

# 基于有限元与现场实测的超高杆塔组立施工安全监控方法

夏顺俊<sup>1</sup>,朱姣<sup>2</sup>,赵俊<sup>1</sup>,季天程<sup>2</sup>,张仁强<sup>1</sup>,李东鑫<sup>2</sup>,徐怀宇<sup>1</sup>,林冬阳<sup>2</sup>

(1. 江苏省送变电有限公司,江苏 南京 210028; 2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210003)

**摘要:**以凤城-梅里 500 kV 线路长江大跨越工程 385 m 高塔组立施工为背景,提出一套基于有限元分析与现场实测的超高杆塔组立施工安全监控方法。通过安装力学传感装置和数据传输装置,监控抱杆腰环拉线系统的受力大小;根据关键施工阶段铁塔与抱杆的耦合有限元模型,以现场实测数据为依据,通过计算机视觉计算分析,实现结构整体应力与位移的监测。通过展示吊装前后抱杆位移的视觉识别测量数据和吊装过程平臂工作状态的动态监测数据,验证该安全监控方法的有效性,其监测数据的精度满足技术要求。

**关键词:**高塔;监控;抱杆;有限元;计算机视觉

**中图分类号:**TM75 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)01-0239-05

## Safety Monitoring Method of Ultra-high Tower Assembly Construction Based on Finite Element and Field Measurement

XIA Shunjun<sup>1</sup>, ZHU Jiao<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, JI Tiancheng<sup>2</sup>, ZHANG Renqiang<sup>1</sup>, LI Dongxin<sup>2</sup>, XU Huaiyu<sup>1</sup>, LIN Dongyang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Transmission & Transformation Corporation, Nanjing 210028, China;  
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Based on the construction of 385 m tall towers in Fengcheng-Meili 500 kV Line Yangtze River Crossing project, this paper puts forward a set of construction safety monitoring method based on finite element analysis and field measurement. With the installation of mechanical sensing device and data transmission device, the force of the rod waist ring wire pulling system is monitored. According to the coupled finite element model of the tower and the pole at the critical construction stage, and based on the field measured data, the displacement monitoring of the overall stress of the structure is realized through computer vision calculation and analysis. The effectiveness of the proposed safety monitoring method and the accuracy of the monitoring data are verified by displaying the visual identification measurement data of the pole displacement before and after lifting and the dynamic monitoring data of the working state of the flat arm in the lifting process.

**Keywords:** tower; monitoring; derrick; finite element; computer vision

## 0 引言

目前在建的凤城-梅里 500 kV 线路长江大跨越工程跨越塔全高 385 m,建成后将成为世界最高输电铁塔,其组立施工难度大、风险高,给施工监测、安全预警提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。本文提出了一套基于有限元与现场实测的超高杆塔组立施工安全监控方法,可为大跨越输电高塔施工提供全方位、全过程的安全监控与预警。

## 1 安全监控方法介绍

针对 385 m 高塔的组立施工专门研制了 T2T1500 双

平臂抱杆,如图 1 所示。由于抱杆结构塔身高、吊重大,为保证施工过程中整体结构的安全性与稳定性,需要对输电塔主体结构与抱杆结构自身开展全过程安全监控<sup>[2]</sup>。

安全监控方法介绍:1)通过安装拉力计实现对腰环拉线的受力检测;2)依赖于抱杆本身集成,实时测量风速、吊重、变幅幅度、力矩等;3)采用计算机视觉分析技术,测量抱杆的位移。

主要难点:①铁塔与抱杆结构高耸,监测仪器的监测范围难以覆盖结构整体<sup>[3]</sup>;②铁塔主体和抱杆系统的高度随着施工的进展而增加<sup>[4]</sup>,抱杆平臂有起吊、调幅、回转等动作<sup>[5]</sup>,因此需要实现铁塔与抱杆结构状态的动态监测;③施工过程中塔顶缺乏相对固定和静止的位移测量参考点,塔顶与抱杆顶部位移测量难度大。

基金项目:国网江苏省电力有限公司 500 kV 凤城-梅里长江大跨越工程超大型组塔双平臂抱杆系统研制及应用科技项目 (SGJSJSOXMJS2000254)

