

文章编号: 1000-4750(2011)10-0009-07

导线覆冰脱冰有限元模拟方法的适用性分析

*沈国辉¹, 徐晓斌¹, 楼文娟¹, 孙炳楠^{1,2}

(1. 浙江大学土木工程学系, 杭州 310058; 2. 浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100)

摘 要: 针对导线覆冰脱冰有限元分析中的附加冰单元法和改变密度法, 采用相同算例进行方法的适用性分析, 澄清以往学者在分析时冰参数选择不合理之处, 并提出计算时冰力学参数的合理建议值。研究表明: 在应用附加冰单元法进行导线覆冰脱冰计算时, 以往学者取 10GPa 作为冰弹性模量的取值是不合理的, 根据算例结果, 建议冰的弹性模量取不超过 10^7 Pa。当冰参数合理取值后的附加冰单元法与改变密度法具有等价性, 均适用于导线覆冰脱冰的有限元分析。

关键词: 输电导线; 有限元; 覆冰; 脱冰; 模拟方法

中图分类号: TM751 **文献标志码:** A

APPLICABILITY ANALYSIS OF FINITE ELEMENT METHODOLOGIES TO SIMULATE THE ICE-ACCRETING AND ICE-SHEDDING ON TRANSMISSION LINES

*SHEN Guo-hui¹, XU Xiao-bin¹, LOU Wen-juan¹, SUN Bing-nan^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: An adjunctive ice element methodology and a density changing methodology used to analyze the ice-accreting and ice-shedding on transmission lines are investigated. The applicability analysis of the two methodologies is carried out based on an identical example. The mechanical parameters of ice used in the two methodologies are clarified and the appropriate values of ice parameters are suggested. The results from this study show that it is inappropriate for some researchers to use 10GPa as the elastic modulus of ice when applied to an adjunctive ice element methodology. According to calculating results, the elastic modulus of ice is suggested to less than 10^7 Pa. When the mechanical parameters of ice are appropriately defined, the adjunctive ice element methodology is equivalent to the density changing methodology and both of them can be used to simulate the ice-accreting and ice-shedding on transmission lines.

Key words: transmission line; finite element method; ice-accreting; ice-shedding; simulation method

湿冷气候条件下导线的覆冰脱冰, 严重威胁到了输电线路的安全。2008 年 1 月, 大规模的雨雪冰冻天气袭击南方地区, 造成 10kV~110kV 线路倒塔超过 14 万基, 220kV 及以上线路倒塔 1500 多基^[1]。据 2008 年雨雪冰冻灾害的灾后调查^[2], 冰灾

中 90%左右的倒塔都是由于不均匀覆冰及脱冰产生。因此研究输电导线的覆冰脱冰具有非常重要的意义。

在输电线路的覆冰脱冰研究中, 常用的有 3 种方法, 即现场实测、模型试验和有限元模拟。由于

收稿日期: 2010-02-04; 修改日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(50638010); 浙江省自然科学基金项目(Y1080207)

作者简介: *沈国辉(1977—), 男, 浙江台州人, 副教授, 博士, 从事结构计算分析和结构风工程研究(E-mail: ghshen@zju.edu.cn);

徐晓斌(1985—), 男, 山西太原人, 硕士生, 从事结构风工程研究(E-mail: eric1985air@163.com);

楼文娟(1963—), 女, 浙江绍兴人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构计算力学与结构风工程研究(E-mail: louwj@zju.edu.cn);

孙炳楠(1940—), 男, 浙江桐乡人, 教授, 学士, 博导, 从事结构分析、结构风工程等研究(E-mail: sbn@zju.edu.cn).

覆冰脱冰过程的随机性和不可预测性,因此现场实测资料几乎没有;由于很难准确模拟均匀覆冰和突然脱冰的情况,因此模型试验的研究也很少,仅Jamaleddine^[3]报道了他们的试验。目前广泛使用的方法为有限元数值模拟^[3-11],具体的模拟方法有附加力模拟法^[3]、附加冰单元法^[4-6]和改变密度法^[7-10]。但研究人员在使用上述有限元方法时,所取冰的力学参数各不相同,同时各种方法的适用性和等价性也没有进行过比较。

鉴于此,本文针对输电导线覆冰脱冰有限元分析中的两种常用方法,即附加冰单元法和改变密度法,利用相同算例进行两种方法的适用性和等价性分析,澄清以往学者在分析时冰力学参数选择不合理之处,并提出冰力学参数的合理建议值。

