

# 基于 ANSYS 的单档覆冰输电线路找形与静力分析

蔡 钢 张晓敏 付毅东

(四川通源电力科技有限公司 四川 成都 610072)

**摘 要:**以 ANSYS 14.5 为基础,建立了架空输电线有限元模型,进行了找形运算和覆冰条件下的静力计算,并对静力下的断线条件进行了分析。在使用 ANSYS 进行找形分析时,针对不同初始模型和不同悬点位置进行了计算并与实际情况进行对比,确定可以以静力分析为基础对输电线路的动力特性进行分析、研究。

**关键词:**覆冰;输电线路;找形;静力计算

**Abstract:** Based on ANSYS 14.5, a finite element model of overhead transmission lines is established and then used for form-finding computation and static force calculation under icing. Moreover, the failure condition under static force is analyzed. When applying ANSYS to form-finding computation, the calculation is carried out aiming at different initial models and different suspension points, and it is compared with the actual situation, which can determine that the static force analysis could be the basis for the analysis and research of dynamic characteristics of transmission lines.

**Key words:** ice accretion; transmission line; form-finding; static force calculation

中图分类号: TM75 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0058-05

## 0 引 言

在 21 世纪的今天,电能是社会发展与人民正常生活不可或缺的资源。中国幅员辽阔,能源、资源的分布却并不均衡,保证电力的输送就成为了一个关乎国计民生的大问题。但是输电铁塔固有的缺点并未被改变,其结构柔性高而刚度低的特点使之容易受到外界环境的影响<sup>[1]</sup>,影响输电线路安全的因素主要有两点:一是风载荷;二是覆冰载荷。在 2008 年年初,那场历史罕见的冰雪灾害当中,很多输电设施发生了严重的覆冰。覆冰厚度远超设计标准,造成了大量的倒塔和断线;国家电网设施的直接财产损失就高达 104.5 亿元<sup>[2]</sup>。

导线覆冰所带来的事故主要有以下 3 种<sup>[3-5]</sup>:

1) 过负载事故。当导线上的覆冰厚度超过设计抗冰厚度时,由于覆冰之后重力的增加以及风压面积的增加导致导线上的张力超过拉断力或者塔杆上的应力过大从而发生的事故; 2) 不均匀覆冰引起的事故。这是由于相邻档的覆冰不均匀导致相邻档间产生张力差,使电气间隙减小导致闪络,破坏输电体系; 3) 导线舞动<sup>[6]</sup>。导线覆冰之后在脱冰时或者在

风载的作用之下会发生舞动,造成断线甚至倒塔事故的发生。

下面将借助 ANSYS 软件对输电线进行实体建模,并对不同情况下的输电线进行静力找形。在此基础上分析覆冰载荷、风载荷以及温度变化造成的热胀冷缩等因素对于导线当中应力分布的影响。

## 1 实体模型建立

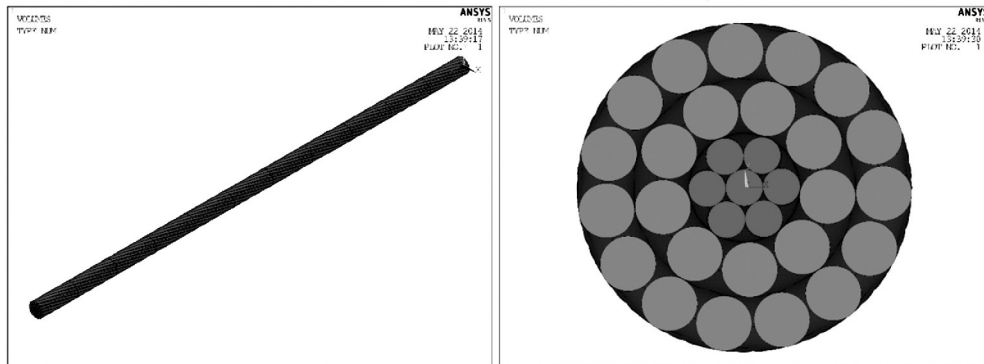
钢芯铝绞线的结构十分复杂且不具有对称性。因无法通过对称简化,所以建模过程必须建立整体模型。在建立实体模型之前首先要将要建立的钢芯铝绞线各项几何参数作为入口参数。以 JL/G1A-150/20 为例,其几何参数见表 1。

