

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.264

引用格式:刘沁雨,严波,吴楷文,等.不均匀覆冰导线脱冰塔线体系动力响应特征参数[J].重庆大学学报, 2025,48(10): 20-33.



不均匀覆冰导线脱冰塔线体系动力响应特征参数

刘沁雨¹,严波¹,吴楷文¹,杨寒旭¹,鲁俊²,梁明³,刘炯³

(1. 重庆大学 航空航天学院,重庆 400044; 2. 国网经济技术研究院有限公司,北京 100000;

3. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,成都 610000)

摘要:覆冰厚度随海拔高度变化导致导线上覆冰不均匀。给出导线覆冰厚度随高度变化和部分脱冰模型,利用附加单元法实现导线不均匀覆冰和脱冰塔线体系动力响应数值模拟方法。建立 500 kV 四分裂线路典型孤立档和连续档塔线耦合体系有限元模型,研究导线不均匀覆冰脱冰后塔线体系的动力响应特征,分析杆塔载荷冲击系数、导线最大挂点支反力、纵向不平衡张力、脱冰跳跃高度等特征参数随线路档距、高差比和覆冰厚度的变化规律,以及极端情况下杆塔的应力和强度,为不均匀覆冰冰区输电杆塔塔头设计提供重要的依据。

关键词:输电塔线耦合体系;不均匀覆冰;脱冰;动力响应特征参数;数值模拟

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)10-020-14

Dynamic response characteristics of tower-line systems after ice-shedding from conductors with non-uniform icing

LIU Qinyu¹, YAN Bo¹, WU Kaiwen¹, YANG Hanxu¹, LU Jun², LIANG Ming³, LIU Jiong³

(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 100000, P. R. China; 3. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610000, P. R. China)

Abstract: Variation in ice thickness with altitude results in a non-uniform icing distribution on conductors. This study defines non-uniform icing and ice-shedding conditions and employs an additional element method to numerically simulate the dynamic response of tower-line systems after ice-shedding from conductors with non-uniform icing. Finite element models of typical isolated and multi-span tower-line coupling systems for 500 kV quad-bundle transmission lines are established, and their dynamic responses are analyzed. The variation patterns of characteristic parameters, including load impact factors, maximum reaction forces at connection points, longitudinal unbalanced tension, and de-icing jump height, with respect to line span, elevation difference ratio,

收稿日期:2024-03-03 网络出版日期:2024-06-12

基金项目:国家电网公司科技项目(5200-202126072A-0-0-00)。

Supported by Science & Technology Program of State Grid Corporation of China (5200-202126072A-0-0-00).

作者简介:刘沁雨(1997—),男,硕士研究生,主要从事输电线路结构力学问题等方面的研究,(E-mail)498497124@qq.com。

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

and icing thickness are examined under varying structural, icing, and ice-shedding parameters. The strength of towers under extreme conditions is also analyzed. The obtained results provide critical guidance for the design of transmission tower heads in ice-prone regions.

Keywords: transmission tower-line coupling system; non-uniform icing; ice-shedding; dynamic response; numerical simulation

冰区输电线路导线脱冰可能导致电气绝缘间隙不足和结构构件受力过大,引发线路跳闸、导线和金具烧蚀、杆塔倒塌等事故。现场观测发现导线上覆冰厚度随海拔高度增大,在导线上形成厚度不均匀的覆冰^[1-2],这种不均匀覆冰导线脱冰引起的事故更为明显。2023年底至2024年初中国异常天气导致大面积输电线路覆冰脱冰事故频发,严重威胁线路的安全运行,迫切需要对导线不均匀覆冰脱冰情况下塔线体系动力响应特征进行深入研究。

采用有限元法数值模拟研究导线脱冰动力响应问题已受到广泛关注。Roshan Fekr等^[3]最早采用ADINA有限元结构分析软件对两档导线脱冰过程进行了数值模拟,研究了不同档距、高差、档数、覆冰厚度和脱冰位置的影响。Yan等^[4]采用ABAQUS软件对不同线路结构参数和脱冰载荷下的导线脱冰动力响应进行了数值模拟,并基于数值模拟结果给出了脱冰跳跃高度的工程实用简化计算公式。王德千等^[5]系统研究了大档距大高差线路脱冰动力响应,并修正了导线脱冰跳跃高度计算公式。张建等^[6]建立了绝缘子串-六分裂导线模型,分析了均匀覆冰、三段覆冰、线性覆冰和高处覆冰等情况下导线弧垂变化及其脱冰动力响应。王昕等^[7]数值模拟了多档导线不均匀脱冰下档中点位移和导线张力随时间的变化。杨春侠等^[8]建立了连续三档绝缘子串-导线有限元模型,定义覆冰段位置、长度和基本冰厚3个特征参数来表征不均匀覆冰,考虑档内不同位置局部覆冰,分析导线脱冰动力响应,研究各参数对最大冰跳高度和最大不平衡张力的影响规律。但以上工作在考虑不均匀覆冰时都基于人为假设,没有依据现场观测数据考虑导线覆冰厚度在档内随高度连续变化的不均匀性,也没有考虑导线脱冰时塔线之间的耦合影响。

Yang等^[9]建立了某500 kV输电线路塔线体系有限元模型,考虑了塔线耦联效应、不同相导线脱冰和覆冰厚度的影响,分析了绝缘子末端负载和杆塔的受力等。杨风利等^[10]模拟研究了输电塔线体系在导线不同覆冰和脱冰情况下的动力响应,分析了脱冰过程中不平衡张力对杆塔的影响。程皓月^[11]采用有限元方法研究了塔线体系在重冰、脱冰、断线情况下的安全性。姚陈果等^[12]以某耐张段线路山顶杆塔为对象,考虑杆塔两侧导地线覆冰厚度不同,用有限元方法模拟研究了塔线体系导线脱冰动力响应。张瑚等^[13]探究了中冰区塔线体系导线不均匀脱冰跳跃特性,以及脱冰位置、脱冰率、脱冰方式、覆冰厚度、档距等因素对冰跳高度的影响,并给出了导线冰跳高度工程实用计算公式。万小东等^[14]模拟研究了导线不同脱冰档数、脱冰时间和阻尼比对塔线体系动力响应的影响。Wen等^[15]利用有限元软件建立了三塔两档塔线体系模型,对比分析了两档相同和不同覆冰厚度情况下杆塔的受力特性。尽管上述工作研究了导线脱冰对塔线耦合体系的影响,但均没有考虑同一档内导线覆冰厚度随高度连续变化的不均匀性。

笔者根据现场观测结果,给出导线不均匀覆冰和脱冰模型,研究导线不均匀覆冰和脱冰塔线体系数值模拟方法。针对500 kV四分裂线路孤立档和连续档线路,利用ABAQUS有限元软件数值模拟导线不均匀覆冰脱冰时塔线体系动力响应,研究杆塔载荷冲击系数、导线最大挂点支反力、纵向不平衡张力和冰跳高度等动力响应特征参及其随线路结构参数和覆冰脱冰参数的变化规律,对不均匀覆冰冰区超高压输电线路杆塔塔头设计具有重要的指导意义。

1 导线覆冰及脱冰模型

1.1 导线不均匀覆冰和脱冰模拟

在中国输电线路设计规范^[16]和IEC标准^[17]中,均给出导线设计冰厚简化计算公式,考虑导线高度的影响,

但覆冰厚度计算公式仅用于计算特定区域导线的设计冰厚,均不考虑冰厚沿档的变化。最近,现场观测发现导线上覆冰厚度随海拔高度增大,在导线上形成厚度不均匀的覆冰。杨亚东^[1]和李清华等^[2]利用对重庆东南部和山西省实际输电线路上覆冰厚度随海拔高度变化的观测数据,得到如图1所示的拟合曲线,覆冰厚度 t 随海拔高度的指数变化公式分别为

$$t = 1.6809e^{0.0019a}, \quad (1)$$

$$t = 1.067e^{0.0012a}, \quad (2)$$

式中: a 为海拔高度,m。由于在一档内高差变化有限,可以采用线性公式式(3)近似覆冰厚度随导线离地高度的变化。

$$t_i = \frac{t_U - t_L}{h} h_i + t_L, \quad (3)$$

式中: t_i , t_L 和 t_U 分别代表在导线上的任意点 i 、导线低端和高端的覆冰厚度; h 为高差, h_i 为导线上 i 点与低端的竖直距离,若导线上 i 点位置低于导线低端位置, h_i 可为负值,覆冰厚度可能小于低端的覆冰厚度,参见图2(a)。线路无高差时档内覆冰厚度无变化,为均匀覆冰。这种处理方式实际上是用分段线性去近似图1所示曲线。因此,只要知道档内导线两端的覆冰厚度,即可通过式(3)得到导线上任一点的覆冰厚度。

