doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2025.267
引用格式:周鑫睿,严波,李晋,等.双分裂导线脱冰动力响应缩比模拟方法及试验[J].重庆大学学报,2025,48(12):82-98.

双分裂导线脱冰动力响应缩比模拟方法及试验

周鑫睿[1],严 波[1],李 晋[2],华 明[3],冯东岳[3],高英博[1],邓华超[1]
(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 102211;
3. 国网西藏电力有限公司,拉萨 850000)

摘要:基于相似性原理建立覆冰分裂导线脱冰动力响应缩比模型,首次实现了分裂导线子导线覆冰和脱冰缩比模拟试验方法。搭建了双分裂导线脱冰缩比模拟试验平台,可测量导线脱冰后的面内、面外和扭转运动,导线张力和挂点支反力纵向、竖向和水平分量时程。对典型双分裂导线子导线部分脱冰、子导线拉链式脱冰和两根子导线异步脱冰等情况进行了缩比模拟试验,测量得到了导线冰跳高度、横向摆幅、扭转角、导线张力以及导线挂点支反力随时间的变化。

关键词:输电线路;双分裂导线;脱冰动力响应;相似性原理;缩比模拟试验
中图分类号:O3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2025)12-082-17

Reduced-scale modeling method and experiments on the dynamic responses of bundle conductor lines after ice-shedding

ZHOU Xinrui[1], *YAN Bo*[1], *LI Jin*[2], *HUA Ming*[3], *FENG Dongyue*[3], *GAO Yingbo*[1], *DENG Huachao*[1]
(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, P. R. China;
3. State Grid Xizang Electric Power Company Limited, Lhasa 850000, P. R. China)

Abstract: Based on similarity principles, this study proposes a reduced-scale modeling and testing method to investigate the dynamic responses of twin-bundle conductor lines after ice-shedding. The processes of ice-accretion and subsequent shedding on sub-conductors of bundled conductors were successfully simulated. A reduced-scale experimental platform was established to measure the in-plane, out-of-plane, and torsional motions of conductors after ice-shedding, as well as the time histories of conductor tension and the longitudinal, vertical, and horizontal components of reaction forces at the suspension points. Reduced-scale tests were conducted on a representative twin-bundle conductor line under three conditions: partial ice-shedding and unzipping ice-shedding from a single sub-conductor, and asynchronous ice-shedding between two sub-conductors. The variations in jumping height, lateral swing amplitude, torsion angle, and conductor tension, along with the reaction forces at suspension points over time, were recorded and analyzed.

收稿日期:2025-03-25 **网络出版日期:**2025-07-15
基金项目:国家电网公司总部科技项目(5200-202356471A-3-2-ZN)。
Supported by State Grid Corporation Headquarters Science and Technology Project (5200-202356471A-3-2-ZN).
作者简介:周鑫睿(2000—),男,硕士研究生,主要从事计算固体力学及应用方向的研究,(E-mail)1484924397@qq.com。
通信作者:严波(1965—),男,博士,教授,(E-mail)boyan@cqu.edu.cn。

Keywords: transmission line; twin-bundle conductor; ice-shedding dynamic response; similarity principle; reduced-scale model

中国地域辽阔，煤电、水电、太阳能和风电资源与工业密集地区分布不均，依托“西电东送”“北电南送”战略，跨地区长距离电网建设如火如荼。近年来，受极端气候影响，输电线路覆冰和脱冰引发的闪络、跳闸、断线、杆塔倒塌等事故时有发生，严重威胁线路安全。输电线路脱冰动力响应研究已成为广泛关注的重点课题。

国内外学者对输电线路导线覆冰及脱冰动力响应已进行了大量的研究，研究方法和手段主要包括简化理论、数值模拟和试验。简化理论方法主要根据导线脱冰跳跃过程中的能量变化，建立计算导线脱冰跳跃高度的理论模型[1-4]，但这些简化模型与实际差异很大。随着计算机硬件和计算方法及软件的发展，数值模拟已成为研究输电导线脱冰动力响应的重要手段。Jamaleddine等[5]首次利用有限元方法模拟了导线脱冰跳跃响应过程，得到了导线面内竖向位移和张力的变化。之后，许多学者利用有限元方法对不同覆冰和脱冰条件下导线脱冰动力响应进行了广泛的研究[6-9]。

试验研究方面，Morgan等[3]率先在5档连续档真型线路上开展了导线脱冰模拟试验，通过在中间档施加并释放集中载荷来模拟导线覆冰与脱冰。Meng等[10]在总长235 m的真型线路上开展了单档、两档和三档的脱冰试验，测量了冰跳高度和脱冰过程中张力的变化，试验过程中采用集中重物来模拟覆冰，并且在八分裂真型输电导线上开展了三档连续档中间档脱冰试验[11]。蒋兴良等[12]在自然覆冰实验站开展了直流融冰试验，记录并观测导线脱冰过程。然而，真型线路脱冰模拟试验成本高、测量难度大，难以进行参数化研究。Jamaleddine[5]等利用档距为3.22 m的细钢丝进行了脱冰模拟试验，测量了脱冰过程中索的位移、张力变化以及悬垂串偏摆。Van Dyke等[13]利用小模型采用分布悬挂载荷开展了拉链式脱冰模拟试验。Kollar等[14]以6.4 m档距孤立档模拟双分裂导线脱冰试验，采用集中质量模拟覆冰并通过电磁铁释放载荷实现脱冰。杨文刚等[15]搭建了孤立档单导线试验平台，研究了整档和部分脱冰下导线张力变化规律。王璋奇等[16]采用架空线真实覆冰和集中质量法模拟覆冰，对比了2种覆冰方法下架空线的脱冰振动特性，在40 m档距模拟架空输电线开展了同期与非同期脱冰跳跃实验，分析了架空线端部动张力时程曲线规律[17-18]。李宏男等[19]设计并实施了50 m孤立档导线脱冰跳跃试验，测量了不同覆冰厚度、脱冰率、脱冰位置、脱冰顺序及速度下导线端部张力和档中跳跃高度，并借助有限元软件ANSYS进行验证。然而，这些研究工作均基于小尺度模型，未考虑试验模型与原型线路的相似性。

有学者基于相似性原理开展了导线脱冰缩比模拟试验。谢献忠等[20-21]以湖南某220 kV输电线路为原型，建立了缩尺比1∶20的两档塔线体系实验模型，实现了多种脱冰工况下的模拟试验。刘敏等[22]设计了1∶50的三跨覆冰导线缩比模型，研究了不同参数下导线冰跳高度、导线张力以及绝缘子串轴力的变化规律。Huang等[23]建立了三档导线缩比模型，利用真型线路试验数据及数值模拟结果验证试验方法，进而研究了多种参数变化对脱冰高度的影响。楼文娟等[24]基于模态叠加法和动力相似关系，设计了自然条件下多分裂导线节段模型装置，并验证了其模拟脱冰位移响应的有效性。Zhang等[25]搭建了孤立档导线脱冰缩比模型试验平台，通过改变延迟持续时间、脱冰顺序及覆冰重量等参数，研究了输电线路延迟脱冰后的冰跳高度和动态张力。然而，由于输电线路档距大，原型和缩比模型之间的尺度比通常较大，使得分裂导线缩比模型子导线之间的间距很小，已有的覆冰模拟方法难以满足子导线之间小间距的要求，尚未见模拟分裂导线子导线覆冰和脱冰缩比试验方法。

笔者基于相似性原理研究覆冰分裂导线脱冰动力响应缩比模拟试验方法，建立覆冰双分裂导线脱冰缩比模拟试验平台。实现分裂导线子导线覆冰及脱冰模拟，导线脱冰后面内、面外和扭转运动的测量、导线张力和挂点支反力分量测量等。提出的缩比模拟试验方法可以用于任意覆冰分裂导线脱冰动力响应模拟试验研究，为分裂导线输电线路抗冰设计及人工除冰等提供了重要的研究手段。

1 分裂导线缩比模型试验方法

1.1 导线脱冰缩比模型相似性

缩比模型试验基于相似性原理，缩比模型和原型之间需满足几何相似、物质相似、运动学相似、动力学相似以及应力变形相似等。线路原型与缩比模型之间的尺度比λ_l、质量比λ_m和时间比λ_t分别为

$$\lambda_l=\frac{l_s}{l_p};\ \lambda_m=\frac{m_s}{m_p};\ \lambda_t=\frac{t_s}{t_p},\tag{1}$$

式中：l、m、t分别为尺度、质量和时间，下标s和p分别表示缩比模型和原型。根据量纲分析可得密度比λ_ρ、杨氏模量比λ_E、载荷比λ_F和加速度比λ_a的关系为

$$\lambda_\rho=\frac{\rho_s}{\rho_p};\ \lambda_E=\frac{E_s}{E_p};\ \lambda_F=\frac{F_s}{F_p};\ \lambda_a=\frac{a_s}{a_p},\tag{2}$$

式中：ρ、E、F和a分别为密度、杨氏模量、力和加速度。

一般情况下，原型和缩比模型之间重力加速度相等，即$g_s=g_p$，可得到缩比因子之间的关系为

$$\lambda_t=\sqrt{\lambda_l};\ \lambda_\rho=\frac{\lambda_E}{\lambda_l};\ \lambda_m=\lambda_F=\lambda_E\lambda_l^2。\tag{3}$$

试验中导线模型采用捻制钢丝绳，导线原型与缩比模型的杨氏模量接近，而原型的外径远大于缩比模型的外径，导致通过相似性原理计算得到的密度比λ_ρ不匹配。可通过在导线缩比模型上布置均匀分布的附加质量块，在尽可能不改变导线模型刚度的前提下使得密度比得到满足。单位长度附加质量块的质量为

$$m_1=\frac{1}{4}\pi\left(\frac{\lambda_E}{\lambda_l}\rho_p-\rho_s\right)D_s^2,\tag{4}$$

式中：D_s表示缩比模型导线的直径。值得注意的是，在导线模型上布置数量过多的附加质量块会明显影响导线的刚度；反之附加质量块过少，质量过于集中又会影响导线脱冰后的振动形态。为此，可以建立缩比试验模型的有限元模型，在模型中保持附加质量块总质量不变的前提下，采用不同数量附加质量块布置方案，数值模拟覆冰脱落后导线的动力响应，通过比较缩比模型与原型数值结果之间的误差，确定最合适的附加质量块数量。模型中将吸附模拟覆冰质量块的电磁铁作为附加质量块的一部分。试验中导线的覆冰和脱冰采用分布集中质量块及其释放来模拟。计算缩比试验模型子导线单位长度覆冰质量m_2的公式为

$$m_2=\frac{\pi}{4}\rho_p\left[\left(D_p+2t_p\right)^2-D_p^2\right]\lambda_m,\tag{5}$$