1 输电导线的覆冰类型

由于输电导线覆冰时温度、湿度等的影响,导线表面覆冰的密度和力学特性等存在很大差别。输电导线的覆冰类型通常可分为4种:1)雨淞:质地坚硬,密度为 $0.5\text{g}/\text{cm}^3\sim 0.9\text{g}/\text{cm}^3$,附着力很强,形成气温在 $-4^\circ\text{C}\sim 0^\circ\text{C}$,相对湿度在80%以上,可在短时间内形成高荷载;2)雾淞:质地松软,密度为 $0.1\text{g}/\text{cm}^3\sim 0.3\text{g}/\text{cm}^3$,附着力很小,形成气温在 $-5^\circ\text{C}\sim 6^\circ\text{C}$,相对湿度在80%以上;3)湿雪:质地松软,密度为 $0.1\text{g}/\text{cm}^3\sim 0.85\text{g}/\text{cm}^3$,形成气温在 $0.5^\circ\text{C}\sim 2^\circ\text{C}$,可在短时间内形成高荷载;4)干雪:很轻,密度为 $0.05\text{g}/\text{cm}^3\sim 0.1\text{g}/\text{cm}^3$,形成气温大大低于冰点。

由以上4种覆冰类型可知,对输电线路危害较大的为雨淞和湿雪,两者的共同点为:密度均较大,容易在短时间内形成高荷载,同时形成时的气候条件均为气温在冰点附近且相对湿度较大。这种覆冰气候环境与南方很多地区的覆冰天气相符合,这也是南方比北方更容易遭受冰灾的一个主要原因。

2 覆冰脱冰有限元模拟方法综述

国内外已有一些学者采用有限元方法对输电导线的覆冰脱冰进行模拟,主要有以下3种方法:

1)附加力模拟法。Jamaleddine^[3]在ADINA中采用10个等间距的集中力来模拟导线覆冰,利用突然释放外力方法来模拟脱冰。由于该方法采用几个集中力来模拟均布的覆冰荷载,其精确度不高,此后鲜有学者采用。

2)附加冰单元法。Kalman^[4]、李黎^[5]和沈国辉^[6]等采用附加冰单元法来模拟导线的覆冰脱冰,利用激活冰单元来模拟覆冰,瞬间移除冰单元来模拟脱冰。

3)改变密度法。Fekr^[7]、Kollar^[8]、尹鹏^[9]和陈科全^[10]等采用改变密度法来模拟导线的覆冰脱冰,利用增加导线密度来模拟输电导线覆冰,利用减少导线密度来模拟脱冰。

本文针对覆冰脱冰有限元模拟的2种常用方法,即附加冰单元法和改变密度法,采用相同实例进行对比分析,探讨在应用这两种方法时冰的力学参数的合理取值,并比较2种方法在模拟方法上的适用性和等价性。

3 冰的力学参数

导线覆冰脱冰的有限元计算中,需要涉及到冰的相关力学参数,主要为密度和弹性模量,以往研究^[4-11]中的参数选取见表1。由表1可知,较多学者研究时冰密度取为 $0.9\text{g}/\text{cm}^3$,弹性模量取10GPa,而沈国辉^[6]在分析时认为冰的刚度贡献应很小,暂取冰的弹性模量为 10^4Pa 。

表1 以往研究采用的冰的力学参数
Table 1 Ice parameters used in previous studies

| 作者 | 模拟方法 | E/Pa | $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ |
|--|--------------|---------------|-------------------------------|
| Kalman ^[4] 、李黎 ^[5] | 附加冰单元法 | 10^{10} | 0.9 |
| 沈国辉 ^[6] | 附加冰单元法 | 10^4 | 0.9 |
| Fekr ^[7] 、Kollar ^[8] | 改变密度法 | / | 0.9 |
| 尹鹏 ^[9] 、陈科全 ^[10] | 改变密度法 | / | / |
| 侯镭 ^[11] | 文献中方法和参数均未提及 | | |

冰弹性模量的获取方法中最常用的是冰的单轴拉压试验^[12],冰的弹性模量可采用下式^[12]计算:

$$E = 10 - 0.0351v_b \quad / \text{GPa} \quad (1)$$

式中, v_b 为冰的含盐度。这大概就是以往研究^[4-5]采用10GPa作为冰的弹性模量的出处。

很显然,式(1)中弹性模量的计算方法主要针对晶体排列良好和结构密实的纯冰,而附着在输电导线外侧的冰的晶体结构不规整,密实度也不如纯冰试块高,因此导线覆冰的弹性模量采用10GPa的取值值得商榷。

4 导线覆冰的有限元模拟

4.1 导线覆冰的计算假设

输电导线的覆冰是一个缓慢发展的过程,可以

对导线覆冰提出以下 2 条计算假设: 1) 覆冰随时间缓慢叠加形成, 可假设覆冰的应力不会太大, 查纯冰的极限抗拉强度为 0.7MPa~3.1MPa^[13], 实际上覆冰的应力应比 0.7MPa 小很多, 同时本文计算中取冰的极限抗拉强度为 0.7MPa; 2) 覆冰后冰和导线不产生相对滑移, 即可以采用冰单元和导线单元共结点的方法建立冰和导线的有限元模型。

4.2 典型跨导线的计算参数

取某典型跨导线进行分析, 导线参数见表 2。导线跨度为 300m, 不设置绝缘子, 即两端铰支, 其计算模型如图 1 所示。导线的设计覆冰厚度根据冰区划分通常为 5mm~20mm, 而在重冰区可达 30mm 以上, 本文取 30mm 覆冰厚度进行分析。