由式(1)(2)可知,因地域和气象条件不同,公式中的指数系数差别明显。然而,从工程设计的角度,可以根据设计线路经过冰区的地域和气象条件确定式(3)中最低和最高点的覆冰厚度。

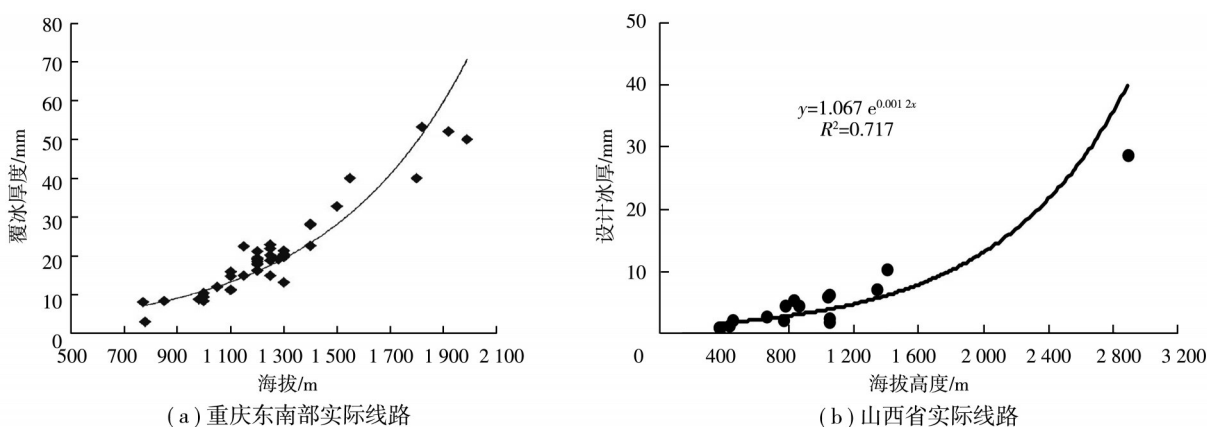


图1 导线覆冰厚度随海拔高度变化实测数据及曲线拟合

Fig. 1 Measured data and curve fitting of ice thickness varying with altitude

为了模拟部分脱冰和整档脱冰,在文献[18]的基础上给出导线不同脱冰情况的描述方式。如图2(b)所示,用脱冰长度 L_s 和脱冰位置 O_s 作为脱冰参数。其中, L_s 为脱落的冰在沿线路方向 x 轴的投影长度,而 O_s 代表了该投影的中点位置到导线左端的水平距离。通过参数 L_s 和 O_s 的变化来反映不同的脱冰方式。

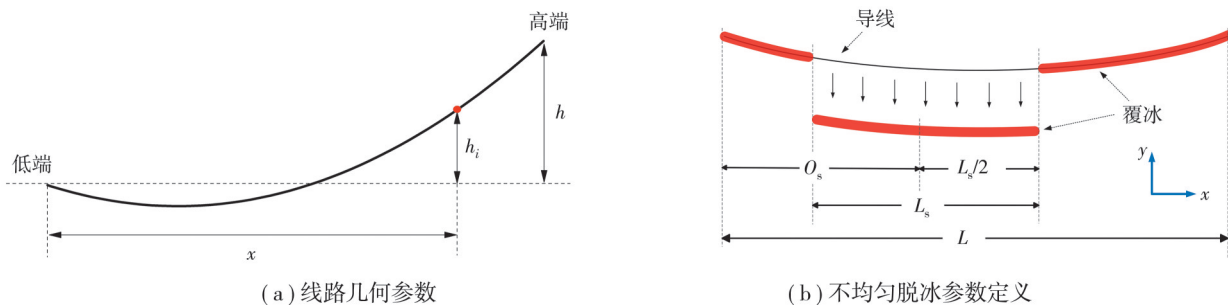


图2 线路几何参数及脱冰参数定义

Fig. 2 Geometric parameters of a transmission line and definitions of ice-shedding parameters

1.2 导线覆冰及脱冰模型

采用附加单元法模拟导线上的不均匀覆冰和脱冰。在 ABAQUS 中建立相互平行且共节点的 2 层单元分别模拟导线和覆冰,导线采用空间梁单元模拟,覆冰用空间管单元模拟,如图 3(a)所示。根据 1.1 节中定义的不均匀覆冰规律,导线沿档不同位置覆冰厚度不同,可以通过对导线沿档不同位置处覆冰单元的截面厚度变化来模拟不均匀覆冰。不均匀覆冰单导线有限元模型如图 3(b)所示,该方法同样适用于均匀覆冰的情况。模拟导线部分脱冰时,根据脱冰段长度和位置删除相应的模拟覆冰的单元即可。当整档导线脱冰时则删除所有覆冰单元。

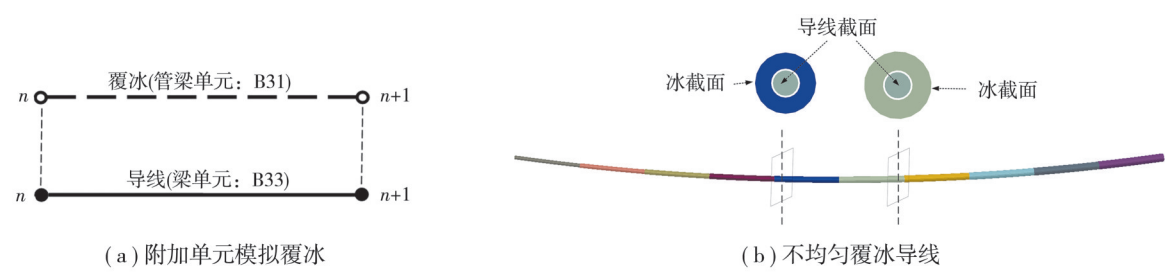


图 3 覆冰导线有限元模型
Fig. 3 Finite element model of iced conductor

2 导线脱冰塔线体系动力响应特征参数

2.1 塔线体系有限元模型

500 kV 四分裂线路使用的耐张塔型号为 JBB461,直线塔型号为 ZBB461。杆塔所有的杆件均为 L 型钢,构件材料分别为 Q235、Q345 和 Q420。线路所用导地线型号及参数如表 1 所示。

表 1 500 kV 四分裂线路导地线参数
Table 1 Parameters of conductor and ground wires of 500kV quad bundle lines

导地线型号	使用线路	外径/mm	截面积/mm	线重/(kg·m ⁻¹)	弹性模量/GPa
导线 JL/G1A-630/45	孤立档	33.80	674.00	2.08	63.00
导线 JL/G1A-500/45	连续档	30.00	531.68	1.69	65.00
地线 JLB20A-120	孤立档和连续档	14.25	121.21	0.81	147.20

在建立导地线的有限元模型时,按导线的计算截面积将其等效为实心圆截面梁模型,采用空间梁单元进行离散。为满足单元收敛要求,单元尺寸取 0.5 m。忽略空气动力阻尼,只考虑结构阻尼,采用瑞利阻尼模型。文献^[19-20]讨论了导线和覆冰导线阻尼比的取值,裸导线阻尼比取临界阻尼的 0.5%,覆冰导线、地线取 2%。

绝缘子串、间隔棒和线夹等金具简化为杆件和框架结构,这些构件的杨氏模量和泊松比均分别取 200 GPa 和 0.3。耐张绝缘子串与耐张塔挂点连接处约束平动自由度和扭转自由度,绕横担轴线可以转动。悬垂绝缘子串与直线塔悬挂点连接处约束 3 个方向的平动自由度,采用 Join+Rotation 连接单元。绝缘子串、间隔棒和线夹与导线之间均固定约束,采用 Beam 连接单元连接。四分裂线路中三相导线采用 I 型悬垂串与直线杆塔连接。孤立档采用 3 档 2 塔模型,其中的 2 个杆塔均为耐张塔;连续档线路以 7 档 6 塔模型为代表连续档模型。典型四分裂线路塔线体系有限元模型如图 4 所示。

