直流线路的大规模建设,部分线路经过的局部地段设计冰厚达60~80 mm,超过了现有重覆冰设计规范中的最大覆冰厚度50 mm,属于特重冰区线路设计既没有规范可循,也没有工程经验可以借鉴。为确保线路的安全运行,研究特重冰区特高压直流线路导线脱冰过程中杆塔的受力和强度以及不同极导线之间、导地线之间的绝缘间隙具有极其重要的工程实际意义。

目前对于输电线路塔线耦合体系脱冰动力响应研究主要有3类:现场观测、模型试验和有限元数值仿真。由于脱冰过程短,且具有随机性,现场记录十分困难;模型试验成本高,难以做到对真实情况进行模拟。因此,采用有限元数值方法模拟输电线路塔线体系导地线脱冰动力响应,研究杆塔安全性和电气绝缘性能已得到广泛关注。Jamaledine等<sup>[1]</sup>搭建了两档输电线路的比例缩小模型,利用ADINA有限元软件模拟了多种脱冰工况下导线的静态和瞬态脱冰跳跃过程。McClure等<sup>[2]</sup>建立了多跨塔线体系有限元模型,研究了导线脱冰塔线体系的动力响应。Roshan Fekr等<sup>[3]</sup>采用有限元方法研究了单导线输电线路的脱冰动力响应,得到了覆冰厚度和脱冰位置等对输电线路的影响。李黎等<sup>[4]</sup>以某1 000 kV大跨越塔线耦合体系为对象,利用ANSYS软件建立有限元模型,模拟研究了导线脱冰后杆塔的振动响应。李雪等<sup>[5]</sup>建立输电线路塔线体系有限元模型,研究了不同档距、高差、不均匀覆冰和风荷载影响等参数对塔线耦合体系发生脱冰跳跃后杆塔受力的影响。鲁元兵等<sup>[6]</sup>采用有限元方法研究了不均匀脱冰情况下导线最大张力、绝缘子串张力、导线不平衡张力以及杆塔的安全性。杨风利等<sup>[7]</sup>通过建立三维塔线系统有限元模型,研究了塔线体系导线脱冰跳跃动力响应。姚陈果等<sup>[8]</sup>采用有限元方法模拟了某500 kV线路塔-线体系在导线10 mm均匀覆冰、不同风速下的动力学响应。刘玥君等<sup>[9]</sup>探究了输电线路在冰风载荷作用下的动力响应与可靠度问题。Li等<sup>[10]</sup>采用有限元方法建立了两塔三线的有限元模型,研究了覆冰脱落引起的杆塔倒塌及其影响因素。但是,已有的研究工作几乎没有考虑50~80 mm特重冰情况下塔线体系导线脱冰动力响应问题。

中国现行电力工程设计规程<sup>[11]</sup>中给出了杆塔纵向不平衡张力的取值范围,并给出了前苏联电力设计规程中的导线冰跳高度经验公式。李梦丽等<sup>[12]</sup>分析了大截面导线重覆冰区不均匀冰纵向荷载特性。严波等<sup>[13-14]</sup>采用有限元方法对不同线路结构参数和覆冰脱冰参数条件下导线脱冰动力响应进行了数值模拟,并在此基础上提出了导线冰跳高度计算公式,该公式仅适用于500 m以下档距线路。王德千等<sup>[15]</sup>对该公式进行了修正,使其适用于大档距大高差线路。然而,目前所有的冰跳高度计算公式均仅适用于小于50 mm冰厚的情况,对于特重冰区导线冰跳高度尚无研究成果报道。

笔者利用ABAQUS有限元软件,针对特重冰区典型连续耐张段线路,建立塔线耦合体系有限元模型,数值模拟研究不同覆冰厚度、不同极导线脱冰塔线体系动力学响应,分析导线脱冰过程中塔线的受力、强度,以及电气绝缘间隙,分析现有重冰区纵向不平衡张力取值和导线冰跳高度公式在特重冰区的适用性,提出纵向不平衡张力的取值建议以及导线冰跳高度的修正计算公式。

## 1 塔线耦合体系导线脱冰有限元模拟

### 1.1 特重冰区典型线路段

典型连续耐张段线路塔线布置如图1所示。该连续耐张段线路使用2种耐张塔,型号分别为JC30601B和JC30602B。杆塔的主要构件均为角钢,主材为Q420,斜撑为Q235和Q345。虽然杆塔型号只有2种,但是在该连续耐张段线路中每一基杆塔的呼高不一样,塔腿高度也不一样。

