2021 年 第 21 卷 第 35 期
2021, 21(35): 14863-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:蔡萌琦, 杜 洋, 周林抒, 等. 输电线路脱冰跳跃研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14863-14870.
Cai Mengqi, Du Yang, Zhou Linshu, et al. Review of investigation ice-shedding of transmission line[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14863-14870.

电工技术

输电线路脱冰跳跃研究进展

蔡萌琦[1], 杜 洋[1], 周林抒[2], 陈小平[1], 郑鸣宇[1], 刘 静[1], 丁顺利[3]
(1. 成都大学建筑与土木工程学院, 成都 610106; 2. 国网四川电力能源综合服务公司, 成都 610016;
3. 成都大学机械工程学院, 成都 610106)

摘 要 输电线脱冰跳跃可能导致短路、导线故障、硬件故障,甚至铁塔倒塌,造成供电中断,严重影响输电线路的安全运行。因此,研究输电线路的覆冰导线脱冰跳跃机理和动态响应具有重要的理论和工程意义。为了能准确掌握提高输电线路可靠性与稳定性的关键技术,从多方面总结了输电导线脱冰跳跃的研究,并探讨导线脱冰动力响应的规律。同时,导线的冰跳高度和横向摆幅也是导线动力响应的重要表征,对学者们在导线冰跳高度和横向摆幅上的研究进行分类整理。这些研究对中国技术提高和规程改进具有重要意义。

关键词 输电线路; 脱冰跳跃; 试验; 数值模拟
中图法分类号 TM752; **文献标志码** A

Review of Investigation Ice-shedding of Transmission Line

CAI Meng-qi[1], DU Yang[1], ZHOU Lin-shu[2], CHEN Xiao-ping[1], ZHENG Ming-yu[1], LIU Jing[1], DING Shun-li[3]
(1. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power & Energy Comprehensive Service Company, Chengdu 610016, China; 3. School of Mechanic Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

[**Abstract**] Short circuits, conductor failures, hardware failures, even tower collapses may be caused by ice-shedding of transmission lines, resulting in interruption of power supply and the safe operation of transmission lines has been seriously affected. Therefore, it has important theoretical and engineering significance to study the jumping mechanism and dynamic response of iced conductors of transmission lines. In order to accurately grasp the key technologies to improve the reliability and stability of transmission lines, the research on deicing jumps of transmission lines by researchers from various aspects were summarized, and the law of the dynamic response of deicing lines were discussed. Meanwhile, the ice jump height and lateral swing of the conductor were also important characterizations of the dynamic response of the conductor. The research on the ice jump height and lateral swing of the conductor by scholars were sorted out. Useful references are provided by the results for a theoretical basis of technical improvement and procedure improvement.
[**Keywords**] transmission line; ice-shedding; test; numerical simulation

输电线路在覆冰情况下具有复杂的受力状态,若技术方案采用不当,会导致导线、线夹和间隔棒甚至杆塔的破坏等恶性事故,威胁电网安全运行。中国许多地区处于山区,气象条件非常复杂,覆冰引起的电网事故时有发生,若由此引起电网系统性事故,将会对其社会生活产生极大影响,如表 1 所示。输电线路脱冰跳跃是指冰区输电线路的覆冰在温度等自然条件下脱落引起导线的上下振动,工程中称为“脱冰跳跃”。脱冰跳跃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,从而导致闪络、烧伤甚至烧断导线等电气事故[1-3]。目前,对于输电线路脱冰跳跃问题的研究主要采用实验、数值模拟和简化理论算法三种方法。

1 模拟试验

导线的覆冰脱落研究,其常用研究方法有三种:现场实测、模型试验、数值仿真模拟。其中现场实测的难度较大,因此该方法并不常见。中国有不少学者采用过模型试验的方法。最早在 20 世纪 50 年代就有学者利用静荷载模拟导线脱冰[4-5],后来国

收稿日期: 2021-02-02; **修订日期**: 2021-08-25
基金项目: 国家自然科学基金(51507106);成都市国际科技合作资助项目(2020-GH02-00059-HZ)
第一作者: 蔡萌琦(1987—),女,汉族,福建莆田人,博士,副教授,硕士研究生导师。研究方向:输电线结构动力学。E-mail: mq. cai@foxmail. com。

表 1 2008 年冰灾 500 kV 输电线路倒塔及受损情况

Table 1 Tower collapse and damage of 500 kV transmission line during ice disaster in 2008

