

# ACCC 塔线体系在风荷载作用下的动力响应\*

鞠彦忠<sup>1</sup>, 门丽丽<sup>2</sup>, 衣亚伟<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学建筑工程学院 吉林, 132012)

(2. 元宝山发电有限责任公司运行分公司 赤峰, 024000)

(3. 国网内蒙古东部电力有限公司检修分公司 赤峰, 024000)

**摘要** 以北卫碳纤维复合芯导线用于输电线路增容改造的实例为工程背景, 运用有限元软件 ANSYS 建立三塔四线的有限元模型, 并通过 Matlab 模拟沿高度变化的 Kaimal 风速谱, 得到作用于输电塔和导地线的脉动风速时程曲线。由于碳纤维复合芯(aluminum conductor composite core, 简称 ACCC)导线具有重量轻、强度大和弧垂小等特点, 计算得出了改造前使用的普通钢芯铝绞线及改造后使用的 ACCC 塔线体系的位移随时间的变化规律, 以及在档距和塔高各自变化的情况下 ACCC 塔线体系的位移和应力, 并与工程实际的塔线体系进行比较。结果表明, ACCC 导线用于输电线路上的优越性及改造后模型的合理性可以节省工程造价, 为以后的设计提供参考。

**关键词** 碳纤维复合芯导线; 输电线路; 塔线体系; 风荷载; 动力响应

**中图分类号** TM726.3; TH140.8

## 引言

相对于普通导线来说, ACCC 导线具有重量轻、低弧垂、强度高、热膨胀小、耐高温、弛度小、载流能力高和安装方法不变等优点<sup>[1-2]</sup>, 是目前全世界电力输变电系统理想的、取代传统导线的新产品<sup>[3]</sup>。这也引发了输电线路建设呈现出新的特点, 给输电线路力学及结构带来了新的课题。ACCC 导线在我国自 2006 年首次挂网以来, 其安装与检验都是按照我国现行的输电线路规范与规程进行的<sup>[4]</sup>, 对于改造后的线路普遍没有进行分析验算。另外, 此类导线主要在我国线路的增容改造中使用, 没有更大地发挥出这类导线的优越性能。

笔者以 ACCC 导线用于线路增容改造的实例为工程背景, 对其塔线体系在风荷载作用下的动力响应进行了分析, 研究对比 ACCC 导线与普通钢芯铝绞线塔线体系的位移时程及在不同档距、不同塔高下的 ACCC 导线输电线路塔线体系的动力响应。在确保同样安全性的前提下, 利用导线的优越性能可以节省塔材、降低线路造价, 从而满足经济性要求, 为以后的设计提供参考。

## 1 计算模型

### 1.1 工程概况

笔者以 220kV 北卫碳纤维复合芯导线用于输电线路增容改造的实例为工程背景。输电塔为 GuZ2 型双回路直线塔, 水平档距为 550 m, 主材采用 Q345 钢, 受力构件为 Q235 钢, 呼称高为 33 m, 总高为 49 m。悬垂型绝缘子长度为 2.336 m。该输电线路改造前后的导线型号及设计参数如表 1 所示。

表 1 导线型号及参数

Tab. 1 Wire type and parameters

导线	ACCC	ACSR
型号	Linnet	LGJ-240
铝总截面积/mm <sup>2</sup>	218	238.85
综合截面积/mm <sup>2</sup>	246	277.75
直径/mm	18.29	21.66
最大使用张力/N	23 913	27 535
单位质量/(kg·m <sup>-1</sup> )	0.655	0.964 3
弹性系数/MPa	<85℃时 66 000 >85℃时 92 000	76 000

\* 国家自然科学基金资助项目(50978049)