表 2 300m 跨导线的型号和参数
Table 2 Parameters of 300m-span cable

| 参数 | 导线 |
|---------------------------|----------------|
| 型号 | 1xLHBGJ-630/45 |
| 弹性模量/MPa | 62000 |
| 截面积/mm ² | 666.55 |
| 直径/mm | 33.6 |
| 单位长度质量/(kg/m) | 2.058 |
| 运行张力/(N/mm ²) | 27.23 |



图 1 300m 跨导线的计算模型

Fig.1 Calculating model of the 300m-span cable

4.3 附加冰单元法的适用性分析

附加冰单元法即在导线单元外侧附加模拟冰的单元, 由于覆冰截面形状通常采用圆环来考虑, 因此可采用 pipe 单元来分析。冰单元与导线单元采用共结点的形式, 如图 2 所示。输电导线为典型的柔性悬索结构, 在自重作用下呈悬链线形状, 可以忽略其抗弯和抗扭刚度, 在有限元中可采用仅受拉的杆单元来模拟^[4,6-7], 当输电线失去张力后可模拟出输电线的松弛现象。赋予杆单元初始张力以模拟输电线在自重作用下的初始状态。

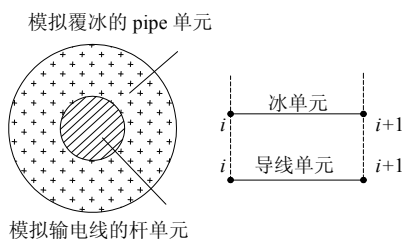


图 2 有限元模拟中的导线单元和冰单元

Fig.2 Cable element and ice element in FEM simulation

很显然, 覆冰导线的拉力将由导线单元的抗拉刚度 $E'A'$ 与冰单元的抗拉刚度 $E''A''$ 共同承担。这样冰单元抗拉刚度 $E''A''$ 的选取会影响导线和覆冰各自所承担的拉力。下面分别讨论冰的密度和弹性模量的选取对覆冰导线的位移和应力的影响。

4.3.1 冰密度对导线覆冰计算的影响

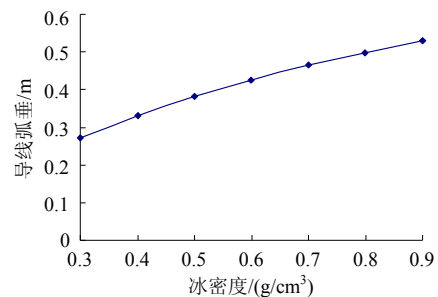
首先固定冰的弹性模量, 取以往研究^[4-5]中采用的 10GPa。在覆冰厚度为 30mm、密度为 0.9g/cm³ 工况下, 覆冰的单位质量为 5.395kg/m, 该数值在本节变密度计算中为恒定值。只考虑雨淞、湿雪两种易形成高荷载的覆冰类型, 因此冰的密度范围可取 0.3g/cm³~0.9g/cm³, 假设冰密度在该范围内变化, 每隔 0.1g/cm³ 取 1 个工况分析, 共 7 个工况。表 3 给出了不同密度下覆冰的抗拉刚度的计算值。由表 3 可知, 随着冰密度的减小, 冰的截面积增加, 导致覆冰的抗拉刚度 $E''A''$ 增加。当冰密度从 0.9g/cm³ 变成 0.3g/cm³ 时, $E''A''$ 增加了 2 倍, 冰与导线抗拉刚度之比 $E''A''/E'A'$ 从 1.09 增加到 3.27。

表 3 不同冰密度下覆冰的抗拉刚度

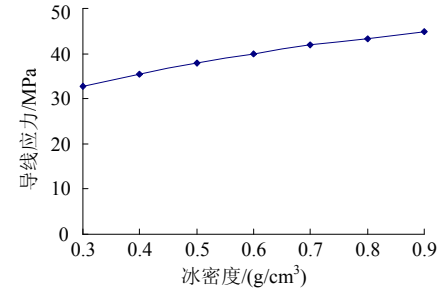
Table 3 Tensile stiffness with different ice densities

| $\rho/(g/cm^3)$ | d/mm | A''/cm^2 | $E''A''/MN$ |
|------------------|--------|------------|-------------|
| 0.9 | 30 | 59.94 | 59.94 |
| 0.8 | 32 | 67.43 | 67.43 |
| 0.7 | 36 | 77.07 | 77.07 |
| 0.6 | 39 | 89.91 | 89.91 |
| 0.5 | 44 | 107.89 | 107.89 |
| 0.4 | 51 | 134.87 | 134.87 |
| 0.3 | 61 | 179.82 | 179.82 |
| 导线抗拉刚度 $E'A'/MN$ | | | 54.97 |