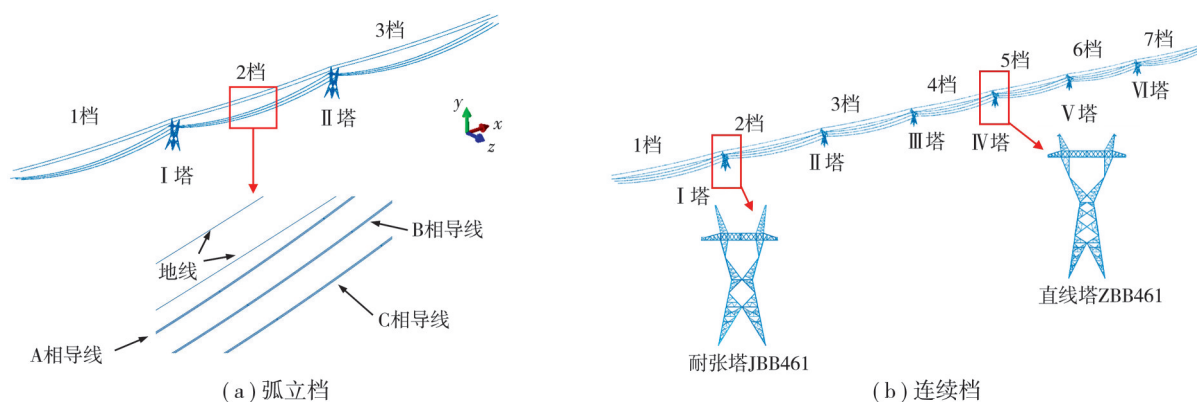


图4 典型500 kV四分裂线路塔线体系有限元模型

Fig. 4 Finite element models of typical 500 kV quad bundle line tower-line system

2.2 动力响应特征参数

冰区线路设计时需要考虑电气绝缘性和结构强度,因此,需要关注导线脱冰后的最大冰跳高度、绝缘子串作用于挂点处的最大支反力、导线作用于杆塔上的载荷冲击系数以及作用于杆塔上的不平衡张力等动力响应特征参数。不均匀覆冰情况下导线脱冰后的最大冰跳高度可能不发生在档距中点。为获得导线最大冰跳高度,在脱冰档导线上均匀设置39个位移测点。

导线脱冰后绝缘子串与塔体连接处的最大支反力,是杆塔强度设计需要考虑的参数之一。由于连续档线路中包含直线塔和耐张塔两类塔线,不同杆塔挂点最大支反力需要分别考虑。用下标s和t分别表示直线塔和耐张塔,下标x,y,z分别代表顺线路纵向、竖直方向和横向支反力分量。

导线脱冰过程中耐张绝缘子串在杆塔上挂点处会产生冲击载荷,杆塔设计时需考虑导线脱冰时产生的冲击效应。为此,定义导线脱冰时导线对杆塔产生的载荷冲击系数

$$\alpha = \frac{F_m}{F_s}, \quad (4)$$

式中: F_s 为导线覆冰后杆塔上挂点处支反力; F_m 为导线脱冰过程中挂点的最大支反力。连续档线路在导线覆冰静载荷作用下沿线路方向(x方向)悬垂绝缘子串支反力 F_s 通常很小,在均匀覆冰时几乎为零。导线脱冰后作用于杆塔沿线路方向(x方向)的冲击效应采用纵向不平衡张力反映。

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,假设某时刻杆塔两侧导线的纵向张力分别为 T_1 和 T_2 ,杆塔两侧导线与杆塔横担垂线之间的转角分别为 α_1 和 α_2 ,则此时刻杆塔所受纵向不平衡张力为

$$\Delta T = T_1 \cos \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2. \quad (5)$$

杆塔设计时需要确定导线脱冰过程中的最大纵向不平衡张力。

2.3 不均匀和均匀覆冰脱冰响应比较

为了研究导线不均匀覆冰与均匀覆冰脱冰时塔线体系动力响应的差异,以四分裂孤立档线路为例,模拟分析2种情况下塔线体系的动力响应。该孤立档线路档距为400 m,高差比为0.3,耐张塔无转角。子导线的初始应力为27 MPa,无风荷载作用。不均匀覆冰时导线低端冰厚为10 mm,高端冰厚为30 mm,控制均匀覆冰与不均匀覆冰的覆冰总质量相等,计算得到均匀覆冰的等效冰厚为18 mm。选择典型的脱冰工况,脱冰长度 L_s 取 $0.6L$,脱冰位置 O_s 分别取 $0.3L$ 和 $0.6L$ 。

均匀和不均匀覆冰情况下导线脱冰塔线体系动力响应特征参数如表2所示。可以看出,脱冰位置 O_s 为 $0.3L$ 时,导线不均匀覆冰时导线脱冰后的最大冰跳高度比均匀覆冰时大了21.2%,最大支反力和冲击系数都比均匀覆冰时大1.8%~6.6%;脱冰位置 O_s 为 $0.6L$ 时,导线不均匀覆冰时导线脱冰后的最大纵向不平衡张力比均匀覆冰时大了7.8%。说明在覆冰总质量相等的情况下,不均匀覆冰脱冰比均匀覆冰脱冰的情况更危险,

值得深入研究。

表 2 孤立档线路导线均匀和不均匀覆冰典型脱冰情况下特征参数
Table 2 Parameters after ice-shedding from conductors with uniform and non-uniform icing

脱冰位置 O_s	覆冰情况	最大冰跳 高度/m	最大冰跳高 度出现位置	F_{tx}/kN	F_{ty}/kN	α_x	α_y	最大纵向不平 衡张力/kN
0.3L	不均匀覆冰	3.15	0.325L	176.85	105.84	1.14	1.14	91.14
	均匀覆冰	2.60	0.275L	171.54	99.25	1.07	1.12	115.36
0.6L	不均匀覆冰	1.42	0.525L	160.32	92.83	1.03	1.00	124.23
	均匀覆冰	2.01	0.700L	164.49	88.28	1.02	1.00	115.24

3 导线脱冰塔线体系动力响应及杆塔强度

3.1 典型线路覆冰及脱冰工况

针对 500 kV 四分裂孤立档和连续档导线模型,进行了不均匀覆冰脱冰动力响应参数分析^[21-22]。由结果可知,孤立档支反力较大的脱冰工况为脱冰长度 L_s 为 0.5L,脱冰位置 O_s 为 0.25L 的部分脱冰,连续档支反力较大的脱冰工况为脱冰长度 L_s 为 1.0L,脱冰位置 O_s 为 0.5L,即整档脱冰。因此,选择塔线体系的典型计算工况如表 3 所示。考虑 400~800 m 档距范围,最大高差比 0.3,不考虑风载荷。对于均匀覆冰的情况,各档导线和地线的覆冰厚度都相同;对于不均匀覆冰情况,表 3 中给出的是中间档导线低端和高端覆冰厚度 t_L 和 t_U ,其他档的覆冰厚度按不均匀覆冰计算方法确定,且仅考虑中间档导线脱冰。

表 3 典型塔线体系线路结构及覆冰和脱冰参数
Table 3 Structural parameters of typical tower-line system and icing and ice-shedding parameters

模型	档距/m	初始应/MPa	高差比	覆冰厚度/mm		脱冰长度	脱冰位置
				t_L	t_U		
孤立档	400	27.0	0.3	20	20, 30, 40	0.5L	0.25L
	600	27.0	0, 0.15, 0.3	20,30	30	0.5L	0.25L
	800	27.0	0.3	20,30	30	0.5L	0.25L
	800	27.0	0.3	30	30	0.6L	0.3L
连续档	400	33.32	0, 0.15, 0.3	15, 20, 30	30	1.0L	0.5L
	500	32.75	0.3	30	30	1.0L	0.5L
	600	32.44	0.3	15	30	1.0L	0.5L
	800	32.62	0.3	15,30	30	1.0L	0.5L