在柱坐标系中,螺旋线方程中轴向距离随角度线性变化。也就是说选取柱坐标中将点  $(0, \rho, \rho)$  和  $(R, 90, \rho, 25L)$  相连就可以得到,原点径向距离为  $R$  且长度为绞合节距  $L$  的螺旋线的  $1/4$ 。通过多次重复的操作就可以建立  $0.25L$  整数倍长的螺旋线。通过定义入库参数就可以进行螺旋线的建立了。

首先,为了使得后续操作简单,使用点号控制变量。初始化点号控制变量 num2 并定义一个数组

表 1 JL/G1A-150/20-24/7 绞线参数

型号规格	钢绞线节径比	铝绞线节径比		线直径/mm	铝线直径/mm
		第一层	第二层		
JL/G1A-150/20-24/7	20	13	11	1.85	2.78



(a) 轴测图

(b) 主视图

图 1 建立完成的绞线实体模型

time 用来存放每层绞线骨架建立之初的长度是节距的多少倍。进入建立铝线骨架的循环,就可以建出所有层铝线的骨架。进行钢线骨架的建立与铝线建立过程相似,在此不做赘述。于是 JL/G1A-150/20 钢芯铝绞线的骨架建立完成。而后,分别在骨架的端面上建立绞线的截面圆,沿着骨架拖动截面圆形成单线的实体模型。最后,修剪导线多出的部分并进行周向复制,建立中心非绞制线。

## 2 输电导线的找形

架空输电线是张拉索膜结构当中的一种。这种结构主要依靠索的抗拉性能来承受载荷,其垂直方向的刚度来自于承受张力之后的应力刚化。在张拉之前是松弛的,垂直方向上的载荷会使其出现较大位移,阻碍计算的正常进行,所以要通过找形赋予悬索初始状态下的张力与几何形态。找形后悬索当中有了张力,发生应力刚化,垂直方向产生刚度。这样才可以施加各种载荷,进行之后的静力计算。未来要进行动力计算亦应以此为基础。在进行找形时要做以下假设:

1) 假设架空线是柔性索。正如之前所说的,架空输电线的档距远远大于线的外径,而且架空线一般都经过了绞合,所以其刚性可以忽略;

2) 架空线截面是均匀的,而且忽略在变形时产生的截面变化;

3) 输电线仅发生弹性变形。

在以上假设条件之下,采用非线性有限元法进行架空线的找形,并用解法对其进行验证。

找形需首先确定导线的初始张力和自重载荷,通过公式计算线长;根据线长建立几何模型定义材料属性和边界条件,进行求解以完成找形。采用非轴对称初始模型。这种模型在建立时将重力加速度方向与 y 轴平行。水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴坐标轴原点在左边悬挂点处。在两悬点 x 方向的中点做一条垂直于 y 轴的直线。建立模型的关键点就在这条直线上根据理论公式计算的线长来选取。参见图 2 中(a)图。式(1)中理论线长为 L 档距为 l。

$$2\left(\frac{l}{2}\right)^2 + (h+d)^2 + d^2 = L^2 \quad (1)$$

$$d = 0.5h - 0.5L \sqrt{\frac{h^2 - L^2 + l^2}{h^2 - L^2}} \quad (2)$$

在得到式(1)之后使用 Matlab 对其进行求解。可以得到中间关键点坐标的解析解,即式(2)。使用这个解析解来建立初始模型并进行找形,得到节点位移云图,见图 2 中(b)图。将数据导出制作的找形前后的对比图参见图 3。