序号	地区/公司	损坏条数	倒塔基数					(局部)受损基数				
			直线塔数量		耐张塔数量		小计	直线塔数量		耐张塔数量		小计
			轻冰	重冰	轻冰	重冰		轻冰	重冰	轻冰	重冰	
1	浙江	17	130	0	8	0	138	19	0	6	0	25
2	湖北	2	9	0	3	1	13	2	0	1	0	3
3	重庆	1	5				5	1		1		2
4	湖南	12	135	0	9	0	144	20	0	5	0	25
5	江西	5	88	0	12	0	100	8	0	2	0	10
6	安徽	1	1				1	3				3
7	广西	4	6	0	4	0	10	8	0	4	0	12
8	贵州	15	131	2	8	4	145	37	3	13	2	55
9	华润电力	2	322	31	27	21	401	44	1	7	2	54
	合计	59	827	33	71	26	957	142	4	39	4	189
	总计						1 146					

际上也有许多学者基于此方法展开了深入研究。

这些学者的研究可推广到相同类型的输电导线,但当输电导线类型和分布在导线上的荷载发生变化时,这些研究结果的有效性还有待商榷。

Mogran 等[6]早在 1964 年就对 132 kV 五档输电线路进行了在档距中点释放集中质量来模拟导线脱冰的试验,同时对冰跳高度进行了测量。Savadjiev 等[7]在实验室里用 3.22 m 长的导线,对不同脱冰情况进行了模拟实验,同时测量了在导线脱冰时的最大上升高度、不同挂点间的张力变化情况及绝缘子串的偏转角度和位移等。中国首次开展对覆冰导线脱冰研究的是陈勇等[8],其研究方法与 Mogran 等[6]类似,通过在导线上悬挂集中荷载代替导线覆冰,该研究同时还利用计算机仿真对脱冰工况进行了数值模拟,对比了试验结果和计算结果,对比结果表明两者的规律相同,数值也相近。

近年,学者们通过数值仿真模拟的方法对导线脱冰动力响应做了大量研究。谢献忠等[9]设计了缩尺比为 1∶20 的两档塔线体系实验模型。模拟了拉链式脱冰和同时脱冰、整档脱冰和局部脱冰等六种工况,并得到整档脱冰是最危险的一种工况、整档脱冰的最大跳跃高度可达跨度的 2.02% 等结论。此实验是在理论研究的基础上,以湖南 220 kV 的输电线路为原型而设计的,具有较好的实际工程参考价值。与谢献忠等[9]研究方案不同的是,李孟珠等[10]设计了 1∶30 的单跨覆冰输电线路的缩尺模型,开展了链式脱冰和瞬时脱冰的研究,试验结果表明:①与链式脱冰相比,瞬时脱冰跳跃高度更高;②脱冰跳跃最大高度随脱冰速度减小而减小,并最终高度趋于瞬时脱冰的 0.5 倍;③跳跃最大高度随高差倾角增大而增大。王璋奇等[11]利用了架空输电线路脱冰跳跃试验系统,通过模型试验研究架空非同期脱冰跳跃的动张力特性。其试验结果表明:在脱冰速度相同的情况下,从档中往两端的非同期脱冰方式将在导线中产生较大的张力波动。李孟珠等[10]和王璋奇等[11]都对链式脱冰展开了研究。李孟珠等[10]研究了不同参数和不同脱冰方式下,导线的脱冰振动,其对输电导线的防振设计提供了支撑;王璋奇等[11]则研究的是脱冰对导线的动张力特性的影响规律,在线路设计时应对此充分考虑,防止脱冰产生过大的动张力而破坏架空导线。李宏男等[12]通过悬挂吸附有铁块的电磁铁代替覆冰,建立孤立档冰跳试验,模拟导线覆冰脱落过程,同时利用 ANSYS 软件计算验证。结果得出导线脱冰跳跃高度与脱冰方向有关:若是从中间向两边脱冰,则跨中跳跃高度最大;若是从两边向中间脱冰,则跨中跳跃高度最小;覆冰脱落前导线的最大静张力和脱落后的最大动张力相差并不大。刘春城等[13]以某地 1 000 kV 特高压输变电工程为原型,针对脱冰响应进行了模型试验,并建立了有限元模型进行验证,其试验结果确定了输电脱冰动力响应时的最不利工况和最不利位置,为输电塔脱冰跳跃研究提供了依据。

2 数值分析

2.1 输电线脱冰数值方法

由于有限元模拟方法的广泛使用,非线性有限元数值模拟方法已经成了目前学者采用最多的研究方式。该研究方法很大程度上节约了试验经费成本和时间成本。最早利用商业有限元软件进行模拟的是 Jamaleddlne 等[14-15],他们利用有限元软件 ADINA对导线脱冰进行模拟,并将其所得数据与实验结果进行了比较。文献[16-18]在研究单导线的脱冰动力响应时,也采用了数值模拟的方法,通过