第一作者简介:夏顺俊(1976—),男,江苏南京人,高级工程师,研究方向为输电线路施工管理。



图1 大跨越输电塔(高 385 m)及双平臂抱杆

## 2 腰环拉线受力监测方案

### 2.1 无线拉力采集系统结构

系统由前端拉力计传感器、无线拉力采集器、无线数据接收通信终端以及手机或计算机端监控后台等组成。采集器和接收通信终端之间使用 433 MHz 无线射频传输数据,接收通信终端使用 GPRS 网络与监控后台通信,从而实现现场拉力的实时采集,并定时存储到云端大数据平台,如图 2 所示。



图2 无线拉力、张力采集系统结构示意图

### 2.2 无线拉力采集工作原理及技术参数

#### 1) 工作原理

拉力计内置电阻桥式电路,当拉力计受力(量程范围内)时导致电桥桥臂电阻发生变化,桥路失去平衡,此时

给电桥输入端施加固定的电压(DC5 V 或 DC10 V),在电桥输出端会输出和受力成线性的 mV 电压信号。经出厂标定,可以获得受力和 mV 信号之间的比例系数。采集器内部设计有高精度稳压电压信号(DC10 V),定时给桥路供电,并采集输出的 mV 信号。可根据前述比例系数换算拉力值,然后通过无线射频信号发送给无线数据接收通信终端。

#### 2) 技术参数

采集精度:0.5 kg;  
分辨率:1 kg;  
采集范围:0~30 t;  
采集频率:5 min/次;  
功耗:静态<5 μW;  
电池使用寿命:>1 个月;  
电池使用温度:-40℃~70℃;  
无线传输距离:>500 m。

### 2.3 无线数据接收通信终端

无线数据接收通信终端是现场无线通信、数据接收和上传后台软件的核心设备。

#### 1) 技术参数

管理传感器数为 90 个;显示方式为 LCD 显示,每页 3 个数据,3 个电压值;通信接口为 RS-485;通信协议为 MODBUS RTU;工作电压为 AC220 V,内置备用 DC5 V 接口,可实现断电自动切换;通信距离>500 m;支持 TF 卡记录,可定时记录现场数据;支持 GPRS 无线传输,每台终端有唯一编码,对应监控后台相应设备。

#### 2) 编码录入

现场传感器的编码需要录入到无线数据接收通信终端(仪表),才可以正常接收和显示。同一个编码只能录入一个位置,如果录入多个位置,数据只会展现出第一个位置。仪表在接收到传感器发来的数据包时,取包头的 4 字节(8 个数字)传感器编码,与仪表内存里的编码比对,若比对成功,就将数据写入相应位置的内存,并在仪表页面相应序号的位置显示数据。