将节点按 x 方向从小到大排列,第 5 个节点开始每隔 60 个节点选一个节点与解析解进行对比,此外对比 3 种方法的最低点弧垂,结果参见表 2。

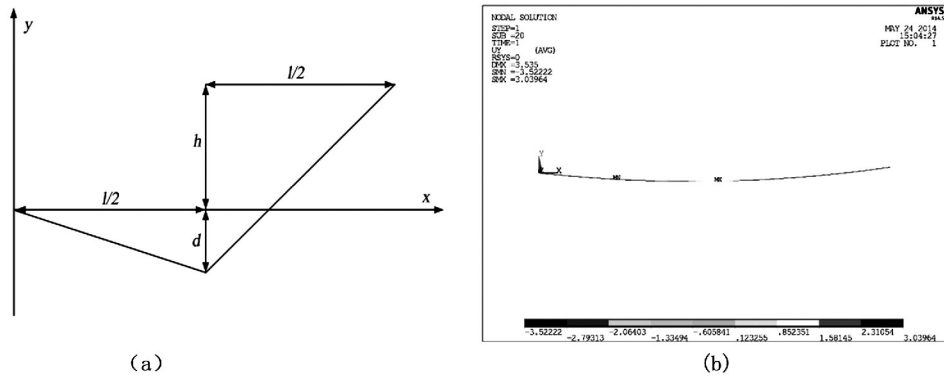


图 2 轴对称初始模型的非等高悬点输电线路几何关系图及找形结果

表 2 非轴对称初始模型的非等高悬点输电线路找形结果

节点号	水平方向坐标/m	找形得到的弧垂/m	弧垂解析解/m	弧垂差/m
6	1.984	-0.228	-0.228	0.000 1
66	31.764	-3.436	-3.434	0.001 8
126	61.584	-6.258	-6.254	0.003 4
186	91.438	-8.690	-8.685	0.004 7
246	121.321	-10.732	-10.726	0.005 8
306	151.228	-12.383	-12.376	0.006 9
366	181.155	-13.642	-13.634	0.007 6
426	211.095	-14.508	-14.500	0.008 2
486	241.044	-14.982	-14.973	0.008 7
546	270.996	-15.062	-15.053	0.009 0
1 205	300.948	-14.748	-14.739	0.009 1
1 145	330.918	-14.041	-14.032	0.009 0
1 085	360.877	-12.940	-12.931	0.008 7
1 025	390.818	-11.445	-11.437	0.008 2
965	420.737	-9.559	-9.552	0.007 5
905	450.629	-7.282	-7.275	0.006 8
845	480.489	-4.614	-4.608	0.005 8
785	510.311	-1.558	-1.553	0.004 7
725	540.091	1.885	1.889	0.003 3
665	569.824	5.714	5.716	0.001 8
605	599.506	9.927	9.927	0.000 0

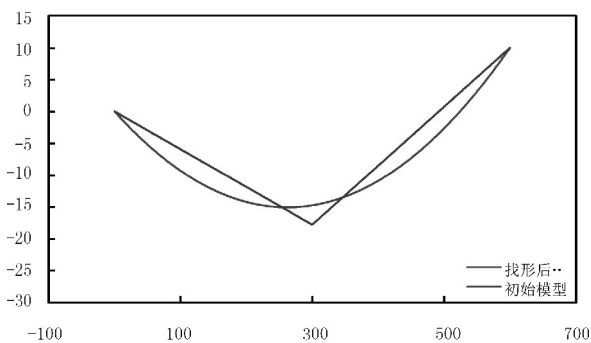


图 3 非轴对称初始模型的非等高悬点输电线路找形结果

从表 2 中可以看出不等高情况下初始模型找形的结果与解析解十分接近,弧垂差值均未超过 1 cm。并且通过这种初始模型解得的最大弧垂为

-15.079 3 m。最大弧垂解析解为 -15.700 0 m。找形结果可以接受。所以之后的计算将采用这种初始模型。

### 3 不同载荷作用下的导线受力

在架空输电线覆冰之后施加在其上的载荷会有明显增加<sup>[7-8]</sup>。其中覆冰的重力是最直接的因素。为了计算覆冰的重力载荷对架空线的影响,建立模型是将覆冰认为是均质且截面均匀的。将覆冰的重力载荷施加到导线上有多种方法。将架空线每一个单元对应的冰的质量计算出来,然后将冰的重力直接施加到模型的各个节点上去。当导线发生覆冰

时就是在导线上增加了一个带有质量的物体。通过建立质量元素也可以来模拟这种改变。此处选用 Mass21 元素来模拟冰的质量。通过设定其 KEYOPT(3) = 2 来禁止转动惯量的产生使元素退化为仅有 3 个平动自由度。然后对应的实常数就只需要定义其质量。计算出每个元素对应的覆冰质量,将相应质量的质量元素生成在节点上就完成了覆冰质量的加载。