耐张绝缘子串为 550 kN 悬式四联双挂点耐张串,型号为 8N42-50100-55P,长度 25 m,质量 9 600 kg;间隔棒型号为 FJZ-650/48D,质量 19 kg。绝缘子串、线夹和间隔棒等金具的弹性杨氏模量取 210 GPa,泊松比取 0.3。六分裂导线子导线型号为 JLHA1/G2A-900/75,地线为 JLB20A-300,导地线的参数如表 1 所示,导线的初始张力如表 2 所示。

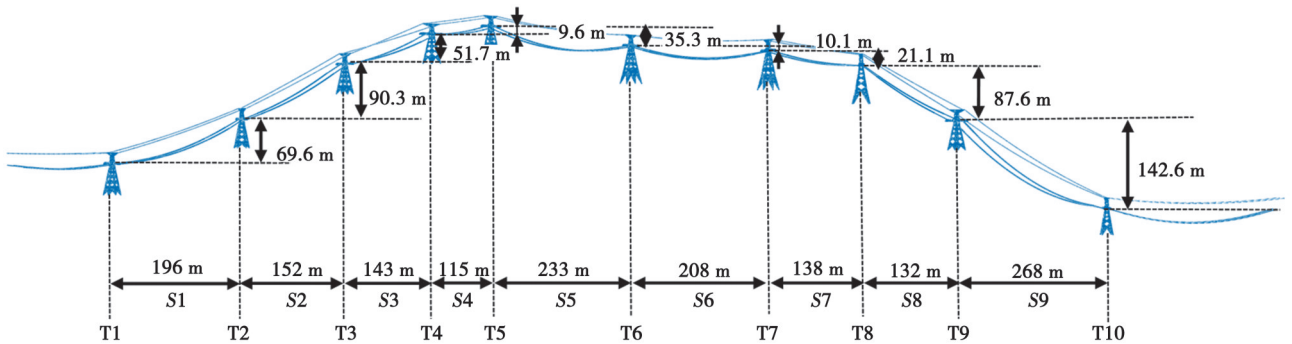


图 1 特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路段

Fig. 1 A typical UHV DC continuous section line in ultra-heavy ice zones

表 1 特重冰区特高压直流六分裂线路导地线参数

Table 1 Parameters of conductor and ground for UHV DC six-bundle lines in ultra-heavy ice zones					
导地线型号	弹性模量/MPa	截面积/mm <sup>2</sup>	线重/(kg·m <sup>-1</sup> )	直径/mm	综合拉断力/N
导线(JLHA1/G2A-900/75)	65 400	973.00	3.071 3	40.6	334 400
地线(JLB20A-300)	145 800	297.57	2.000 2	22.4	358 870

表 2 特重冰区特高压直流六分裂线路导线的初始张力

冰厚/mm	初始张力/N				
	L=100 m	L=200 m	L=300 m	L=400 m	L=500 m
60	37 314	20 860	19 210	18 704	18 480
70	14 908	12 326	11 964	11 844	11 790
80	11 302	9 980	9 780	9 712	9 681

注:L为档距。

1.2 塔线体系有限元模型

利用 ABAQUS 有限元软件建立该特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路塔线耦合体系有限元模型。采用空间梁单元对杆塔结构进行离散。导地线采用索单元离散,为满足单元收敛要求,单元长度取 0.5 m,在 ABAQUS 软件中可以通过设置空间桁架单元的材料不可压缩来模拟导地线。绝缘子串采用空间梁单元模拟,线夹和间隔棒均简化为空间框架结构,使用空间梁单元进行离散,简化模型的质量与原型保持一致。耐张绝缘子串与杆塔挂点连接采用铰接,可沿线路方向转动,线路两端和输电杆塔塔腿施加固定约束。建立的塔线耦合体系有限元模型如图 2 所示。

考虑导线上同时存在覆冰载荷和自重载荷,假设覆冰均匀分布在导线上,沿导线整档脱落。通过增大导地线的等效密度来模拟导线覆冰载荷,通过修改导线的惯性加速度来实现脱冰模拟<sup>[13]</sup>。要准确确定导线的阻尼十分困难,根据文献[16-18],裸导线的阻尼取临界阻尼的 0.5%,覆冰导线的阻尼取临界阻尼的 2%。

