

文章编号:1000-582X(2009)11-1306-05

架空输电线脱冰跳跃高度的计算公式

严波¹, 郭跃明², 陈科全¹, 梁明²

(1. 重庆大学工程力学系, 重庆 400030; 2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘要:在采用有限元数值模拟方法研究架空高压输电线脱冰跳跃问题的基础上, 通过对各种脱冰工况和不同参数情况下导线脱冰动力响应数值结果的分析, 得到导线脱冰后最大跳跃高度与导线脱冰前后静止状态的弧垂差之间的定量关系, 进而给出连续档最大跳跃高度的工程实用简化计算公式。利用该公式可以简化重冰区高压输电线导线之间以及导地线之间安全间隙的设计, 具有重要的工程实用价值。

关键词:高压输电线; 脱冰; 动力响应; 冰跳高度; 数值模拟

中图分类号: TM75; O39

文献标志码: A

Formula for jump height of overhead transmission lines after ice-shedding

YAN Bo¹, GUO Yue-ming², CHEN Ke-quan¹, LIANG Ming²

(1. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Southwest Electric Power Design Institute of Electric Power Project Group of China, Chengdu 610021, Sichuan, P. R. China)

Abstract: This paper numerically investigates the jump heights of overhead transmission lines after ice-shedding by the finite element method, and simulates the dynamic responses of the transmission lines, with different structure parameters, in different ice-shedding conditions. Based on the results, it obtains the quantitative relations between the jump height of conductor and the amplitude difference of the two static states of the conductors before and after ice-shedding, and proposes a simplified formula for the jump height of conductors in continuous span after ice-shedding for the determination of the clearance distance between the conductors at different phases in the design of high voltage transmission lines located in heavy ice zones.

Key words: high voltage transmission lines; ice-shedding; dynamic response; jump height; numerical simulation

输电线路覆冰导致的故障一直是电力系统严重的自然灾害之一^[1]。2008 年初中国南方发生了一场历史罕见的持续雨雪冰冻天气, 贵州、湖南、江西、四川等省市遭受了严重的冰雪灾害。输电线路覆冰问题再次成为线路设计中关注的重点之一。

处于重冰区的架空输电线的覆冰有时会非常严

重, 覆冰可能引起相邻档导线张力的不平衡, 导致金具损坏、导线断股、杆塔折损等机械事故^[2]。此外, 覆冰在特定的温度等自然条件下脱落后可能引起导线上下振动, 亦称为脱冰跳跃或冰跳。导线在有风荷载时脱冰后还可能以椭圆轨迹运动。覆冰脱落后的振动过程中可能使得各相导线之间或导地线间的

收稿日期: 2009-06-26

基金项目: 中国电力工程顾问集团公司资助项目 (DG1-T01-2006)

作者简介: 严波 (1965-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事工程力学方向的研究, (Tel) 023-65102561;

(E-mail) boyan@cqu.edu.cn.

间隙小于电气间隙要求,导致闪络、烧伤甚至烧断导线等电气事故,也可能导致前述机械事故。因此,在进行重冰区输电线路设计时,必须确保在最恶劣的脱冰条件下,各相导线之间以及导地线间的间隙要满足相应的电气间隙要求。

然而,对导线脱冰动力响应问题的研究远比对导线覆冰问题的研究少^[3]。关于覆冰导线脱冰后的冰跳高度和动力响应的研究,主要有模拟试验和数值分析两类方法。模拟试验方面,Morgan等^[4]对一132 kV的5档输电线路通过在档中释放固定载荷来模拟脱冰过程,并测量了各档的最大跳跃高度。Jamaleddine等^[5]在人工气候实验室对一两档输电线路模型进行了多种脱冰工况的模拟。Druetz等^[6]系统介绍了导线的多种脱冰方式,并对机械脱冰等3种脱冰方式的试验结果进行了比较。在数值模拟研究方面,Roshan Fekr等^[7]采用有限元方法研究了单导线输电线路的脱冰动力响应问题,得到了覆冰厚度和脱冰位置等的影响。McGlure等^[8]采用ADINA有限元软件模拟了两档输电线路中某一构件突然失效或突然脱冰等冲击载荷下导线的动力响应。László等^[9]采用数值模拟方法研究了间隔棒距离对分裂导线脱冰后动力响应的的影响。Kalman等人^[10]则采用数值方法模拟了一种机械除冰方式下地线的脱冰过程。笔者项目组采用ABAQUS有限元软件模拟了典型输电线路的动力响应问题^[11],并与文献^[5]的试验结果进行了比较,验证了数值模型的正确性。候镭等^[12]建立了导线脱冰跳跃分析的3自由度模型,分析了档距组合和导线参数等的影响。这些研究工作主要考虑的是单导线模型,缺乏对不同耐张段线路结构参数以及各种脱冰工况对覆冰导线脱冰动力响应影响规律的系统研究。