收稿日期: 2012-10-24; 修回日期: 2012-12-20

## 1.2 有限元模型的建立

如图 1 所示,取直线段三塔四线为计算模型,以中间塔响应作为塔线耦合体系输电塔塔线的响应,采用 ANSYS 的 BEAM189 空间梁单元建模<sup>[5]</sup>。BEAM189 具有截面自定义功能,能够模拟实际的构件截面,在建模时单元的方向与实际构件方向相同。单元材料参数采用双线性模型,同时考虑材料的弹性特性和塑性特性,具体参数如下:a. Q345 钢的弹性模量  $E=206\ 000\ \text{MPa}$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,屈服强度为  $345\ \text{MPa}$ ; b. Q235 钢的弹性模量  $E=206\ 000\ \text{MPa}$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,屈服强度为  $235\ \text{MPa}$ 。用带预拉力的 LINK10 来模拟导(地)线,每  $25\ \text{m}$  划分为一个单元。

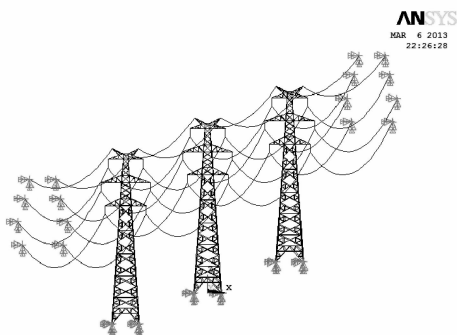


图 1 输电塔线体系有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the transmission line system

## 2 风速时程模拟

脉动风可以看成是均值为零的平稳随机过程。目前,有两种方法可以模拟平稳随机过程,分别为基于线性滤波技术的线性滤波器法和基于三角级数的谐波叠加法<sup>[6]</sup>。由于线性滤波法需要的计算机内存小、精度好,所以笔者采用线性滤波法模拟脉动风。模拟脉动风的方法是应用最广泛的 AR(Auto-Regressive)模型方法,本研究采用  $220\ \text{kV}$  双回路鼓形塔,呼称高为  $33\ \text{m}$ ,全高为  $49\ \text{m}$ ,档距为  $550\ \text{m}$ 。这里模拟的是  $90^\circ$  大风时结构上各点的模拟脉动风速,将输电塔划分为 10 个区域,输电线分为 22 段,运用 Matlab 软件编制脉动风速时程模拟程序,输电塔  $10\ \text{m}$  高度处的最大风速为  $25\ \text{m/s}$ ,模拟时间步长  $0.1\ \text{s}$ ,共  $2\ 000$  步,总时长为  $200\ \text{s}$ 。模拟每个区域代表点(中心点)处的风速时程,得到各点的风速时程曲线。图 2 为第 1 点脉动风速时程曲线。图 3 为模拟谱与目标谱比较,由图可知,模拟的功率谱与目标谱比较接近,说明模拟较合理。得到各点的风速时程曲线,根据电力行业标准<sup>[7]</sup>,输电塔上的风荷

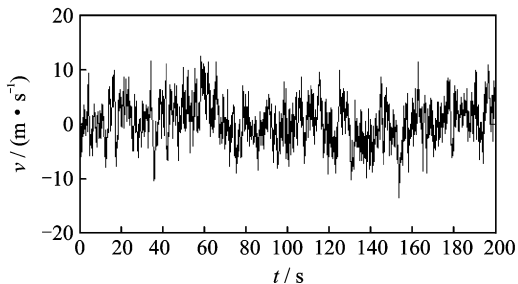


图 2 第 1 点脉动风速时程曲线

Fig. 2 The first point fluctuating wind speed time curve

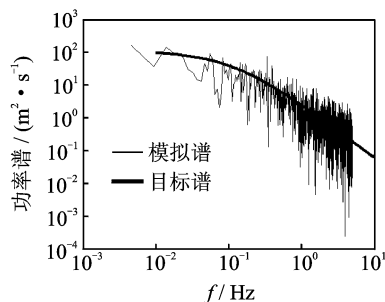


图 3 模拟谱与目标谱比较

Fig. 3 Comparison of analog spectrum and target spectrum

载为

$$W_t = kA_p \frac{V^2}{1.6} \quad (1)$$

其中: $k$  为风载体形系数; $A_p$  为输电塔上杆件的挡风面积( $\text{m}^2$ ); $V$  为计算风速( $\text{m/s}$ )。