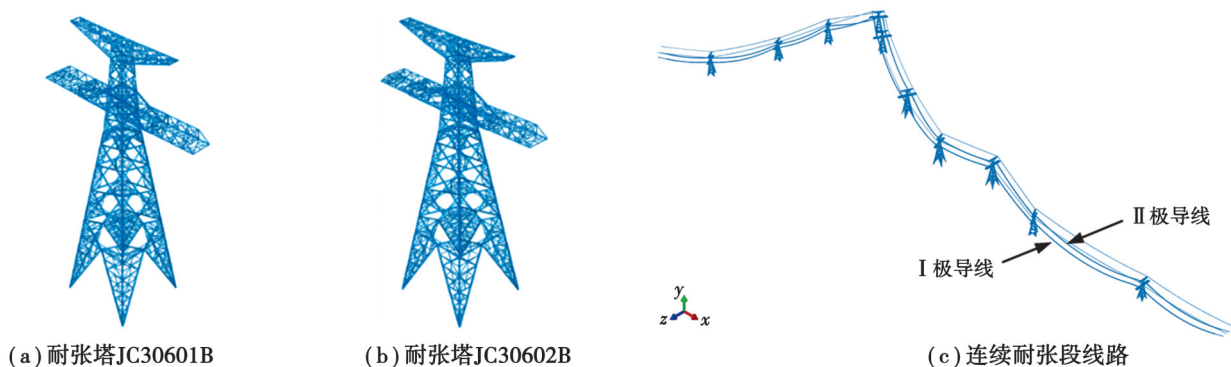


图2 特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路塔线耦合体系有限元模型

Fig. 2 The finite element models of tower line coupling system in UHV DC continuous section lines in ultra-heavy ice zones

### 1.3 脱冰动力响应模拟工况

该特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路包括10个转角塔和9个耐张段,首先建立该线路段10塔11档塔线体系有限元模型。若采用该10塔11档塔线体系模型模拟各档导线脱冰时塔线体系的动力响应,计算规模太大,计算效率太低。事实上,在连续耐张段线路中某一档导线脱冰时,对远离该档的塔线影响甚微,因此,为提高计算效率,将该线路段拆分成3段进行模拟分析。由于连续耐张段线路中各转角塔结构不对称,在脱冰时需分别考虑I极导线和II极导线脱冰的情况,具体计算工况如表3所示,共54种工况。已有的研究表明<sup>[13,15]</sup>,整档导线不同脱冰率情况下100%脱冰时导线的冰跳高度和张力变化最大,即为最恶劣脱冰情况,故在此仅考虑100%脱冰率。

表3 特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路塔线体系覆冰脱冰工况

Table 3 Icing and ice shedding conditions for tower line system of typical UHV DC continuous section line in ultra-heavy ice zones

工况编号	覆冰厚度/mm	脱冰率/%	脱冰档	脱冰位置
I-60-1~I-60-9	60	100	S1~S9	I极导线
II-60-1~II-60-9	60	100	S1~S9	II极导线
I-70-1~I-70-9	70	100	S1~S9	I极导线
II-70-1~II-70-9	70	100	S1~S9	II极导线
I-80-1~I-80-9	80	100	S1~S9	I极导线
II-80-1~II-80-9	80	100	S1~S9	II极导线

## 2 导线脱冰杆塔强度及不平衡张力

### 2.1 杆塔变形及应力分析

在特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路中,S9档的档距和高差均较大,在脱冰过程中最危险。在本节中着重分析S9档I极导线整档脱冰时脱冰档两端杆塔的变形和应力。

图3为S9档I极导线脱冰过程中耐张塔T9和T10的最大Mises应力。从图3中可见,在不同覆冰厚度条件下,脱冰过程中同一杆塔的最大应力出现位置相同。在覆冰厚度分别为60、70、80 mm时,塔T9的最大Mises应力分别为136、142.7、155.2 MPa,出现在Q420材料杆件上;塔T10的最大Mises应力分别为152.4、148.7、158.6 MPa,也出现在Q420材料杆件上。可见,这2塔的最大应力均出现在塔身构件上,最大应力均没有超过Q420构件材料的最大应力允许值。在计算的54种脱冰工况中,所有杆塔脱冰过程中的最大应力均未超过其对应钢材材料的屈服强度,故杆塔的结构安全性满足要求。