式中：D_p和t_p分别表示原型导线的直径和其上的覆冰厚度。

1.2 缩比模型试验系统

基于前述相似性原理，双分裂导线缩比模型试验平台示意图如图1所示。试验平台主要包括模拟杆塔的支架、双分裂导线、相内间隔棒、附加质量块、电磁铁（兼做部分附加质量）、覆冰模型（质量块）、脱冰控制系统、导线运动测量系统和导线张力及支反力测量系统等。

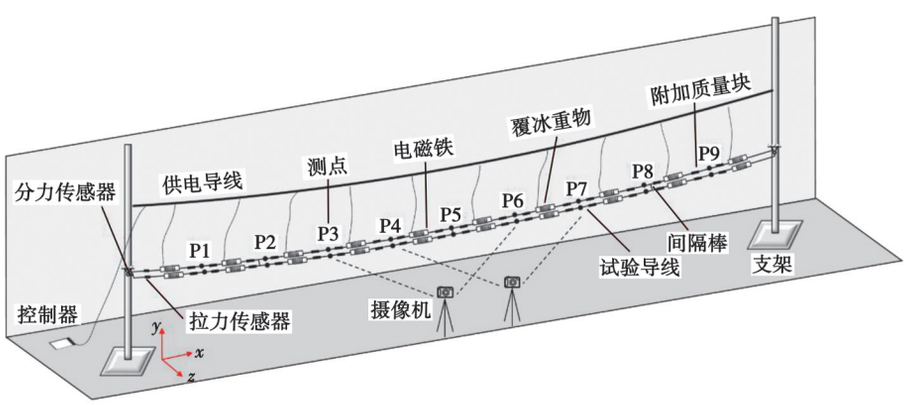
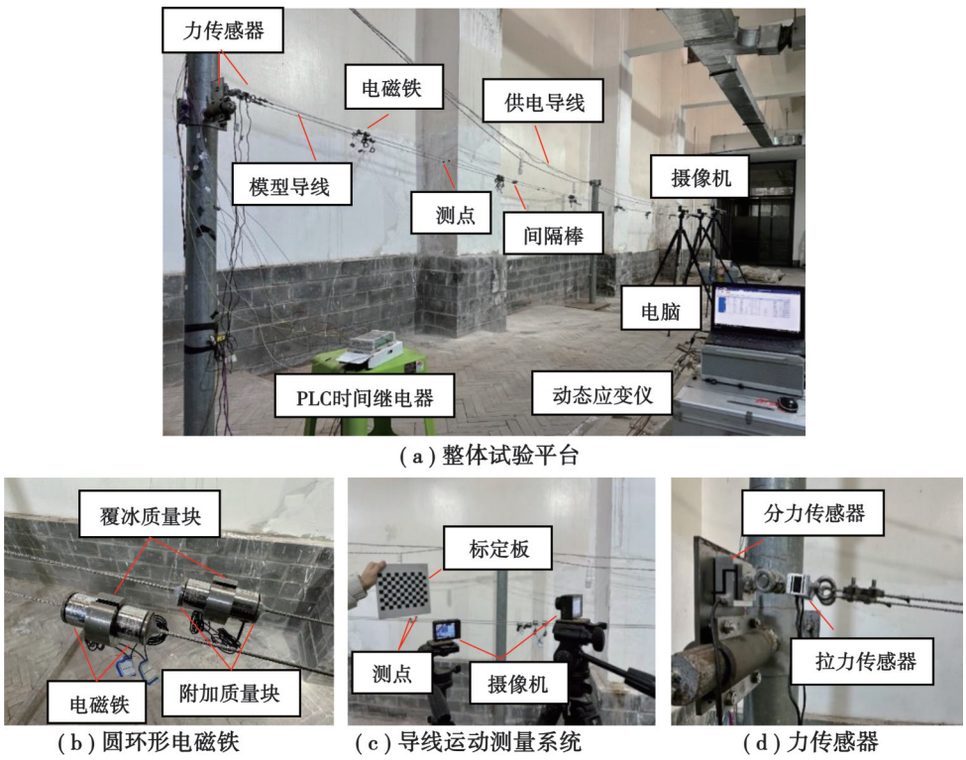


图1 双分裂孤立档线路缩比模型试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reduced-scale test system for twin-bundle isolated transmission line

已有研究表明,杆塔变形对导线脱冰动力响应的影响可忽略,于是试验模型中将杆塔简化为底座固定的刚性支架,忽略杆塔的结构细节。安装双分裂导线模型时,根据原型导线的静态弧垂和初始张力,调整导线模型使其中点弧垂满足缩比要求,并利用拉力传感器确保两者初始张力满足相似比。间隔棒的尺寸、质量和安装位置也需满足相似比。电磁铁作为导线模型附加质量的一部分,用于吸附和释放模拟覆冰的质量块。覆冰模型用定制的质量块来模拟。通过PLC时间继电器控制电磁铁的电流,以吸附和释放模拟覆冰的质量块,模拟导线上的覆冰和脱落。导线运动测量系统用数字摄像机拍摄导线上测点的运动,经程序处理得到导线的运动时程。力测量系统利用拉力和分力传感器测量导线张力及挂点支反力沿3个方向的分力。搭建的典型双分裂导线孤立档线路缩比模型试验平台如图2所示。



(a) 整体试验平台

(b) 圆环形电磁铁　(c) 导线运动测量系统　(d) 力传感器

图2　典型双分裂孤立档线路缩比模型试验平台

Fig. 2　Reduced-scale test platform for typical twin-bundle isolated transmission line

1.3　分裂导线覆冰及脱冰控制系统

缩比模型中分裂导线覆冰及脱冰模拟系统由附加质量块、模拟覆冰的质量块、电磁铁、PLC时间继电器、供电导线等组成(见图2)。附加质量块用于匹配导线缩比模型和原型的密度,且电磁铁也作为附加质量的一部分,导线覆冰质量根据原型导线的覆冰厚度按式(5)计算,用分布的钢制质量块模拟,这些质量块在脱冰前被电磁铁吸附在导线模型上,如图2(b)中所示。这里采用了圆环状电磁铁,导线模型穿过电磁铁的中心,圆环的两个端面的磁力吸附开口圆环覆冰质量块。采用这种设计一方面可以克服子导线间距太小的困难,另一方面子导线脱冰后导线扭转运动过程中产生的不平衡扭矩很小,可以忽略不计。PLC时间继电器一个通道连接一个电磁铁,且可以控制每一个通道的断电时间。模拟导线脱冰时,由PLC时间继电器控制器根据覆冰脱落位置和顺序控制各通道的断电顺序,当某一个电磁铁断电失去磁力,覆冰质量块脱落,从而模拟导线覆冰的脱落。

已有的导线脱冰缩比模拟试验中均使用悬挂式电磁铁,该方式在模拟子导线脱冰发生扭转运动时,悬挂的电磁铁和未脱落的覆冰质量块会产生很大的附加扭矩,不能反映导线的真实扭转运动。因而已有的缩比模拟试验几乎都将分裂导线等效为单导线,不能模拟子导线脱冰过程。

1.4 导线运动和力测量系统

导线不均匀覆冰脱冰可能导致导线的复杂运动形态。导线运动测量系统由2台数字摄像机、标定板、测点及图像处理软件构成，如图2(c)所示。采用的数字摄像机为FIREFLY 8S相机，录制频率为120 Hz；标定板型号为LGP200-12×9，单格边长15 mm。测点均匀分布于整档导线，每组含2个测点，分别位于2根子导线上，测点位置以x/L定义(x为测点距导线左挂点水平距离，L为档距)。

试验时，先将2台摄像机沿档固定在合适的位置，再用标定板标定相机位置，建立像素坐标系与世界坐标系的关系，确定单个像素对应的真实长度。在导线脱冰动态响应过程中，摄像机对每组测点的运动过程进行录制，以捕捉子导线整档的冰跳高度及横向摆幅。因2根子导线初始位置固定，每组测点初始相对位置已知，可依据2测点在导线脱冰跳跃中的运动状态，计算各测点处导线扭转角度时程曲线。

力测量系统包括导线张力测量与导线挂点支反力测量两部分，由拉力传感器、分力传感器和动态信号测量分析仪器等构成，如图2(d)所示。动态信号测量分析仪为东华分析仪器有限公司的DH8302多通道动态信号仪。分力传感器和拉力传感器的采集频率均设定为200 Hz。拉力传感器串联在2根子导线端部附近，以获取导线张力时程曲线。分力传感器安装在导线挂点处，以测量挂点处支反力3个方向的分力。

2 典型线路脱冰缩比模拟试验及数值仿真

缩比模拟试验基于线性理论的相似性原理，而导线脱冰动力响应过程是大位移小应变几何非线性问题，采用相似性原理具有近似性。另一方面，为了平衡密度相似比的附加质量，进行了离散化处理，且覆冰也采用了覆冰质量块模拟，这些都与原型存在偏差。为验证提出的缩比模型试验方法和建立的试验平台的可行性，针对一典型双分裂导线单根子导线整档脱冰情况进行缩比模拟试验，并利用有限元软件ABAQUS进行数值模拟，然后对比分析试验和数值模拟结果。

2.1 典型线路及其缩比模型

典型孤立档线路以JL/G1-300/40双分裂导线为原型，子导线间距为0.5 m，档距为129.4 m且无高差，子导线初始应力为59.68 MPa。原型导线上覆冰厚度为11.9 mm。缩比模型中采用直径为2 mm的捻制钢丝绳作为导线模型。导线原型和缩比模型的参数如表1所示。利用式(1)~(3)计算得出表2所示的原型与缩比模型各缩比因子，进一步计算得到导线缩比模型档距为10.0 m，子导线间距为38.6 mm，初始应力为49.98 MPa。

表1 导线原型和缩比模型参数

Table 1 Parameters of prototypes and reduced-scale model of conductor

模型	导线	外径/mm	单位长度质量/(g·m^{-1})	截面积/mm^2	杨氏模量/GPa
原型	JL/G1A-300/40	23.90	1 132.00	339.000	74.0
缩比模型	捻制钢丝绳	2.00	16.00	2.025	61.3

表2 双分裂孤立档线路脱冰试验模型缩比因子

Table 2 Scale factors between reduced-scale model and prototype of twin-bundle conductor line after ice-shedding

