均匀覆冰下的架空线有限元找形分析

黄新波[1],马龙涛[2],肖 渊[2],遵明伟[2]

(1. 西安工程大学 电子信息学院,陕西 西安 710048;2. 西安工程大学 机电工程学院,陕西 西安 710048)

摘要:在 ANSYS 中建立导线有限元模型,分别对架空线在自重载荷作用和均匀覆冰且不考虑风载荷的 2 种情况下进行有限元找形分析。通过对比 ANSYS 找形结果与理论计算结果,发现 ANSYS 找形方法所得结果更接近精确悬链线解,验证了 ANSYS 找形的可靠性。找形结果还说明在覆冰状态下导线的各个参数变化明显,这对架空线路的安全运行造成了一定的隐患,有必要对其进行找形分析。进一步提出把有限元找形分析和在线监测系统相结合,可以使得覆冰状态下的监测结果更加精确。

关键词:架空线;找形;索结构;覆冰;ANSYS;有限元;监测;模型

中图分类号:TM 75 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.013

0 引言

我国电力事业发展迅猛,电网也随之不断延伸和发展,经复杂地形及恶劣气候地区的架空线路越来越多。输电线是电力系统的基础,输电线的振动以及舞动,容易造成线路跳闸停电,甚至会导致导线折断、杆塔倒塌等严重事故,造成重大经济损失[1]。确定架空线路的初始状态是输电线路微风振动、覆冰舞动、脱冰跳跃等动力分析的基础和前提,找形结果的精度将直接影响后续动力分析的准确性[2]。

索结构初始平衡状态的确定问题就是索结构的找形问题,本文将索结构的找形方法应用于确定架空线的初始状态[3]。对于该问题的分析目前主要有力密度法、动力松弛法、非线性有限元法 3 种。力密度法是由 Schek 等人在 1974 年提出的一种用于索网结构的找形方法[4];动力松弛法最早被 J. H. Bun 和 A. S. Dya 用于索网结构,而 M. R. Banres 从 20 世纪 70 年代以来的系列研究工作,成功地将这一方法发展应用于索网及膜结构的找形,目前它在英国被广泛采用[5];非线性有限元法最早在 20 世纪 70 年代被 E. Huag 和 G. H. Pwoen 等运用于索膜的找形分析,目前它在我国应用较为广泛[6]。本文运用基于 ANSYS 的非线性有限元法对架空线的找形问题进行研究。ANSYS 是一种大型的有限元分析通用软件,也是结构分析中使用最为广泛的软件之一,因此可用于架空线路初始构形的找形。

收稿日期:2013-06-12;**修回日期**:2014-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177115);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-1043);陕西省教育厅专项科研计划项目(2010JK569);西安工程大学创新基金资助项目(chx2013036)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177115),Program for New Century Excellent Talents in University(NCET-11-1043),Science and Technology Plan of Shaanxi Education Department(2010JK569) and Innovation Foundation of Xi'an Polytechnic University(chx2013036)

1 架空线基本特性

架空线属于典型的索结构,不能承受压力和弯矩,主要依靠索的抗拉性能来承受外部荷载。针对架空线的受拉不受压的特性特作如下假设[3]:

a. 架空线是理想柔性的,不能承受弯矩和压力;

b. 架空线的受拉工作符合胡克定律;

c. 载荷均作用在节点上,各微元段内架空线呈直线。

本文遵循上述假设。

2 架空线找形的解析法

解析法的主要思路是在竖向荷载沿弦长或弧长均匀分布的作用下,利用数学和力学知识推导出架空线的数学表达式。该方法概念清晰、求解方便,常用于确定单跨架空线初始状态。

架空线所受均布载荷一般分为 2 种形式:

a. 竖直载荷沿弧线均匀分布,此时架空线形状为悬链线,由此导出的所有计算式均称为"悬链线公式";

b. 竖直载荷沿弦线均匀分布,此时架空线形状为抛物线,由此导出的所有计算式均称为"抛物线公式"。

2 种形式的具体公式详见文献[7]。

3 基于ANSYS 的架空线找形研究的非线性有限元法

3.1 非线性有限元法简介

非线性有限元方法最早是 1971 年由 E. Huag 和 G. H. Powen 提出的一种基于 Newton-Raphson 非线性迭代的索网结构找形方法[8]。即从一个勾画出的初始几何开始,通过改变索的预应力或索段的原始长度并经迭代得到相应的形状,它首次将有限元技术应用到索膜结构的找形中。此后,J. H. Aigyris 等人则在 1974 年提出了一种从平面状态开始的找形方法,通过逐步改变控制点的坐标并经平衡迭代,