图4为脱冰过程中塔T9和T10最大应力点处的应力时程。从图4中可以看出,脱冰档两端耐张塔在导线脱冰过程中的应力短时间内达到最大,随时间逐渐减小,最后趋于稳定。

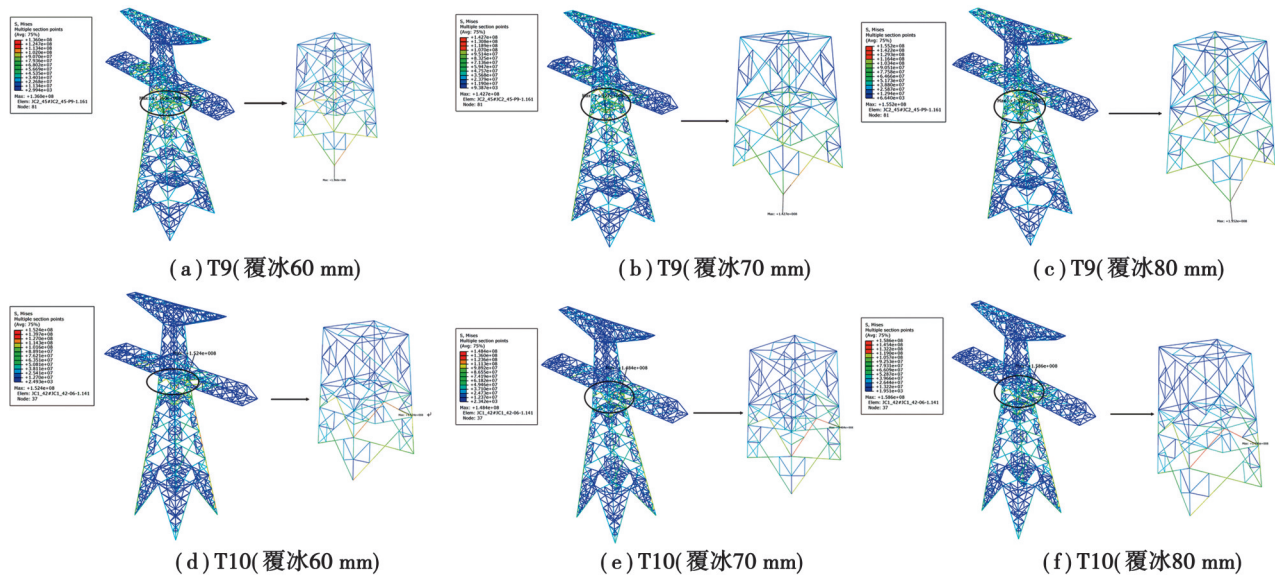


图 3 S9 档 I 极导线脱冰时塔 T9 和 T10 最大 Mises 应力

Fig. 3 Maximum Mises stresses in towers T9 and T10 during ice shedding of the I-pole conductor in S9

