

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.034

# 覆冰输电导线气动力特性模拟的合理模型

樊 勇<sup>1</sup>, 阮少林<sup>1</sup>, 陈国栋<sup>1</sup>, 侯 阳<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团 云南省电力设计院有限公司, 昆明 650051;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

**摘 要:**对覆冰导线风洞试验的数值模拟和参数分析是获取气动参数的主要手段。进行了覆冰输电导线气动参数数值模拟的几何建模、网格划分、边界条件的选取、湍流模型的选取、求解参数设置等分析研究。明确了加密区首层厚度、层数、厚度、形状及加密条带等对计算结果的影响,得到了合适的网格模型。对  $k-\epsilon$  湍流模型、 $k-\omega$  湍流模型、Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型、Reynolds 应力湍流模型及 SST  $k-\omega$  湍流模型的分析,表明  $k-\omega$  模型虽然能较好地模拟覆冰输电导线的气动力特性,但是对参数比较敏感。 $k-\epsilon$  湍流模型的是模拟覆冰输电导线气动参数的最合理模型。

**关键词:**覆冰; 输电导线; 气动力; 数值模拟; 湍流模型

**中图分类号:** TU375    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0183-06

## Reasonable model aerodynamic characteristics simulation of iced transmission wire

Fan Yong, Ruan Shaolin, Chen Guodong, Hou Yang

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

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The numerical simulation on wind tunnel test of the iced transmission line and parameters analysis is the major means of obtaining aerodynamic parameters. The numerical simulation of the aerodynamic parameters of iced transmission line was carried out. The geometry modeling, meshing, selection of boundary conditions, turbulence model selection, and so on, were discussed to set the solving parameter. The effect of first layer thickness, layer number, thickness, shape, and encryption stripe of the encrypted area on the result of calculation was clarified. Then, the suitable grid model was built. The analysis of the  $k-\epsilon$ , the  $k-\omega$ , the Realizable  $k-\epsilon$ , the Reynolds stress and the SST  $k-\omega$  turbulence model show that the  $k-\omega$  is more sensitive to parameters although it can be well used to simulated the aerodynamic characteristics. The  $k-\epsilon$  turbulence model is the most reasonable model to simulate aerodynamic parameters of iced transmission line.

**Key words:** iced; transmission line; aerodynamic force; numerical simulation; turbulence model

流体流过覆冰输电导线结构的绕流以及尾迹中的旋涡脱落,有可能诱发作用于覆冰输电导线上的纵向和横向荷载,激起了覆冰输电导线舞动,严重时会造成结构的巨大破坏<sup>[1-2]</sup>。目前普遍进行的覆冰导线刚

性测力风洞试验,是为了获得覆冰导线的给定截面的升力系数、阻力系数和力矩系数,这些参数是分析导线的垂直运动、水平运动以及扭转运动的关键<sup>[3-4]</sup>。然而,由于覆冰形状的千变万化,对覆冰导