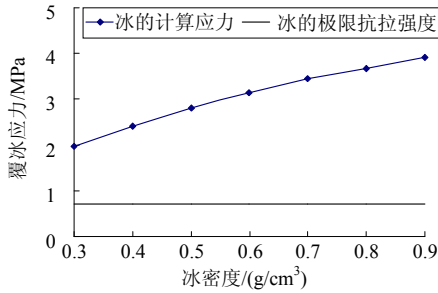
图 3 给出了冰密度的选取对覆冰导线位移和应力的影响。由图 3 可知, 随着冰密度的增加, 导线弧垂、导线应力和覆冰应力都呈上升的趋势。当冰密度从 0.3g/cm³ 变化到 0.9g/cm³ 时, 导线弧垂从 0.27m 增加到 0.53m, 导线应力从 32.7MPa 增加到 44.8MPa。而覆冰应力从 1.97MPa 增加到 3.92MPa, 很显然这些覆冰应力超出了覆冰的极限抗拉强度值 0.7MPa, 也就是说这些工况下冰的应力结果是不合理的。



(a) 导线弧垂与冰密度的关系



(b) 导线应力与冰密度的关系



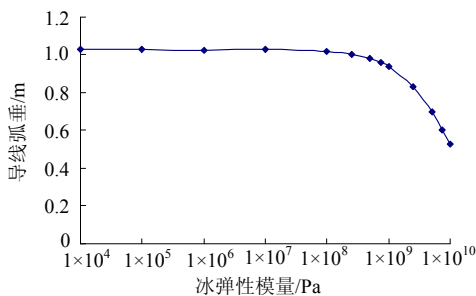
(c) 覆冰应力与冰密度的关系

图3 冰密度对导线覆冰计算结果的影响

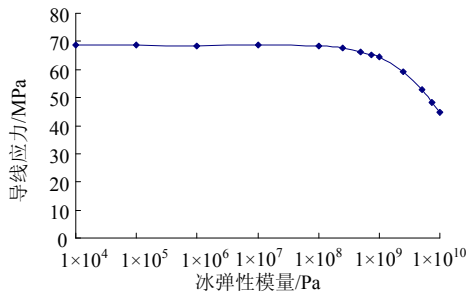
Fig.3 Influence of ice density on ice-accreting results

4.3.2 冰弹性模量对导线覆冰计算的影响

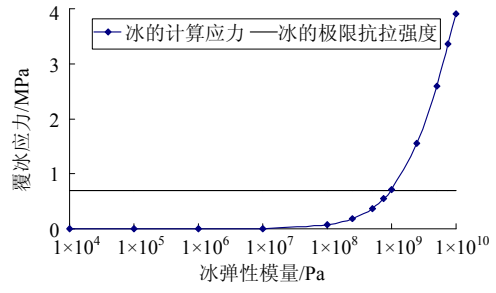
下面分析冰弹性模量的选取对覆冰导线的位移和应力的影响,固定冰密度为常用值 0.9g/cm^3 ,结果如图4所示。由图4可知,随着冰弹性模量的增加,导线弧垂和导线应力呈下降的趋势,覆冰应力呈上升的趋势。当冰弹性模量从 10^4Pa 变化到 10^{10}Pa 时,导线弧垂从 1.03m 降低至 0.53m ,导线应力从 68.8MPa 降低至 44.8MPa ,覆冰应力从 0.78kPa 上升至 3.92MPa 。



(a) 导线弧垂与冰弹性模量的关系



(b) 导线应力与冰弹性模量的关系



(c) 覆冰应力与冰弹性模量的关系

图4 冰弹性模量对导线覆冰计算结果的影响

Fig.4 Influence of ice elastic modulus on ice-accreting results

从图4中还可以发现,当冰的弹性模量 $E''A''$ 小于 10^8Pa 时,计算结果受冰的弹性模量影响很小,即冰的抗拉强度 $E''A''$ 与导线的抗拉强度 $E'A'$ 相比为小量时,认为所有的拉力均由导线承担。从图4(c)中还可以发现,当冰的弹性模量超过 10^9Pa 时,冰的应力会超过极限应力值 0.7MPa ,显然这种情况下冰的应力结果是不合理的。同时,由于覆冰导线中冰的应力应远小于极限抗拉强度值 0.7MPa ,因此针对本实例冰的弹性模量应取小于 10^8Pa 。

4.3.3 联合考虑密度和弹性模量的影响

图5给出了联合考虑冰密度和弹性模量对覆冰导线中导线应力的影响。由图5可知,总体而言,导线应力随着冰密度增大而增大,随着冰弹性模量的减小而增大。即总体原则为,只要冰的抗拉刚度 $E''A''$ 减小,导线所承担的拉力即为增加。同时从图5中还可以发现,当冰的弹性模量小于 10^8Pa 时,冰密度的取值对导线应力的影响很小,即可以不考虑冰密度的影响。