根据文献[8],导线上风荷载的计算式为

$$W_x = \alpha W_0 \mu_z \mu_{sc} \beta_c d L_p \sin^2 \theta \quad (2)$$

其中: $W_x$  为与导线垂直的水平向风荷载标准值( $\text{kN}$ ); $\alpha$  为风压不均匀系数; $\beta_c$  为线路风荷载调整系数; $\mu_z$  为风压高度变化系数; $\mu_{sc}$  为导线的风荷载体型系数,当导线直径  $< 17\ \text{mm}$  或覆冰时(不论导线直径大小)应取  $\mu_{sc} = 1.2$ ,导线直径  $\geq 17\ \text{mm}$  且电线不覆冰时应取  $\mu_{sc} = 1.1$ ;  $d$  为导线直径或覆冰导线的计算外径;当导线为分裂导线时,取所有子导线外径总和( $\text{m}$ ); $L_p$  为杆塔水平档距( $\text{m}$ ); $\theta$  为风向与导线间的夹角(度); $W_0$  为基准风压标准值, $W_0 = V^2/1\ 600(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$ 。

由于 ACCC 导线的重量较 ACSR 钢芯铝绞线的轻,弧垂较 ACSR 导线的小,直径较 ACSR 导线的小,从而导致两种导线所受风荷载不同且 ACCC 导线的略偏小。

## 3 两种导线及 ACCC 导线用于不同档距和塔高下的时程分析

图 4 为塔顶节点和塔底单元的位置图。

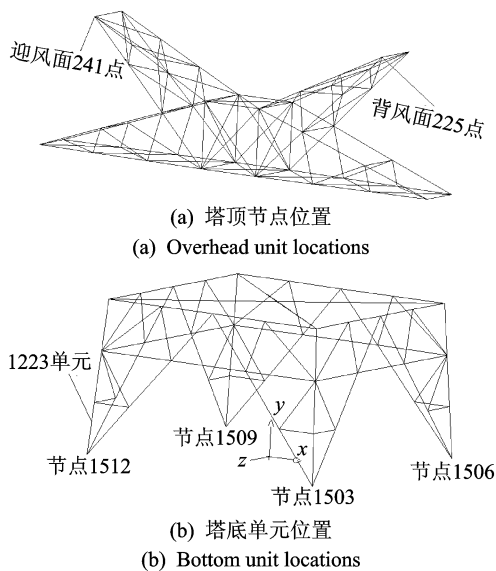


图 4 塔顶节点及塔底单元位置图

Fig. 4 Overhead and bottom unit locations

### 3.1 两种导线的塔线体系

图 5 为两种导线塔线体系的塔顶迎风面位移时程曲线的对比。

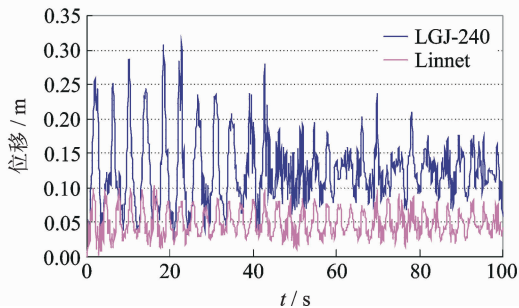


图 5 两种导线的塔顶位移时程曲线对比

Fig. 5 Two wires top displacement time history curve of the contrast

### 3.2 塔高不变,档距变化时 ACCC 导线塔线体系

$$f_m = H - (\lambda + h + \Delta h) \quad (3)$$

$$L = \sqrt{8\sigma f_m / g} \quad (4)$$

其中: $\lambda$ 为悬垂绝缘子串长度; $f_m$ 为导线最大弧垂; $h$ 为发生最大弧垂时导线到设计地面的最小距离; $\Delta h$ 为施工裕度; $\sigma$ 为架空线的许用应力; $g$ 为架空线自重比载; $L$ 为塔高允许档距。

根据选用的导线和弧垂公式,得出塔高允许档距为 812.79 m。在杆塔排位时,尽可能地使定位档距接近塔高允许档距,以便充分利用塔高,降低工程建设造价。在档距允许变化的范围内,将原线路 550 m 档距分别增大至 650 m 和 750 m,分析此时的动力响应。

