

# 输电线路中杆线结构的抗风监测技术

梁庆国, 梁世容, 彭家宁, 边美华

(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要:**针对华南沿海地区输电线路经常遭受台风威胁这一事实,对 10 kV 输电线路中典型水泥杆线结构抗风监测技术开展了研究。首先,建立适用于杆线结构的抗风监测系统。接着,提出监测系统中的预警值确定方法,并建立杆线整体有限元动力模型,采用风-杆流固耦合模型将风速转化为风荷载,将风荷载作用于模型中确定风速预警值。最后,通过实际工程运用结果验证了提出的杆线结构抗风监测技术的正确性。通过研究表明:风对导线表面的作用力是不均匀的,通过风-导线流固耦合模型可以准确地将风速转化为导线上的风荷载;将风荷载作用于杆线整体有限元模型中得到的结构响应能够准确的反映结构的实际受力状态,可用于风速预警值的确定;提出的输电线路中杆线抗风监测系统得到了实际工程验证,可推广运用。

**关键词:**输电杆; 流固耦合; 风荷载; 动力时程分析; 监测系统

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.025 中图分类号:TM754 文章编号:1673-9140(2020)01-0181-06

## Research on wind resistance and monitoring technology for pole-line structure in transmission lines

LIANG Qinguo, LIANG Shirong, PENG Jianing, BIAN Meihua

(Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

**Abstract:** Power transmission lines in the coastal areas of South China are often threatened by typhoons. This paper aims to study wind-resistance and wind-monitoring technologies for typical cement pole-line structures in 10kV distribution lines. Firstly, a wind-resistant monitoring system for pole-line structures is established. Then, a method is proposed to determine the threshold in the monitoring system. A finite element model for a whole rod-line is established. By using the fluid-structure coupling model to calculate the wind-rod system, the value of wind speed is transformed into the wind load which is generally used as the threshold of wind speed in early warning stage. Finally, the wind-resistant monitoring technology of pole-lines is verified by the monitoring results in practical operation. It is shown that the wind load at the surface of conductors is inhomogeneous. The wind load can be accurately calculated through the fluid-solid coupling model of the wind-pole system. And The structural response obtained by the model accurately reflects the actual stress state of the structure, which can be used to determine the threshold of wind speed in the early warning stage. The wind-resistant monitoring system of poles-lines proposed in this paper has been verified by practical projects.

**Key words:** transmission pole; fluid-solid coupling; wind load; dynamic time-history analysis; monitoring system

收稿日期:2019-02-21;修回日期:2019-11-17

基金项目:广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20151021)

通信作者:梁庆国(1987-),男,硕士,工程师,主要从事结构分析及金属材料无损检测等研究;E-mail:lxtx100@163.com

输电线路中杆塔线的抗风能力是中国沿海省份电网安全需要考虑的关键问题之一。近年来的超强台风,对电网造成了很大的破坏<sup>[1-2]</sup>。例如,2014年“威马逊”强台风造成广西沿海地区输配电线路断杆、倒杆高达11 859基<sup>[3]</sup>,不仅产生了巨大的经济损失,还影响了人们的正常生活。据统计,台风中破坏最多的为10 kV以下的水泥杆。因此,开展该类结构在风荷载作用下的动力响应及破坏机理研究,从而形成适用于该类结构的抗风监测系统,对保障电网稳定运行具有重大实际意义<sup>[3]</sup>。

国内外研究表明,输电线路结构体系在可变荷载(尤其是风荷载)作用下,实际的破坏具有明显的动力特性<sup>[4-5]</sup>。中国输电杆线结构设计中采用动力调整系数来考虑风荷载增大作用,其实质仍然是拟静力的分析方法。由于风压往往是一个时变量,同时导线和杆存在相互作用,杆和线在风作用下的振动具有明显的耦合效应。因此,想要准确获得输电杆在不同风速下的响应,就需要建立杆线整体模型,同时将风速转化为时变风荷载施加在杆线结构上。文献<sup>[6-8]</sup>均针对杆塔的位移、舞动提出了相应的监测方法,然而他们并未考虑导线和杆的相互作用,同时风荷载也是近似模拟,因此方法的适用性有限。