λ_l	λ_E	λ_ρ	λ_F	λ_t
1∶12.94	1∶1.21	1∶0.093 2	1∶201.9	1∶3.6

利用式(4)计算得到需附加于导线模型上的单位长度质量m_1为56.53 g。为此，在单根子导线上布置10组电磁铁作为附加质量块，单组电磁铁重量应为56.53 g，由于单组环形电磁铁重量约46 g，在每组电磁铁端部粘贴小铁片，使其附加质量满足要求。由于电磁铁数量会影响试验精度，利用有限元进行模拟，结果表明该数量对精度影响很小，满足要求。利用式(5)计算得到缩比模型中子导线单位长度覆冰质量为77.0 g。模拟覆冰的质量块数量与电磁铁组数一致，在单根子导线上设置10个质量块，每个质量为77.0 g。同时，为获取整档导线运动形态，在试验导线上均匀布置9组测点(见图1)。

2.2 原型线路脱冰动力响应数值模拟

利用ABAQUS软件模拟该双分裂孤立档线路原型脱冰动力响应。基于悬链线公式构建原型导线初始

形态模型，用B33空间梁单元离散导线和相内间隔棒。在Input文件里，通过*INITIAL CONDITIONS关键字施加初始张力。因导线覆冰厚度较小时，杆塔变形对导线脱冰跳跃影响可忽略，在模型中忽略杆塔的影响。在建模时释放导线端部绕面外方向转动自由度，约束其余方向自由度。导线覆冰与脱冰采用附加单元法（又称生死单元法）进行模拟[8-9]。具体而言，建立与导线单元重合的覆冰单元，在Input文件中通过*MODEL CHANGE关键字删除覆冰单元，实现脱冰载荷模拟，利用ABAQUS隐式模块计算导线脱冰动力响应。

2.3　数值模拟与试验结果的比较

当子导线整档脱冰后，导线除了面内竖向振动外，还会发生面外横向运动和扭转运动。将数值模拟和缩比试验得到的导线各测点的冰跳高度、横向摆幅及扭转角进行比较。图3为导线档中点2子导线冰跳高度、横向摆幅和分裂导线扭转角时程曲线。缩比试验测量结果需按比例因子放大至原型尺度后与数值模拟结果

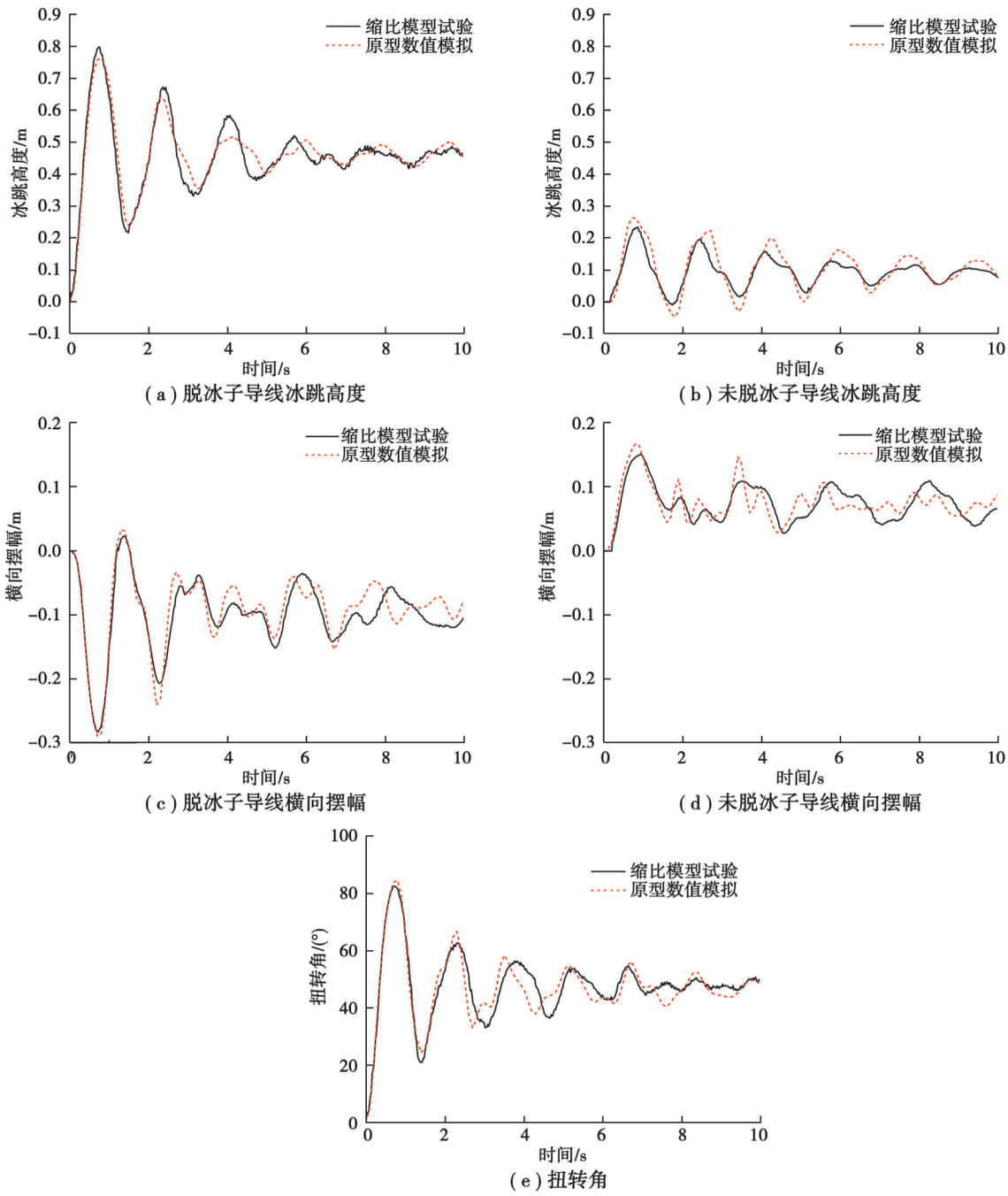


图3　单根子导线整档脱冰时档中点运动时程曲线

Fig. 3　Motion time histories at midpoint of sub-conductor after ice-shedding

进行对比。可见,脱冰和未脱冰子导线的冰跳高度时程曲线前2个波的试验与数值模拟结果吻合较好,之后差异逐渐变大,这是由于试验模型的阻尼难以准确确定所致。由于冰跳高度最大值都在前2个波出现,所得结果可以用于指导线路设计。此外,脱冰子导线冰跳高度远高于未脱冰子导线,且2根子导线稳定位置均高于初始位置。横向摆幅和扭转角时程曲线与冰跳高度时程曲线特征相似,前2个波试验与模拟结果吻合较好,之后差别增大。脱冰瞬间,2根子导线在面外横向运动方向上会相互靠近,横向摆幅小于冰跳高度。数值模拟和缩比试验得到的脱冰和未脱冰子导线档中点的最大冰跳高度误差分别为5.00%和11.03%;最大横向摆幅误差分别为2.05%和9.52%。双分裂导线的最大扭转角误差为2.48%。

此外,提取所有测点运动时程曲线的最大值,绘制出最大冰跳高度、最大横向摆幅和最大扭转角的包络线,如图4所示。从图4中可见,缩比试验和数值模拟得到的运动包络线吻合较好。从最大冰跳高度和最大横向摆幅包络线可以看出,脱冰子导线的数值大于未脱冰子导线,且越靠近档距中点差别越大,使得靠近中点处的最大扭转角远大于端部。未脱冰子导线冰跳高度与横向摆幅幅值较小,相对误差较大,但对扭转角度计算影响小。另外,端部测点运动因数值较小,其相对误差大于中部测点。2种方法得到的脱冰子导线各测点最大冰跳高度相对误差不超5.00%;除端部外,各测点最大横向摆幅相对误差不超9.84%;各测点最大扭转角相对误差均小于9.13%。

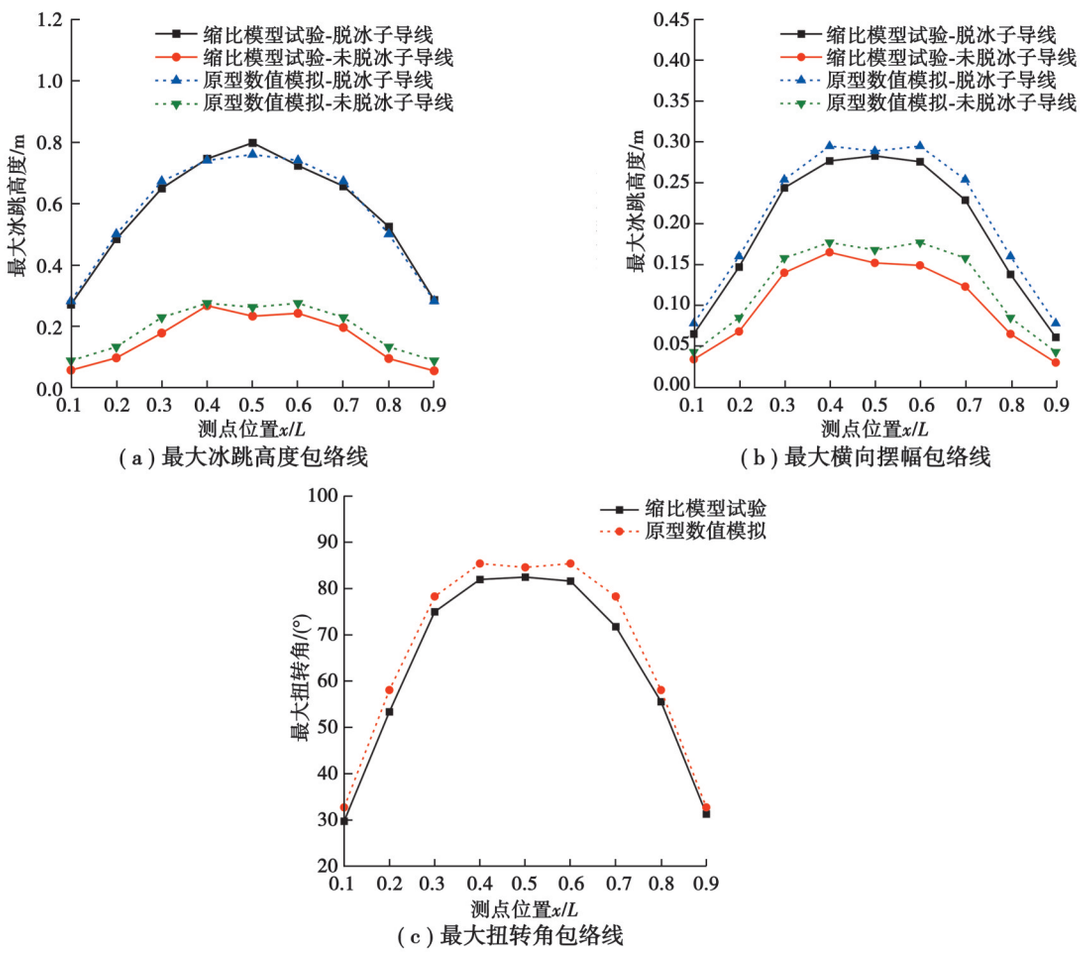


图4 单根子导线整档脱冰时导线运动包络线

Fig. 4 Motion envelopes of conductor line after ice-shedding from a sub-conductor