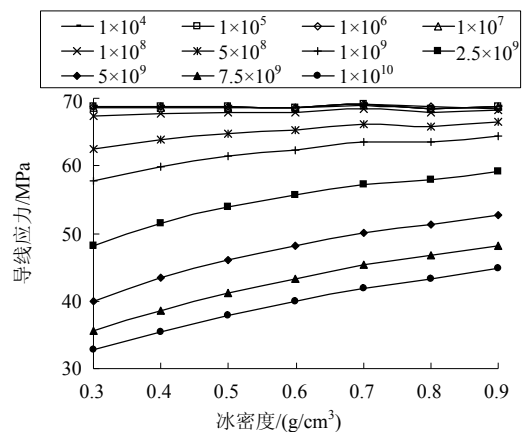


图5 联合考虑冰密度和弹性模量的影响

Fig.5 Combined influence of ice density and elastic modulus

4.3.4 附加冰单元法结果的公式方法验证

精确求解输电线的形状和应力一般须采用悬链线模型,但当垂跨比 $f/l < 0.1$ 时,采用抛物线模

型已具有很好的精度^[14]。本实例的最大垂跨比 $f/l=13.5/300 < 0.1$ ，可以采用抛物线模型求解。

对抛物线模型，受均布荷载时，覆冰前后输电线曲线的长度 s_0 和 s 分别为：

$$s_0 = l \left(1 + \frac{8f_0^2}{3l^2} \right) \quad (2)$$

$$s = l \left(1 + \frac{8f^2}{3l^2} \right) \quad (3)$$

式中： f_0 和 f 分别为输电线覆冰前后跨中的弧垂； l 为输电线跨度。则输电线的伸长量 Δs 为：

$$\Delta s = s - s_0 = \frac{8}{3} \frac{f^2 - f_0^2}{l} \quad (4)$$

根据拉索的变形协调方程可知：

$$\frac{H - H_0}{EA} l = \frac{8}{3} \frac{f^2 - f_0^2}{l} \quad (5)$$

式中： H_0 、 H 为覆冰前后的输电线拉力； E 为输电线的弹性模量； A 为输电线的截面积。根据受力平衡方程可得覆冰前后输电线跨中弧垂的计算公式：

$$f_0 = \frac{q_0 l^2}{8H_0} \quad (6)$$

$$f = \frac{q l^2}{8H} \quad (7)$$

式中： q_0 、 q 分别为始态和终态输电线的单位荷载。最后整理得到输电线覆冰后增加的拉力 ΔH 为：

$$\Delta H = H - H_0 = \frac{EA l^2}{24} \left(\frac{q^2}{H^2} - \frac{q_0^2}{H_0^2} \right) \quad (8)$$

很显然， ΔH 由导线抗拉刚度 $E'A'$ 和覆冰抗拉刚度 $E''A''$ 按比例共同承担。则覆冰后导线的拉力为：

$$H_{\text{线}} = H_0 + \Delta H \times \frac{E'A'}{E'A' + E''A''} \quad (9)$$

转化成应力为：

$$\sigma_{\text{线}} = \frac{H_{\text{线}}}{A} = \sigma_0 + \frac{\Delta H E'}{(E'A' + E''A'')} \quad (10)$$

取冰密度 0.9g/cm^3 ，根据式(10)可计算得导线覆冰后的应力，公式计算结果与附加冰单元法计算结果的比较见表 4，表 4 中误差项计算以附加冰单元法计算结果为基准。

由表 4 可知，两种方法的结果相当吻合，但也存在着一些小的误差，误差的存在主要可归结为以下两个原因：一是公式计算中采用了近似算法，即采用抛物线公式代替精确的悬链线公式；二是有限元计算本身引入的误差，如单元离散等。附加冰单

表 4 附加冰单元法与公式求解的导线应力比较

Table 4 Results comparison of adjunctive ice element method and equation

| 冰弹性模量/Pa | 附加冰单元法计算/MPa | 公式计算/MPa | 误差/(%) |
|--------------------|--------------|----------|--------|
| 1×10^4 | 68.75 | 68.68 | -0.108 |
| 1×10^5 | 68.75 | 68.68 | -0.109 |
| 1×10^6 | 68.42 | 68.67 | 0.366 |
| 1×10^7 | 68.70 | 68.62 | -0.112 |
| 1×10^8 | 68.27 | 68.20 | -0.096 |
| 1×10^9 | 67.58 | 67.51 | -0.097 |
| 2.5×10^9 | 66.42 | 66.41 | -0.018 |
| 5×10^9 | 65.36 | 65.35 | -0.011 |
| 7.5×10^9 | 64.35 | 64.35 | -0.007 |
| 1×10^{10} | 59.15 | 59.15 | -0.008 |

元法有限元模拟结果与公式计算结果的吻合相互印证了两种方法的准确性。

4.3.5 有限元分析中冰力学参数的取值建议

上述分析主要针对 300m 跨长进行，结论为在采用附加冰单元法计算覆冰时，冰的弹性模量应取小于 10^8Pa 。下面将该结论的适用性推广到其他跨度，取 10m 和 500m 跨度的导线进行分析，两种导线可以近似作为常规输电导线的下限和上限，导线参数见表 5。