3.2 孤立档导线脱冰特征参数分析

在本节中,对 500 kV 四分裂线路不同档距和高差孤立档塔线体系在导线不同覆冰和脱冰情况下的动力响应参数进行分析。

3.2.1 档距的影响

孤立档在高差比为 0.3、档距分别为 400、600、800 m 时,对导线脱冰塔线体系动力响应进行数值模拟。考虑导线两端冰厚 t_L 和 t_U 分别为 20 mm 和 30 mm 不均匀覆冰和冰厚 30 mm 均匀覆冰 2 种情况。脱冰长度 L_s 为 0.5L,脱冰位置 O_s 为 0.25L,无风荷载作用。导线脱冰后塔线体系各特征参数随档距的变化如图 5 所示。可见,不均匀覆冰和均匀覆冰情况下,最大冰跳高度、竖直方向最大支反力 F_y 和最大纵向不平衡张力随档距的增大而增加,而纵向最大支反力 F_x 和载荷冲击系数随档距的增加而减少。

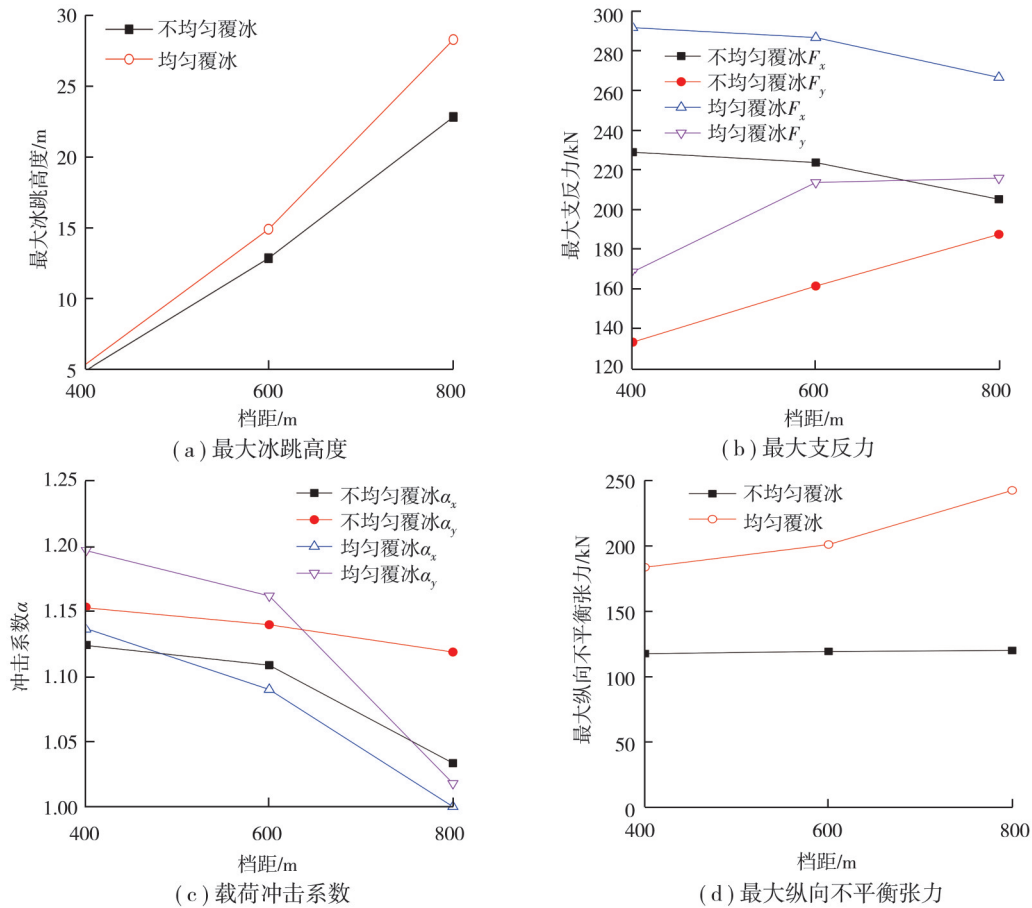
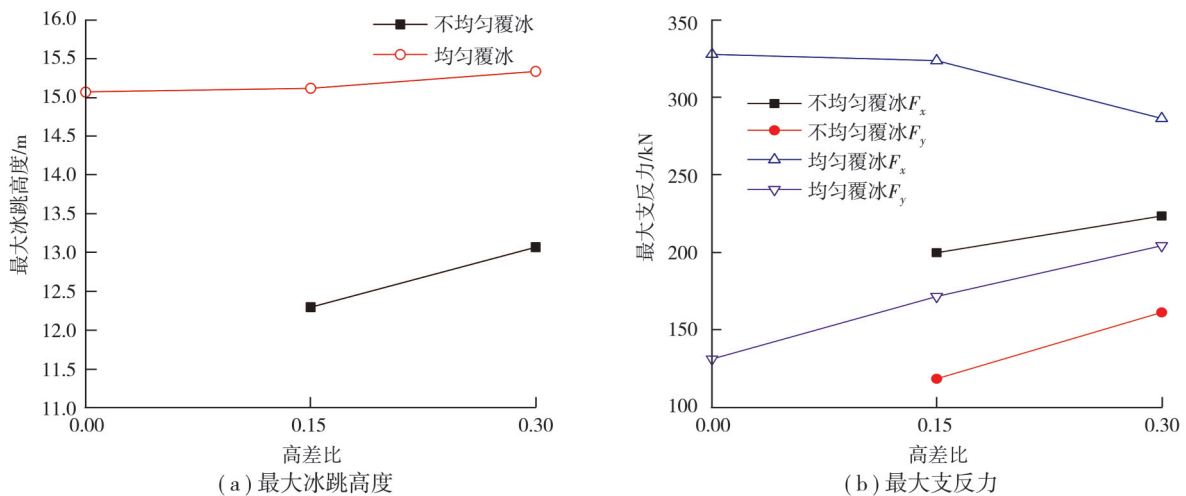


图5 500 kV四分分裂孤立档塔线体系导线脱冰动力响应参数随档距的变化

Fig. 5 Variations of dynamic response parameters of 500 kV quad-bundle isolated tower-line system after ice-shedding from conductors with span length

3.2.2 高差比的影响

孤立档在档距600 m、高差比分别为0、0.15、0.3时,对导线脱冰塔线体系动力响应进行模拟研究。考虑导线两端冰厚 t_L 和 t_U 分别为20 mm和30 mm不均匀覆冰和冰厚30 mm均匀覆冰2种情况。脱冰长度 L_s 为 $0.5L$,脱冰位置 O_s 为 $0.25L$ 。根据1.1节冰厚定义,线路无高差时为均匀覆冰,所以高差比为0时仅有均匀覆冰情况。导线脱冰塔线体系动力响应各特征参数随高差比的变化如图6所示。可见,不均匀覆冰时最大冰跳高度、最大挂点支反力、冲击系数 α_x 和纵向不平衡张力随高差比增加而增加;均匀覆冰时最大冰跳高度变化不明显,最大纵向支反力 F_x 、冲击系数和最大纵向不平衡张力随高差比的增加而减小。



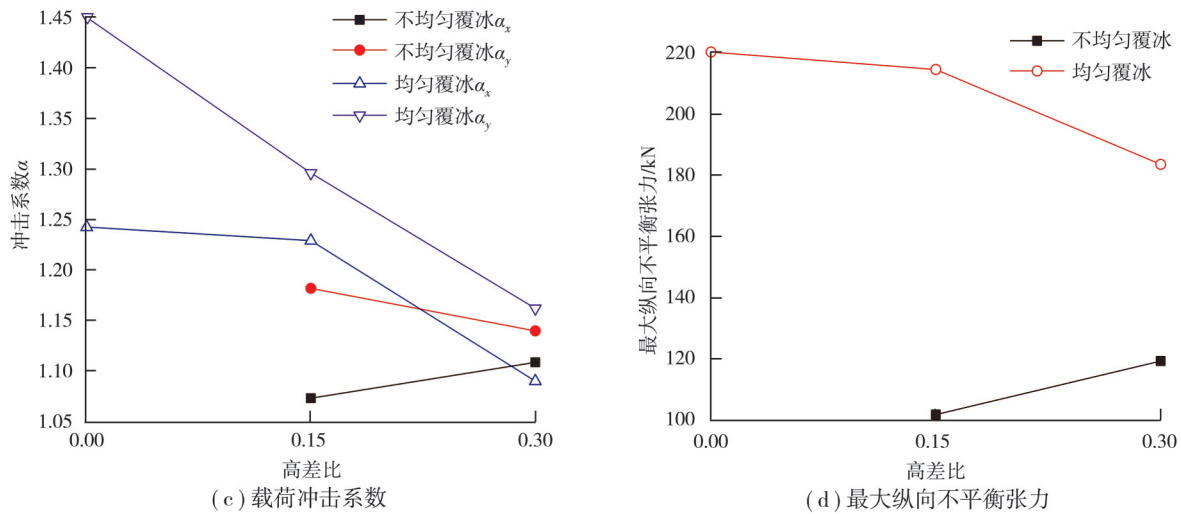


图 6 500 kV 四分裂孤立档塔线体系脱冰动力响应参数随高差比的变化

Fig. 6 Variations of dynamic response parameters of 500 kV quad-bundle isolated tower-line system after ice-shedding from conductors with elevation difference ratio