求得相应形状[10]。目前，有限元法已成为较普遍的索膜结构找形方法，该方法也适用于架空线的找形。

3.2　架空线找形的基本原理

a. 直接迭代法[11]。在架空线弦线位置创建几何模型，采用实际材料的性质、实常数和小的初应变，然后施加载荷，并逐步更新有限元模型，释放不平衡力，以架空线水平张力为收敛条件进行迭代，满足条件时退出循环迭代，此时架空线的变形状态即为该载荷下的初始状态。

b. 找形分析法[11]。采用大的初应变和小的弹性模量，施加载荷得到变形线形，然后恢复实际弹性模量，假定小的初应变，逐步更新有限元模型，释放不平衡力，循环若干次，直至架空线水平张力满足收敛条件退出循环，即求得该载荷下架空线的初始状态。

3.3　ANSYS 找形步骤

针对架空线只能受压不能受拉的特性，ANSYS 提供了几类单元可供选用，本文采用 Link10 单元来进行模拟。Link10 单元是一个 3D 杆单元且只能承受轴向的仅拉或仅压，可用来模拟缆索或间隙等。它设有一个拉、压选项，打开受拉选项时，只需输入相应的实常数，单元特性就类似于受拉刚性件，一旦受压单元刚度就会消失。找形流程图见图 1，图中/POST1 为 ANSY 软件中的后处理命令，表示进入后处理器查看相关结果。

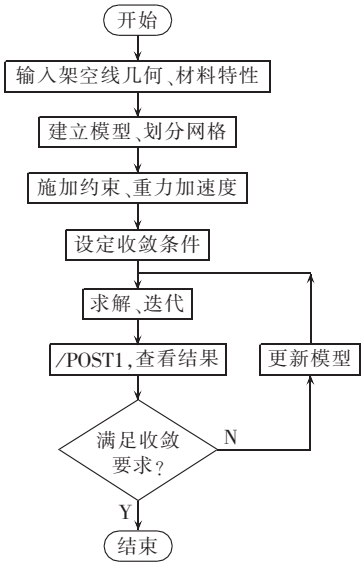

图 1　找形流程图

Fig.1　Flowchart of form-finding

4　架空线路的找形算例

本文分别使用解析法和有限元法对算例进行计算分析，并对找形结果数据进行分析比较。下面以山西省神头—原平 220 kV 送电线路改造工程中的 108–109 号段架空线路为例，在无风、无冰且只有重力作用的情况下进行找形计算分析。其基本参数如下：导线型号 LGJ–185/30，截面积 210.93 mm^2，档距 230 m，悬挂点高差 25 m，弹性模量 76 Gpa，单位长度重量 0.7326 kg/m，在年平均气温 5 ℃、无风、无冰、自重作用下导线最低点的水平张力 14359.86 N，计算拉断力 64320 N。图 2 给出架空线找形后的运算结果图。根据悬链线公式和抛物线公式可以得到理论上架空线的弧垂、线长和应力值，同时提取找形后架空线各点的弧垂、变形后架空线总长度和各点应力值，列于表 1 和表 2 中。表 1 中，节点 1 为高侧悬挂点，节点 2 为低侧悬挂点，e_1 为抛物线解和悬链线解间的误差，e_2 为 ANSYS 解和悬链线解间的误差，后同。从表中可以看出架空线找形后的弧垂、线长和应力值与理论值的误差均小于±2.5 %，足以满足工程的实际需求，说明该找形方法是可靠的。