此方法得到脱冰位置与覆冰厚度等因素对导线动力响应的影响规律。陈将等[19]利用有限元软件ABAQUS对三挡耐张段线路的脱冰动力响应问题展开了研究,得出脱冰后的导线位移与应力的变化关系和过程。Kollar等[20]也用有限元软件模拟了分裂导线中子导线的脱冰动力响应。李永平等[21]分析了数值模拟方法,构建了1 000 m的大档距架空导线有限元模型,以此分析某一节点导线张力和跳跃高度的变化规律,在线路设计时,对避免导线闪络有一定借鉴意义。侯镭等[22-24]建立了3自由度多档脱冰跳跃模型,对导线脱冰跳跃进行分析,并分析了脱冰量、档距组合等因素对导线脱冰的影响。鲁元兵等[25]用单根导线等效替代分裂导线,再对导线的不均匀脱冰进行了全过程模拟分析,发现脱冰时导线和绝缘子串的张力大幅度增加。鲁元兵等[25]在模拟覆冰的同时,得出一定条件下导线覆冰厚度与导线和绝缘子串所受张力的关系,此研究还对导线和绝缘子串的设计和导线的安全提供参考依据。李春等[26]通过ABAQUS软件建立了导线及耐张串连接金具的模型,以此来研究导线张力对导线连接金具的破坏作用。叶中飞等[27]也利用ABAQUS软件对输电杆塔仿真分析,建立了空间梁杆模型,并通过此方法分析了支撑杆对整体受力和稳定的影响,合理解释了某杆塔的破坏位置。鞠彦忠等[28]在研究导线张力对防振装置的效果影响时,利用ANSYS有限元软件模拟导线-防振器体系的振动,并将数值仿真结果与其进行的模拟实验相对比,两者都能较好地吻合。李嘉祥等[29]研究导线的覆冰脱落振动机理时,也采用了ANSYS软件建立线路模型。此研究结果对于研究线路参数和外部荷载的影响有较重要的实际意义。以上四位学者在研究时,都利用了有限元软件建立模型,从而得可以对不同参数条件下的复杂工况都进行较为精确的模拟。沈国辉等[30]提出了线路脱冰的有限元模拟方法,并对导线“拉链”型脱冰进行了分析,讨论了该类型脱冰对导线动力响应的影响,此研究对工程中“拉链”型脱冰的处理具有一定参考价值。王昕等[31]建立了多跨覆冰输电线路有限元模型,并对导线中跨脱冰和三跨脱冰两种情况进行模拟,研究了线路张拉力、档距等参数对导线脱冰的影响,这些模拟情况所得出的结论对线路安全运行有重要意义。

以上有限元模拟研究内容都是导线脱冰后的动力响应,主要分析了导线所受张拉力、档距等参数对动力响应的影响,并由此得出相关结论。对于输电杆塔与导地线的耦连作用、导线脱冰的脱冰跳跃高度、横向摆幅等方面有待深入研究。

2.2　输电塔线脱冰数值计算结果

对于输电塔线脱冰的数值模拟方法,也已被许多学者采用。尹鹏等[32]针对导线脱冰跳跃问题,以云南至广东某特高压输电工程为实际案例,采用非线性时程分析法和四种双层黏弹铅芯阻尼器布置方案对其进行了控制研究,试验表明黏弹铅芯阻尼器对脱冰导线有良好减震效果。McGlure等[33]利用了有限元软件ADINA对输电线路被破坏后的动力响应进行模拟,虽然其采用的是二维杆塔模型且与实际的差异较大,但其方法对导线脱冰模拟仍具有参考意义。李黎等[34]以非线性有限元方法建立了塔-线耦合模型,分析了某实际工程线路的脱冰动力响应,但其分析重点在于脱冰动力响应,未对多档连续脱冰及塔线体系的安全性进行研究。李雪等[35]按原工程资料建立了输电塔-线体系有限元模型,分析了湖南地区挂靖线220 kV输电线路覆冰倒塔事故的主要原因,考虑水平垂直档距、高差、不均匀覆冰和风荷载对线路的影响,结果表明过载、风载及不均匀覆冰是这次事故发生的主要原因。韩军科等[36-37]也通过实例,分析多种因素,得出输电线路倒塔是由于覆冰过载及纵向不平衡张力过大的原因导致的。杨风利等[38-39]建立ANSYS有限元模型,考虑塔线耦合效应、脱冰位置、覆冰厚度、档距等有关因素,完成了塔线体系脱冰跳跃分析。沈国辉等[40]用有限元数值模拟法建立了四塔五线模型,试验发现,导线覆冰脱落使导线产生低频舞动、绝缘子大幅摆动、部分杆塔出现较大峰值应力。晏致涛等[41]通过有限元理论构建了输电线路塔-线体系的脱冰振动分析模型,并以某实际工程为例进行分析,进行了对跳跃高度、支座反力、水平张力数据变化的分析,进而探讨塔线的多种参数对导线脱冰振动的影响。胡伟等[42]先开展了模拟单根导线覆冰脱落的过程,来比较不同情况下该导线的冰跳规律;再利用数值仿真技术模拟各种工况,其结果与实验结果的差距是在误差允许范围内,从而验证了仿真模拟的正确性;在此基础上,他们建立了3自由度多档导线的模型,分析档数、不同档距组合、档距大小等多种因素对特高压同塔输电线路脱冰跳跃的影响。易文渊[43]利用ABAQUS有限元软件建立了三档四塔精细有限元模型,针对覆冰荷载、风荷载及脱冰荷载因素,数值模拟塔线耦合体系导线的脱冰动力响应;基于该模拟结果,得出了连续档导线最大冰跳高度和横向摆幅的计算公式。程皓月[44]以连续的孤立档覆冰线路为研究对象,建立了有限元模型,分析了500 kV塔线体系在覆冰脱冰工