3.2.3 覆冰厚度的影响

孤立档在档距分别为 400 m、高差比 0.3 时,对不同覆冰厚度导线脱冰塔线体系动力响应进行模拟研究。导线低端冰厚 t_l 为 20 mm,改变线路高端冰厚 t_h 分别为 20、30、40 mm。脱冰长度 L_s 为 $0.5L$,脱冰位置 O_s 为 $0.25L$ 。导线脱冰塔线体系动力响应各特征参数随冰厚的变化如图 7 所示。可见,最大冰跳高度、最大挂点支反力和最大纵向不平衡张力均随冰厚增加而增加,载荷冲击系数随冰厚增加而减小。

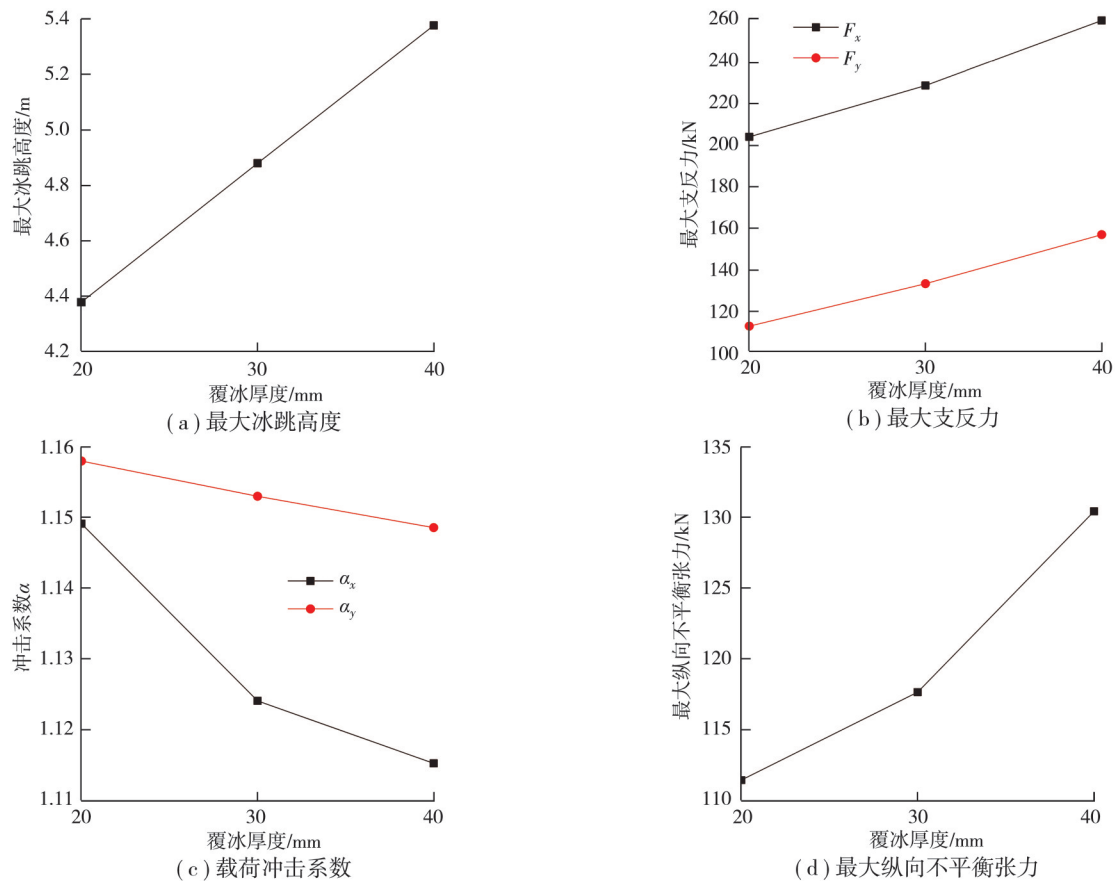


图 7 500 kV 四分裂孤立档塔线体系脱冰动力响应参数随覆冰厚度的变化

Fig. 7 Variations of dynamic response parameters of 500 kV quad-bundle isolated tower-line system after ice-shedding from conductors with ice thickness

3.3 连续档导线脱冰特征参数分析

在本节中,对 500 kV 四分裂连续档线路在中间档导线不同覆冰脱冰情况下塔线体系的动力学响应参数进行分析。

3.3.1 档数的影响

在档距 400 m、高差比 0.3 时,对不同档数线路中间档导线脱冰塔线体系动力响应进行模拟研究。分别建立 5 档 4 塔、7 档 6 塔、9 档 8 塔模型,假设所有档导线 20 mm 均匀覆冰,中间档整档脱冰。导线脱冰塔线体系动力响应各特征参数随档数变化如图 8 所示。可见,各项特征参数随档数变化不大,且 7 档和 9 档的结果非常接近。因此,后面选择 7 档 6 塔线路为代表性连续档线路进行研究。

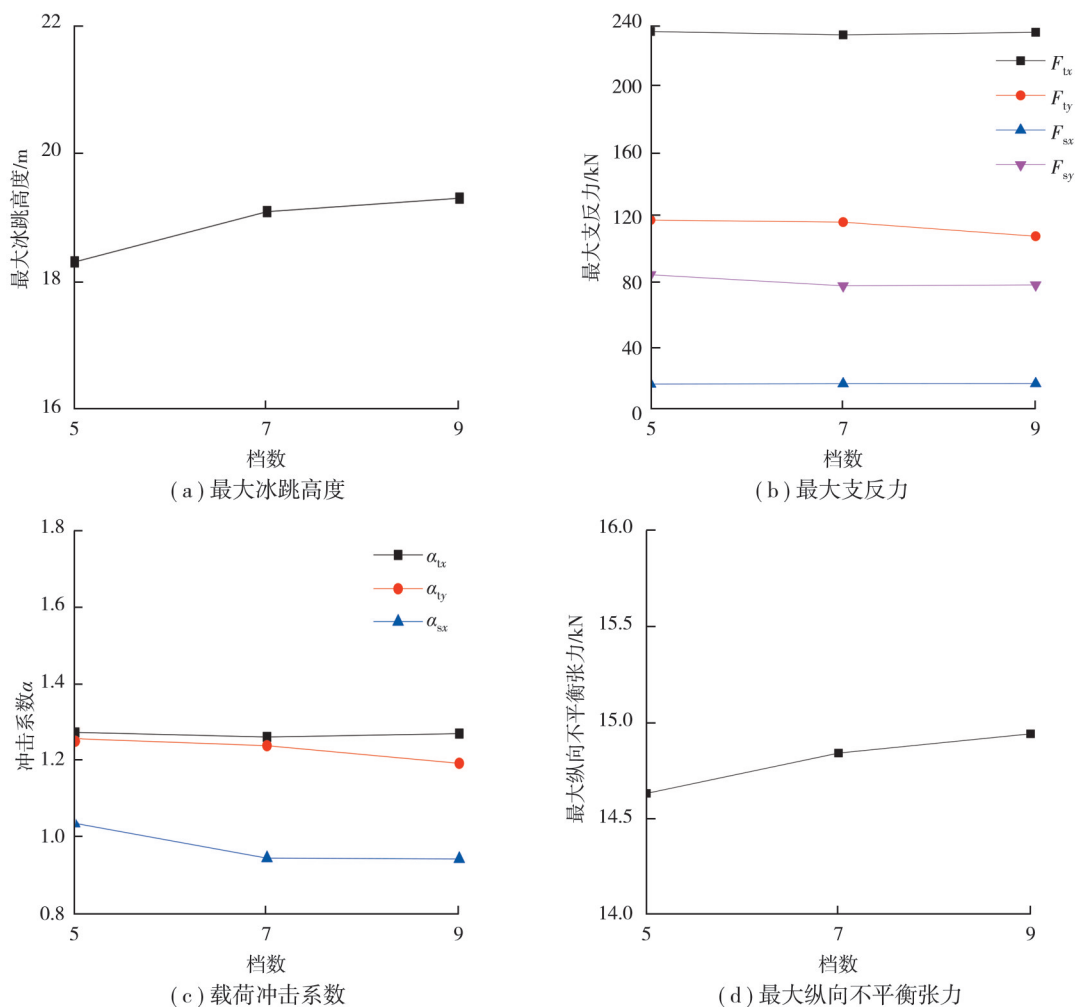


图 8 500 kV 四分裂连续档塔线体系脱冰动力响应参数随档数的变化

Fig. 8 Variations of dynamic response parameters of 500 kV quad-bundle multi-span tower-line system after ice-shedding from conductors with number of spans