线风洞试验的数值模拟和参数分析是获取气动参数的主要手段。数值风洞在一定程度上可代替风洞试验,并且数值风洞的计算结果可以为覆冰导线驰振研究提供实际的参考。

黄河<sup>[5-6]</sup>运用高阶有限差分法的迎风格式,探讨了计算域的选取、网格划分以及时间步长的选取对计算结果的影响,模拟了在较高雷诺数下两种不同冰厚的新月形覆冰导线模型在不同攻角下的升力系数、阻力系数和 Strouhal 系数的变化规律。姚育成<sup>[7]</sup>在雷诺数 10000 下,运用流函数-涡量法对不同覆冰厚度的新月形覆冰导线的气动力特性进行在二维空间内的数值分析,得出阻力系数和升力系数的变化规律。腾二甫<sup>[8-9]</sup>分别计算两种不同冰厚的新月形覆冰导线模型在不同风速下的阻力系数和升力系数;分析了冰厚、风速对覆冰导线模型气动力特性的影响;夏正春同样采用了悬挂集中质量块的方法模拟覆冰,释放集中质量块模拟脱冰的方法,对一个单档架空输电导线进行实验,测得了架空线的张力变化情况<sup>[10]</sup>;Morgan 通过在一个 132 kV 的五档输电线路采用悬挂集中质量块的方法模拟覆冰,在档中释放质量块模拟脱冰,测得了脱冰后导线的跳跃高度<sup>[11]</sup>。王璋奇模拟了单档架空线的脱冰振动情况,通过改变输电导线的覆冰厚度、脱冰位置、脱冰量、悬跨比等条件,研究了不同工况下架空输电导线在集中质量块脱冰方法下的张力变化情况<sup>[12-13]</sup>。Kalman T 针对输电导线脱冰跳跃的问题,在有限元软件 Adina 中建立了非线性有限元模型,采用冰单元法模拟覆冰导线在不同档距和脉冲荷载作用下的脱冰,得到了不同工况导线脱冰后的拉力,位移等响应<sup>[14]</sup>。Jamaleddine 采用附加力模拟法,通过有限元软件 ADINA 建模,用集中力模拟输电导线的覆冰,移除集中力模拟脱冰<sup>[15]</sup>。Laszlo 等人在 Adina 软件中采用变密度法模拟了单档子导线在考虑间隔棒作用下的脱冰响应,分析了输电导线脱冰对整个输电塔线体系的影响<sup>[16]</sup>,上述研究均基于特定的覆冰形状,并没有对湍流模型进行具体的探讨。

在计算流体力学数值模拟中,湍流模型的选择、网格的建立以及参数的选取是研究的关键内容。下面采用 GAMBIT 建立二维计算网格,通过考虑加密区首层厚度、加密区层数、加密区厚度、加密区形状以及加密条带对网格质量的影响来分别建立测试网格并采用 FLUENT 进行测试,确定合适的网格建立方法,得出合理的湍流模型。

## 1 几何建模

这里采用 GAMBIT 建立用于网格测试的二维网格,基本计算数据:覆冰导线直径为 33 mm,冰厚 14 mm,模拟风场速度为 12 m/s,覆冰导线截面如图 1 所示。

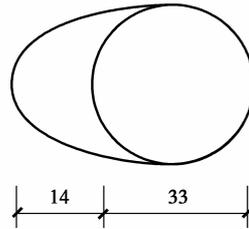


图 1 14 mm 冰厚的覆冰导线截面(单位:m)

取计算区域为一个矩形区域,大小为 2 000 mm × 1 400 mm,导线的中心处于坐标原点,到入口边界和出口边界的距离分别为 500 mm 和 1 500 mm,由此建立二维几何模型,如图 2 所示。在这里建立几何模型时应注意覆冰导线至上下边界及其到入口和出口的距离,尤其对于覆冰导线至出口边界的距离,在建立模型的时候需大于 40D,可以保证在这个区域内尾流充分发展。

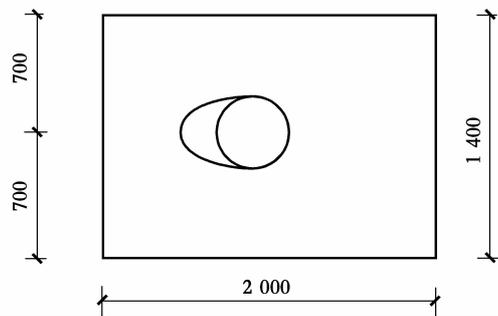


图 2 二维计算模型示意图(单位:m)

### 1.1 网格划分

网格的质量对于 CFD 数值模拟精度及计算效率有着重要的影响。在二维模型中,由于结构网格网格点之间的邻近关系有序规则且可以准确处理边界条件,所以采用结构网格建立起的网格质量较采用非结构网格的质量要高,在此次分析中采用四边形单元进行结构化网格划分。

网格的划分是由线到面逐级划分的,对覆冰导线截面附近进行加密,离导线截面越远网格越稀疏。在对覆冰导线截面附近进行加密处理时,主要采用了 GAMBIT 中的边界层设置,在此处边界层的设置