况下的安全性,但因其有限元模型不包含直线杆塔,所以不能代表一般情况。

上述方法主要是围绕 500 kV 及其以下电压的线路脱冰进行计算。随着特高压输电线路的广泛应用,现有研究研究均缺乏对多分裂、大截面特高压输电导线脱冰跳跃形态及塔线受力特性的研究。

3 脱冰跳跃计算结果

3.1 跳跃动态特性

数值仿真模拟的方法主要是通过有限元软件建立模型,从而分析导线的脱冰跳跃动态特性,这是很多学者常采用的方法,也是近几年很热门的研究方式。有限元模拟中有几种常用方法:附加冰单元法、改变密度法和附加力模拟法。但是研究人员在使用以上方法时,其所取的力学参数并不一致,且未比较各种方法的适用性和等价性[45]。为此,沈国辉等[45]指出有限元分析中的附加冰单元法和改变密度法中冰参数选择的不合理之处,并对有限元模拟的三种方法分别给出了合理建议值。他们认为以往学者将冰的弹性模量取值为 10 GPa 是不合适的,并根据算例结果给出了不高于 0.01 GPa 的弹性模量建议取值。杜运兴等[46]用数值模拟方法建立耦合模型,采用附加单元法模拟覆冰,探究了导线两层覆冰不同脱落情况的动力响应,并得出结论:以往的脱冰荷载取值仍有优化空间。邱勇等[47]借助有限元软件建立输变电线路模型,同时再通过改密度法模拟脱冰,分析塔线体系对输电线路的动力响应,其研究结果对防止闪络事故具有指导意义。张宏雁等[48]建立了覆冰破坏的有限元模型,模拟了覆冰导线受冲击荷载作用后的脱冰过程,并得出以下结论:导线脱冰量随荷载冲击增大而增大,当冲击荷载大于一定值时,导线覆冰完全脱落;脱冰效果与荷载作用时间、荷载距导线中点的距离有关。王凌旭等[49]用 ANSYS 软件建立四塔三线的模型,分析不同工况下,导线脱冰时的受力规律和动力响应,并发现某工况下的导线脱冰振动可导致线路接触闪络。吴天宝等[50]通过有限元模拟的方法,探究了覆冰厚度、脱冰位置、输电线路长度、输电线档数对脱冰跳跃幅值的影响,得出了冰跳高度增加的规律。随着特高压输电线路的广泛应用,部分线路经过高寒地区,目前研究缺乏对特高压线路脱冰的研究。

3.2 跳跃高度

脱冰跳跃高度即是导线脱冰时竖直方向的振动幅度。导线冰跳高度的研究对于导线脱冰动力响应具有重要意义。赵煜哲等[51]采用有限元数值仿真方法,构建出了包含塔、线、绝缘子等的精细有限元模型,针对输电线路的脱冰跳跃现象,分析了多个参数对导线脱冰的影响,并最后得出脱冰跳跃高度的近似计算公式,为实际设计时确定竖向安全距离提供了参考。伍川等[52]基于冰跳过程中的能量关系、应力弧垂关系、变形关系和平衡关系,从而给出了导线最大冰跳高度的计算方法,并利用数值模拟方法和 Morgan 理论算法验证了该计算方法的正确性。李黎等[53]利用 ANSYS 及 VC + + 编制互交界面软件来实现有限元分析,并验证了较高精度及实用性;最后在不同参数条件下进行了脱冰工况计算,并提出了冰跳高度简化公式,为线路设计和脱冰振动预防提供了参考依据。谢献忠等[54]基于功能原理和能量守恒定律,推导出了导线跳跃高度的理论计算公式,并利用有限元分析方法进行了验证。前面已有几位学者提出了跳跃高度的计算公式,但对于大档距大高差线路,这些方法并不合适。针对大档距大高差线路,王德千等[55]采用有限元模拟方法来研究脱冰动力响应,分析数值模拟得到的冰跳高度与弧垂差、档距、高差等参数的关系,最后得出冰跳高度的简化公式。该公式同前面已有公式相比,可用于大档距大高差线路,其适用范围更广。伍川等[56]在研究大截面导线脱冰动力响应特征时,利用数值模拟方法确定了 导线最大冰跳高度与导线静止状态下的弧垂差之间存在线性关系,并在此基础上给出了大截面导线的最大冰跳高度简化计算公式,可为工程设计提供指导。白天明等[57]建立三种实验系统、模拟了单导线的 7 种覆冰脱落工况,从而得到各工况的跳跃位移,并进行了有限元模拟;最后从试验中得出脱冰振动幅值与覆冰厚度呈正相关的结论;该实验对实际脱冰具有指导意义,同时,在此试验中也验证了模拟方法的正确性。文楠等[58]用数值模拟方法获得导线最大冰跳高度,并基于此模拟结果和 BP(back propagation)神经网络建立了导线冰跳高度的预测模型;通过与中国规程给出的冰跳高度计算公式比较,其模型预测的计算精度大幅提高,可为覆冰区线路绝缘间隙的设计给出重要参考。