子导线张力及挂点支反力时程曲线如图5所示。导线覆冰时,2根子导线的张力均为27.48 kN;脱冰后瞬间,2根子导线张力均明显降低,脱冰子导线降低幅度更大,缩比模型试验和数值模拟结果吻合较好。脱冰跳跃过程中,脱冰子导线最大张力未超过覆冰时张力;未脱冰子导线最大张力为27.93 kN,略大于覆冰时张

力。2种方法得到的导线挂点支反力吻合较好。覆冰时顺线方向挂点支反力达55.02 kN,远大于其他方向支反力。脱冰后瞬间,顺线路和竖直方向挂点支反力骤降,顺线方向降幅更大。脱冰跳跃过程中,顺线方向最大挂点支反力51.59 kN,竖直方向最大为2.65 kN,均未超覆冰时对应值。面外方向挂点支反力F_{Rz}在各阶段都处于较低水平。

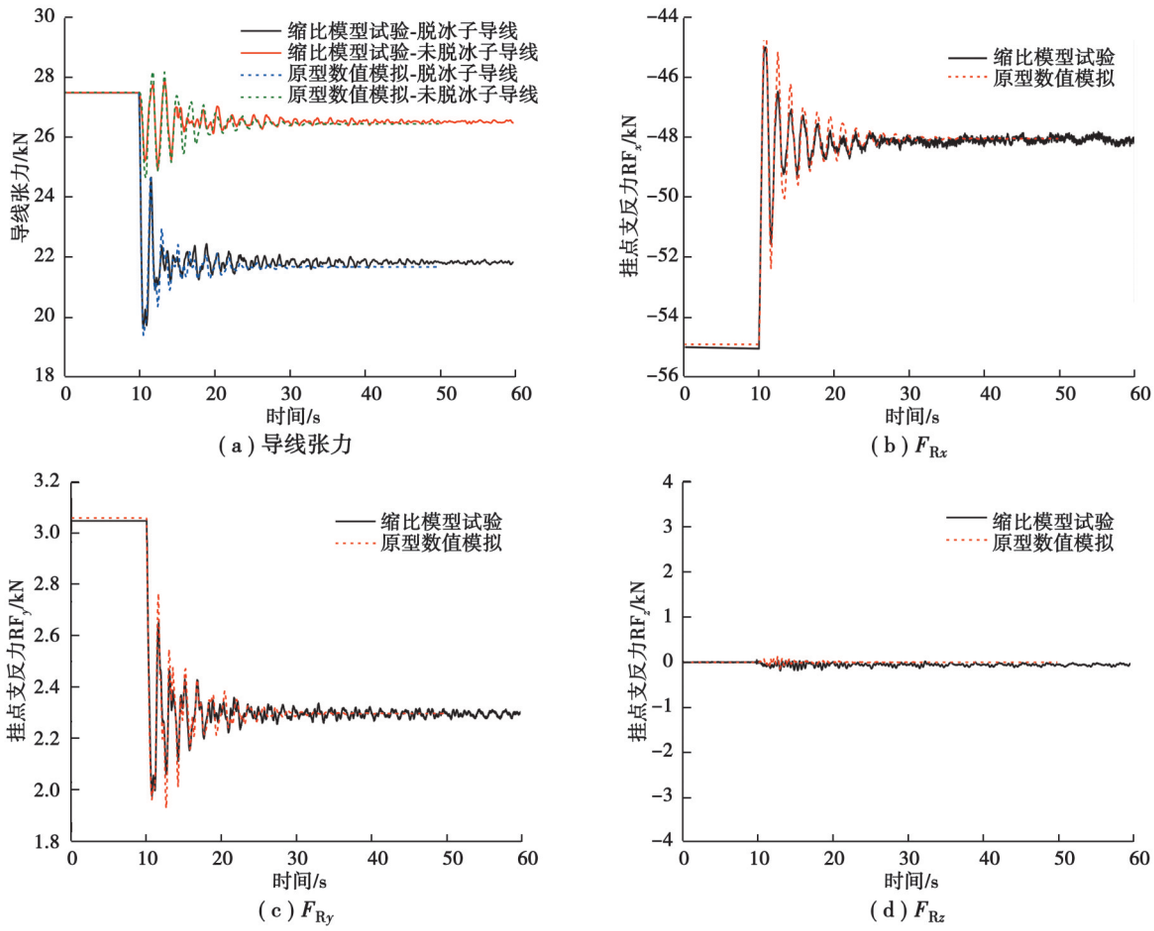


图5　单根子导线整档脱冰时导线张力和挂点支反力时程曲线

Fig. 5　Time histories of conductor tension and reaction force at hanging point after ice-shedding from a sub-conductor

综上可见,缩比模型试验结果与数值模拟结果吻合较好,验证了缩比模型试验方法和建立的试验平台合理可行。

3　覆冰双分裂导线脱冰缩比模拟试验

3.1　试验工况

脱冰形式包括单根子导线部分脱冰、拉链式脱冰和2根子导线异步脱冰(见表3)。子导线部分脱冰指单根子导线上不同位置以一定的脱冰率同时脱冰,如图6所示。单根子导线拉链式脱冰指一根子导线上的覆冰从某处开始,以类似拉链拉开的方式逐段、连续地脱落,而另一根子导线不脱冰的情况,其主要控制参数包括脱冰方向和脱冰速率。2根子导线异步脱冰指一根子导线整

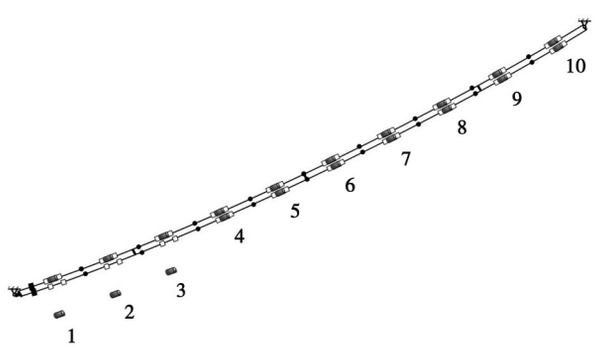


图6　双分裂孤立档线路单根子导线部分脱冰示意图

Fig. 6　Schematic diagram of partial ice-shedding from a sub-conductor

档脱冰后间隔一段时间另一根子导线整档脱冰的情况。

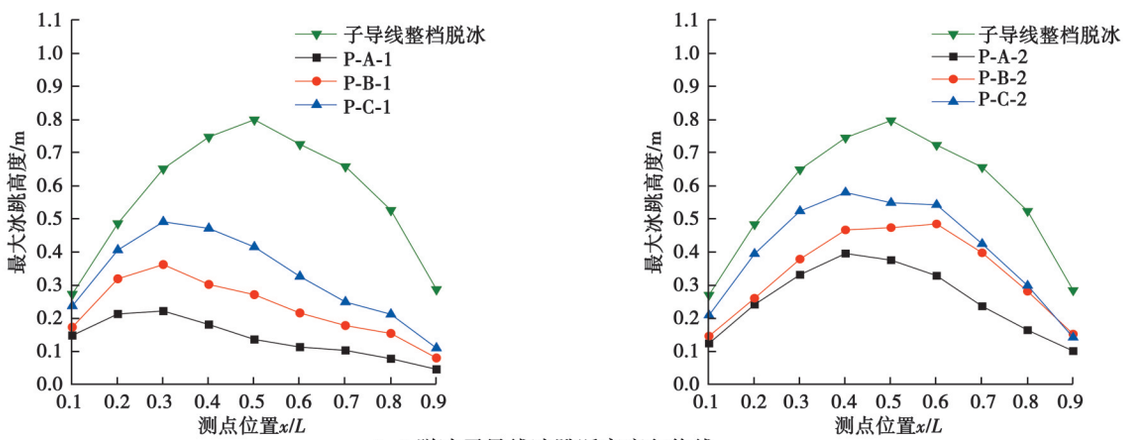
表 3 双分裂孤立档导线脱冰试验工况

Table 3 Ice-shedding cases of twin-bundle conductor lines

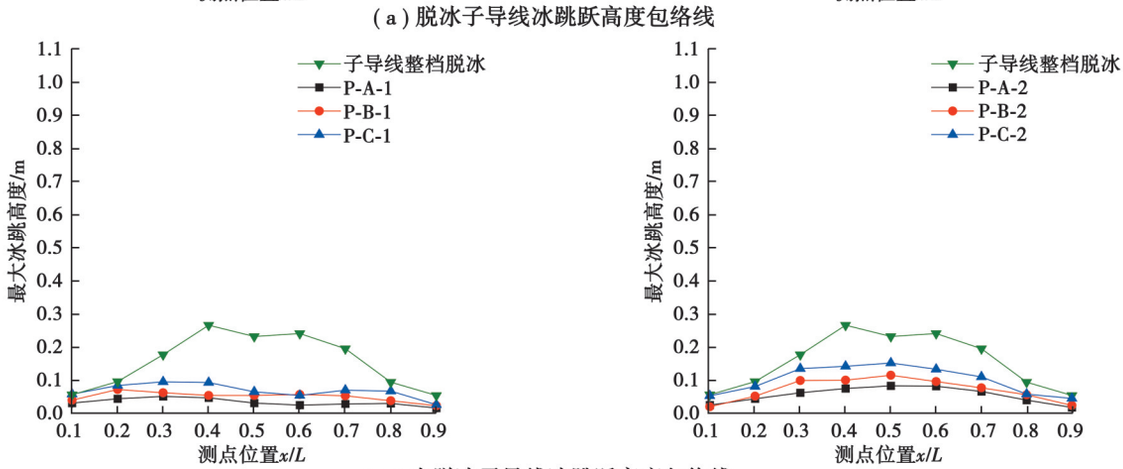
单根子导线部分脱冰			单根子导线拉链式脱冰			2根子导线异步脱冰	
工况编号	脱冰率/%	脱冰位置	工况编号	脱冰方向	脱冰速率/($m \cdot s^{-1}$)	工况编号	脱冰时间间隔/s
P-A-1	30	1,2,3	Z-A-1	左端到右端	10	T-1	0.8
P-A-2	30	4,5,6	Z-A-2	左端到右端	20		
P-B-1	40	1,2,3,4	Z-B-1	两端到中部	10	T-2	1.6
P-B-2	40	4,5,6,7	Z-B-2	两端到中部	20		
P-C-1	50	1,2,3,4,5	Z-C-1	中部到两端	10	T-3	2.4
P-C-2	50	3,4,5,6,7	Z-C-2	中部到两端	20		