3.3.2 档距的影响

在高差比 0.3、档距分别为 400、600、800 m 时,对连续档导线中间档脱冰塔线体系动力响应进行模拟研究。线路两端冰厚 t_L 和 t_U 分别为 15 mm 和 30 mm 不均匀覆冰。整档脱冰,无风荷载作用。各动力响应特征参数随档距变化如图 9 所示。可见,载荷冲击系数随档距的增加而减少,最大冰跳高度、最大挂点支反力和最大纵向不平衡张力均随档距的增大而增加。

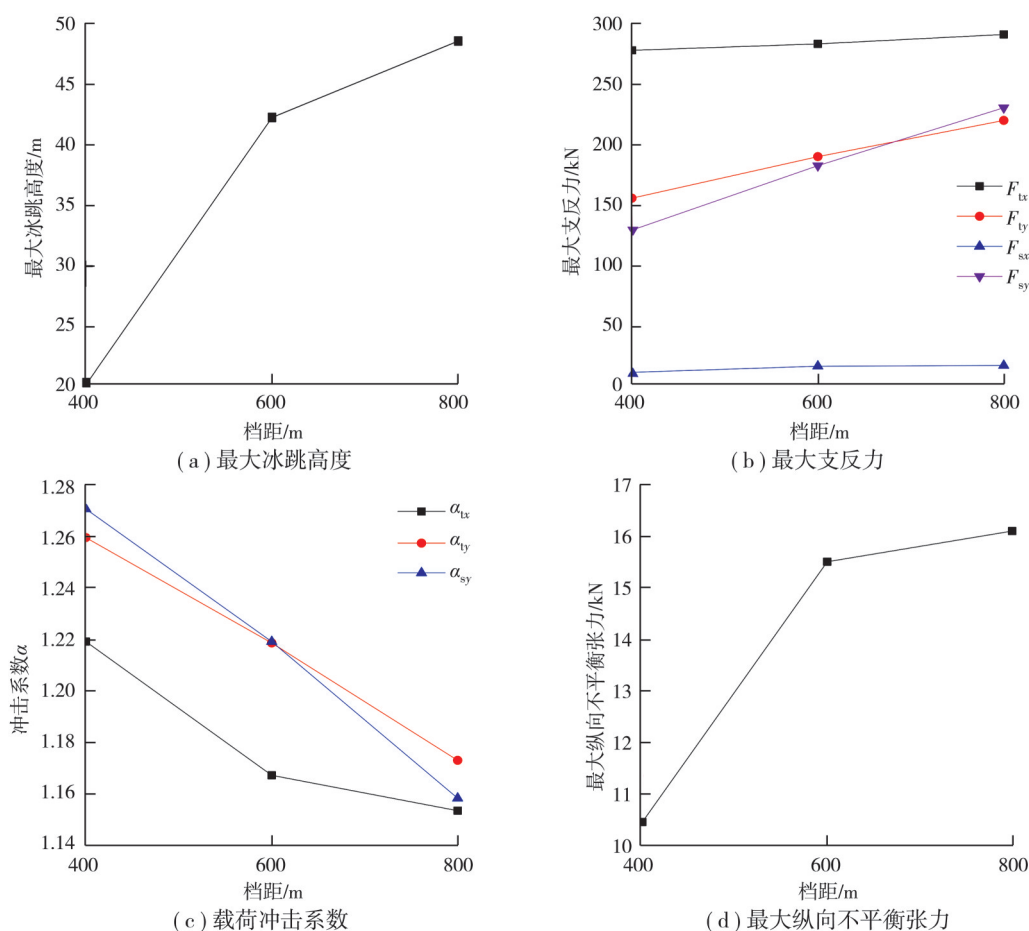
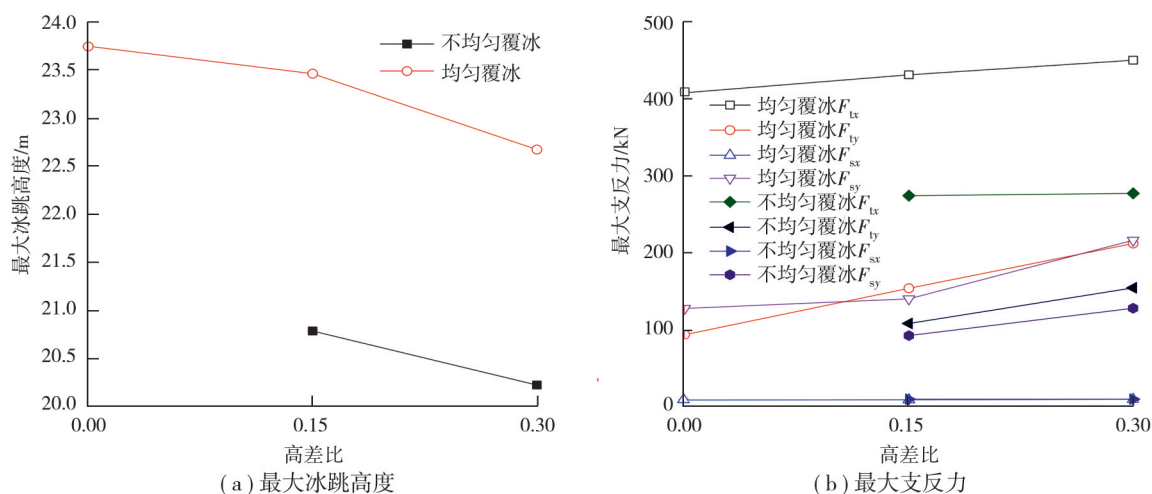


图 9 500 kV 四分裂连续档塔线体系脱冰动力响应参数随档距的变化

Fig. 9 Variations of dynamic response parameters of 500 kV quad-bundle multi-span tower-line system after ice-shedding from conductors with span length

3.3.3 高差比的影响

在档距为 400 m、高差比分别为 0、0.15、0.3 时,对中间档导线脱冰塔线体系动力响应进行模拟研究。考虑导线两端冰厚 t_L 和 t_0 分别为 15 mm 和 30 mm 不均匀覆冰和冰厚 30 mm 均匀覆冰 2 种覆冰情况,脱冰工况为中间档整档脱冰。各动力响应特征参数随高差比的变化如图 10 所示。可见,最大冰跳高度随高差比增加而减小;最大挂点支反力随高差比增大而增加。最大纵向不平衡张力随高差比的增大而增大。均匀覆冰时耐张塔载荷冲击系数 α_{tx} 、直线塔载荷冲击系数 α_{sx} 、不均匀覆冰时直线塔冲击系数 α_{sy} 随高差比增大而增加,其余载荷冲击系数随高差比的增大而减小。