表 5 10m 和 500m 跨度导线的型号和参数

Table 5 Parameters of 10m-span and 500m-span cables

| 导线参数 | 10m 跨度 | 500m 跨度 |
|--------------------------|------------|---------------|
| 型号 | 1xLGJ-16/3 | 1xLGJ-800/100 |
| 弹性模量/MPa | 79000 | 67000 |
| 截面积/ mm^2 | 18.82 | 896.05 |
| 直径/mm | 5.55 | 38.98 |
| 单位长度质量/(kg/m) | 0.0652 | 2.991 |
| 运行张力/(N/ mm^2) | 31.25 | 33.76 |
| 抗拉刚度/N | 1.487 | 58.226 |

图 6 和图 7 分别给出冰密度和弹性模量对 10m 和 500m 跨导线应力的影响，计算中冰厚取 30mm。

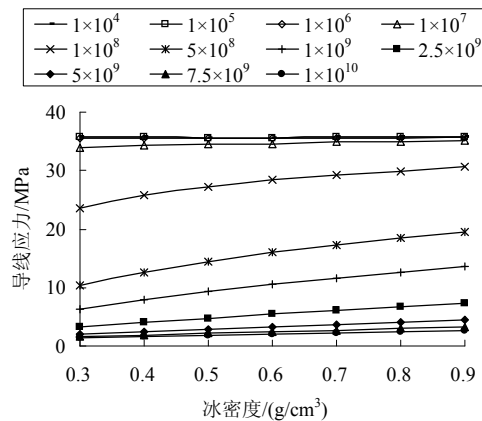


图 6 10m 跨长输电线的导线应力

Fig.6 Stress of 10m-span cable

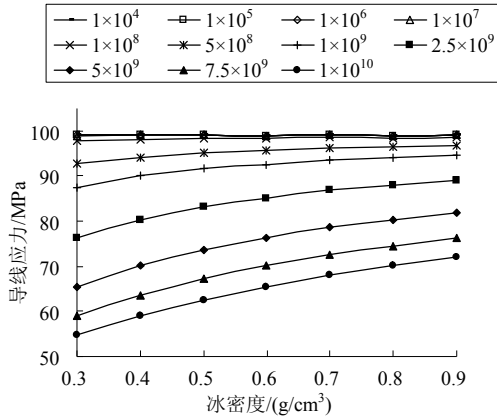


图 7 500m 跨长输电线的导线应力
Fig.7 Stress of 500m-span cable

由图 6 和图 7 可知, 10m 跨度和 500m 跨度实例反映出导线应力随冰密度和弹性模量变化的趋势同 300m 跨度的结果(图 5)基本一致。对于大跨度导线(500m 跨), 当冰的弹性模量不超过 10^8Pa 时, 导线应力基本不变; 而对于小跨度导线(10m 跨), 当冰的弹性模量不超过 10^7Pa 时, 导线应力基本不变。

综合以上的有限元分析和公式求解结果可知, 附加冰单元法可以用来模拟输电导线覆冰的情况, 即该方法适用于求解输电导线的覆冰问题。但前提是冰的力学参数取值须合理, 尤其是冰的弹性模量, 不能取值过大。若冰的弹性模量取一些研究^[4-5]中采用的 10GPa 时, 冰的应力会超过极限抗拉强度, 很显然这样的应力分布是不合理的。根据本文对 10m、300m 和 500m 跨的实例计算, 在采用附加冰单元法进行覆冰有限元分析时, 建议冰的密度取 0.9g/cm^3 , 冰的弹性模量取值不超过 10^7Pa 。

4.4 改变密度法的适用性分析

改变密度法将导线的覆冰等效为导线密度的增加, 因此不会涉及到冰的力学参数。由于 ABAQUS^[15]中密度只能在初始时刻设定, 不能在分析步中改变, 因此本文通过改变重力加速度的方法来等效模拟密度的变化, 改变导线密度和改变重力加速度对输电导线的受力情况是完全相同的。

采用上述的 300m 跨线路实例, 覆冰厚度为 30mm, 密度为 0.9g/cm^3 。覆冰前导线应力为 20.51MPa , 弧垂为 12.5m, 导线密度为 2.321g/cm^3 , 覆冰后导线等效密度为 8.405g/cm^3 , 可以计算获得覆冰后导线应力和弧垂。同时, 还可以采用公式方法求解, 直接采用式(8)来计算, 结果如表 6 所示。由表 6 可知, 改变密度法的计算结果与式(8)的计算结果相当吻合, 相互验证了两种方法的准确性。同

时表 6 中还给出了附加冰单元法的计算结果, 可以发现当冰弹性模量取值小于 10^8Pa 时, 附加冰单元法和改变密度法的结果非常吻合, 这就说明附加冰单元法和改变密度法在有限元模拟导线覆冰中的等价性, 同时也说明了改变密度法的适用性。

表 6 附加冰单元法和改变密度法结果的比较

Table 6 Results comparison of adjunctive ice element method and density changing method

| 分析方法 | 冰弹性模量/Pa | 覆冰应力/MPa | 弧垂/m |
|---------|--------------------|----------|--------|
| 附加冰单元法 | 1×10^4 | 68.75 | 1.028 |
| | 1×10^5 | 68.75 | 1.028 |
| | 1×10^6 | 68.42 | 1.022 |
| | 1×10^7 | 68.70 | 1.027 |
| | 1×10^8 | 68.27 | 1.019 |
| | 1×10^9 | 64.35 | 0.9385 |
| | 2.5×10^9 | 59.15 | 0.8308 |
| | 5×10^9 | 52.78 | 0.6977 |
| | 7.5×10^9 | 48.22 | 0.6016 |
| | 1×10^{10} | 44.80 | 0.5289 |
| 改变密度法 | / | 68.77 | 1.029 |
| 公式(8)求解 | / | 68.68 | 1.048 |