为便于工程设计,工程界一直致力于研究得到导线脱冰后冰跳高度的简化计算公式。虽然国外建议了一些近似经验公式,但均缺乏理论和数据支持。为此,利用不同耐张段结构参数和脱冰工况等条件下线路脱冰后的数值模拟结果,提出了一个简化实用的导线脱冰冰跳高度的计算公式,可以大大简化重冰区高压输电线路的设计过程。

1 导线脱冰动力响应数值模拟

为研究导线脱冰后冰跳高度的规律,对典型连续档耐张段脱冰后的动力响应进行了数值模拟研究。据文献^[7],输电线设计时不必考虑不等档脱冰

后的动力响应,只需用其中最大档距的等档进行校验即可,且高差对脱冰后动力响应影响很小,故文中仅考虑等档无高差耐张段脱冰。下面以七档耐张段为对象,阐述有限元模型的建立。

1.1 特征段线路及其模型简化

无高差七档连续档耐张段线路模型参见图1(a),每档档距500 m,四分裂导线各子导线型号为LGJ-400/50^[13],直径27.63 mm,自重1.511 kg/m,弹性模量 7×10^4 MPa,泊松比取0.3。悬垂绝缘子串长6.47 m,总质量为460.8 kg,由于其对导线脱冰后的动力响应影响不大,将其简化为半径0.05 m的圆截面梁。悬垂联板的型号为LX-4245,重37.86 kg,加上线夹挂板等零件,线夹总重量89.26 kg,将其简化为边长0.45 m的正方形筐架,构成该框架的圆截面杆半径为0.05 m,如图1(b)。间隔棒型号为JZF-400,质量为7.5 kg。类似于线夹,将其简化为边长0.45 m的正方形筐架,由于在有限元模拟时采用空间桁架单元,为保证结构的稳定性,在对角线增加一根斜撑,组成框架的圆截面杆半径为0.01 m,参见图1(c)。悬垂绝缘子串、线夹和间隔棒的弹性模量取 2×10^5 MPa,泊松比取0.3,各构件的等效密度通过其质量与几何模型的尺寸确定。导线阻尼系数的取值一般应通过试验实测^[14-16],但目前试验数据较为缺乏,依据文献^[16],裸导线的粘性阻尼系数取临界阻尼的2%,覆冰导线取临界阻尼的10%。此外,导线在无冰、无风、气温为10℃的安装状态下最低点应力为36.64 MPa,弧垂为28.53 m。

计算模型的载荷包括自重、覆冰静载荷和脱冰载荷和风载荷。目前在工程设计中通常假设冰均匀地覆盖在导线表面,且认为脱冰为瞬间脱落过程。在进行有限元分析时,可以通过增加导线的密度来模拟作用在导线上的覆冰静力荷载,通过修改导线密度和惯性加速度来模拟脱冰载荷。

根据架空高压输电线路设计规程^[13],当风向与导线轴向之间的夹角为 θ 时,电线单位长度上的风载荷按下式计算

$$p_H = 0.625 \alpha \mu_{sc} \beta_c (d + 2\delta) l_H v^2 \sin^2 \theta \times 10^{-3}, \quad (1)$$

式中: α 为风压不均匀系数,当风速小于20 m/s时取0.75,大于20 m/s时取0.61; μ_{sc} 为电线体型系数,无冰时取1.1,覆冰后取1.2; β_c 为风荷载调整系数,计算导线风偏时取1.0; d 为电线直径; l_H 为水平档距, v 为风速。