该文以华南沿海某10 kV输电线路中典型水泥杆线结构为背景,进行了该类结构的抗风监测技术研究:①提出适用于杆线结构的抗风监测系统;②为确定监测系统中的预警值,建立杆线结构整体有限元模型,将基于精细化有限元分析得到的风速与风力关系作为时变荷载施加于模型上,获得杆线结构在风荷载下的动力仿真模型,进而确定出风速预警值;③依托实际工程,建立抗风监测系统,监测结果验证该文所提方法的正确性。

## 1 输电线路中杆线结构抗风监测系统

杆线结构抗风监测中最重要的监测参数为风速、动应变、杆线模态,因此需要在杆的不同位置安装不同的传感器。其中风速和风向监测点布置于与导线同高处,杆线模态监测点布置于杆顶位置,动应变监测点布置于杆底位置。

各项监测参数采用的传感器类型及数量如表1所示。

表1 监测传感器类型及数量

Table 1 Types and quantities of monitoring sensors

| 监测参数  | 配置        | 数量    |
|-------|-----------|-------|
| 风速、风向 | 三向超声风速仪   | 1台    |
| 杆底弯矩  | 动应变计      | 不少于4个 |
| 振动加速度 | 磁电式加速度传感器 | 2台    |

由于输电杆一般位于野外,采用市电作为仪器的供电手段变得不可行;同时由于监测点离监测中心往往较远,采用有线传输方式较困难。为克服这些困难,监测系统的供电采用太阳能供电系统,采用带有4G传输模块的无线网络采集仪,数据接收、存储、处理及展示均在云平台服务器上完成。杆线抗风监测系统如图1所示。

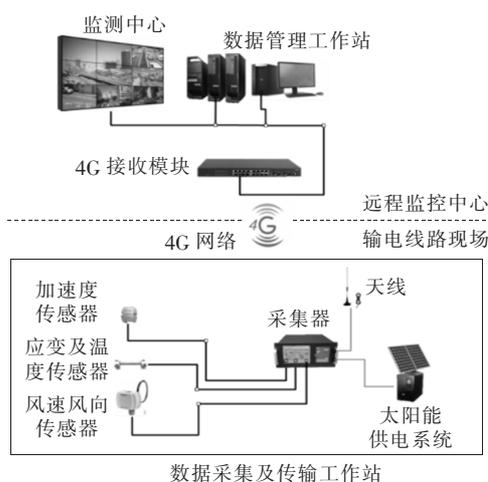


图1 监测系统总体架构

Figure 1 Global frame of monitoring system

抗风监测系统的一个重要功能是根据实时监测数据对结构的安全性进行评估,一旦出现不安全就做出预警提示,因此设置合适的预警值就显得十分关键。

## 2 风速预警值确定

### 2.1 风荷载确定

在实际监测中,风速较易获得,然而在杆线结构进行动力分析时需要的是力,因此就需要将风速转化为模型中需要的力(即风荷载)。

风对导线的作用实际上是流固耦合作用,该文基于Ansys Workbench有限元分析软件,建立了导线与风的流固耦合精细化模型,如图2所示。

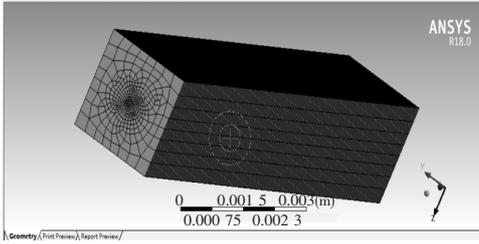


图 2 风与导线流固耦合三维模型

Figure 2 3D model of fluid-solid coupling between wind and wire

模型中采用  $K-\epsilon$  湍流模拟,并做如下假定:导线表面光滑、无渗透;导线与风场在耦合面上的速度压力均相等;风作为黏性不可压缩流体。模型参数:建立  $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 20\text{ m}$  的长方体 liquid 流体模型用于模拟风;模型内部  $0.024\text{ m}$  直径的圆柱体作为导线,采用 solid 固体,密度  $2\ 850\text{ kg/m}^3$ 。导线表面边界条件类型为 wall。