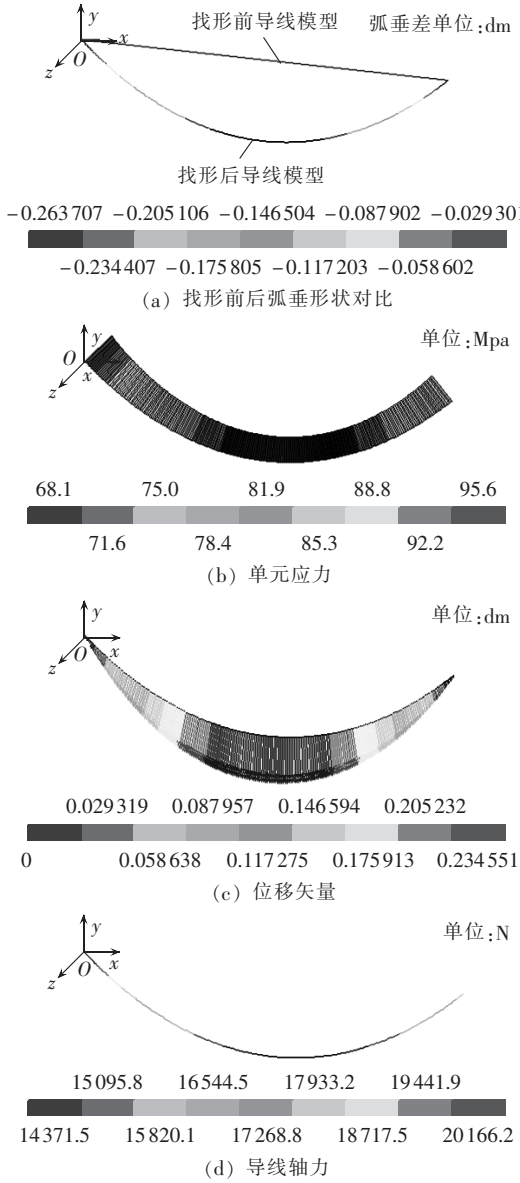

图 2　找形后结果分析图

Fig.2　Diagrams of form-finding analysis

表1 应力值的悬链线解、抛物线解和ANSYS找形结果的对比

Tab.1 Comparison of stress among catenary solutions, parabola solutions and ANSYS form-finding results

节点	应力值/Mpa			e_1/%	e_2/%
	悬链线解	抛物线解	ANSYS值		
1	84.33256	69.97445	84.802	17.0256	−0.5570
2	75.82203	68.10158	75.990	10.1823	−0.2220
20	81.94916	69.80320	80.805	14.8213	1.3962
40	77.79160	69.48434	76.904	10.6789	1.1410
60	74.41250	69.19738	73.907	7.0084	0.6793
80	71.77805	68.94271	71.369	3.9501	0.5699
100	69.86187	68.72068	69.528	1.6335	0.4779
120	68.64484	68.53162	68.437	0.1649	0.3028
140	68.11473	68.37580	68.130	−0.3830	−0.0220
160	68.26624	68.25345	68.619	0.0187	−0.5170
180	69.10090	68.16475	69.886	1.3548	−1.1360
200	70.62706	68.10982	71.891	3.5641	−1.7900
220	72.85999	68.08875	74.577	6.5485	−2.3570

表2 弧垂和线长的悬链线解、抛物线解和ANSYS找形结果的对比

Tab.2 Comparison of sag and line length among catenary solutions, parabola solutions and ANSYS form-finding results

参数	悬链线解/m	抛物线解/m	ANSYS值/m	e_1/%	e_2/%
跨中垂度	3.4773	3.3934	3.4526	2.41348	0.71029
导线长度	244.70424	244.47232	244.55383	0.09477	0.06147

5 架空线路覆冰状态下的找形分析

架空线在覆冰状态下易发生振动甚至舞动,同时覆冰会使架空线路的荷重增加,造成断线、倒杆(塔)、闪络等事故,给社会造成了巨大的经济损失,严重影响了架空线路的可靠性。故有必要对覆冰状态下架空线路的初始构形状态进行找形分析,为后续受力分析提供基础。

图3为覆冰状态下的受力示意图。图中,A、B、C分别对应109、108、110号杆塔悬挂点;$l_{AC''}$和$l_{AB''}$分别为悬挂点A距离最低点C'和B'的水平距离;s_1和s_2分别为悬挂点A到最低点C'和B'的导线长度;γ为覆冰后导线比载;T_H^{AB}和T_H^{AC}分别为最低点B'和C'的水平张力。具体详见文献[5]的相关章节。在假设覆冰沿导线均匀分布的情况下,利用笔者研发的输电线在线监测系统,测得悬挂点A覆冰状态下的竖直拉力T_{VA}、导线倾角α和该状态下所对应的冰厚d。