5 导线脱冰的有限元模拟

上一节进行了输电导线覆冰的有限元模拟, 本节主要进行脱冰分析, 采用的方法为附加冰单元法和改变密度法。计算实例采用上述的 300m 跨输电导线, 覆冰厚度为 30mm, 冰密度为 0.9g/cm^3 , 假设该跨的覆冰同时发生脱落。

5.1 附加冰单元法

附加冰单元法利用激活冰单元来模拟覆冰, 利用“杀死”冰单元来模拟脱冰。在覆冰脱落响应计算中, 时间步长取 0.02s, 计算长度为 10s, 导线采用 Rayleigh 阻尼假设, 阻尼比取 0.02。表 7 给出了不同冰弹性模量对应的导线跳跃高度。由表 7 可知, 在覆冰状态下不同的冰弹性模量对应于不同的导

表 7 不同冰弹性模量下导线跨中的跳跃高度

Table 7 Middle-span jump height with different ice modulus

| 冰弹性模量/Pa | 覆冰位移/m | 跳跃高度/m |
|--------------------|--------|--------|
| 1×10^4 | -1.028 | 1.661 |
| 1×10^5 | -1.028 | 1.661 |
| 1×10^6 | -1.028 | 1.661 |
| 1×10^7 | -1.027 | 1.659 |
| 1×10^8 | -1.019 | 1.645 |
| 1×10^9 | -0.939 | 1.503 |
| 2.5×10^9 | -0.831 | 1.320 |
| 5×10^9 | -0.698 | 1.104 |
| 7.5×10^9 | -0.602 | 0.952 |
| 1×10^{10} | -0.529 | 0.838 |

线应力和弧垂,从而导线积蓄的弹性能不同。采用以往研究^[4-5]中使用的弹性模量值 10GPa 时,跳跃高度为 0.8379m,比采用本文建议的弹性模量取值(小于 10^8 Pa)时的跳跃高度 1.659m 减少 50%左右。

5.2 改变密度法

利用突然减小导线的密度来模拟导线脱冰,实际操作中采用突然改小自重加速度来等价模拟。所有的参数设置与上节的附加冰单元法相同,进行导线的脱冰时程分析,并与附加冰单元法中冰的弹性模量取 10^5 Pa、 10^7 Pa 和 10^{10} Pa 时导线跨中位移和导线跨中应力时程进行比较,如图 8 和图 9。由图 8 和图 9 可知,当冰的弹性模量不超过 10^7 Pa 时,两种方法获得的时程曲线完全吻合,说明了附加冰单元法和改变密度法在进行脱冰分析时的等价性和适用性。

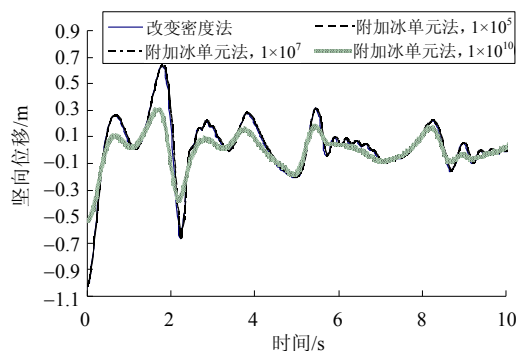


图 8 两种方法计算的跨中位移时程

Fig.8 Time history of middle-span displacement calculated by two methods

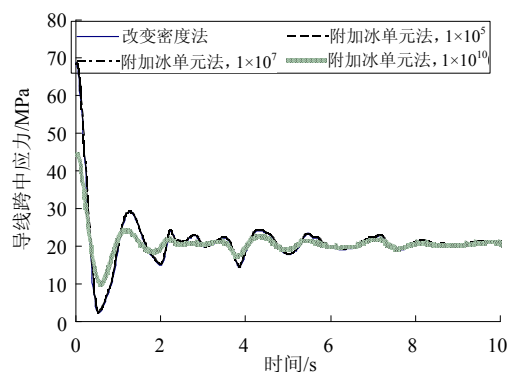


图 9 两种方法计算的跨中应力时程

Fig.9 Time history of middle-span stress calculated by two methods

6 结论

(1) 在分别采用附加冰单元法和改变密度法进行导线覆冰的有限元模拟时,将有限元结果与公式求解结果进行比较,两者相当吻合,相互验证了方

法使用的准确性。

(2) 采用附加冰单元法进行导线覆冰脱冰研究时,以往学者^[4-5]取 10GPa 作为冰的弹性模量,在该取值下覆冰的应力会超过极限值,因此 10GPa 的冰弹性模量取值不合理。通过算例分析,我们建议在采用附加冰单元法时,弹性模量应取不超过 10^7 Pa,冰密度可取 0.9g/cm^3 。