分别讨论风速为 5、10、20、30 m/s 等 4 种工况,导线附近风速分布云图如图 3 所示。从云图中可以看出,在导线上下缘处风速最大,为  $13.64\text{ m/s}$ ,在导线迎风面位置为  $6.82\text{ m/s}$ ,在导线的背风面位置为  $3.41\text{ m/s}$ 。

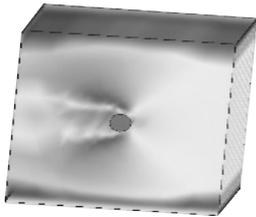


图 3 导线附近风速分布云(10 m/s 风速)

Figure 3 Cloud picture of wind speed distribution around wire(10 m/s)

在得到风速分布后,利用风速和风压的关系,对整个导线表面积分就能得到各风速下的导线力,接着将力除以导线迎风面积得到平均风压,不同风速下的平均风压如表 2 所示。

表 2 不同风速作用下平均风压

Table 2 Average wind pressure applied on wire under different wind speed

| 序号 | 风速/(m/s) | 平均风压/Pa |
|----|----------|---------|
| 1  | 5        | 22.7    |
| 2  | 10       | 80.8    |
| 3  | 20       | 295.0   |
| 4  | 30       | 634.6   |

将表中数据进行曲线拟合,由此可以得出导线平均风压与风速之间的关系式:

$$P = 1.1307V^{1.8589} \quad (1)$$

式中  $P$  为导线平均风压,Pa; $V$  为风速,m/s。

通过式(1)就可以将实测风速转化为导线所受平均风压,进而得到导线每延米所受力,从而实现了风速向风荷载的转化。

## 2.2 杆线结构在风荷载下的动力分析

5 基直线杆为该背景线路中的典型结构形式。该结构杆高为  $15\text{ m}$ ,档距均为  $60\text{ m}$ 。主杆材料为 C30 混凝土,横担材料为 Q235 钢,导线采用 LGJ-95/20 钢芯铝绞线。基于 Ansys 软件建立有限元模型,主杆和横担采用 Beam189 模拟,导线及地线采用 Link10 模拟。模型约束条件:杆底为固定约束,杆身和横担共用节点,导线、地线与横担的连接采用节点耦合,耦合所有平动自由度。

5 基杆线结构有限元模型如图 4 所示。



图 4 杆线结构有限元模型

Figure 4 Finite element model of cement pole-line structure

对依托工程中的杆线结构进行了风速监测,取其中 1 h 内的风速数据,如图 5 所示,最大风速为  $9.3\text{ m/s}$ 。利用式(1),将风速时程转化为导线的平均风压时程,并根据导线的直径,转换为导线单位长度受力,如图 6 所示。

将风荷载施加于杆线模型上,采用直接积方法进行时程分析,就可以得到杆线结构的加速度、内力、导线与水泥杆的耦合作用力等动力响应时程。杆顶的加速度时程如图 7 所示,杆底的弯矩时程如图 8 所示,杆顶加速度和杆底弯矩最大最小值如表 3 所示。