表 2 为导线的弧垂及弧垂最低点对地的距离。

可以看出,档距加大到 750 m 时,导线对地距离为 13.54 m,大于原线路要求的安全距离 7.5 m。图 6, 7 为在 49 m 塔高不变、档距分别为 550, 650, 750 m 情况下的塔顶位移时程和塔底应力时程的对比。表 3 为 3 种档距下的塔顶位移峰值。

表 2 导线弧垂及弧垂最低点对地距离

Tab. 2 The lowest point of the wire sag and sag distance

档距/m	弧垂/m	对地安全距离/m
550	10.15	22.85
650	14.62	18.38
750	19.46	13.54

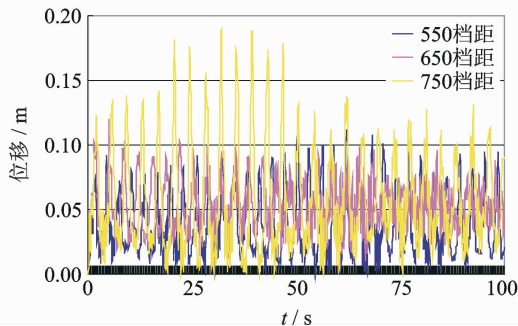


图 6 不同档距的塔顶位移时程曲线对比

Fig. 6 Comparing different span of top displacement time history curve

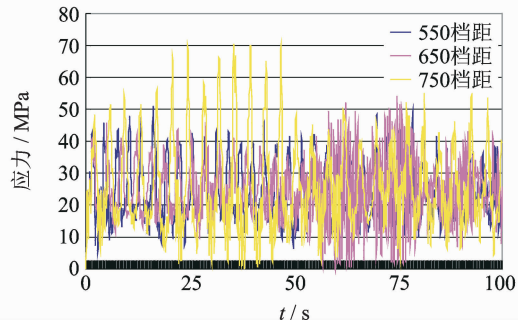


图 7 不同档距的塔底应力时程曲线对比

Fig. 7 Comparing different shift away from the bottom of the stress time history curve

表 3 档距改变情况下的塔顶位移峰值

Tab. 3 File from the change of displacement of the top peak

档距/m	241 点位移/m	225 点位移/m
550	0.116 2	0.116 0
650	0.129 4	0.129 3
750	0.190 0	0.189 4

### 3.3 档距不变,塔高变化时 ACCC 导线塔线体系

由于 ACCC 导线弧垂小,故可以有效降低铁塔呼称高、减少工程造价。维持原线路 550 m 档距不变,在铁塔呼称高允许变化的范围内将原塔呼称高分别降为 30 m 和 27 m,分析其三塔四线体系在风荷载作用下的动力响应。图 8, 9 为 3 种塔高下塔线体系的塔顶位移时程及塔底应力时程的对比。表 4 为 3 种塔高的塔线体系的塔顶位移峰值。

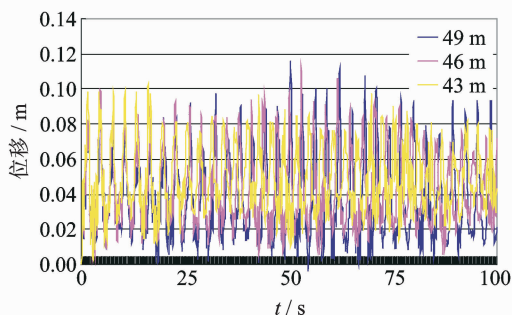


图8 不同塔高的塔顶位移时程曲线对比

Fig. 8 Comparing different height of the tower displacement time history curve

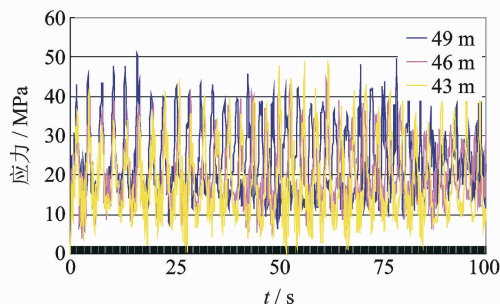


图9 不同塔高的塔底应力时程曲线对比

Fig. 9 Comparing different height of bottom stress time history curve

表4 塔高改变情况下的塔顶位移峰值

Tab. 4 Displacement peak of the overhead in the case tower height change

塔高/m	241 点位移/m	225 点位移/m
49	0.116 2	0.116 0
46	0.113 1	0.112 9
43	0.103 5	0.103 8