(3) 应用附加冰单元法时,在参数取值合理(冰弹性模量不超过 10^7 Pa)情况下,该方法与改变密度法具有等价性,均适用于导线覆冰脱冰的有限元分析。

参考文献:

- [1] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 215—219.
Hu Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 215—219. (in Chinese)
- [2] 杨靖波, 李正, 杨风利, 等. 2008 年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(4): 4—8.
Yang Jingbo, Li Zheng, Yang Fengli, et al. Analysis of the features of covered ice and collapsed tower of transmission line snow and ice attacked in 2008 [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(4): 4—8. (in Chinese)
- [3] Jamaledine A, McClure G. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA [J]. Computers and Structures, 2003, 47: 523—536.
- [4] Kalman T, Farzhneh 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: 375—384.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] 沈国辉, 袁光辉, 孙炳楠, 楼文娟. 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, Lou Wenjuan. Dynamic impact effects on tower-line system due to ice-shedding [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 210—217. (in Chinese)
- [7] Fekr M R, McClure G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission [J]. Atmospheric Research, 1998, 46: 1—11.

(参考文献[8]—[15]转第 40 页)

(3) 对于 H 型框架梁与 H 型框架柱强轴进行的刚性连接, 可采用四根刚性杆与一根非线性弹簧组合而成的机械模型进行模拟; 其中, 非线性弹簧的刚度可以根据文中式(1)得到或通过有限元分析得到。因为文中的机械模型是根据节点的抗剪刚度得到的, 所以, 该机械模型适用于剪切受力的强轴刚性连接的梁柱节点; 对于其它的节点形式和受力情况的机械模型还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 江晓峰, 陈以一. 建筑结构连续性倒塌及其控制设计的研究现状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 1—8.
Jiang Xiaofeng, Chen Yiyi. A review on the progressive collapse and control design of building structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 1—8. (in Chinese)
- [2] Jun Jin, Sherif EI-Tawil. Evaluation of FEMA-350 seismic provisions for steel panel zones [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(2): 250—258.
- [3] Rassati G A, Leon R T, Noe S. Component modeling of partially restrained composite joints under cyclic and dynamic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 343—351.
- [4] 宋振森. 刚性钢框架梁柱连接在地震作用下的累计损伤破坏机理及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.
Song Zhensen. Damage cumulation collapse mechanism and design criteria of welded steel beam-to-column connections under seismic load [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2001. (in Chinese)
- [5] Griengsak Kaewkulchai. Dynamic progressive collapse of frame structures [D]. The USA: The University of Texas, 2003.
- [6] 谢甫哲, 舒赣平. 基于抽柱法的钢框架连续倒塌分析[J]. 东南大学学报, 2010, 40(1): 1—6.
Xie Fuzhe, Shu Ganping. Progressive collapse analysis of steel frame structure using removing column method [J]. Journal of southeast university, 2010, 40(1): 1—6. (in Chinese)
- [7] U.S. General Services Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Washington DC, 2003
- [8] 刘观云. 多层钢结构住宅结构体系及梁柱节点的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Liu Guanyun. Research on steel structure of multi-stories resident houses and beam-to-column joints [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [9] European Committee for Standardization. EN 1993-1-8: 2003, Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-8: Design of joints [S]. Brussels (Belgium), 2005.
- [10] American Institute of Steel Construction (AISC). Steel construction manual [M]. 13th ed. Chicago: American Institute of Steel Construction Inc., 2006.
- [11] Kapil Khandelwal, Sherif EI-Tawil, Sashi K Kunnath. Macromodel-based simulation of progressive collapse: Steel frame structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(7): 1070—1078.

(上接第 15 页)

- [8] Kollar L E, Farzaneh M. Vibration of bundled conductors following ice shedding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1097—1104.
- [9] 尹鹏, 李黎, 张行. 输电线路脱冰跳跃反应控制研究[J]. 电网与水利发电进展, 2008, 24(3): 3—7.
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—7. (in Chinese)
- [10] 陈科全, 严波, 郭跃明. 超高压输电线脱冰动力响应数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(5): 544—549.
Chen Kequan, Yan Bo, Guo Yueming. Dynamic responses of ultra-high voltage transmission line ice shedding [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(5): 544—549. (in Chinese)
- [11] 侯镛, 王黎明, 朱普轩. 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. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 1—6. (in Chinese)
- [12] Timco G W. A review of the engineering properties of sea ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60: 107—129.
- [13] Kalman T. Dynamic behavior of iced cables subjected to mechanical shocks [D]. Canada, Quebec: University of Quebec, 2007.
- [14] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣. 悬索结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Shen Shizhao, Xu Chongbao, Zhao Chen. Design of cable structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [15] Dassault Systemes Simulia Corporation. Ansys (Ver 6.9), analysis user's manual [M]. Dassault Systemes Simulia Corporation, Rode, Islands, USA, 2009.