### 2.4 拉力计布置方案

抱杆的主腰环绳采用上下双道,防扭腰环绳采用单道,腰环的布置见图 3,拉力计的安装位置见图 4,现场安装照片见图 5。

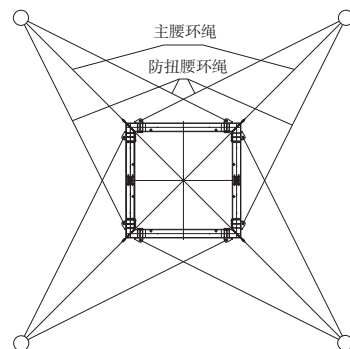


图3 腰环布置示意图

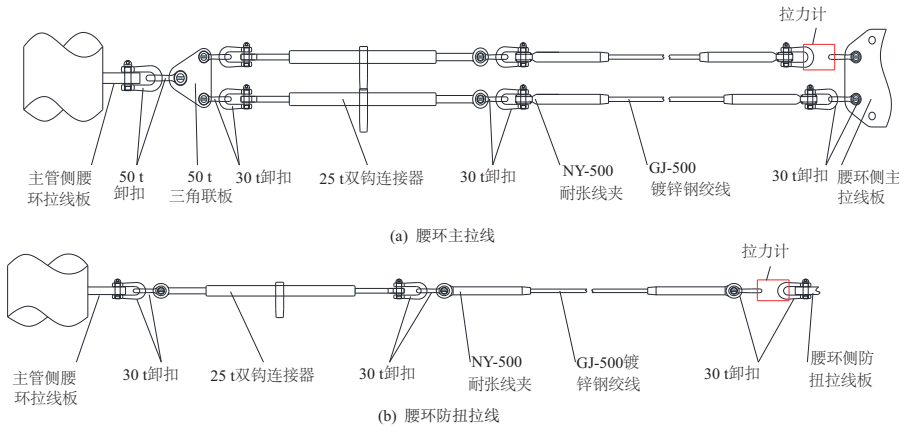


图4 拉力计安装位置示意图



(a) 拉力计



(b) 无线拉力采集器

图5 拉力计及无线拉力采集器

### 2.5 拉力监测结果分析

图6为2021年9.25-10.25期间4-7层腰环拉索拉力曲线(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者),其中值为0表

示由于环境因素影响,塔下设备未接受到拉力计数据。从已有监测数据可以看出,在9.25-10.11期间,腰环受力基本比较均衡,第7层防扭拉线数据最大达到15t,其余拉力计数据均在15t以内,满足设计使用要求。

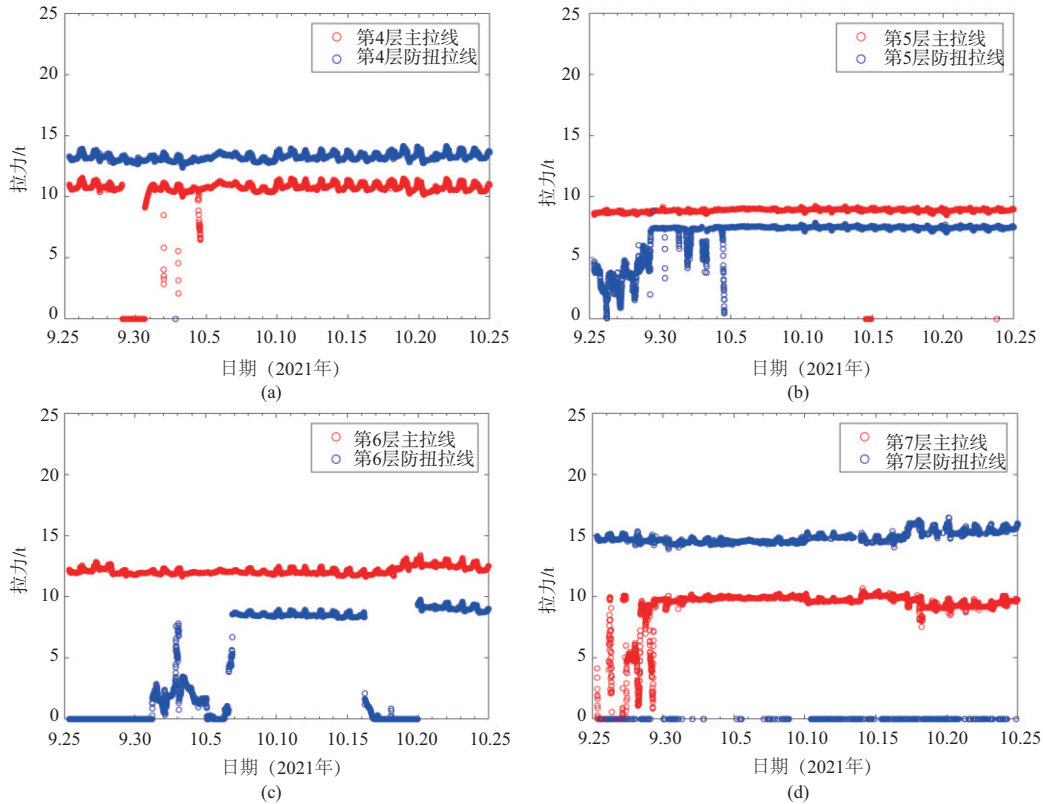


图6 9.25-10.25期间4-7层腰环拉索拉力曲线

## 3 基于计算机视觉的抱杆位移测量技术

### 3.1 监测设备

基于计算机视觉的抱杆位移测量技术,通过沿着输电高塔和抱杆布置的摄像头来实施,施工现场还布置和安装有气象观测仪器、力传感器、应变片等,实时采集周边风

象要素和结构在工作状态或非工作状态下的吊装荷载、平臂姿态、变幅幅度和结构位移响应等结构状态参数<sup>[6]</sup>。如图7所示,施工安全状态监测内容包括以下项目。