风作用在导线上的力与导线直径、导线是否覆冰、覆冰厚度以及风速有关。作用在导线上的风压可以计算出来。假设当气流速度为吹向导线,将其动能全部转化为导线的动能,式(3)为风压计算公式。

$$W_v = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

式中:  $v$  为风速;  $\rho$  为空气密度。对于一定直径的导线其受到风的压力可以由式(4)表示<sup>[10]</sup>。

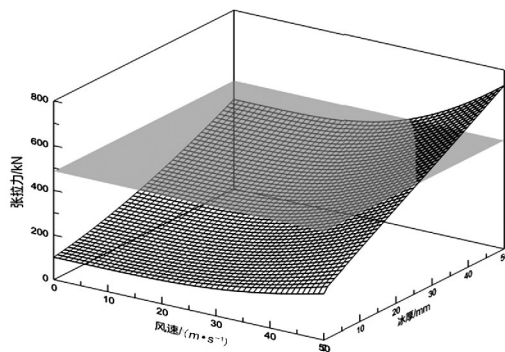
$$p = 0.613 a C d v^2 \quad (4)$$

式中:  $a$  为风速不均匀系数,此处认为风的强度是均匀的所以此值取 1;  $C$  为风载体形系数,当导线未覆冰且直径大于 17 mm 时取值为 1.1,其他时候取值为 1.2。计算出导线上的风压之后,可以使用类似于附加力施加冰重载荷的方法来施加风载。

导线覆冰一般都是在气温较低的情况才会发生的,随着温度的改变,由于发生热胀冷缩会使得架空线中的应力改变。在定义材料属性时应当定义线膨胀系数,并定义参考温度,即导线正常运行时的温度,并给定整体温度,即覆冰时的温度。进行计算之后就可以得到温度降低对导线当中应力的影响。

#### 4 静力计算与分析

文献[11]中实例情况参见表 3。将整个档距内



的导线按其水平坐标,分为 10 个部分,每个部分赋予不同的冰厚,冰厚情况在入口参数中定义。建立循环,使用 nsel 命令选取某一部分中包含的节点,并算出各节点上应当附加的冰重、定义实常数,最终建立质量元素,此外,将风载一并施加在节点上。通过循环对总共 10 个部分进行上述操作加载。覆冰分为 5 个区段,工况共有 3 种,参见表 4。

表 3 实例导线参数

参数	数值	参数	数值
外径/mm	35.2	破坏应力/MPa	665
截面积/mm <sup>2</sup>	729.56	最大使用应力/MPa	212.97
单位长度质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	3 188.3	平均运行应力/MPa	130
综合弹性系数/MPa	97 158	综合线膨胀系数	15.98 × 10 <sup>-6</sup>
档距/m	1 650	冰厚/mm	15
高差/m	0.5	覆冰密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.8

表 4 覆冰的 3 种工况

工况	覆冰厚度/mm				
	1	2	3	4	5
A	20	18	15	12	10
B	15	20	18	12	10
C	10	15	20	18	12

在 3 种工况之下通过代码计算的结果与文献中给出的结果相差不超过 1%。

将初始温度和当前温度分别定为 20℃ 和 -20℃。令风速分别为 0 ~ 50 m/s,冰厚为 0 ~ 50 mm。在之前静力计算代码外嵌套两层循环来实现风速和冰厚的变化,并使用 \*vwirte 命令导出各种情况下的应力最大值,可以得到风速和冰厚同时变化时导线中的最大应力值。但因为电力行业中常使用导线上张力与破坏张力作为设计与施工的指标,所以将