文献[51-56]都通过实验得出跳跃高度的计算公式或简化计算公式。但这些公式受限于多种工况和条件,对于高压、大跨度及受自然条件影响大的输电导线,其实用性有待考究。

3.3 横向摆幅

相比与导线冰跳高度,覆冰导线脱冰时产生的最大横向摆幅的研究并不多,这也可作为导线脱冰动力响应的一个深入研究方向。赵煜哲等[51]在利

用有限元数值仿真方法时研究导线跳跃高度时,同时考虑脱冰风荷载作用与横向风荷载的在时间上的相关性,给出了在横向风作用下,导线最大横向摆幅差的计算公式。严波等[59]建立了塔线耦合体系的有限元模型,通过对不同风速、档距、高差、绝缘子串长度等参数条件下的数值结果分析,得出最大横向摆幅与静止状态风偏改变量的定量关系;并由此给出了导线脱冰后最大横向摆幅的简化计算公式,为输电线路绝缘配合设计提供了基础。李黎等[60]在利用有限元模拟研究导线脱冰及风偏问题时,得出了脱冰档最大横向摆幅发生在先风偏再脱冰的情况下的结论;最后研究横摆规律时,提出了横向摆幅的简化公式,为线路和杆塔的设计提供了依据。伍川等[56]采用数值模拟方法,分析各种参数下导线脱冰的动力响应特征,得出横向摆幅的变化规律,并说明了覆冰厚度、脱冰率、档距、档数、风速这些参数对于导线的最大横向摆幅皆有影响,为研究最大横向摆幅计算公式提供了参考。最后根据这些实验结论提出了横向摆幅工程简化计算公式。

以上对导线横向摆幅的研究,是基于不同体系不同条件下得出的计算方法或计算公式。赵煜哲等[51]主要是考虑了横向风荷载和脱冰共同作用的情况,并由此得出了计算导线最大横向摆幅差的公式。与赵煜哲等不同的是,严波等[59]研究耦合塔线体系不同参数下导线的动力响应特征,并由此得出导线最大横向摆幅的工程简化算法;其研究对于线路设计时绝缘间隙值的确定具有重要的实际意义。李黎等[60]是探究了在脉冲风荷载作用下不同参数的横摆规律,从而给出计算导线横向摆幅的简化公式,其对于杆塔和线路的设计有着重要参考价值。伍川等[56]与严波等[59]的研究思路类似,也是在研究了档距、高差等多种参数下导线的动力响应的基础上,获得导线横向摆幅的变化规律;但研究对象是特高压大截面导线,并考虑了温度对脱冰动力响应的影响。

要保证输电线路的安全运行,研究覆冰导线脱冰的动力响应必不可少;而探究导线的动力响应,其冰跳高度和横向摆幅又是动力响应的两个重要表征。导线冰跳高度和横向摆幅对于输电线路动力响应特征及线路杆塔的设计具有重要参考价值,而且目前在此方面的研究较少,需要进行深入研究。

4　结论和展望

总结了中外学者对覆冰导线脱冰动力响应的研究进展,包括各种模拟实验、数值模拟方法、脱冰跳跃计算结果分析等,并得出以下结论。

(1)目前中国研究导线脱冰方法中,利用有限元数值仿真模拟是学者最为广泛采用的方式,适用范围很广,其计算精度和准确度也比较高。

(2)对于导线脱冰跳跃高度的研究,已有研究通过试验给出了跳跃高度的计算方法和简化计算公式,并可适用于多种情况;其中计算精度更高的可为中国规程的改进提供参考。

(3)对于导线横向摆幅的研究,是导线脱冰动力响应研究方向里学者涉及较少的部分;横向摆幅对于输电线路动力响应特征及线路杆塔的设计具有重要参考价值,可在此方向进行深入研究。

(4)随着特高压输电线路的广泛应用,现有研究研究均缺乏对多分裂、大截面特高压输电导线脱冰跳跃形态及塔线受力特性的研究。

(5)在前期的研究基础上,可以综合利用多学科交叉,提出脱冰跳跃预测技术与智能除冰系统研究。

参　考　文　献

[1] 蒋兴良, 易　辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Jiang Xinliang, Yi Hui. Transmission line icing and protection [M]. China Electric Power Press, 2001.