由式(1)可知,电线脱冰前后由于截面积变化而承受的风压存在差异,脱冰后的风压与脱冰率有关。同样,可以通过改变导线的密度和惯性加速度来模拟风荷载。

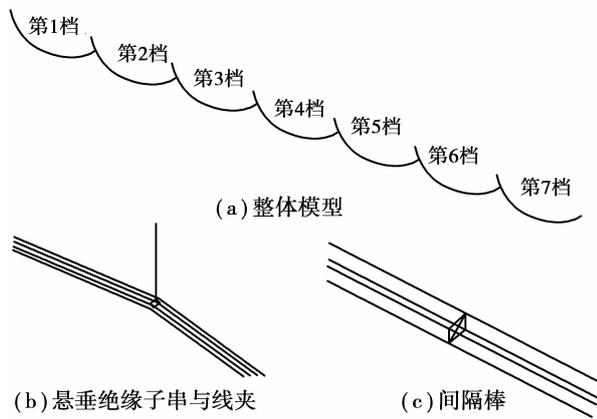


图 1 7 档耐张段线路模型

1.2 有限元数值模型

根据线路安装条件下的弧垂和最低点的应力,用文献^[17]提出的一种确定导线在自重作用下的几何构形与应力分布的方法来确定导线的初始构形。建立分裂导线模型时,先建立包括间隔棒在内的模型,并利用改变间隔棒单元的“死”和“活”状态来达到与实际架线过程的一致。模型中各子导线和间隔棒采用桁架单元模拟,绝缘子串和线夹用梁单元模拟。模型的边界条件为所有悬垂绝缘子串上端点位移约束,但可以自由转动,与耐张塔相连的耐张串端部固定,即忽略耐张塔的变形。

划分单元时,导线可以用三维二节点桁架单元(T3D2)来模拟^[18],每档导线离散成 518 个单元,其中每个间隔帮用 5 个桁架单元离散,每个绝缘子串用 1 个梁单元描述,而线夹则划分为 4 个梁单元。

有限元分析过程中,首先计算分裂导线在自重作用下的平衡状态,再计算覆冰载荷和温差作用下的平衡状态,在此基础上进一步计算各种脱冰工况下的动力响应。分析中考虑了大变形。

1.3 数值模拟结果

在线路设计中通常需要考虑不同覆冰厚度、档距、档数和脱冰率下导线脱冰跳跃高度。在此,分析了不同情况下导线冰跳高度的不同。由于导线在脱冰前后静止状态下的弧垂与导线的几何和物理参数、线路的档距、档数、高差、水平应力、温度以及覆冰厚度等有关,即弧垂反映了导线的结构因素、覆冰量和脱冰率的关系,因此,导线脱冰前后静止状态下弧垂的差值 Δf 可能与导线的最大冰跳高度 H 之间

存在某种定量的关系。

在线路设计时,一个连续档耐张段内一般设计为奇数档。故这里仅考虑奇数档的情况。计算表明,对于奇数连续档,当中间档脱冰时,其冰跳高度远大于几档同时脱冰的情况,故仅需讨论中间档脱冰的情况。图 2 所示为无风荷载情况下 7 档、等档距 500 m 无高差耐张段在第 4 档不同脱冰率条件下覆冰厚度对导线脱冰后冰跳高度的影响规律。图 2(a)为冰跳高度 H 与覆冰厚度 t 的关系,图 2(b)为不同覆冰厚度导线在不同脱冰率下导线脱冰前后静止状态下弧垂差 Δf 与最大冰跳高度 H 之间的关系。值得注意的是, Δf 与 H 之间呈线性关系。

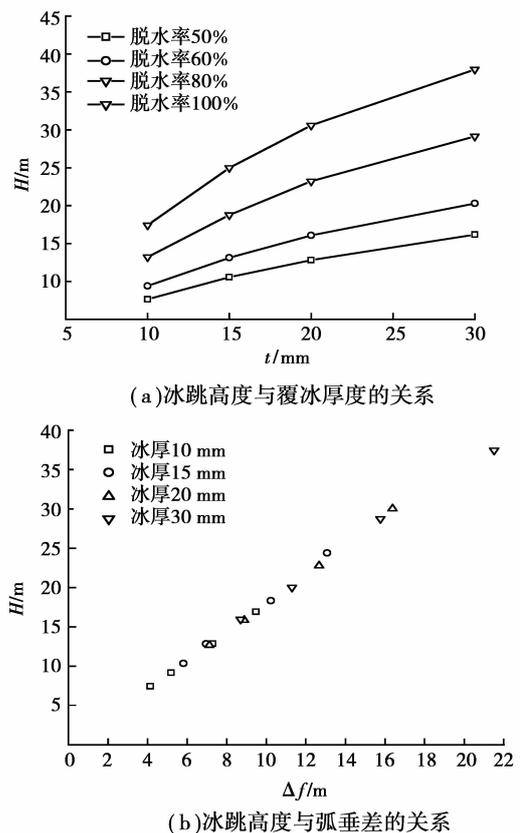
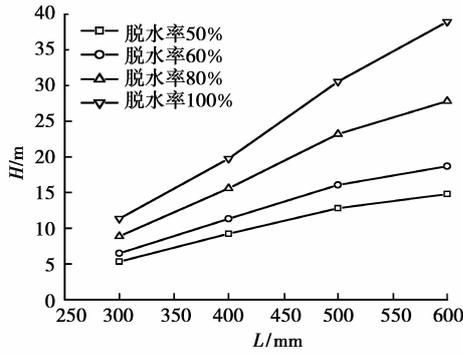