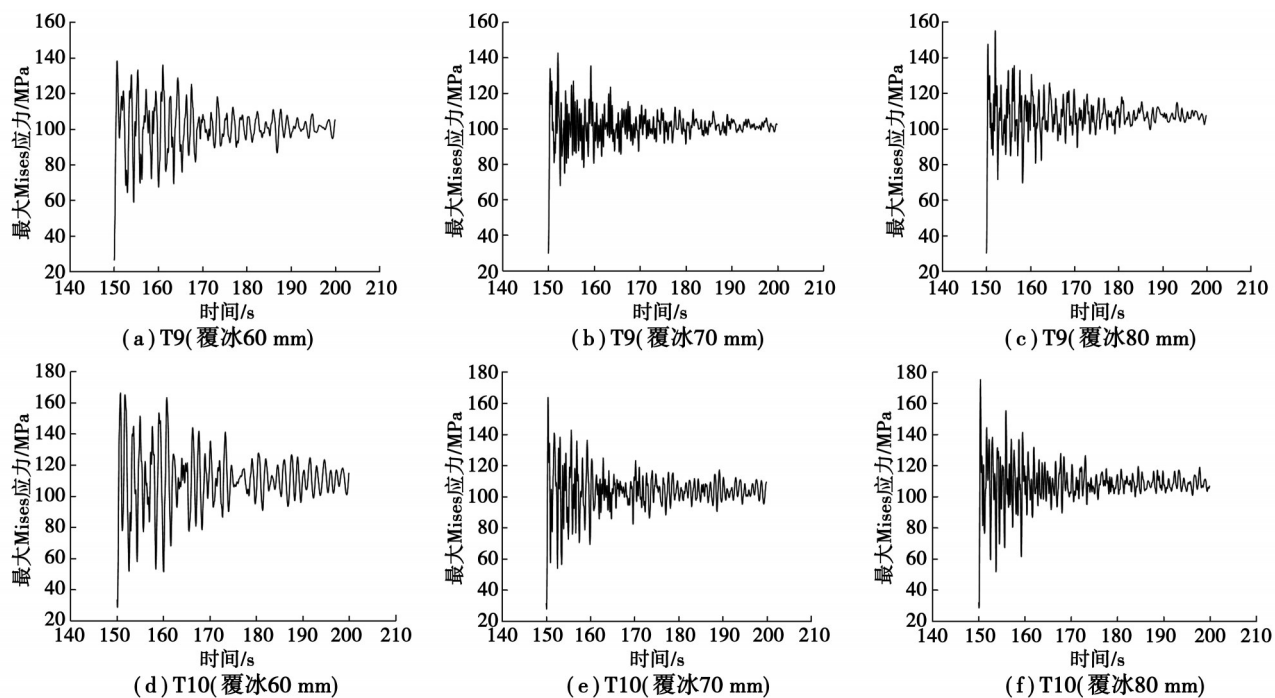


图 4 S9 档 I 极导线脱冰时塔 T9 和 T10 最大应力点处 Mises 应力时程

Fig. 4 Time-histories of Mises stress at the maximum stress point of T9 and T10 at the time of icshedding of the I-pole conductor of S9

2.2 杆塔纵向不平衡张力

导线脱冰后作用于杆塔上的纵向不平衡张力是杆塔强度设计的重要参数。为了计算导线脱冰过程中作用于杆塔上的纵向不平衡张力,假设导线脱冰过程某时刻杆塔两侧导线的张力分别为  $T_1$  和  $T_2$ ,若杆塔两侧导线与杆塔横担垂线之间的转角分别为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,则该时刻杆塔所受纵向不平衡张力为

$$\Delta T = T_1 \cos \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2 \tag{1}$$

对于特重冰区典型特高压直流连续耐张段输电线路,选择 S5 档 I 极导线脱冰,脱冰率 100%,覆冰厚度分别为 60、70、80 mm。计算得到的作用于杆塔上的最大纵向不平衡张力如表 4 所示。表 4 中还给出了杆塔上

最大纵向不平衡张力与导线最大使用张力之比,文中所提到的最大纵向不平衡张力均为导线脱冰后瞬时最大纵向不平衡张力。

按设计手册中规定<sup>[11]</sup>,110 kV 及以上架空输电线路重冰区杆塔强度校核时,对覆冰厚度 50 mm 双分裂及以上线路耐张型杆塔的纵向不平衡张力的取值,应不小于导线最大使用张力的 90%。从表 4 中数据可见,数值模拟得到的导线 60、70、80 mm 覆冰脱冰后的最大纵向不平衡张力与导线最大使用张力之比在范围 90.21%~99.50% 内,大于设计规程中 50 mm 冰区要求的 90%,因此,可以适当增大特重冰区特高压直流线路耐张杆塔纵向不平衡张力的取值。

表 4 特重冰区特高压直流线路导线脱冰时杆塔最大纵向不平衡张力  
Table 4 Maximum longitudinal unbalance tension in tower during ice shedding of UHV DC line in ultra-heavy ice zones

$t/\text{mm}$	杆塔	$\Delta T_{\max}/\text{kN}$	$T_{\text{m}}/\text{kN}$	$\Delta T_{\max}/T_{\text{m}}/\%$
60	T5	107.735	119.429	90.21
	T6	112.292		94.02
70	T5	92.965	95.543	97.30
	T6	94.398		98.80
80	T5	93.830	95.543	98.21
	T6	95.069		99.50