[2] 苑吉河, 蒋兴良, 易　辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高压电技术, 2004, 30(1): 6-9.
Yuan Jihe, Jiang Xingliang, Yi Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9.

[3] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-14.
Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study [J]. PowerSystem Technology, 2008, 32(4): 7-14.

[4] Electric Power Research Institute. Transmission line reference book: 115 ~ 138 kV compact line design[M]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1978.

[5] Stewart J R. Ice as an influence on compact line phase spacing [C]//Proceedings of IWAIS. Hanover: Mew Hampshire, 1983: 77-82.

[6] Morgan V T, Swift D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads[J]. Proceedings IEEE, 1964, 111(10): 1736-1746.

[7] Savadjiev K, Farzaneh M. Modeling of icing and ice-shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 715-721.

[8] 陈　勇, 胡　伟, 王黎明, 等. 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 Liming, et al. Research on ice-shedding characteristic of icing conductor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 115-121.

[9] 谢献忠, 李　丹, 黄　伟, 等. 塔线体系脱冰跳跃动力特性实

验研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(5):855-861, 1010.
Xie Xianzhong, Li Dan, Huang Wei, et al. Experimental study on dynamical properties of tower-line systems induced by ice-shedding [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(5): 855-861, 1010.

[10] 李孟珠, 晏致涛, 熊 辉, 等. 多参数影响下输电线链式脱冰实验研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2021(5): 59-67.
Li Mengzhu, Yan Zhitao, Xiong Hui, et al. Experimental research on transmission line chain deicing under the influence of multiple parameters[J]. Journal of Chongqing University (Nature Science), 2021(5): 59-67.

[11] 王璋奇, 齐立忠, 王 剑, 等. 架空输电线非同期脱冰跳跃动张力实验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 61-65.
Wang Zhangqi, Qi Lizhong, Wang Jian, et al. Experiments on the dynamic tension of an overhead conductor under the asynchronous ice shedding[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 61-65.

[12] 李宏男, 吴育炎. 输电线路覆冰脱落动力效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 35-46, 100.
Li Hongnan, Wu Yuyan. Experimental study on dynamic responses of transmission lines caused by ice shedding[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 35-46, 100.

[13] 刘春城, 沈磨群, 张 莹, 等. 大跨越输电塔-线体系脱冰振动模型试验[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 191-195.
Liu Chuncheng, Shen Moqun, Zhang Ying, et al. Model test study on deicing vibration of long span transmission tower-line system[J]. Water Resource and Power, 2013, 31(7): 191-195.

[14] Jamaleddine A. Static and dynamic effects of ice shedding on overhead power transmission lines [D]. Montreal: University of Montreal, 1994.

[15] Jamaleddine A, McClure G, Rousselet J, et al. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA[J]. Computers and Structures, 1993, 47: 523-536.

[16] Laszlo E, Farzaneh M. Vibration of bundled conductors following ice-shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1097-104.

[17] Kalman T, Farzaneh M, McClure G. Numerical analysis of the dynamic effects of shock-load-induced ice-shedding on overhead ground wires[J] . Computers and Structures, 2007, 85(7-8): 375-384.

[18] Fekr M R, McClure G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46: 1-11.

[19] 陈 将, 严 波, 陈科全. 重冰区架空输电线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: 46-48.
Chen Jiang, Yan Bo, Chen Kequan. Numerical simulation research on deicing vibration of overhead transmission line in heavy ice[J]. Journal of Chongqing University (Nature Science), 2007, 30: 46-48.

[20] Kollar L E, Farzaneh M. Vibration of bundled conductors following ice shedding[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 2008, 23(2): 1097-1104.

[21] 李永平, 苏 攀, 郑 毅. 架空导线覆冰及脱冰的数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(12): 133-135.
Li Yongping, Su Pan, Zheng Yi. Research on icing and ice-shedding numerical simulation of overhead conductors[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(12): 133-135.

[22] 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(6): 1-6.
Hou Lei, Wang Liming, Zhu Puxuan, et al. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 1-6.

[23] 孟晓波, 王黎明, 侯 镭, 等. 特高压输电线路导线脱冰跳跃动态特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(10): 1631-1636.
Meng Xiaobo, Wang Liming, Hou Lei, et al. Dynamic characteristics of ice-shedding on UHV overhead transmission lines[J]. Journal of Tsinghua University (Nature Science), 2010, 50(10): 1631-1636.

[24] Meng X B, Wang L M, Hou L, et al. Dynamic characteristic of ice-shedding on UHV overhead transmission lines[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 66: 44-52.

[25] 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.
Lu Yuanbing, Lou Wenjuan, Li Huanlong. Whole process analysis for non-uniform ice shedding of transmission lines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9): 47-50.