中主要注意加密区网格的首层厚度、加密区网格层数、加密区网格厚度以及加密区形状的影响。在这里加密区网格的首层厚度对于计算结果的影响非常大, 必须多次试画并进行测试, 最后得出合适的结果。

对于加密区网格层数及厚度, 在进行划分的过程中主要原则是保证计算精度以及要保证网格数量合适, 不能太大也不宜太小, 太大会使计算时间加大, 并且迭代的累积误差也会相应加大, 反而不利于模拟, 太小同样会使得计算结果不可信, 起不到加密区应有的作用。

加密区的形状同样需要考虑, 在本文中主要对比了类圆形以及与覆冰导线一致的形状, 类圆形主要是由于采用了边界层的办法造成的, 与覆冰导线一致的情况未采用边界层的办法设置加密区。另外, 在考虑到流体的尾流的情况下, 还需设置加密条带。

最后, 本文选出了比较合适的网格划分方法, 按照加密区首层厚度为 0.3 mm, 加密区层数取为 60 层, 加密厚度为  $2D$ ,  $D$  为导线直径, 加密区形状取与覆冰导线一致, 设置加密条带, 用 GAMBIT 来建立的计算网格如图所示, 新月形覆冰导线的网格划分如图 3 所示。

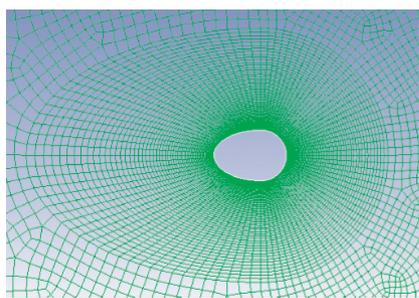


图 3 新月形覆冰导线的网格划分

## 1.2 边界条件选取

本文流体为不可压缩流, 所以采用 Velocity-inlet 速度进口边界条件, 在用 FLUENT 进行模拟时需要风速、湍流强度以及水力直径进行设置。计算区域的出口处采用完全发展的出流边界条件。此边界条件适用于模拟出口处流动为完全发展的情况, 即流域内的流动由区域内部外推得到, 且对上游流动没有影响。

本文计算模型几何建模时覆冰导线中心位置离出口边界的距离超过了  $40D$ , 能够保证流动在出口边界处完全发展。计算区域的两侧采用对称边界条

件, 在对称轴或者对称面上既无质量交换, 又无热量等物理量的交换, 在垂直对称面的方向上物理量梯度为零。在对称边界上, 只需要定义对称边界的位置, 无需设置其他参数。计算区域中的导线与流域的交界线采用无滑移壁面条件。此边界条件主要是用来限定 Fluid 跟 Solid 区域的, 无滑移壁面的速度为零, 壁面处流体速度为零。

边界条件的设置情况如图 4 所示, 入口边界 A 为速度入口边界条件, 出口边界 C 为出流边界条件, 上下两边界 B、D 为对称边界条件, 覆冰导线与流体的交界面 E 为壁面边界条件。

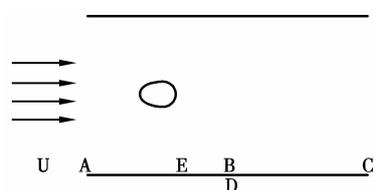


图 4 边界条件设置示意图

## 1.3 湍流模型选取

湍流模型的选取对于数值模拟结果的影响很大, 对于不同的问题需要采用不同的湍流模型, 而针对不同湍流模型, 在网格划分时又需要考虑不同的划分方法。对于本文所研究的问题, Realizable  $k-\epsilon$  模型、Reynolds 应力方程模型及 SST  $k-\omega$  模型理论上都是可选湍流模型, 但在初步二维网格测试下, 由于只有进行压力梯度修正的加强壁面标准  $k-\epsilon$  模型及考虑了低雷诺数和剪切流修正的 Standard  $k-\omega$  模型的模拟结果与实验值相差不大外, 其他湍流模型的模拟结果与实验值都相差太远, 所以本文主要验证这两个模型的模拟效果。