注: $t$ 为覆冰厚度; $\Delta T_{\max}$ 为最大纵向不平衡张力; $T_{\text{m}}$ 为导线最大使用张力( $T_{\text{m}}=T_{\text{d}}/n$ , $T_{\text{d}}$ 为导线综合拉断力; $n$ 为安全系数, $t=60\text{ mm}$ 时, $n=2.8$ ;  $t=70、80\text{ mm}$ 时, $n=3.5$ )。

3 导线脱冰跳跃高度

3.1 特重冰区特高压直流线路导线脱冰跳跃高度

针对图 1 所示的特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路,以单档单极导线脱冰为分析工况,导线均匀覆冰,风速 15 m/s,脱冰档分别为 S1~S9 档,脱冰率为 100%。采用前述方法分别模拟覆冰厚度为 60、70、80 mm 时,塔线体系导线脱冰跳跃动力响应。

图 5 为不同覆冰厚度下 S1 档单极导线脱冰后脱冰档导线中点竖向位移随时间变化曲线,图 6 为各档分别脱冰后脱冰档导线最大冰跳高度随覆冰厚度的变化规律。可见覆冰厚度越大,冰跳高度也越大,档距是影响冰跳高度的主要因素,在该实际线路中,S9 档的档距为 268 m,大于其他档的档距。在相同覆冰厚度下,S9 档导线脱冰时比其档导线脱冰时导线的最大冰跳高度更大。在覆冰厚度 80 mm,脱冰率为 100% 时,S9 档导线脱冰后,其冰跳高度可达到 14.895 m。

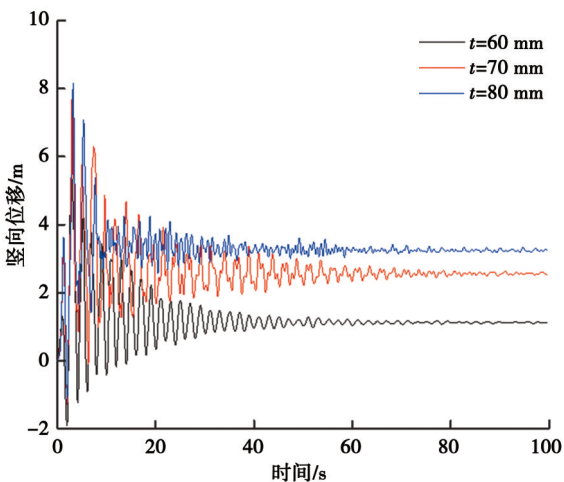


图 5 不同冰厚下塔线体系 S1 档导线脱冰后中点竖向位移时程曲线  
Fig. 5 Vertical displacement curves at the midpoint of the tower line system under different ice thicknesses after ice shedding of S1 conductor

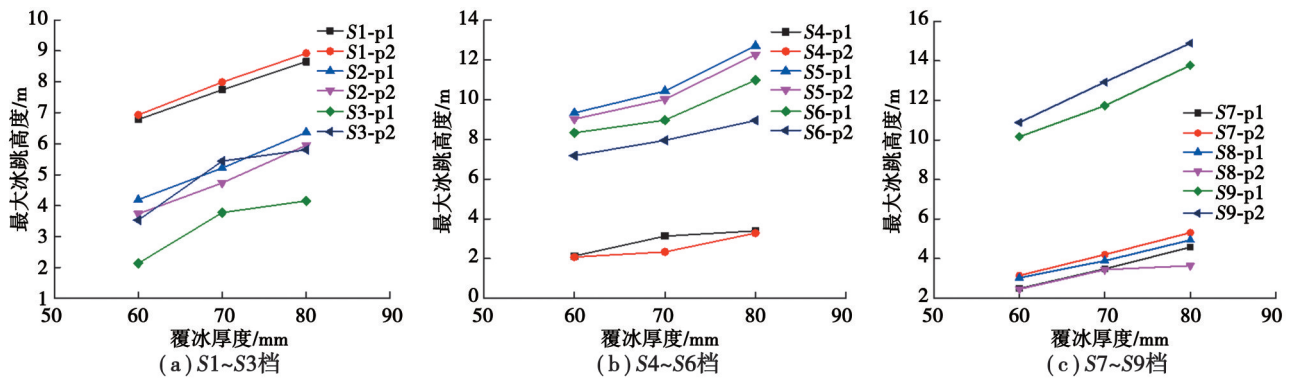


图6 各档分别脱冰后脱冰档导线最大冰跳高度随覆冰厚度的变化

Fig. 6 Variation of maximum jump height with ice thickness of conductor after ice shedding of each span