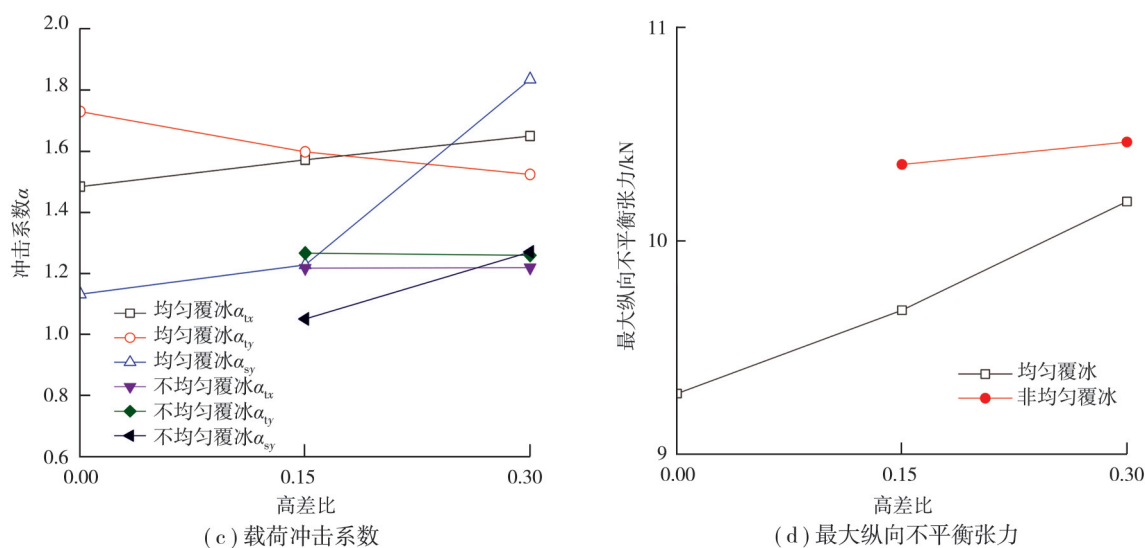


图 10 500 kV 四分裂连续档塔线体系脱冰动力响应参数随高差比的变化

Fig. 10 Variations of dynamic response parameters of 500 kV quad-bundle multi-span tower-line system after ice-shedding from conductors with elevation difference ratio

3.3.4 覆冰厚度的影响

在档距 400 m、高差比 0.3 时,对不同冰厚导线中间档导线脱冰塔线体系动力响应进行模拟研究。导线高端冰厚 t_0 为 30 mm,改变导线低端冰厚 t_L 分别为 15、20、30 mm,中间档导线整档脱冰。各动力响应特征参数随档距变化如图 11 所示。可见,各特征参数均随覆冰厚度的增加而增大。

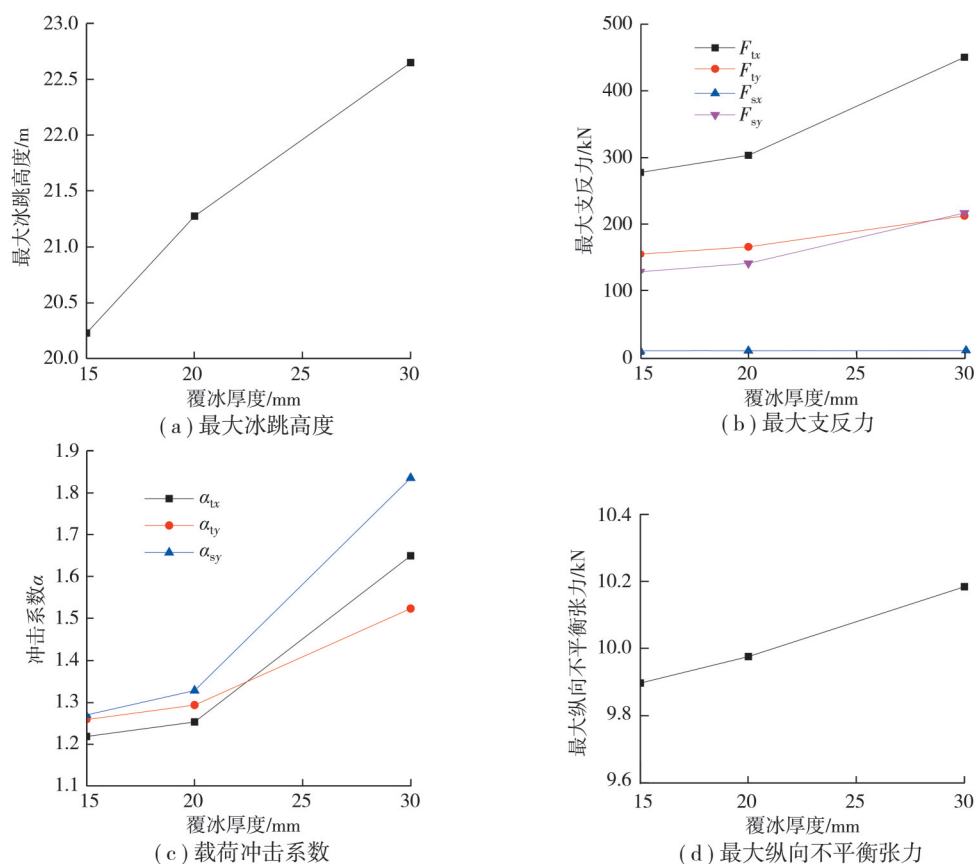


图 11 500 kV 四分裂连续档塔线体系脱冰动力响应参数随覆冰厚度的变化

Fig. 11 Variations of dynamic response parameters of 500 kV quad-bundle multi-span tower-line system after ice-shedding from conductors with ice thickness

3.4 杆塔应力及强度

在本节中,研究不同相导线脱冰时杆塔的应力和强度。因塔线体系边相 A 相和 C 相基本对称,数值模拟考虑线路中间档 A 相(边相)和 B 相(中间相)导线分别脱冰的情况。以 7 档 6 塔连续档线路为例,档距 400 m,高差比 0.3;导线不均匀覆冰,其两端冰厚 t_L 和 t_U 分别为 15 mm 和 30 mm;脱冰工况为 A 相导线整档脱冰。耐张塔和直线塔杆件 Mises 应力最大时的分布如图 12 所示。

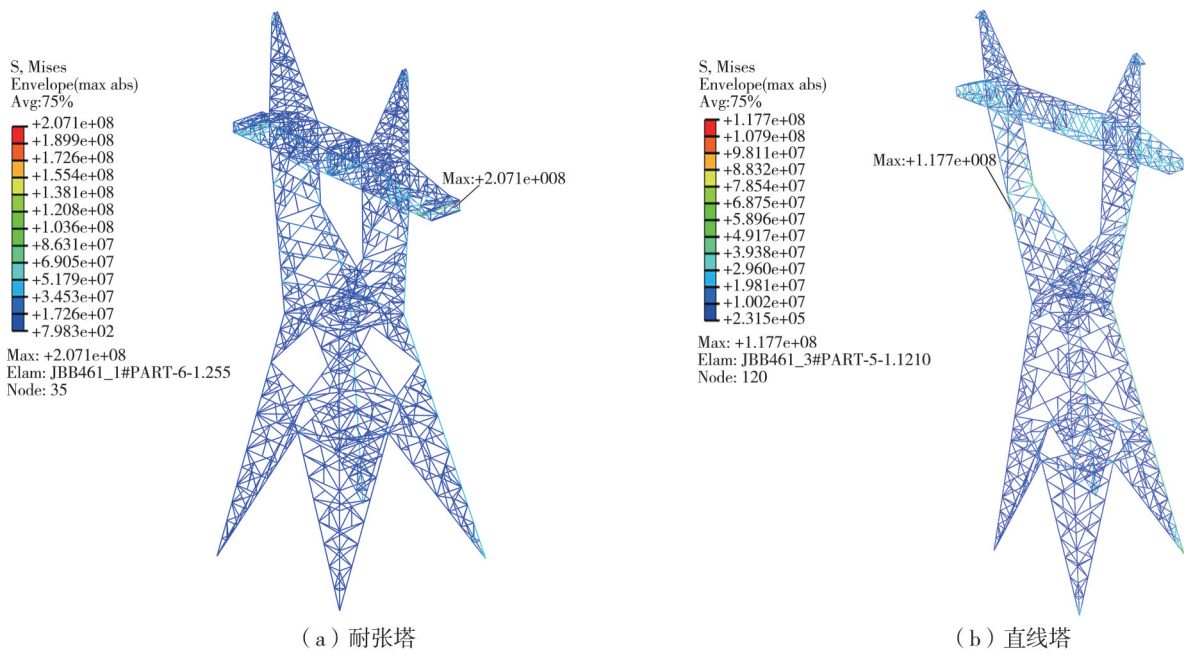


图 12 杆塔的应力分布
Fig.12 Stress distributions of towers

数值模拟和分析了表 3 中所有典型工况下的导线脱冰塔线体系动力响应,得到了耐张塔和直线塔 Q235、Q345 和 Q420 材料杆件的最大 Mises 应力,如表 4 所示。可见,2 种杆塔各材料杆件的最大应力值均未超过杆件的最大许用应力。耐张塔应力最大位置主要出现在横担挂点附近 Q345 材料杆件上,直线塔最大应力主要出现在上曲臂和下曲臂连接处 Q420 材料杆件上。A 相脱冰时各杆塔的最大应力均大于 B 相脱冰,而且直线塔的最大应力差别更为明显。A 相导线脱冰时 Q420 材料的最大应力比 B 相脱冰时大 62.9%,说明 A 相导线脱冰比 B 相导线脱冰更危险,这是由于 A 相脱冰时杆塔承受了更大的弯矩作用。