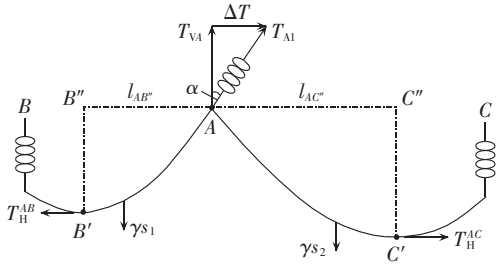

图3 覆冰状态下受力示意图

Fig.3 Stress chart of ice-coated line

以山西省神头—原平220 kV送电线路改造工程中109号杆塔安装的在线监测系统测得的数据为例,在不计风载且设覆冰沿导线均匀分布情况下对覆冰状态下的架空线路进行找形分析。2007年3月1日,覆冰监测装置测量基本数据如下:气温−7 ℃、风速10 m/s、覆冰厚度16.3792 mm,109号杆塔B相的垂直载荷28220.48 N,导线倾角39.9744°,取覆冰密度$\rho=0.8\times10^{-3}$ kg/cm^3。利用以上数据对覆冰状态下的架空线构形状态进行找形分析。图4为位移矢量图和架空线应力图,表3为部分节点应力值与理论解的对比,表4为弧垂和线长的ANSYS值与理论解的对比。

对计算结果的数据进行比对发现,在覆冰状态下利用抛物线公式求得的导线应力值误差太大,基本上无实际利用意义,而用ANSYS对架空线的找形

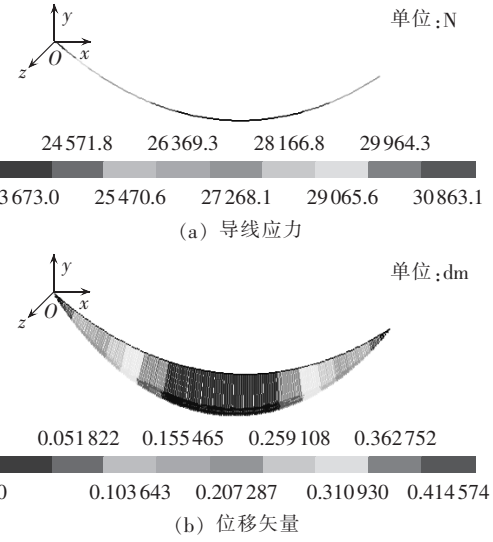

图4 位移矢量图和导线应力图

Fig.4 Displacement vector chart and conductor stress chart

表3 应力值的悬链线解、抛物线解和ANSYS找形结果的对比

Tab.3 Comparison of stress among catenary solutions, parabola solutions and ANSYS form-finding results

节点	应力值/MPa			e_1/%	e_2/%
	悬链线解	抛物线解	ANSYS值		
1	143.68635	115.92504	150.60	−19.32077	4.3940
2	137.23308	112.28275	133.40	−18.18099	−2.7931
20	128.66144	112.19384	129.49	−12.79918	0.6440
40	121.97038	112.18319	122.70	−8.02424	0.5762
60	117.06210	112.25082	117.44	−4.11003	0.3228
80	113.86486	112.39660	113.93	−1.28948	0.0572
100	112.33192	112.62021	112.34	0.25664	0.0072
120	112.44087	112.92120	112.75	0.42718	0.2275
140	114.19332	113.29895	115.14	−0.78321	0.8290
160	117.61488	113.75270	119.41	−3.28375	1.5263
180	122.75555	114.28154	125.36	−6.90316	2.1217
200	129.69047	114.88442	132.77	−11.41645	2.3745
220	138.52102	115.60209	141.42	−16.57569	2.0928

表 4 弧垂和线长计算结果

Tab.4 Comparison of sag and line length among catenary solutions, parabola solutions and ANSYS form-finding results

参数	悬链线解/m	抛物线解/m	ANSYS值/m	e_1/%	e_2/%
跨中垂度	4.164738	4.018311	4.177300	−3.51587	0.30034
导线长度	250.20615	249.74872	250.529487	0.18281	0.12923