在本文中对  $k-\omega$  模型中的 SDR Prandtl Number 进行修改, 在测试中将其改为 1.3 的模拟结果比较接近实验值, 所以在其后的二维模型验证中先采用 1.3 进行模拟。此时, 水力直径 HD 取为 1 m, 湍流强度 TI 取为 1%。

## 1.4 参数设置及其他设置

流体是不可压缩的空气, 其密度采用一般试验温度条件下的值, 即  $1.225 \text{ kg/m}^3$ 。参考值设置迎风面积为特征长度乘以导线长度, 特征长度取导线直径, 为 0.033 m, 导线长度在二维网格中取为 1 m, 而在三维网格中为  $z$  方向的厚度即为 0.2 m。所以二维网格中迎风面积取为  $0.033 \text{ m}^2$ , 三维网格中迎风面积取为  $0.0066 \text{ m}^2$ 。

流场数值计算采用 Coupled 算法, 经过测试本

文所建模型对于流场计算方法不敏感,采用 SIMPLE、SIMPLEC、PISO 及 Coupled 这几种算法得出的结果一样,但对所选用的离散格式比较敏感。经过多次测试得出了合适的离散格式,压力项采用标准方法进行离散,动量、湍动能及比耗散率都采用二阶迎风格式进行离散。欠松弛因子一般不需修改,采用默认值。初始条件采用入口处的值。对于迭代残差监测的设置可以采用收敛标准为  $1 \times 10^{-7}$ ,这是为了保证迭代次数,不至于在迭代过程中出现中断,迭代次数设为 1 000 步,迭代完成的标志主要看所得的数据是否稳定,若已重复出现不变的数据,那迭代过程可结束。

## 2 网格测试

### 2.1 加密区首层厚度的影响

加密区首层厚度取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、1.0 mm,加密区层数取 60 层,加密区厚度取 2D,加密区形状取与覆冰导线一致,不设加密条带。网格测试时,覆冰导线的攻角为  $0^\circ$ 。由于在网格测试中阻力系数值变化较稳定,而升力系数及力矩系数相对难以控制,所以采用阻力系数作为控制量进行测试。从图 5 可以看出  $k-\epsilon$  模型中,0.72 出现 4 次且加密区首层厚度为 0.1~0.3 mm 时阻力系数都为 0.72,而  $k-\omega$  模型中 0.85 出现 4 次且加密区首层厚度为 0.1~0.3 mm 时阻力系数都为 0.85,所以加密区首层厚度应该在 0.1~0.3 mm 中选择,又由于网格数量应经量少以便于减少迭代次数,加快计算速度,所以选取加密区首层厚度为 0.3 mm。

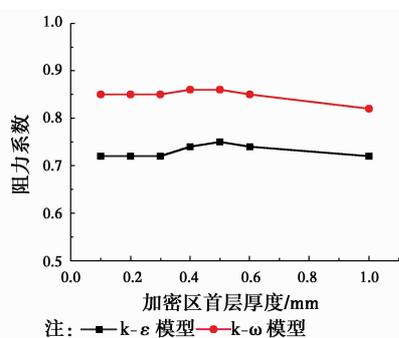


图 5 加密区首层厚度对计算结果的影响

### 2.2 加密区层数的影响

加密区层数选取 40、60、80 层进行网格测试,加密区厚度取 2D,加密区首层厚度 0.3 mm,加密区形状与覆冰导线一致,不设加密条带。测试结果如图 6,从图中可以看出选取加密区层数为 60 层比较

合适。

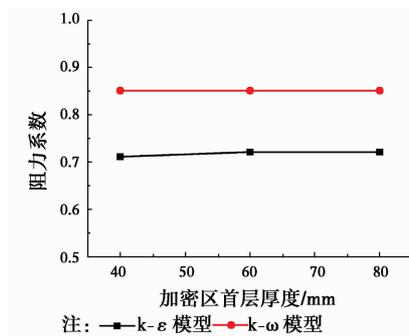


图 6 加密层数对计算结果的影响

### 2.3 加密区厚度的影响

加密区厚度选取 2D 及 2.5D 进行测试,加密区首层厚度 0.3 mm,加密区层数取 60 层,加密区形状与覆冰导线一致,不设加密条带。测试表明看出两种加密区厚度得出的结果是一样的,为了减少网格数量,所以选取加密区厚度为 2D。