表 4 塔线体系杆塔不同材料杆件的最大应力

Table 4 Maximum stresses of towers in quad bundle tower-line system after ice-shedding from conductors						
脱冰相	最大 Mises 应力/MPa					
	耐张塔 JBB461			直线塔 ZBB461		
	Q235	Q345	Q420	Q235	Q345	Q420
A 相	206.5	232.2	198.3	207.9	294.0	325.4
B 相	189.0	214.4	186.0	182.0	241.8	199.7

另外,根据设计手册中规定^[23],500 kV 架空输电线路重冰区杆塔强度校核时,对覆冰厚度 20 mm 四分裂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 75%。表 5 给出了典型不均匀覆冰塔线体系的最大纵向不平衡张力,导线两端冰厚 t_L 和 t_U 分别为 20 mm 和 30 mm 不均匀覆冰,可见最大使用张力百分比为 62.05%,未超过设计手册中的取值要求。

表5 不均匀覆冰导线脱冰塔线体系最大纵向不平衡张力

Table 5 Maximum longitudinal unbalance tension in tower-line system after ice-shedding from conductors

脱冰导线	最大纵向不平衡张力 ΔT_{\max} /kN	最大使用张力百分比/%
A相	120.135	59.89
B相	124.473	62.05

4 结 论

针对 500 kV 四分裂孤立档和连续档线路,利用有限元法模拟研究了导线不均匀覆冰脱冰条件下塔线体系动力响应,分析了导线脱冰过程中导线最大冰跳高度、挂点支反力、纵向不平衡张力、杆塔载荷冲击系数以及杆塔的强度,得出以下结论:

1)在覆冰量相同时,不均匀覆冰导线部分脱冰时的最大冰跳高度、载荷冲击系数、纵向不平衡张力、挂点支反力均大于均匀覆冰情况,故在设计不均匀覆冰冰区线路时,应考虑不均匀覆冰的影响,适当调整相应的设计参数。

2)对于孤立档线路,不均匀覆冰导线脱冰最大冰跳高度、纵向不平衡张力随档距增大而增加,纵向最大支反力和载荷冲击系数随档距增加而减少;最大冰跳高度、挂点支反力、纵向载荷冲击系数和不平衡张力随高差比增加而增加;最大冰跳高度、挂点支反力和纵向不平衡张力均随冰厚增加而增加,载荷冲击系数随冰厚增加而减小。

3)对于连续档线路,导线最大冰跳高度、挂点支反力和纵向不平衡张力随档距的增大而增加,载荷冲击系数随档距增大而减少;最大冰跳高度、纵向载荷冲击系数随高差比增加而减小,最大支反力和纵向不平衡张力随高差比增大而增加;各特征参数均随覆冰厚度的增加而增大。

4)在所有均匀和不均匀覆冰导线脱冰情况下,杆塔的最大 Mises 应力均未超过其对应杆件材料许用应力,强度满足要求。耐张塔最大应力位置主要在横担挂点附近 Q345 杆件上,直线塔最大应力主要在上曲臂和下曲臂连接处 Q420 材料主材上。边相导线脱冰时杆塔最大应力比中间相导线脱冰时大,最大达到了 62.9%,杆塔设计时需增大这些位置的强度。不均匀覆冰导线脱冰引起的纵向不平衡张力与导线最大使用张力之比小于设计规程规定的 75%,满足杆塔设计要求。

参考文献

- [1] 杨亚东. 渝东南地区输电线路覆冰划分依据分析[J]. 河南科技, 2021, 40(34): 147-149.
Yang Y D. Basis analysis of icing classification for transmission lines in southeast Chongqing[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(34): 147-149. (in Chinese)
- [2] 李清华, 孟洁, 李劲松, 等. 山西省不同重现期下电线覆冰厚度空间分布及区划[J]. 干旱气象, 2022, 40(1): 156-165.
Li Q H, Meng J, Li J S, et al. Spatial distribution and division of wire icing thickness under different return periods in Shanxi Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(1): 156-165. (in Chinese)
- [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): 1-11.
- [4] 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.
- [5] 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)
- [6] 张健, 张宇卓, 王金锁, 等. 750kV 输电导线不均匀覆冰弧垂变化与脱冰跳跃研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(3): 558-570.
Zhang J, Zhang Y Z, Wang J S, et al. Research on uneven iced transmission lines and the dynamic response after ice-shedding [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(3): 558-570. (in Chinese)
- [7] 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): 226-232.

- Wang X, Lou W J. Dynamic response analysis of multi-span transmission line to ice-shedding shock[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 226-232. (in Chinese)
- [8] 杨春侠,何雯琦,刘慧聪,等. 不均匀覆冰下连续档架空输电线路脱冰动力响应分析[J/OL]. 工业建筑, 2023: 1-10. (2023-07-20). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.TU.20230719.1857.004.html>.
- Yang C X, He W Q, Liu H C, et al. Dynamic response characteristic of ice-shedding on multi-span transmission line under non-uniform icing[J/OL]. Industrial Construction, 2023: 1-10. (2023-07-20). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.TU.20230719.1857.004.html>. (in Chinese)
- [9] Yang F L, Yang J B, Han J K, et al. Numerical simulation on the HV transmission tower-line system under ice shedding[C]// 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. Seoul, Korea (South). IEEE, 2009: 1-5.
- [10] 杨风利,杨靖波,付东杰,等. 塔线系统脱冰跳跃动力响应分析[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)
- [11] 程皓月. 重冰区超高压输电塔线体系安全性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- Cheng H Y. Study on safety of EHV transmission tower-line system in heavy ice area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [12] 姚陈果,毛峰,许道林,等. 不均匀覆冰输电塔线体系力学特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3084-3092.
- Yao C G, Mao F, Xu D L, et al. Mechanical properties of transmission tower-line system in non-uniformly iced condition[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3084-3092. (in Chinese)
- [13] 张瑚,吕健双,汪峰,等. 基于塔线体系的中冰区分裂导线不均匀脱冰跳跃研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 204-207, 198.
- Zhang H, Lv J S, Wang F, et al. Research on uneven ice-shedding jump of bundled conductors in middle ice area based on tower-line system[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(10): 204-207, 198. (in Chinese)
- [14] 万小东,霍锋,张骁,等. 1000 kV复合横担输电塔线体系覆冰脱落动力响应分析[C]// 2020年工业建筑学术交流会论文集(下册). 北京, 2020: 370-374.
- WAN Xiaodong, HUO Feng, ZHANG Xiao, et al. Analysis of ice-shedding dynamic response of 1 000 kv composite cross-arm transmission tower-line system[C]// Collected Papers of the 2020 Industrial Architecture Academic Exchange Conference (Volume 2). Beijing: 2020: 370-374. (in Chinese)
- [15] Wen Y, Hu Z H, Mao X Y, et al. Comparison for mechanical properties of transmission towers in uniform and non-uniform icing condition under micro-topography[C]// 2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO). Beijing, China: IEEE, 2021: 1-5.
- [16] 国家能源局. 电力工程气象勘测技术规程: DL/T 5158—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- National Energy Bureau of the People's Republic of China. Technical specification for meteorological survey of electric power engineering: DL/T 5158—2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)
- [17] International Electrotechnical Commission. Design criteria of overhead transmission lines: IEC 60826[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2003.
- [18] 王黎明,曹露,高亚云,等. 输电线路非均匀脱冰严重工况的规律[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2442-2449.
- Wang L M, Cao L, Gao Y Y, et al. Law of sever conditions of non-uniform ice-shedding jumping of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2442-2449. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] Lilien J L. State of the art of conductor galloping[C]// Technical Brochure CIGRE No 322. Paris, France: CIGRE, 2007: 139.
- [21] Wu K W, Yan B, Yang H X, et al. Dynamic response characteristics of isolated-span transmission lines after ice-shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(5): 3519-3530.
- [22] Wu K W, Yan B, Yang H X, et al. Characteristics of multi-span transmission lines following ice-shedding[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 218: 104082.
- [23] 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)