### 3.2 冰跳高度公式适用性及修正建议

由于特重冰区导地线的覆冰超过 60 mm,在线路设计中没有规范可遵循。这里分析现有冰跳高度计算公式在特重冰区的适用性,并提出计算公式的修正建议。输电线路设计规程<sup>[1]</sup>中利用前苏联提出的式(2)计算脱冰跳跃高度。

$$H = m \Delta f \left( 2 - \frac{L}{1\ 000} \right), \quad (2)$$

式中: $H$ 为导线跳跃幅值,m; $L$ 为档距,m; $m$ 为校正系数,在整档完全脱冰时取 1.0; $\Delta f$ 为导线覆冰及脱冰振动静止后的弧垂差值,m。

Yan 等<sup>[13]</sup>基于输电导线脱冰动力响应数值模拟结果,提出式(3)的脱冰跳跃高度简化计算公式

$$H = k \Delta f, \quad (3)$$

式中: $k=1.82$ ; $\Delta f$ 仍然为导线覆冰及脱冰振动静止后的弧垂差值。该公式是基于冰厚 50 mm 以下导线脱冰动力响应研究基础上提出的。

图 7 为本文中有限元模拟得到的特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路均匀覆冰和脱冰工况下的冰跳高度以及式(3)得到的导线冰跳高度导线脱冰前后弧垂差的关系。从图 7 中可以看出,一方面有限元计算得到的导线冰跳高度在弧垂差较小的时候与式(2)和式(3)的计算值较接近,其他情况下差别明显,有限元模拟值大于公式计算值,故现有公式不适用于特重冰区特高压直流线路导线冰跳高度计算。另一方面,特重冰区特高压直流输电线路导线脱冰高度与脱冰前后导线弧垂差的关系非线性较明显。为了简化计算,对特重冰区特高压直流输电线路导线冰跳高度数据采用式(3)的形式进行拟合,得到系数  $k=2.67$ 。

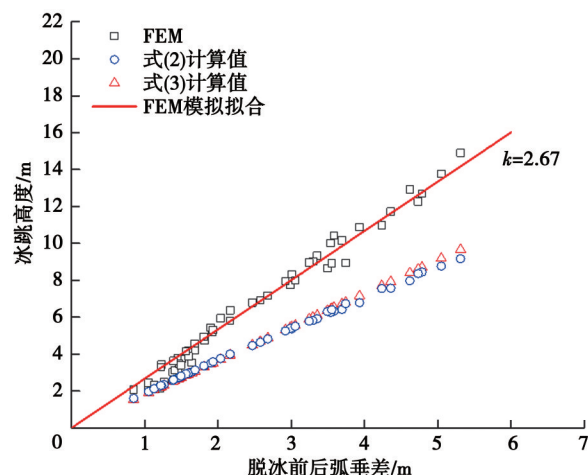


图7 导线冰跳高度与脱冰前后弧垂差的关系

Fig. 7 Relationship between conductor jump height and sag difference before and after ic shedding

## 4 结 论

建立了特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路塔线体系有限元模型,模拟研究了该塔线体系导线脱冰动力响应,分析了导线脱冰过程中杆塔的受力、变形和应力,讨论了导线冰跳高度的计算方法,以及有风荷载作用时导线之间的绝缘间隙。得到以下结论:

1)对于特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路,在所有导线覆冰和脱冰工况下耐张塔的最大 Mises 应力均未超过其对应杆件材料许用应力,强度满足要求。

2)该特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路,导线脱冰过程中杆塔上最大纵向不平衡张力与导线最大使用张力之比均大于重冰线路规范要求的 90%。不同覆冰厚度下 S5 档 I 极导线脱冰时最大纵向不平衡张力与导线最大使用张力之比在 90.21%~99.50% 范围,故对于设计的特重冰区杆塔而言,可以适当增加纵向不平衡张力的取值。

3)特重冰区导线的初始张力较小,导线脱冰后振动非线性明显,有限元模拟得到的特重冰区典型特高压直流连续耐张段线路导线冰跳高度明显大于现有简化公式的计算值,现有公式不再适用于特重冰区特高压直流输电线路。为了简化计算,对特重冰区导线冰跳高度数据进行线性拟合,冰跳高度可以采用公式  $H = k\Delta f$ ,取系数  $k=2.67$ 。要得到满足工程设计普遍适用的导线跳跃高度计算公式,尚需进一步对更大范围线路结构参数条件下导线脱冰动力响应进行研究。