### 2.4 加密区形状的影响

加密区形状取类圆形(用 GAMBIT 建立网格时采用边界层的方法会产生此种情况)及与导线形状一致两种情况进行测试,加密区首层厚度 0.3 mm,加密区层数取 60 层,加密区厚度取 2D,不设条带。测试结果表明两种情况得出的数据是一致的,然而在建立 3D 网格的过程中,采用前一种较为方便,这样在用 GAMBIT 建立网格时采用边界层的方法来设置加密区,所以采用前者。

### 2.5 加密条带的影响

在测试中加与不加加密条带对于结果并无影响,但一般情况下是应该加设加密条带的,由于在二维网格测试时难以对所有情况进行论证,所以在考虑到尾流影响的情况下,有必要对覆冰导线的计算流域内  $x$  及  $y$  方向都进行条带加密(3D 网格中  $z$  方向有加密区加密)。

## 3 湍流模型选取

### 3.1 $k-\epsilon$ 模型

根据实验基本数据可知,风速为 12 m/s,特征长度为导线直径 33 mm,采用湍流计算程序计算得到的湍流强度值为 4.47%,因此在采用  $k-\epsilon$  模型计算时应该采用此值,如下进行对比中也发现湍流强度取 4.47%时,计算结果为 0.76,与实验值更接近。此时,水力直径  $HD = 4A/R = 1.4$  m,  $A = 1.4 \times 1.4$  m<sup>2</sup>,  $R = 4 \times 1.4$  m。由此初步采用湍流强度值

4.47%,水力直径 1.4 m。由于在 0°、45°、90°、135°、180°处三分力系数变化比较明显,因此可以用这几个角度处的模拟结果进行误差验证,结果如下:(控制量阻力系数误差值应小于 20%,升力系数及力矩系数难以控制误差在 20%)。从图 7 中可以看出,阻力系数的误差都在 20%以内,所以在湍流强度为 4.47%,水力直径为 1.4 m 的参数取值是合理的。

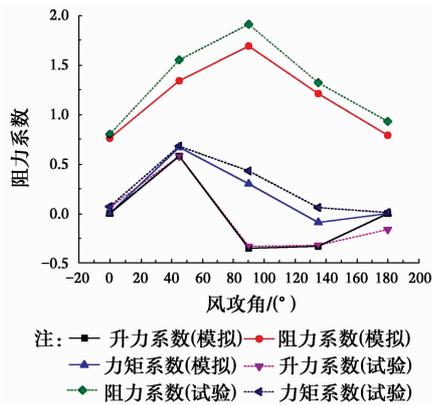


图 7  $k-\epsilon$  湍流模型与试验结果对比

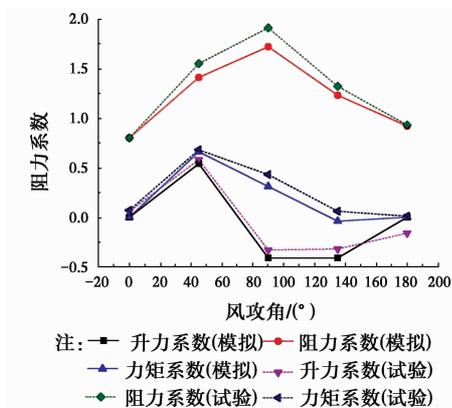


图 8  $k-\omega$  湍流模型与试验结果对比

### 3.2 $k-\omega$ 模型

对于  $k-\omega$  模型,由于其对于参数比较敏感,所以得进行多次参数测试,选取合适的参数, $k-\omega$  模型的参数可以不用根据湍流计算程序计算得到,对于此模型,主要是为了找到她的适用性,以验证此模型可以用于覆冰导线的模拟。计算表明,SDR 参数的取值对计算结果较大。当  $SDR = 1.42$ ,湍流强度为 0.01%,水力直径为 1.4 m 时的模拟结果与试验值吻合较好,如图 8 所示,阻力系数的误差都较小。