结果误差均小于 5%，满足工程计算的需要，说明该计算有一定的实际应用意义。

表 5 对架空线在覆冰情况下和不覆冰情况下的找形结果(悬链线解)进行对比，发现在覆冰状态下导线的应力值变化明显，弧垂也有大幅增加，这对架空线的安全运行带来一定的隐患，故有必要对其进行找形分析并进行预警提示。在输电线在线监测系统中加入有限元分析计算，可使得覆冰状态下监测结果更加精确，从而进一步完善输电线在线监测系统，也使得本文研究更有实际意义。覆冰在线监测基本流程图描述如图 5 所示，图 6 为运行人员于 2007 年 3 月 1 日在现场处理覆冰事故时拍摄的导线覆冰图。

表 5 导线在覆冰和不覆冰情况下找形结果对比

Tab.5 Comparison of line form-finding results between line with and line without ice-coating

参数	覆冰情况下	不覆冰情况下	变化率
跨中垂度	4.1647 m	3.4773 m	0.197691
导线长度	250.20615 m	244.70424 m	0.022484
左悬挂点应力值	143.68635 Mpa	84.33256 Mpa	0.703806
右悬挂点应力值	137.23308 Mpa	75.82203 Mpa	0.809937

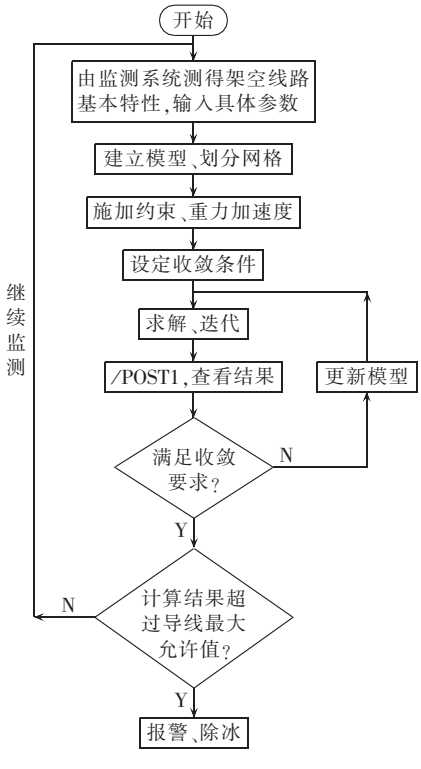

图 5 覆冰在线监测流程图

Fig.5 Flowchart of online ice-coating monitoring

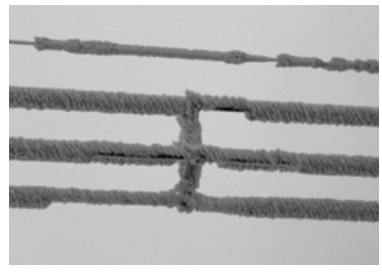

图 6 导线覆冰图

Fig.6 Graph of ice-coating of conductors

6 结论

本文介绍了架空线找形的理论知识和基于 ANSYS 软件的有限元找形，并通过具体算例分别介绍了架空线在自重荷载和覆冰载荷作用下的找形分析，得出以下结论。

a. 用 ANSYS 对架空线找形时，选用了 Link10 杆单元模拟索单元。将找形后的弧垂值、最大拉力值、导线长度、悬挂点应力值等与理论值进行对比分析，误差结果均在工程允许范围内，可以满足使用要求，验证了 ANSYS 程序找形计算的准确性。

b. 文中 ANSYS 的找形是采用实际的材料和实常数，设置很小的初应变并施加自重载荷，逐步更新有限元模型，在满足收敛条件时退出迭代，其最终结果就是所要求的架空线自重作用下的初始构形。该方法找形速度较快，与理论值相比，模拟值考虑到了结构的非线性，更能准确地模拟工程的实际情况。

c. 在对覆冰状态下线路找形分析时，充分和输电线在线监测系统相结合，以其监测的数据为计算依据，对架空线进行找形分析，将 ANSYS 计算结果与理论计算值进行比较分析，验证 ANSYS 在覆冰状态下找形的可靠性。文中给出了利用有限元计算和输电线在线监测系统二者相结合对输电线监测的流程图，这对以后在输电线在线监测系统中加入有限元计算方法的研究有一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] 黄新波. 输电线在线监测与故障诊断[M]. 北京：中国电力出版社，2008：197-204.