3.2 单根子导线部分脱冰试验

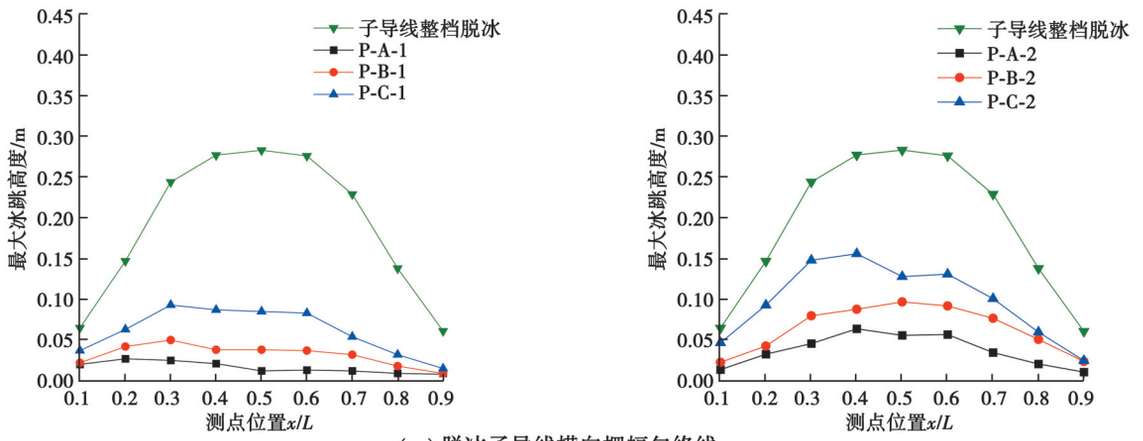
双分裂线路单根子导线整档和部分脱冰情况下,脱冰子导线和未脱冰子导线脱冰跳跃高度、横向摆幅和扭转角包络线如图7所示。从图7中可见,脱冰子导线的冰跳高度和横向摆幅均大于未脱冰子导线。脱冰位置一定时,导线的最大冰跳高度、横向摆幅和扭转角随脱冰率增大而增大,脱冰子导线增幅更明显;脱冰率一定时,靠近档距中点脱冰引发的导线响应更大,脱冰位置附近的各运动响应显著大于远离脱冰位置处。与单根子导线整档脱冰相比,部分脱冰引发的导线运动响应更小。



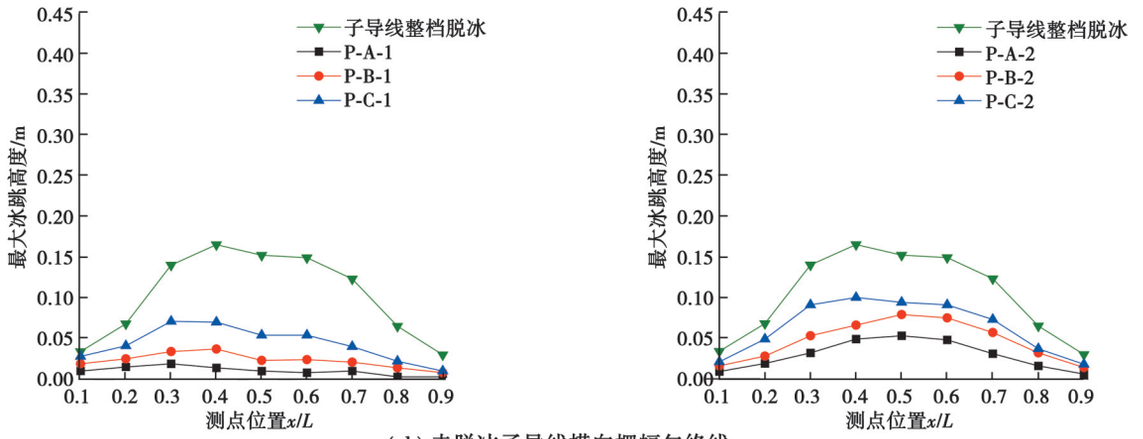
(a) 脱冰子导线冰跳跃高度包络线



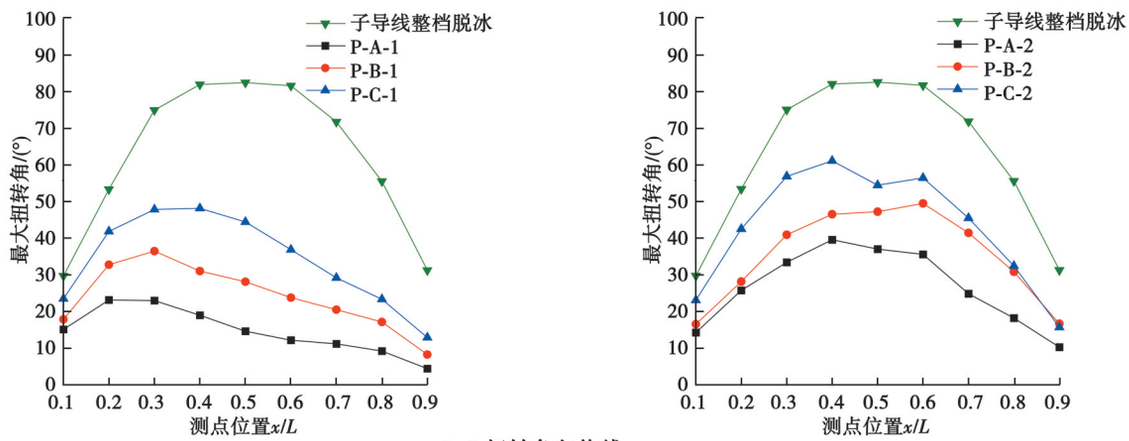
(b) 未脱冰子导线冰跳跃高度包络线



(c) 脱冰子导线横向摆幅包络线



(d) 未脱冰子导线横向摆幅包络线

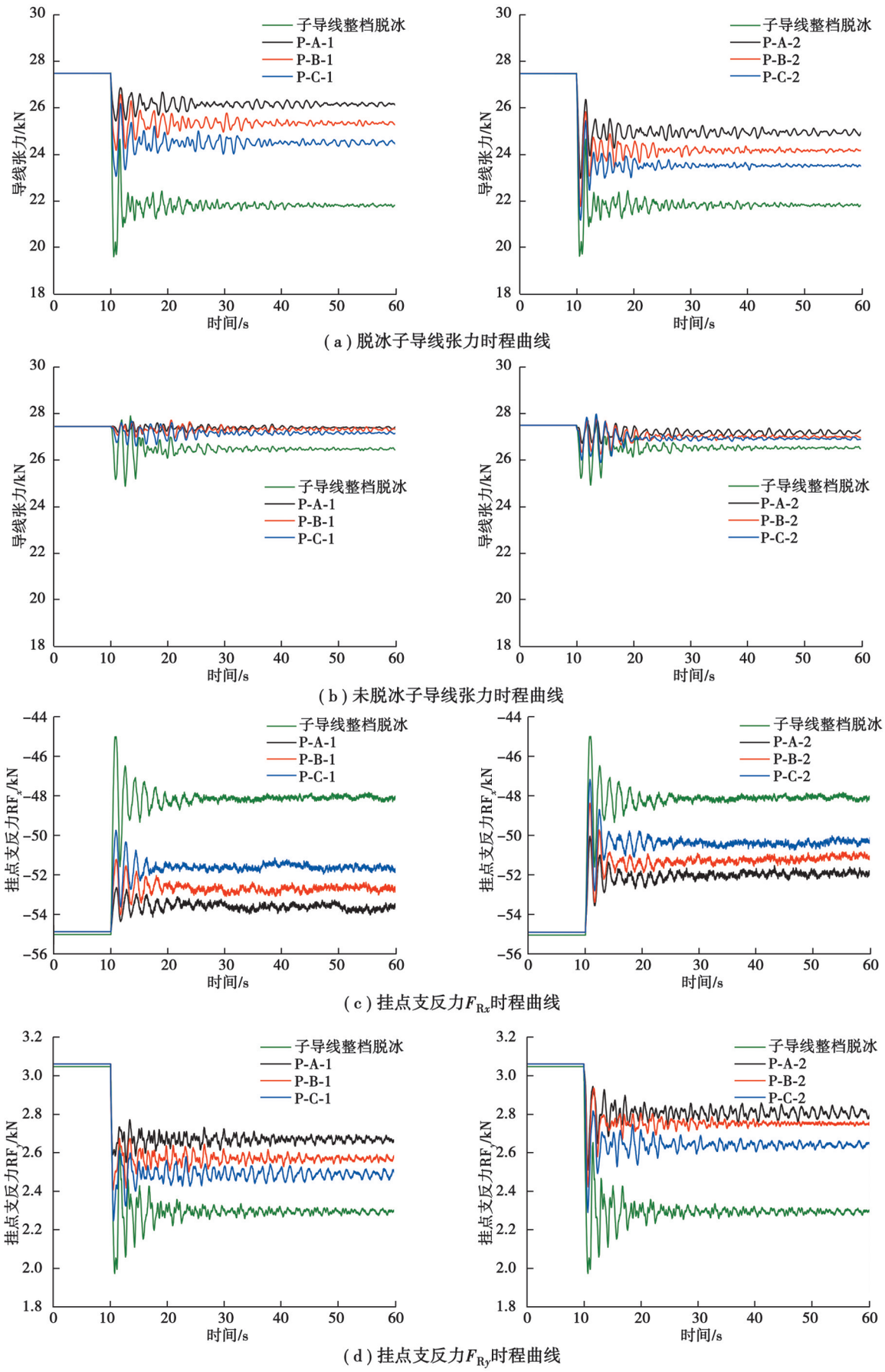


(e) 扭转角包络线

图 7　单根子导线部分脱冰时导线运动参数包络线

Fig. 7　Motion envelopes of sub-conductors after partial ice-shedding

单根子导线整档和部分脱冰情况下,导线张力与挂点支反力时程曲线如图 8 所示。在脱冰跳跃过程中,未脱冰子导线张力会略大于覆冰静态张力值。脱冰位置一定时,导线张力随脱冰率增大而减小,脱冰子导线尤为明显;脱冰率一定时,越靠近导线中部脱冰时,导线张力变化更剧烈。由于双分裂导线分裂间距小,脱冰跳跃以面内运动为主,面外方向挂点支反力 F_{R_z} 较小,不予讨论。由于导线张力大、端部与水平夹角小,顺线方向挂点支反力 F_{R_x} 远大于竖直方向支反力 F_{R_y},且脱冰率越大或脱冰位置越靠近中部,挂点支反力变化越剧烈。与子导线部分脱冰各工况相比,子导线整档脱冰时,导线张力和挂点支反力变化最大。