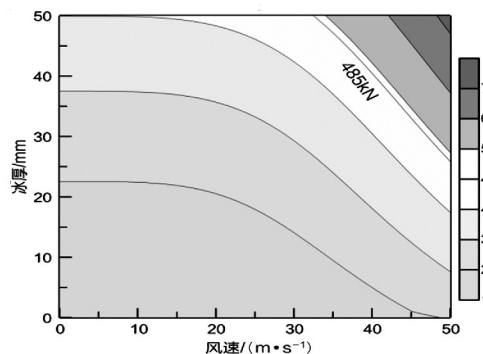


图 4 不同情况下输电线上的张力及云图

此处应力转换成张力值。导线中张力与外部条件的变化关系如图 4。

导线的破坏张力为 485.157 4 kN。图中灰色水平面之下的部分表示其拉力小于破坏张力。而在灰色水平面之上的部分,其对应的工况下输电线上的张力会大于破坏张力。也就是说在这个区域对应的情况下会发生静力校核失败导致的导线断裂。在覆冰厚度达到 40 mm 且风速达到 40 m/s 的时候才会发生静力拉断。然而,在实际情况当中,不需要如此巨大的风速和如此厚的覆冰层导线就已经断了。静力分析结果显示最大拉力往往会在悬挂点处出现,但是真实情况下很多时候导线并不是在此处发生的断裂,甚至有时拉断是发生在弧垂最大处的。实际情况下也并非静力载荷才会使得导线发生断裂。在导线上的覆冰发生脱落以及覆冰和不稳定的风载同时作用时导线发生振动,这样情况产生的瞬时拉力很可能超过导线的破坏拉力导致导线发生断裂。

在导线上的覆冰发生脱落时可能使输电线路体系发生较大振动,另外导线覆冰之后的动力特性发生改变,可能在风的作用下发生振动。振动可能造成瞬时的巨大载荷导致各种事故的发生。因此下一步的工作可以着重研究导线的动力特性。

参 考 文 献

[1] 鲁元兵. 输电线路覆冰脱落及断线分析[D]. 杭州:

(上接第 50 页)

[11] 谭亲跃,王少荣,程时杰. 电力需求侧管理(PDSM)综述[J]. 继电器, 2005, 33(17): 79-84.

[12] 茆美琴,孙树娟,苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.

[13] 方乐润. 线性规划及其在水资源工程中的应用(二)[J]. 黑龙江水专学报, 1996(2): 1-9.

[14] 李淑萍. 海底油气集输系统网络流规划模型设计[J]. 油气储运, 2009, 28(4): 22-24.

[15] 邱晓燕,夏莉丽,李兴源. 智能电网建设中分布式电源的规划[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 7-10.

[16] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2011.

[17] 吴雄,王秀丽,王建党,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-9.

浙江大学, 2010.

[2] 陈正洪,史瑞琴,李兰. 湖北省 2008 年初低温雨雪冰冻灾害特点及影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008(4): 639-644.

[3] 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]. 高电压技术, 2004(1): 6-9.

[4] 刘春城,李宏男,刘佼. 高压输电线路抗冰灾的研究现状与发展趋势[J]. 自然灾害学报, 2012(1): 155-162.

[5] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006(4): 126-131.

[6] Druetz J, Louchez S, McComber P. Ice Shedding from Cables [J]. Cold Regions Science and Technology, 1995, 23(4): 377-388.

[7] 孔贝贝. 输电塔及塔线体系的静动力特性分析[D]. 济南: 山东大学, 2012.

[8] Druetz J, Nguyen D D, Lavoie Y. Mechanical Properties of Atmospheric Ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1986, 13(1): 67-74.

[9] 赵先德. 输电线路基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[10] 侯景鹏,陈加宝,曾建华,等. 基于牛顿-拉普森迭代法的输电导线找形研究[J]. 水电能源科学, 2012(2): 177-179.

作者简介:

蔡 钢(1964),高级工程师,主要从事继电保护方面的研究;

张晓敏(1987),助理工程师,主要从事电网材料研究;

付毅东(1966),助理工程师,主要从事电网材料研究。

(收稿日期: 2015-11-30)

[18] Tsikalakis A G, Hatziaargyriou N D. Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.

[19] 牛铭,黄伟,郭佳欢,等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.

[20] 杨秀,陈洁,朱兰,等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.

作者简介:

况 达(1992),硕士研究生,从事电力系统调度自动化研究;

滕 欢(1965),高级工程师、硕士生导师,从事电力系统调度自动化及计算机信息处理研究;

黄炜果(1990),硕士研究生,从事电力系统及其自动化研究;

王博堃(1991),硕士研究生,从事电力系统调度自动化研究。

(收稿日期: 2015-09-14)