[26] 李 春, 刘小会, 黄 睿, 等. 输电线脱冰过程中耐张串金具的受力仿真分析[J]. 图学学报, 2021(2): 279-288.
Li Chun, Liu Xiaohui, Huang Rui, et al. Simulation analysis of stress in power fitting for connecting tension stringfollowing ice shedding from cables [J]. Journal of Graphics, 2021(2): 279-288.

[27] 叶中飞, 伍 川, 陶亚光, 等. 斜撑角钢杆对输电铁塔受力状态影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(30): 288-296.
Ye Zhongfei, Wu Chuan, Tao Yaguang, et al. Effect of bracing members on the stress state of transmission tower[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 288-296.

[28] 鞠彦忠, 王 冠. 导线张力对防振器防振效果影响试验与数值研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(4): 213-217, 229.
Ju Yanzhong, Wang Guan. Experimental and numerical research on the influence of tension in the conductor on the damping effectiveness of damping devices[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(4): 213-217, 229.

[29] 李嘉祥, 李宏男, 付 兴. 输电线路覆冰脱落参数影响研究[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 76-83.
Li Jiaxiang, Li Hongnan, Fu Xing. Ice-shedding factors of transmission line[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 76-83.

[30] 沈国辉, 袁光辉, 孙炳楠, 等. 考虑脱冰速度效应的输电线路脱冰模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2010, 33(9): 132-138.
Shen Guohui, Yuan Guanghui, Sun Bingnan. Simulation of ice-shedding on transmission lines considering ice-shedding velocity effect[J]. Journal of Chongqing University (Nature Science), 2010, 33(9): 132-138.

[31] 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 Xin, Lou Wenjuan. Dynamic response analysis of multi-span transmission line to ice-shedding shock[J]. Engineering Me-

chanics, 2011, 28(1): 226-232.

[32] 尹　鹏, 李　黎, 张　行. 输电线路脱冰跳跃反应控制研究[J]. 电网和水力发电进展, 2008, 24(3): 3-8.
Yin Peng, Li Li, Zhang Hang. Investigation on control of jumping induced by transmission line ice-shedding[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(3): 3-8.

[33] McClure G, Lapointe M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers and Structures, 2003, 81: 825-834.

[34] 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.
Li Li, Xia Zhengchun, Fu Guoxiang, 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.

[35] 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.
Li Xue, Li Hongnan, Huang Lianzhuang. Nonlinear buckling analysis of collapsed steel tower for 220 kV Guajing iced transmission line[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 111-114.

[36] 李　正, 杨靖波, 韩军科, 等. 2008 年输电线路冰灾倒塔原因分析[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 31-35.
Li Zheng, Yang Jingbo, Han Junke, et al. Analysis on transmission tower toppling caused by icing disaster in 2008[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 31-35.

[37] 韩军科, 杨靖波, 杨风利, 等. 电网冰灾典型线路段覆冰倒塔分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(3): 31-35.
Han Junke, Yang Jingbo, Yang Fengli, et al. Analysis on tower collapsing for ice coating on typical transmission line in power grid ice disaster area[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(3): 31-35.

[38] 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 Fengli, Yang Jingbo, Fu Dongjie, et al. Analysis on dynamic responses of transmission tower-line system under ice shedding [J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(1): 86-93.

[39] 杨风利, 杨靖波, 李　正, 等. 覆冰输电线路脱冰跳跃及抑制方法研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 20-25.
Yang Fengli, Yang Jingbo, Li Zheng, et al. Ice shedding and vibration suppression of a transmission line system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 20-25.

[40] 沈国辉, 袁光辉, 孙炳楠, 等. 覆冰脱落对输电塔线体系的动力冲击作用研究[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 210-217.
Shen Guohui, Yuan Guanghui, Sun Bingnan, et al. Dynamic impact effects on tower-line system due to ice-shedding[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 210-217.

[41] 晏致涛, 李正良, 汪之松. 重冰区输电塔-线体系脱冰振动的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 209-227.
Yan Zhitao, Li Zhengliang, Wang Zhisong. Simulation of ice-shedding of transmissiontower-line system in heavy ice regions[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 209-227.

[42] 胡　伟, 陈　勇, 蔡　炜, 等. 1 000 kV 交流同塔双回输电线路导线脱冰跳跃特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 275-280.
Hu Wei, Chen Yong, Cai Wei, et al. Ice-shedding characteristic of 1 000 kV AC double circuit transmission line on the same tower [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 275-280.

[43] 易文渊. 特高压输电塔线体系脱冰动力响应数值模拟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
Yi Wenyuan. Numerical simulation study on dynamic response of UHV transmission tower-line system after ice-shedding [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[44] 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 Haoyue. Research on the safety of UHV transmission tower and line system in heavy ice area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

[45] 沈国辉, 徐晓斌, 楼文娟, 等. 导线覆冰脱冰有限元模拟方法的适用性分析[J]. 工程力学, 2011, 28(10): 9-15, 40.
Shen Guohui, Xu Xiaobin, Lou Wenjuan, et al. Applicability analysis of finite element methodologies to simulate the ice-accreting and ice-shedding on transmission lines[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(10): 9-15, 40.