## 参考文献

- [1] Jamaledine A, McClure G, Rousselet J, et al. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA[J]. Computers & Structures, 1993, 47(4/5): 523-536.
- [2] McClure G, Lapointe M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers & Structures, 2003, 81(8/9/10/11): 825-834.
- [3] Roshan Fekr M, McClure G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 1-11.
- [4] 李黎,夏正春,付国祥,等.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, 50, 180.  
Li L, Xia Z C, Fu G X, et al. Ice-shedding induced vibration of a long-span electric transmission tower-line system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 32-34, 50, 180. (in Chinese)
- [5] 李雪,李宏男,黄连壮.高压输电线路覆冰倒塔非线性屈曲分析[J].振动与冲击,2009,28(5): 111-114, 208.  
Li X, Li H N, Huang L Z. Nonlinear buckling analysis of collapsed steel tower for 220kV Guajing iced transmission line[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 111-114, 208. (in Chinese)
- [6] 鲁元兵,楼文娟,李焕龙.输电导线不均匀脱冰的全过程模拟分析[J].振动与冲击,2010,29(9): 47-50, 81, 241.  
Lu Y B, Lou W J, Li H L. Whole process analysis for non-uniform ice shedding of transmission lines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9): 47-50, 81, 241. (in Chinese)
- [7] 杨风利,杨靖波,付东杰,等.塔线系统脱冰跳动力响应分析[J].振动工程学报,2010,23(1): 86-93.  
Yang F L, Yang J B, Fu D J, et al. Analysis on dynamic responses of transmission tower-line system under ice shedding[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(1): 86-93. (in Chinese)
- [8] 姚陈果,张蕾方,张磊,等.架空输电塔-线体系导线风振对脱冰的影响[J].高电压技术,2014,40(2): 381-387.  
Yao C G, Zhang R F, Zhang L, et al. Influence of wind vibration of overhead transmission tower-line system on ice shedding [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 381-387. (in Chinese)
- [9] 刘玥君,张新语,郭峻崧,等.输电线路在冰风荷载作用下的可靠性研究[J].东北电力大学学报,2020,40(5): 63-68.  
Liu Y J, Zhang X Y, Guo J S, et al. Study on the reliability of electric transmission line under ice load and wind load[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40(5): 63-68. (in Chinese)
- [10] Li J X, Wang B, Sun J, et al. Collapse analysis of a transmission tower-line system induced by ice shedding[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 712161.
- [11] 张殿生.电力工程高压送电线路设计手册[M].2版.北京:中国电力出版社,2003.  
Zhang D S. Design manual for high voltage transmission lines in power engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power

- Press, 2003. (in Chinese)
- [12] 李梦丽, 柏晓路, 李清, 等. 大截面导线重覆冰区不均匀冰纵向荷载特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 183-188.  
Li M L, Bai X L, Li Q, et al. Analysis on longitudinal load of uneven ice-shed for large cross-section conductor in heavy icing area[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 183-188. (in Chinese)
- [13] Yan B, Chen K Q, Guo Y M, et al. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 216-225.
- [14] 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.  
Yan B, Guo Y M, Chen K Q, et al. Formula for jump height of overhead transmission lines after ice-shedding[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1306-1310. (in Chinese)
- [15] 王德千, 严波, 黄桂灶, 等. 输电导线脱冰跳跃高度实用简化计算公式[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(2): 60-67.  
Wang D Q, Yan B, Huang G Z, et al. Simplified formula for jump height of transmission lines after ice-shedding[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(2): 60-67. (in Chinese)
- [16] Barbieri N, de Souza Júnior O H, Barbieri R. Dynamical analysis of transmission line cables. Part 1: linear theory[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(3): 659-669.
- [17] Barbieri N, de Souza Júnior O H, Barbieri R. Dynamical analysis of transmission line cables. Part 2: damping estimation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(3): 671-681.
- [18] Barbieri R, Barbieri N, de Souza O H Jr. Dynamical analysis of transmission line cables. Part 3: nonlinear theory[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(4): 992-1007.

(编辑 郑 洁)