从图 7、8 及表 2 可以看出,杆线结构在风荷载的作用下,其力学响应表现出明显的动力时程特性,而非静态特性。

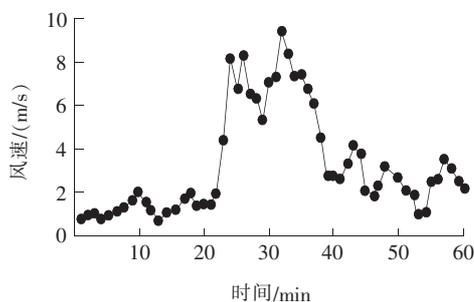


图 5 风速时程数据

Figure 5 Time-history data of wind speed

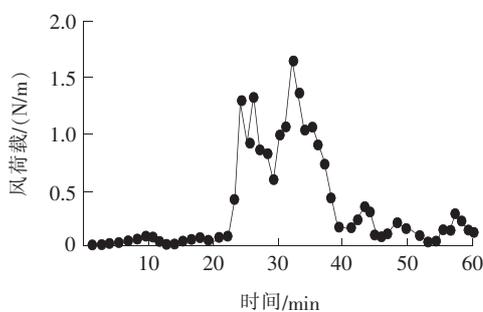


图 6 作用于导线的风荷载时程数据

Figure 6 Time-history data of wind load applied to wire (N/s)

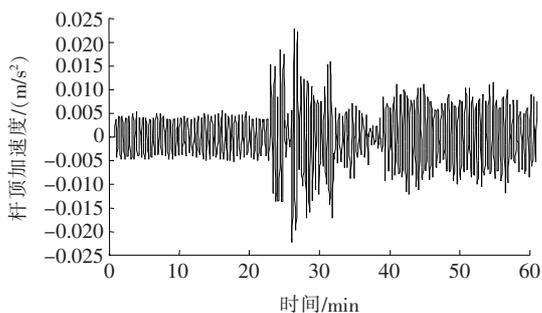


图 7 杆顶水平加速度时程

Figure 7 Time-history data of acceleration at top of cement pole

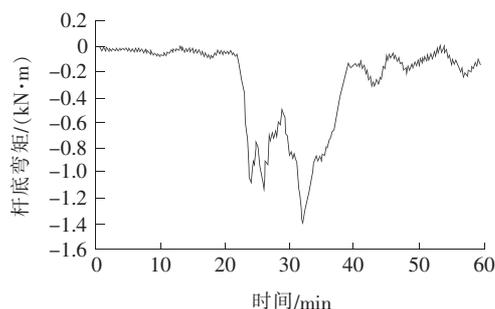


图 8 杆底截面弯矩时程

Figure 8 Time-history data of bending moment at bottom of cement pole

表 3 水泥杆动力分析结果

Table 3 Dynamic results of cement pole

| 极值  | 杆底弯矩/(kN·m) | 杆顶加速度/(m/s <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------|---------------------------|
| 最大值 | 0.00        | 0.02                      |
| 最小值 | -1.39       | -0.02                     |

### 2.3 风速预警值确定

通过 2.2 节的分析可以确定出杆线结构的最不利位置为杆底截面。接着,由杆底截面的截面参数及配筋参数,利用截面抗弯承载力的计算方法,可以方便地求出杆底截面的极限承载力。

由于杆底弯矩与施加于杆身上的荷载呈线性关系,通过杆线结构动力分析模型就能确定抗弯承载力下的极限风荷载。如该文模型的极限风压推导结果如表 4 所示。

表 4 极限风荷载及极限风压计算

Table 4 Calculation of the limited wind speed and wind pressure

| 状态 | 杆底弯矩/(kN·m) | 风荷载/(N/m) | 风压/Pa  |
|----|-------------|-----------|--------|
| 常规 | 1.39        | 1.21      | 71.39  |
| 极限 | 8.06        | 7.04      | 413.98 |

从上表可以得出,杆线结构体系能够承受的极限风压为 413.98 Pa。通过式(1)有:

$$V = \left( \frac{P}{1.1307} \right)^{0.538} \quad (2)$$

由此,可得出杆线监测系统的风速预警值为 23.94 m/s。

通过分析,得到杆线抗风监测系统的风速预警值确定流程,如图 9 所示。

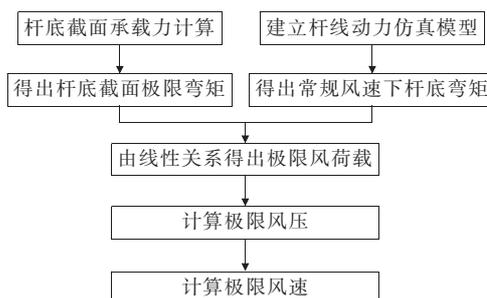


图 9 杆线结构抗风监测系统的风速预警值确定流程

Figure 9 The determination procedure of wind speed warning value in monitoring system for pole-line structure