(a) 脱冰子导线张力时程曲线

(b) 未脱冰子导线张力时程曲线

(c) 挂点支反力F_{Rx}时程曲线

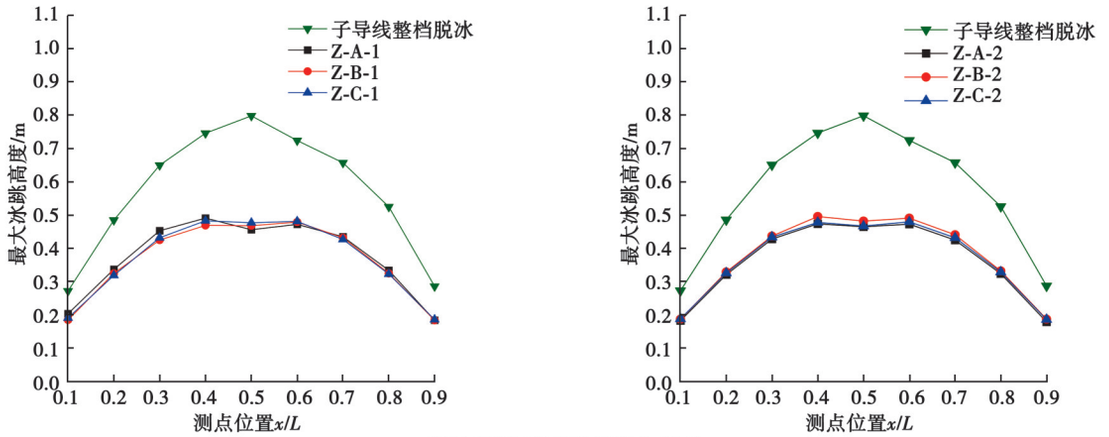
(d) 挂点支反力F_{Ry}时程曲线

图 8 单根子导线部分脱冰时导线张力和挂点支反力时程曲线

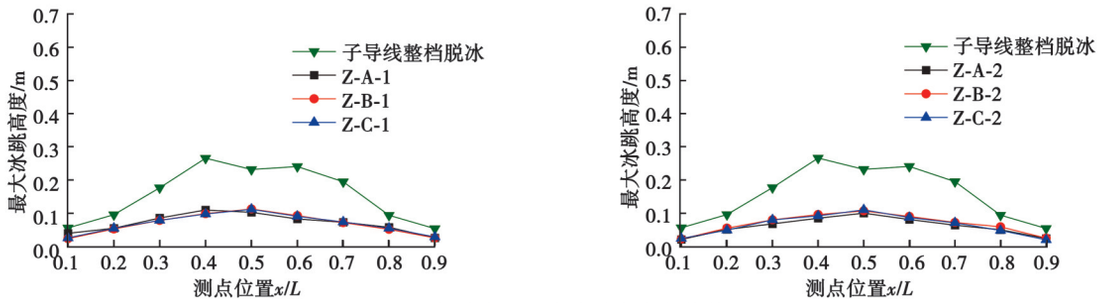
Fig. 8 Time histories of conductor tension and reaction forces at hanging points after partial ice-shedding

3.3　单根子导线拉链式脱冰试验

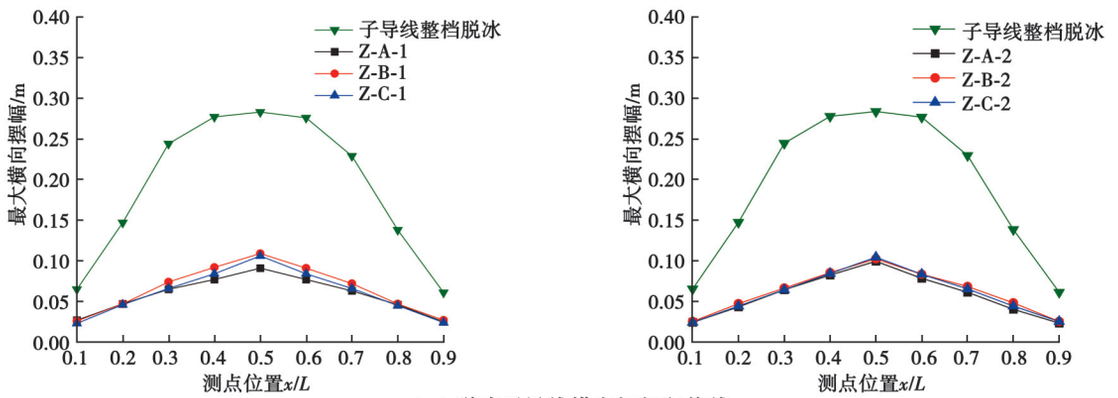
单根子导线拉链式脱冰时,导线运动参数包络线如图9所示。从图9中可见,各拉链式脱冰情况下,脱冰与未脱冰子导线均是中点附近运动响应最大。脱冰速度对运动响应影响不明显;速度一定时,从两端到中部脱冰时引发的运动响应略大于其他脱冰方向引起的响应。与整档脱冰相比,拉链式脱冰引发的导线运动响应较小。