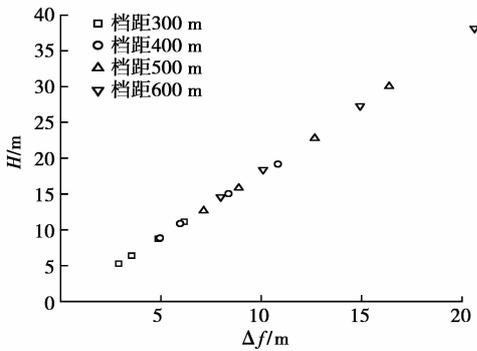
图 2 冰厚对冰跳高度的影响(7 档、档距 500 m)

图 3、4 分别给出了档距 L 和档数对导线冰跳高度的影响规律。一个非常值得注意的现象是,在所给出的几种条件下导线脱冰后的冰跳高度 H 与导线脱冰前后静止状态下弧垂差 Δf 之间均呈线性关系。

此外,对连续档中存在高差的情况进行了计算,结果表明,高差的存在对冰跳高度的影响很小,可以忽略不计。通过对存在风荷载作用情况下导线脱冰动力响应的分析,结果表明,风荷载的存在造成了导线的横向摆动,而其在垂直方向上的冰跳高度相对

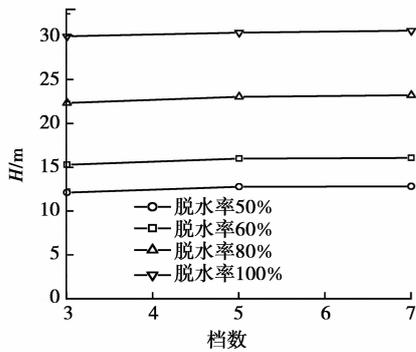


(a)冰跳高度与档距的关系

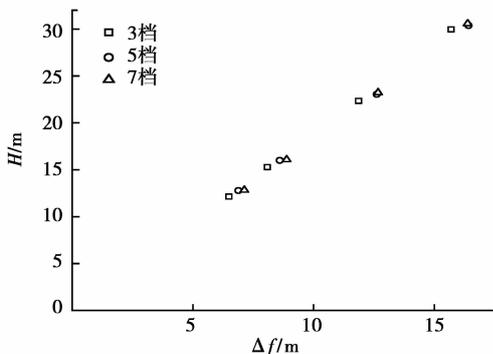


(b)冰跳高度与弧垂差的关系

图 3 档距对冰跳高度的影响(七档、冰厚 20 mm)



(a)冰跳高度与档数的关系



(b)冰跳高度与弧垂差的关系

图 4 档数对冰跳高度的影响(档距 500 m、冰厚 20 mm)

于其受风荷载时的平衡位置和无风荷载作用时的冰跳高度几乎一致。限于篇幅,这里未给出计算结果。

2 脱冰导线冰跳高度工程实用简化公式

由图 2(b)、3(b)和 4(b)可知,导线脱冰后的冰跳高度 H 与导线脱冰前后静止状态下弧垂差 Δf 之间呈线性关系。现在将这些不同条件下的所有计算结果作图,如图 5 所示。可见 H 与 Δf 之间的线性关系明显。利用最小二乘法拟合得到如下线性关系式

$$H = 0.013\ 36 + 1.846\ 28\Delta f.$$

其常数项非常小,这应该是数值误差所致,因为当导线未脱冰时 $\Delta f = 0$,冰跳高度也应为 0。故可得到简化式

$$H = 1.85\Delta f, \tag{2}$$

利用式(2)计算得到的冰跳高度与前述所有条件下的有限元结果的最大相对误差为 3.5%。故可以利用式(2)计算连续档中间档脱冰时的最大冰跳高度。

将前述线路模型中的子导线换成 LGJ—630/45 型导线,对多种脱冰工况进行了有限元数值模拟计算,并对式(2)进行了检验,得到了很好的近似精度。因而该公式适用于不同导线型号。