### 3 工程验证

将该文提出的杆线结构抗风监测系统运用于华南沿海某 10 kV 的输电线路中的水泥杆线结构中,仪器布设如图 10 所示。通过监测结果与该文提出的动力分析模型计算结果对比,以此来验证所提方法的正确性。

某时间段杆顶实测加速度时程曲线如图 11 所示。对该曲线进行频谱分析,得到结构的一阶固有频率如图 12 所示。

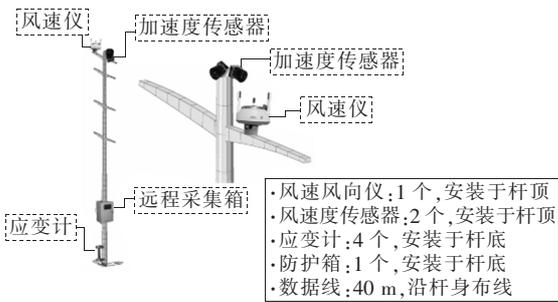


图 10 监测仪器布置

Figure 10 Layout of monitoring instruments

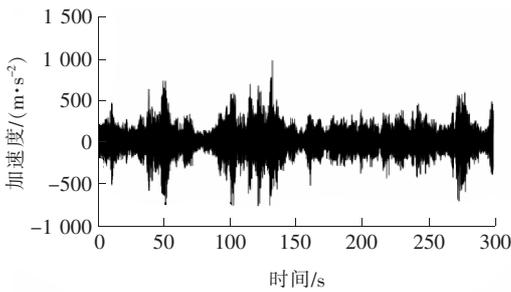


图 11 杆顶实测加速度时程曲线

Figure 11 Time-history situ monitoring data of acceleration at top of pole

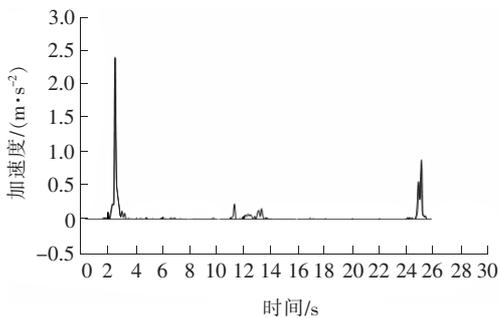


图 12 第一阶固有频率识别

Figure 12 Identified 1st order natural frequency based on monitoring data

同时,将该时段的风速监测结果输入到动力分析模型中,提取杆顶位置处的加速度信号,如图 7 所示。实测杆顶加速度和一阶频率与有限元分析结果对比如表 5 所示。

表 5 实测杆顶加速度和一阶频率与有限元分析结果对比

Table 5 Comparison of measured acceleration and 1st frequency with those calculated by finite element analysis

| 极值     | 杆顶加速度/(m/s <sup>2</sup> ) | 一阶固有频率/Hz |
|--------|---------------------------|-----------|
| 有限元分析值 | 0.020 0                   | 2.500     |
| 实测值    | 0.018 4                   | 2.812     |

由表 5 可知:动力分析得到杆顶最大加速度为 0.020 m/s<sup>2</sup>,与实测最大值 0.018 4 m/s<sup>2</sup> 较接近;动力特性分析得到的主杆一阶振动频率为 2.5 Hz,与实测值 2.8 Hz 同样较为接近。综合可以说明该文建立的杆线动力分析模型是正确的。