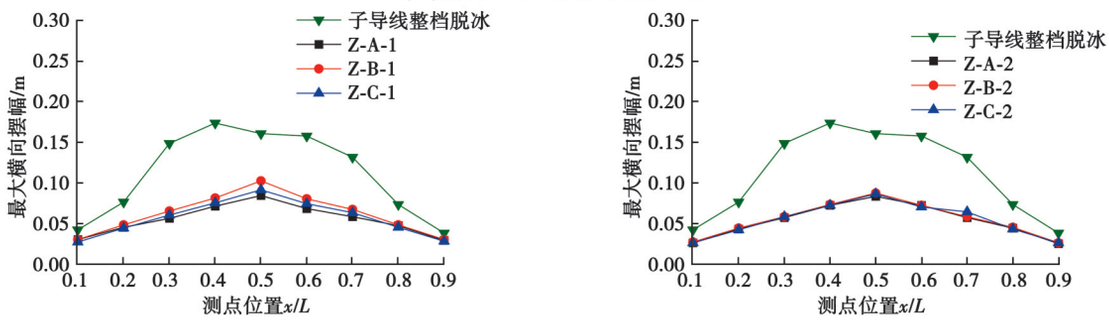
(a) 脱冰子导线冰跳高度包络线



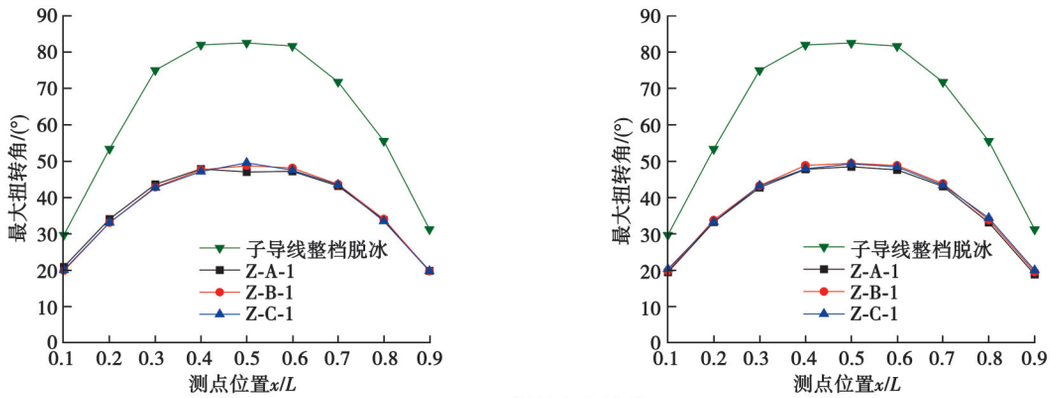
(b) 未脱冰子导线冰跳高度包络线



(c) 脱冰子导线横向摆幅包络线



(d) 未脱冰子导线横向摆幅包络线

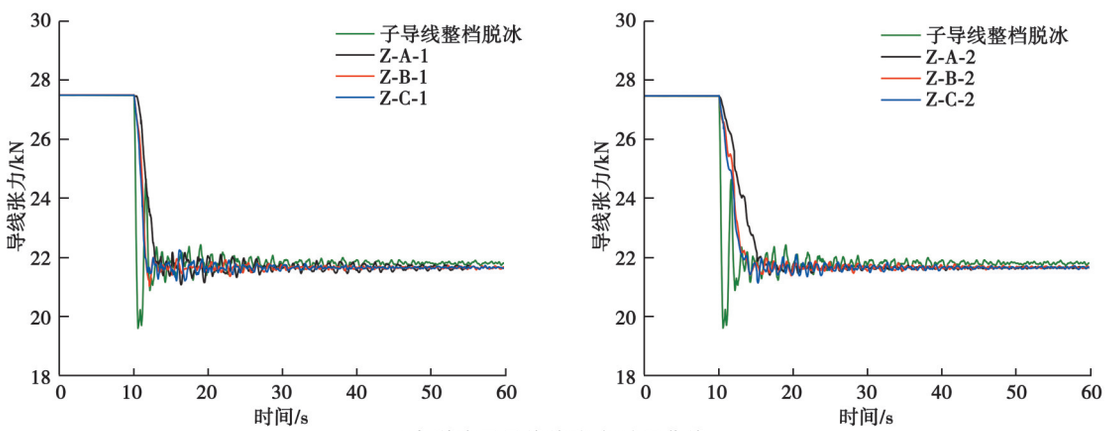


(e) 扭转角包络线

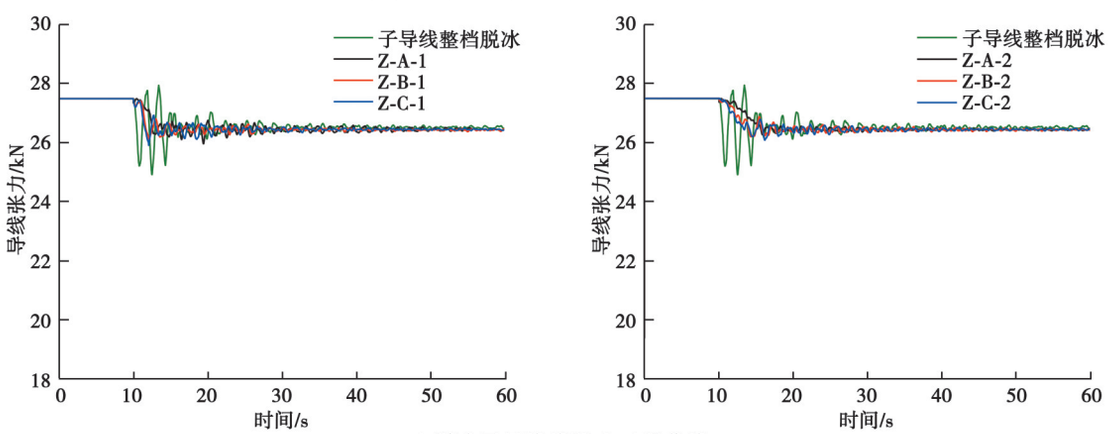
图 9 单根子导线拉链式脱冰时导线运动参数包络线

Fig. 9 Motion parameter envelopes of conductor lines after unzipping ice-shedding

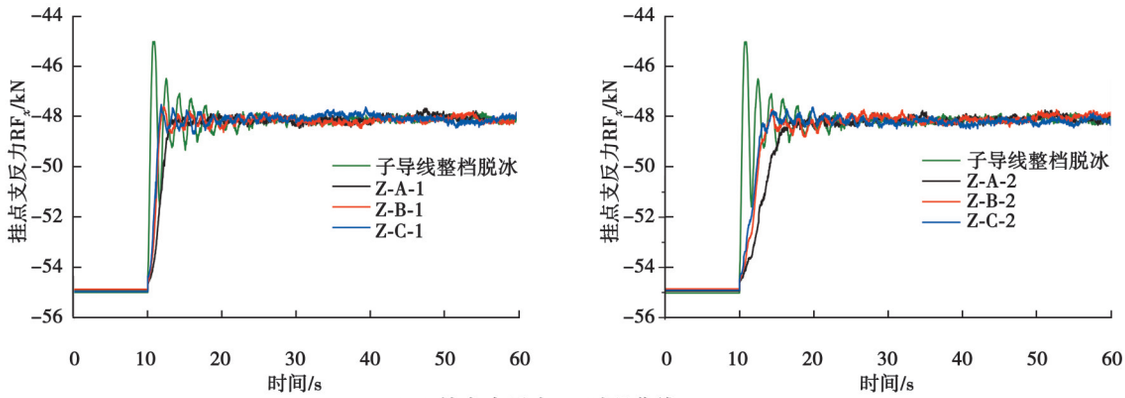
单根子导线拉链式脱冰时各工况下导线张力与挂点支反力时程曲线如图 10 所示。在导线脱冰跳跃过程中,2 根子导线的张力及挂点支反力很快达到平衡,且均未超过覆冰时的静态值。改变脱冰方向和速度,对导线张力及挂点支反力影响不大。与子导线拉链式脱冰各工况相比,子导线整档脱冰时导线张力及挂点支反力变化更剧烈,最终稳定时各工况静态响应相当。



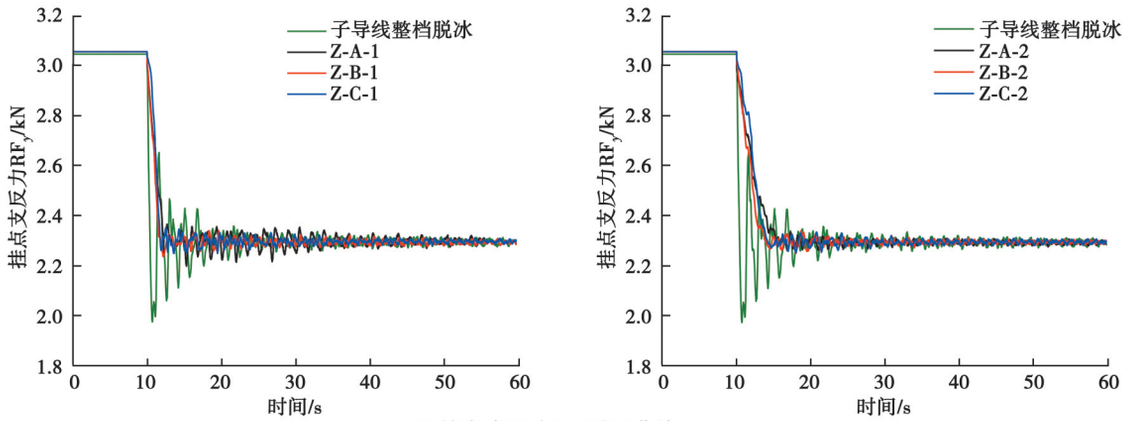
(a) 先脱冰子导线线张力时程曲线



(b) 未脱冰子导线线张力时程曲线



(c) 挂点支反力F_{Rx}时程曲线



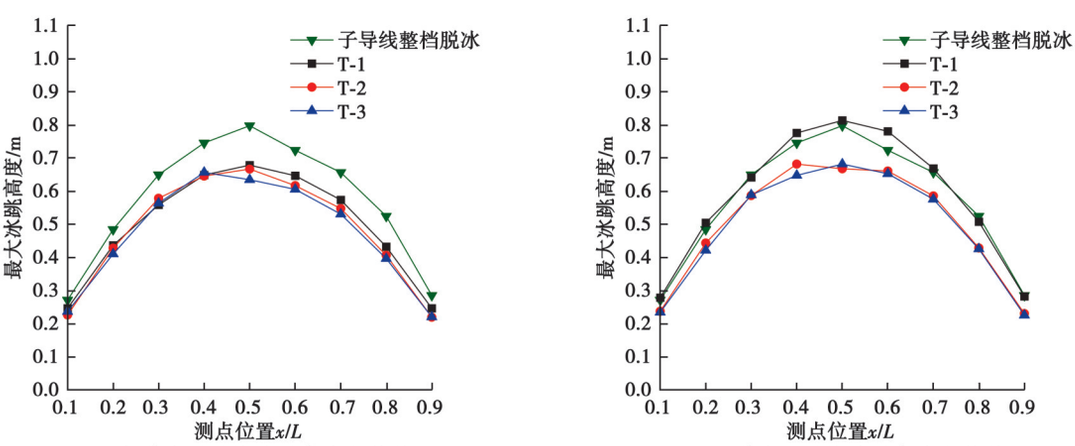
(d) 挂点支反力F_{Ry}时程曲线

图 10　单根子导线拉链式脱冰时导线张力和挂点支反力时程曲线

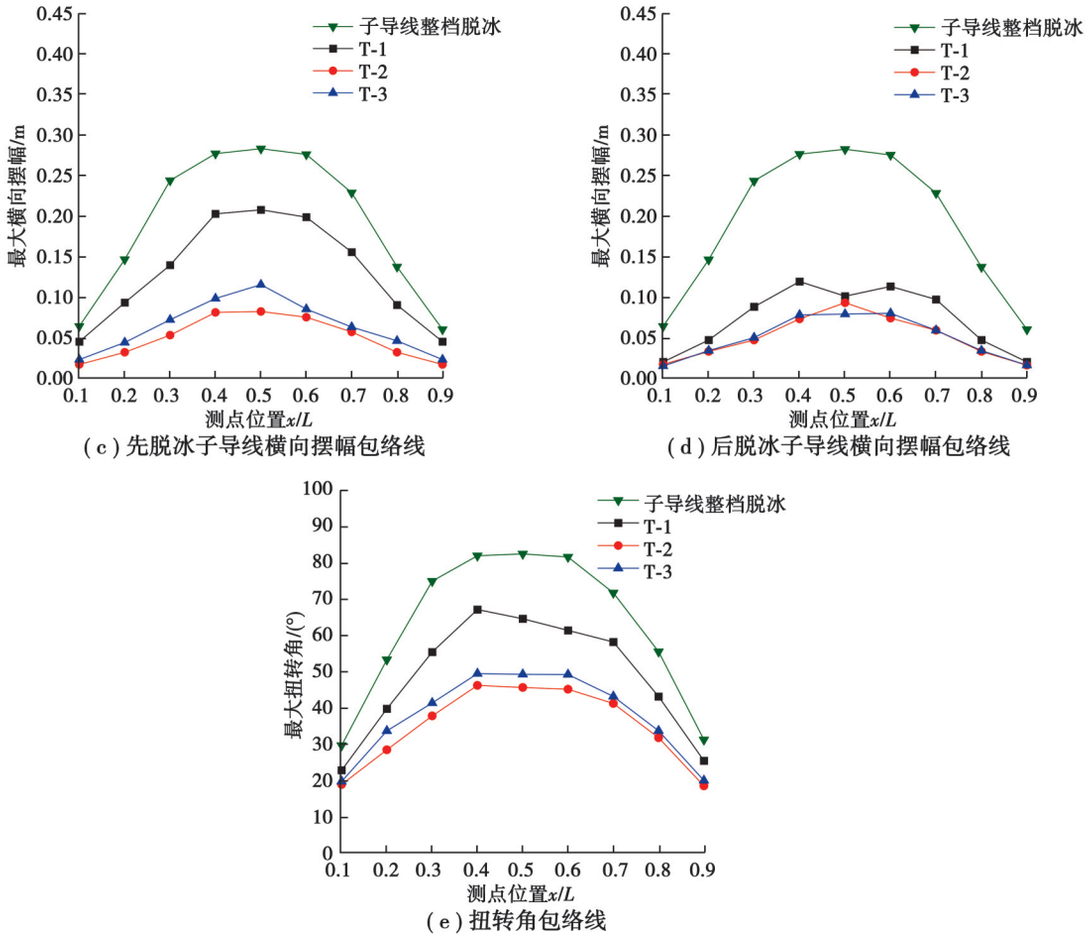
Fig. 10　Time histories of conductor tension and reaction force at hanging point after unzipping ice-shedding from a sub-conductor