若  $SDR = 2$ ,当入口湍流度(%)分别取值为 0.01、0.1、1、2、3、4.47 时,阻力系数分别为 2.02、1.83、1.47、1.4、1.37。入口湍流度越大,阻力系数越小。当水力半径分别取值为 1、0.5、0.3、0.2 m 时,

阻力系数分别为 1.26、1.03、0.86、0.76。可以看出水力半径越小,阻力系数越小。由上述两种结果我们可以缩小范围得出入口湍流度及水力半径的取值。前面数据计算结果表明, $TI = 1\%$ , $HD = 0.2$  m 时, $Cd = 0.79$ ,这与试验值基本吻合。综上,两种优化参数设置为:1)  $SDR = 1.42$ , $TI = 1\%$ , $HD = 0.2$  m;2)  $SDR = 2$ , $TI = 0.01\%$ , $HD = 1.4$  m。

其中由于  $k-\epsilon$  模型不需修改参数,模拟时的迭代速度及收敛速度都快,且模拟结果与试验值也比较吻合,在模拟覆冰输电导线阻力系数方面属于最合理模型。对于  $k-\omega$  模型的两种参数设置在一定程度上是说明了问题的,表明此湍流模型可以适用于覆冰导线舞动分析的数值模拟,但是,其对于参数比较敏感,这对于其他的数值模拟问题仅有一定的借鉴意义。

## 4 结 论

对覆冰导线风洞试验的数值模拟和参数分析是获取气动参数的主要手段,进行了覆冰输电导线气动参数数值模拟的几何建模、网格划分、边界条件的选取、湍流模型的选取、求解参数设置等分析研究。基于数值模拟,得到了合适的网格模型。明确了加密区的相关影响因素,包括加密区首层厚度、层数、厚度、形状及加密条带的影响及解决的方法。

通过对  $k-\epsilon$  湍流模型、 $k-\omega$  湍流模型、Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型、Reynolds 应力湍流模型及 SST  $k-\omega$  湍流模型的分析表明, $k-\epsilon$  湍流模型与  $k-\omega$  湍流模型在模拟覆冰输电导线的气动力特性方面具有较大的优势。尤其是  $k-\epsilon$  湍流模型的实用性较好,在修改了参数之后, $k-\omega$  模型也能较好地模拟覆冰输电导线的气动力特性,提出的两种参数设置对于类似的计算有一定的借鉴意义。

### 参考文献:

[1] Hartog D. Transmission line vibration due to sleet [J]. AIEE Transmission, 1932: 1074-86.  
 [2] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping, Part II-torsional mechanism [J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(2): 708-23.  
 [3] Nigol O, Clarke G J, Havard D G. Torsional stability of bundle conductors [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(6): 1666-74.  
 [4] 黄河. 覆冰输电导线气动力特性的数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001:43-52.

- [5] 黄河,刘建军,李万平.覆冰导线绕流的数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2004,23(6):767-769.
- [6] 姚育成,李万平,李良军.高雷诺数下钝体绕流的数值模拟[J].华中科技大学学报,2003,21(2):106-108.
- [7] 滕二甫.新月形覆冰导线横风向驰振气动力参数的数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [8] 滕二甫,段忠东,张秀华.新月形覆冰导线气动力特性的数值模拟[J].低温建筑技术,2008(1):86-88.
- [9] 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.
- [10] 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..
- [11] 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(12):1982-1988.
- [12] 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.
- [13] Kalman T, Farzhneh M, Mcglure G. Numerical analysis of the dynamic defects of shock-load-induced ice shedding on overhead ground wires[J]. Computers and Structures 2007, 85(7/8): 375-384.
- [14] Jamaledine A, Mcglure G. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA [J]. Computer and Structures, 2003, 47: 523-53.
- [15] Laszlo E, Farzaneh M. Vibration of bundled conductors following ice shedding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1097-1104.

(编辑 吕建斌)