[46] 杜运兴, 卢心龙, 聂逸悠. 线路覆冰分层脱落动力响应的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(7): 104-110.
Du Yunxing, Lu Xinlong, Nie Yiyou. Research on dynamic response of ice layer shedding in line system[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(7): 104-110.

[47] 邱　勇, 郁　杰, 赵华赟. 复合横担塔-线在线路脱冰作用下的振动[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(3): 82-85.
Qiu Yong, Yu Jie, Zhao Huayun. Ice-shedding induced vibration of a composite cross arm tower-line system[J]. Composites Science and Engineering, 2019(3): 82-85.

[48] 张宏雁, 陈科全, 周　松, 等. 冲击载荷作用下导线脱冰过程数值模拟[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(S1): 362-365.
Zhang Hongyan, Che Kequan, Zhou Song, et al. Numerical simulation for dynamic response of transmission lines under mechanical deicing load[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(S1): 362-365.

[49] 王凌旭, 姚　瑶, 张有佳, 等. 高压输电线路脱冰跳跃及脱冰准则的研究现状[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 1-6.
Wang Lingxu, Yao Yao, Zhang Youjia, et al. Research status on the sleet jump and ice-shedding criteria of high voltage transmission lines[J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 1-6.

[50] 吴天宝, 胡中原, 王　健, 等. 输电线路脱冰跳跃动态模型研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(1): 134-140, 233.
Wu Tianbao, Hu Zhongyuan, Wang Jian, et al. Dynamical modeling of ice-shedding on transmission line[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(1): 134-140, 233.

[51] 赵煜哲, 李　黎, 邓　威. 输电线路脱冰动力响应数值仿真[J]. 水电能源科学, 2013, 31(9): 205-209.
Zhao Yuzhe, Li Li, Deng Wei. Numerical simulation of dynamic response of ice-shedding on transmission lines[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(9): 205-209.

[52] 伍　川, 严　波, 张　亮, 等. 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, et al. A theoretical algorithm for jump heights of iced transmission lines after ice shedding[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(2): 117-126.

[53] 李　黎, 杨　斌, 赵　鑫, 等. 输电线路脱冰参数化有限元法的实现及应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016,

44(4): 68-73.
Li Li, Yang Bin, Zhao Xin, et al. Implementation and application of parametric finite element method of ice-shedding on transmission lines[J]. Huazhong University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 44(4): 68-73.

[54] 谢献忠, 黄 伟, 李 丹, 等. 输电线路脱冰跳跃高度的理论计算公式[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(2): 53-57.
Xie Xianzhong, Huang Wei, Li Dan, et al. Theoretical formula for jump height of transmission line after ice-shedding[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 31(2): 53-57.

[55] 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(自然科学版), 2020, 43(2): 60-67.
Wang Deqian, Yan Bo, Huang Guizao, et al. Simplified formula for jump height of transmission lines after ice-shedding[J]. Journal of Chongqing University (Nature Science), 2020, 43(2): 60-67.

[56] 伍 川, 叶中飞, 陶亚光, 等. 特高压大截面导线冰跳高度及横向摆幅研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2013-2020, 2321.
Wu Chuan, Ye Zhongfei, Tao Yaguang, et al. Study on ice shedding jump height and maximum horizontal amplitude of ultra-high voltage large-section conductors[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(5): 2013-2020, 2321.

[57] 白天明, 曹咏弘, 薛凯允, 等. 架空输电线路脱冰跳跃模拟试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 136-141.
Bai Tianming, Cao Yonghong, Xue Kaiyun, et al. Research of simulated test on deicing jump of overhead transmission lines[J]. Journal of North University of China (Natural Science), 2020, 41(2): 136-141.

[58] 文 楠, 严 波, 林 翔, 等. 基于 BP 神经网络的导线脱冰跳跃高度预测模型[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 199-204.
Wen Nan, Yan Bo, Lin Xiang, et al. Prediction model of conductor de-icing jump height based on BP neural network BP neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(1): 199-204.

[59] 严 波, 陈科全, 肖洪伟, 等. 风荷载作用下覆冰导线脱冰后的最大横向摆幅[J]. 应用力学学报, 2013, 30(6): 913-919, 956-957.
Yan Bo, Chen Kequan, Xiao Hongwei, et al. Horizontal amplitude of iced conductor after ice-shedding under wind load[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(6): 913-919, 956-957.

[60] 李 黎, 杨 斌, 徐宁波, 等. 导线脱冰与风偏相互影响研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 83-88.
Li Li, Yang Bin, Xu Ningbo, et al. Interaction of ice shedding and wind deviation on transmission lines[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 44(9): 83-88.