## 4 结论

1) 风荷载作用下的两种导线在原 550 m 档距的塔线耦合体系中, ACCC 导线作用下的塔顶位移较 ACSR 导线作用下的塔顶位移减小约 66%, 这说明在风荷载作用下 ACCC 导线比 ACSR 导线对输电塔的影响较小。

2) 根据《高耸结构设计规范》<sup>[9]</sup>, 设计时将风作为主要的荷载, 在标准组合条件下自立塔按非线性分析, 水平位移应不超过塔总高的 1/50, 该塔总高 49 m, 计算所得极限位移为 0.98 m, 随着档距的加大, 650 及 750 m 档距的塔顶位移较 550 m 分别增大 1 cm 和 7 cm, 都在规范规定的范围之内, 由此表明原线路档距可以加大。由 3 个档距的应力时程曲线图可知, 几种档距下塔线体系的最大应力都未超过 80 MPa, 都在材料的屈服强度容许的范围之内, 所以档距变化后的模型满足设计要求。

3) 将杆塔呼称高降为 30 m 和 27 m 时, 塔顶最大位移较 33 m 有所降低但并不明显, 可见满足规

范要求, 由此表明原线路杆塔塔高可以降低。由应力时程曲线图可知, 几种塔高的塔线体系的最大应力都未超过 60 MPa, 都在材料的屈服强度容许的范围之内。可见, 塔高变化后的模型满足设计要求。

## 参 考 文 献

- [1] 黄国飞, 季世泽, 蒋华君. 碳纤维芯软铝绞线的特性研究与应用[J]. 电线电缆, 2007(4): 10-14.  
Huang Guofei, Ji Shize, Jiang Huajun. Characteristics of aluminum conductor composite core[J]. Wires and Cables, 2007(4): 10-14. (in Chinese)
- [2] 鞠彦忠, 李秋晨, 孟亚男. 碳纤维复合芯导线与传统导线的比较研究[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1191-1194.  
Ju Yanzhong, Li Qiuchen, Meng Yanan. Comparative study of aluminum conductor composite core and traditional wire[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1191-1194. (in Chinese)
- [3] 杨宁. ACCC 碳纤维复合芯导线技术在我国的应用前景分析[J]. 电气应用, 2008, 27(5): 50-52.  
Yang Ning. The application prospect of analysis technology of the ACCC conductor in our country[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(5): 50-52. (in Chinese)
- [4] 何州文, 陈新, 王秋玲, 等. 国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述[J]. 电力建设, 2010, 31(4): 90-93.  
He Zhouwen, Chen Xin, Wang Qiuling, et al. Domestic research and application of aluminum conductor-composite core wire summary[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(4): 90-93. (in Chinese)
- [5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 5-96.
- [6] 刘锡良, 周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 81-84.  
Liu Xiliang, Zhou Ying. Several wind load simulation method[J]. Industrial Buildings, 2005, 35(5): 81-84. (in Chinese)
- [7] 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]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 103-327.
- [8] 舒新玲, 周岱. 风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2003, 19(4): 10-15.  
Shu Xinling, Zhou Dai. AR model of wind speed time and its rapid implementation[J]. Spatial Structure, 2003, 19(4): 10-15. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50135—2006 高耸结构设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.



第一作者简介: 鞠彦忠, 男, 1963 年 11 月生, 博士、教授。主要研究方向为输电线路工程。曾发表《基于 PSD 法输入的输电塔结构随机振动分析》(《中国电力》2008 年第 41 卷第 4 期) 等论文。  
E-mail: juyanzhong@126.com