此外,当考虑风荷载作用时,由于在不同脱冰率下导线的受风面积不同,因而导线承受的风荷载也不同,故导线脱冰后水平方向的摆动幅值与线路各种结构参数和脱冰工况之间可能存在较复杂的关系,对此尚需进行深入研究。

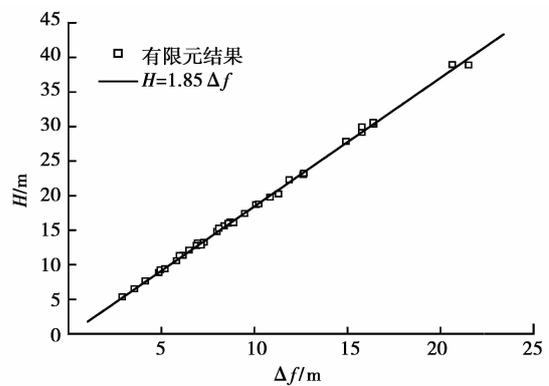


图 5 冰跳高度与脱冰前后静止状态弧垂差的关系

3 结 论

在采用有限元方法模拟研究重冰区高压输电线路连续档耐张段在各种参数条件和脱冰工况下的动力响应的基础上,得到连续档脱冰时最大冰跳高度与该档导线脱冰前后静止状态弧垂差之间的线性关

系。给出了冰跳高度的工程实用计算公式,并对该公式在各种条件下的精度和实用性进行了验证。给出的连续档冰跳高度计算公式,可以直接用于重冰区高压输电线路的设计。值得一提的是,文中公式仅适用于档数为奇数档的连续档,而对于孤立档和特殊情况下设计的偶数档不适用,需另行考虑。

参考文献:

- [1] 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 JI-HE, JIANG XING-LIANG, YI HUI, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9.
- [2] 蒋兴良,马俊,王少华,等. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 27-30.
JIANG XING-LIANG, MA JUN, WANG SHAOHUA, et al. Transmission lines' ice accidents and analysis of the formative factors [J]. Electric Power, 2005, 38 (11): 27-30.
- [3] 刘和云. 架空导线覆冰防冰的理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [4] MORGAN V T, SWIFT D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads [J]. Proceedings of the IEE, 1964, 111(10): 1736-1746.
- [5] JAMALEDDINE A, MCCLURE G, ROUSSELET J, et al. Simulation of Ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA[J]. Computers and Structures, 1993, 47(4/5): 523-536.
- [6] DRUEZ J, LOUCHEZ S, MCCOMBER P. Ice shedding from cables [J]. Cold Regions Science and Technology, 1995, 23(4): 377-388.
- [7] ROSHAN FEKR M, MCCLURE G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 1-11.
- [8] MC GLURE G, LAPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers and Structures, 2003, 81(8/11): 825-834.
- [9] LASZLO E, FARZANEH M. Vibration of bundled conductors following ice shedding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 23 (2): 1097-1104.
- [10] KALMAN T, FARZANEH M, MC GLURE G. Numerical analysis of the dynamic effects of shock-load-induced ice shedding on overhead ground wires[J]. Computers & Structures 2007, 85(7/8): 375-384.
- [11] 陈将. 覆冰导线脱冰动力响应的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [12] 候镭,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 LI-MING, ZHU PU-XUAN, et al. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 1-6.
- [13] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [14] RICHARDSON A S Jr. Vibration damping required for overhead lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 934-940.
- [15] RAWLINS C B. Long span problem in the analysis of conductor vibration damping[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 770-776.
- [16] BARBIERI N, HONORATE DE SOUZA JUNIOR O, BARBIERI R. Dynamical analysis of transmission line cables, part II-damping estimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(3): 659-669.
- [17] 刘小会. 架空高压输电线路风偏数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [18] Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. ABAQUS. user's manual, volumes, version 6. 4 [M/OL]. Pawtucket, RI: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2003. [2008-05-07] [http:// download. caenet. cn/DownInfo101. html](http://download.caenet.cn/DownInfo101.html).

(编辑 赵 静)