[2] 陶颐格，刘锐鹏，陈小平，等. 基于 ANSYS 的架空找形系统研究[J]. 广东电力，2011，24(4)：64-67.
TAO Yige，LIU Ruipeng，CHEN Xiaoping，et al. Research on form-finding system of over-head lines based on ANSYS[J]. Guangdong Electric Power，2011，24(4)：64-67.

[3] 黄涛. 大跨越输电线路非线性舞动理论研究[D]. 武汉：华中科技大学，2007.
HUANG Tao. Study on nonlinear galloping theory for long conductors of power transmission lines[J]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2007.

[4] 白建昆. 索膜结构非线性有限元分析[D]. 重庆：重庆大学，2009.

BAI Jiankun. The nonlinear finite element analysis of cable-membrane structure[D]. Chongqing:Chongqing University,2009.

[5] 唐喜. 基于ANSYS参数化语言的索膜结构找形优化和荷载分析[D]. 南京:河海大学,2005.
TANG Xi. Optimization of cable-membrane form-finding and load-case analysis based on APDL of ANSYS[D]. Nanjing:Hohai University,2005.

[6] 袁驷,程大业,叶康生. 索结构找形分析的精确单元方法[J]. 建筑结构学报,2005,26(2):46-51.
YUAN Si,CHENG Daye,YE Kangsheng. Exact element method for form-finding analysis of cable structures[J]. Journal of Building Structures,2005,26(2):46-51.

[7] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 北京:中国电力出版社,2003:59-92.

[8] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[9] 孔伟,朱明伟,付豪. 架空输电线路导线在ANSYS中的找形分析[J]. 东北电力大学学报,2011,31(5/6):64-67.
KONG Wei,ZHU Mingwei,FU Hao. The find-forming of transmission line in ANSYS[J]. Journal of Northeast Dianli University,2011,31(5/6):64-67.

[10] 孟遂民,孔伟. 架空输电线路设计[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

[11] 王新敏,李义强,许宏伟. ANSYS结构分析单元与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2011:467-473.

[12] 刘增良,杨泽江. 输配电线路设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:33-48.

[13] 尹飞鸿. 有限元法基本原理及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2010:10-26.

[14] 杨钦,李承铭. ANSYS索结构找形及悬链线的模拟[J]. 土木建筑工程信息技术,2010,2(4):61-65.
YANG Qin,LI Chengming. ANSYS form finding and catenary simulation of cable structure[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture,2010,2(4):61-65.

[15] 郑昊,古娟妮,王娜. 索膜结构基于非线性有限元法的ANSYS找形分析[J]. 四川建筑,2010,30(1):110-112.

作者简介:

黄新波

黄新波(1975-),男,山东海阳人,教授,博士后,研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术(**E-mail**:huangxb1975@163.com);

马龙涛(1987-),男,河南开封人,硕士研究生,研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术;

肖 渊(1975-),男,陕西咸阳人,副教授,博士,主要研究方向为机电控制技术、微制造系统;

遵明伟(1987-),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术。

Form-finding analysis based on finite element method for line with uniform ice-coating

HUANG Xinbo[1],MA Longtao[2],XIAO Yuan[2],ZUN Mingwei[2]

(1. College of Electric and Information,Xi'an Polytechnic University,Xi'an 710048,China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering,Xi'an Polytechnic University,Xi'an 710048,China)

Abstract: A finite element model is established in ANSYS for the finite element form-finding analysis of overhead line,considering dead weight,uniform ice-coating and no wind load. The comparison between ANSYS form-finding analysis and theoretical calculation shows that the results of the former is closer to the accurate catenary solution,verifying its reliability. The results of form-finding analysis show that the ice-coating changes line parameters obviously,which is a potential threat to the safe operation of overhead line,and the form-finding analysis is necessary for ice-coated lines. It is proposed to integrate the finite element form-finding analysis into the online monitoring system to obtain more accurate conditions of ice-coated lines.

Key words: overhead line; form-finding; cable structure; ice-coating; ANSYS; finite element; monitoring; models