3.4　2 根子导线异步脱冰试验

2 根子导线异步脱冰时导线运动参数包络线如图 11 所示。从图 11 中可见，各异步脱冰工况中，2 根子导线均为中点附近运动响应最大。2 根子导线冰跳高度和横向摆幅幅值相当。多数异步脱冰工况下最大横向摆幅和扭转角小于整档脱冰工况对应的响应，当时间间隔为 0.8 s（先脱冰子导线跳至最高点时后脱冰子导线脱冰）时，先脱冰子导线横向摆幅更大，后脱冰子导线冰跳高度更大，且会超过整档脱冰工况最大冰跳高度。所以，工况 T-1 是危险的，实际人工除冰中应尽可能避免此类情况的发生。



(a) 先脱冰子导线冰跳高度包络线　　(b) 后脱冰子导线冰跳高度包络线



(c) 先脱冰子导线横向摆幅包络线

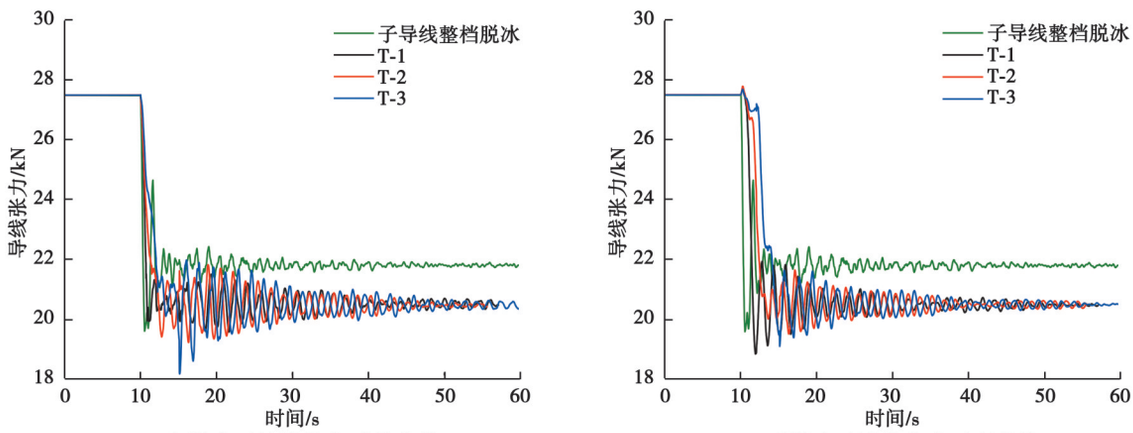
(d) 后脱冰子导线横向摆幅包络线

(e) 扭转角包络线

图 11　2 根子导线异步脱冰时导线运动参数包络线

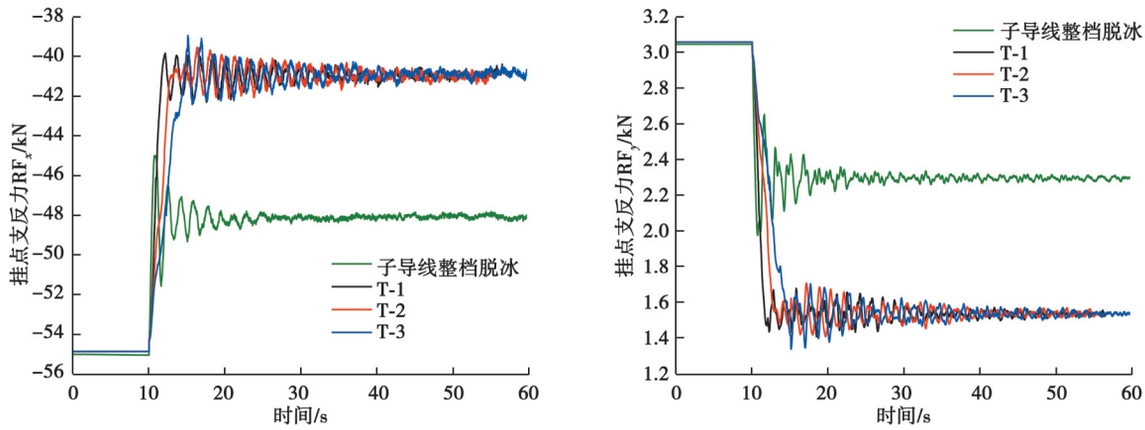
Fig. 11　Motion parameter envelopes of conductor after asynchronous ice-shedding from two sub-conductors

2 根子导线异步脱冰时导线张力与挂点支反力时程曲线如图 12 所示。在脱冰跳跃过程中，2 根子导线的张力及挂点支反力很快达到平衡位置，且均未超覆冰时的静态响应值。2 根子导线张力水平接近。由于 2 根子导线异步脱冰的脱冰量是子导线整档脱冰的 2 倍，所以异步脱冰工况下导线张力与挂点支反力的变化比整档均匀脱冰更剧烈，但最终稳定时相应载荷响应参数也更小。



(a) 先脱冰子导线张力时程曲线

(b) 后脱冰子导线张力时程曲线



(c) 挂点支反力F_{Rx}时程曲线　　(d) 挂点支反力F_{Ry}时程曲线

图 12　2根子导线异步脱冰时导线张力和挂点支反力时程曲线

Fig. 12　Time histories of conductor tension and reaction force at hanging point after asynchronous ice-shedding from two sub-conductors

4　结　论

基于相似性原理建立了分裂导线脱冰动力响应缩比试验方法，并搭建了典型双分裂导线脱冰缩比模拟试验平台，模拟研究了子导线部分脱冰、子导线拉链式脱冰和两根子导线异步脱冰情况下的动力响应特征。得到如下结论：

1)建立的分裂导线脱冰动力响应缩比模拟试验方法，实现了分裂导线子导线覆冰和脱冰，可用于任意覆冰分裂导线和子导线脱冰动力响应的模拟。

2)搭建的双分裂导线脱冰动力响应缩比模拟试验平台，可以模拟子导线脱冰等任意形式脱冰；可以准确测量导线脱冰后的面内、面外和扭转运动以及导线张力和挂点支反力的分量。

3)对典型双分裂导线单根子导线部分脱冰和拉链式脱冰、2根子导线异步脱冰进行了缩比模拟试验，得到了合理的结果。

4)提出的缩比模拟试验方法可以用于任意分裂导线任意脱冰动力响应模拟试验研究，为分裂导线输电线路抗冰设计及人工除冰提供了重要的研究手段。

参考文献

[1] Oertli H. Oscillations de cables electriques aeriens apres la chute de surcharges[J]. Bull Assoc Sue Elect, 1950, 41: 501.

[2] Lips K. Die schnellhohe von freileitungsseilen nach abfallen von zusatzlastcn[J]. Bull Assoc Suisse Elect, 1952, 43: 62.

[3] 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.

[4] Wu C, Yan B, Zhang L, et al. A method to calculate jump height of iced transmission lines after ice-shedding[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 125: 40-47.

[5] Jamaleddine 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.

[6] 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.

[7] Murín J, Hrabovský J, Gogola R, et al. Dynamic analysis of overhead power lines after ice-shedding using finite element method[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 67(6): 421-426.

[8] Ji K P, Liu B, Cheng Y F, et al. Evaluation and optimization of a shock load de-icing method for transmission lines with combined ice failure criteria[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 165: 102818.

[9] 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.

[10] 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(1): 44-52.

[11] Meng X B, Hou L, Wang L M, et al. Oscillation of conductors following ice-shedding on UHV transmission lines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 30: 393-406.

[12] 蒋兴良, 毕茂强, 黎振宇, 等. 自然条件下导线直流融冰与脱冰过程研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2626-2631.
Jiang X L, Bi M Q, Li Z Y, et al. Study on DC ice melting and ice shedding process under natural condition[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2626-2631. (in Chinese)

[13] Van Dyke P, Havard D, Laneville A. Effect of ice and snow on the dynamics of transmission line conductors[M]. Farzaneh M, ed. New York: Springer, 2008: 171-228.

[14] Kollar L E, Farzaneh M. Modeling sudden ice shedding from conductor bundles[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 604-611.

[15] 杨文刚, 苏士斌, 王璋奇. 导线脱冰振动的模拟实验研究[J]. 振动测试与诊断, 2013, 33(5): 892-896, 917-918.
Yang W G, Su S B, Wang Z Q. Simulated experiment of ice shedding from cable[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(5): 892-896, 917-918. (in Chinese)

[16] 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.
Wang Z Q, Qi L Z, Yang W G, et al. 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)

[17] 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 Z Q, Qi L Z, Wang J, 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. (in Chinese)

[18] 王璋奇, 王剑, 齐立忠. 同期脱冰架空输电导线的动张力特性实验研究[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1): 157-162.
Wang Z Q, Wang J, Qi L Z. Experimental study on the dynamic tension characteristics of the overhead transmission conductor under synchronous ice shedding[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(1): 157-162. (in Chinese)

[19] 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 H N, Wu Y Y. Experimental study on dynamic responses of transmission lines caused by ice shedding[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 35-46, 100. (in Chinese)

[20] 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 X Z, Li D, Huang W, 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. (in Chinese)

[21] Xie X Z, Wu Y J, Liang K Y, et al. Experiment study on dynamic effects of tower-line systems induced by ice shedding[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 6241789.

[22] 刘敏, 晏致涛, 冯上铭, 等. 多跨覆冰导线脱冰振动模型风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 223-229.
Liu M, Yan Z T, Feng S M, et al. Wind tunnel model tests for ice-shedding vibration of multi-span icing conductors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(3): 223-229. (in Chinese)

[23] Huang G Z, Yan B, Wen N, et al. Study on jump height of transmission lines after ice-shedding by reduced-scale modeling test[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 165: 102781.

[24] 楼文娟, 张跃龙, 徐海巍, 等. 基于室外导线节段模型的输电线路覆冰与脱冰过程试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 27-35.
Lou W J, Zhang Y L, Xu H W, et al. Field experiments on ice-accretion and ice-shedding processes of power transmission lines based on a conductor segment model[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(3): 27-35. (in Chinese)

[25] Zhang Y L, Guo Y, Lou W J, et al. Dynamic response of a transmission conductor following delayed ice shedding by reduced-scale model test[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 226: 104288.

（编辑　郑　洁）