将动力分析模型中的杆底应力值与实测值进行对比,如图 13 所示。

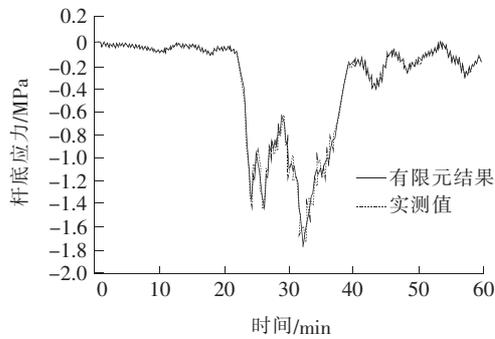


图 13 实测应力结果和动力分析模型结果对比

Figure 13 Comparison of measured stress with that calculated by finite element analysis

通过图 13 可以看出:实测应力结果和动力分析模型结果十分接近,进一步验证了该文建立的动力分析模型的正确性;同时也可以说明所建立的杆线有限元模型能够准确地反映杆线的实际受力状态,通过该方法得到的风速预警值是可靠的。

### 4 结语

该文以华南沿海某 10 kV 输电线路中典型水泥杆线结构为背景,对杆线结构抗风监测技术开展了研究。首先建立了杆线结构抗风监测系统;其次提出了监测系统预警值确定方法;最后通过实

际工程验证了方法的正确性。得出结论:

1)风对导线表面的作用力是不均匀的,通过风—导线流固耦合模型可以准确地将风速转化为导线上的风荷载;

2)建立了杆线整体动力分析模型,将风荷载作用于模型中得到的结构响应能够准确地反映结构的实际受力状态,可用于风速预警值的确定;

3)所提出的输电线路中杆线抗风监测系统得到了实际验证,可推广运用。

#### 参考文献:

- [1] 庞清乐,高厚磊,杜强,等. 面向智能配电网的保护与控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21): 28-32+38.  
PANG Qingle, GAO Houlei, DU Qing, et al. Protection and control method for smart distribution grid [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 28-32+38.
- [2] 黄仁谋,安利强,张荣伦,等. 台风风雨荷载作用下输电线路绝缘子串风偏特性[J]. 电力科学与技术学报, 2018,33(2):89-95.  
HUANG Renmou, AN Liqiang, ZHANG Ronglun, et al. Windage characteristic analysis of transmission lines under typhoon-rain loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(2): 89-95.
- [3] 谢强,张勇,李杰,等. 华东电网500 kV任上5237线跑线风致倒塔事故的调查分析[J]. 电网技术,2006,30(10): 59-63+89.  
XIE Qiang, ZHANG Yong, LI Jie. Investigation on tower collapses of 500 kV Renshang 5237 transmission line caused by downburst[J]. Power System Technology, 2006,30(10): 59-63+89.
- [4] 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,2006,15(4): 126-131.  
XIE Qiang, LI Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures[J]. Journal of Natural Disasters,2006,15(4): 126-131.
- [5] YAN Hui, LIU Yanjun, ZHAO Diansheng. Geometric nonlinear analysis of transmission tower with continuous legs[J]. Advances in Steel Structures, 1996, 1(5): 339-344.
- [6] 黄文焘,邵能灵,范春菊. 基于杆塔结构力学测量的线路覆冰在线监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(24): 71-75+83.  
HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju. Study on icing monitoring system of different tower overhead transmission lines based on mechanics measurements [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 71-75+83.
- [7] 李玉曦,赵胜利,朱岸明,等. 750kV输电线路复合横担动载下的疲劳性能研究[J]. 智慧电力,2017,45(12): 46-49+68.  
LI Yuxi, ZHAO Shengli, ZHU Anming, et al. Study on fatigue property under dynamic load of composite cross-arm in 750 kV AC transmission line[J]. Smart Power, 2017,45(12): 46-49+68.
- [8] 张淼,汤心韵,周力行,等. 电站10 kV连续倾斜架空线防雷配置改造[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(2): 169-174.  
ZHANG Miao, TANG Xinyun, ZHOU Lixing, et al. Power station 10 kV continuous tilt overhead line lightning protection reformation[J]. Journal of electric power science and technology,2019,34(2): 169-174.