- 1) 风速。在塔顶与地面分别布置风速传感器,其中塔顶传感器随着抱杆高度的提升而提升。
- 2) 吊重。在平臂两侧吊钩上布置拉力传感器,实时测量吊装重物的质量。
- 3) 变幅幅度。实时记录平臂小车至回转中心的距离。
- 4) 力矩。根据平臂两侧吊重与吊钩变幅幅度,可以

计算两侧力矩与力矩差。

5)位移。采用基于计算机视觉的位移测量方法,在平臂末端安装相机实现抱杆位移测量。

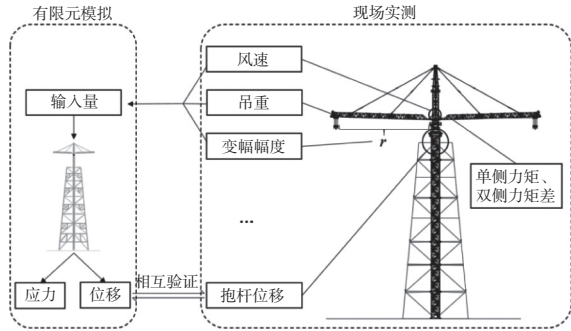


图7 基于有限元模拟与现场实测的输电高塔组立技术

### 3.2 监测原理

在抱杆平臂末端安装有监控摄像头,研发设计了铁塔及抱杆结构位移识别算法,实现了对铁塔-抱杆耦合系统位移的远距离、非接触式测量。具体原理与实施方式如下。

#### 1) 相机标定

相机标定采用比例系数法,目的在于得到图像平面坐标到实际空间坐标的变换关系。抱杆与输电塔的所有尺寸可在施工图样中获取,若已知目标点附近某两点实际距离为 $d$ ,这两点在图像上的像素距离为 $p$ ,则可以计算目标点处的比例系数为

$$C_{\text{scale}} = \frac{d}{p} \quad (1)$$

#### 2) 目标追踪

选用模板匹配法进行目标追踪,首先在帧图像中选取钢管构件节点等特征较为明显的区域作为预定义模板,然后将预定义模板逐像素在感兴趣区域(ROI)上移动,搜索目标区域,模板与区域间的匹配程度由归一化相关系数,即采用式(2)来计算。

$c(i, j) =$

$$\frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (f(x, y) - \bar{f}) [r_t(x+i, y+i) - \bar{r}_t]}{[\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (f(x, y) - \bar{f})^2]^{1/2} [\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n r_t(x+i, y+i) - \bar{r}_t]^2} \quad (2)$$

式中: $(i, j)$ 为搜索框左上角点坐标; $f(x, y)$ 为预定义模板 $(x, y)$ 处像素值; $r_t(x, y)$ 为第 $t$ 帧图像 $(x, y)$ 处像素值; $\bar{f}$ 为预定义模板的平均像素值; $\bar{r}_t$ 为被搜索区域的平均像素值; $m$ 与 $n$ 分别为搜索区域宽度和高度。归一化相关系数 $c(i, j)$ 取值最大的位置即为目标所在位置。

#### 3) 抱杆位移计算

本工程输电塔塔身为钢管混凝土结构,具有较大的刚度,而抱杆本身截面小、长细比超大,为柔性结构,因此以某高度处输电塔塔身为参考,将抱杆相对输电塔塔身的位移作为待测位移,提出了一种在相机位置可变条件下抱杆相对位移的计算机视觉测量方法。

图8(a)所示为基于计算机视觉的位移测量系统平面

图,点1、2、3、4分别为施工阶段输电塔顶部截面的4个角点,点5为抱杆截面待测点。这5个点位于同一水平面上,平臂末端的监控摄像头可将所有目标点拍摄在内。

图8(b)为监控摄像头所拍摄的视频画面示意图,各点像素位移为 $(u_i, v_i)$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ),假设点1、2、3、4实际位移已知(假设0位移),则所构成的平面在点5位置处的像素位移可表示为4个角点位移的插值:

$$\begin{cases} u_0 = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \\ v_0 = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4 \end{cases} \quad (3)$$

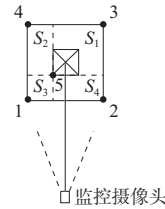
$$N_i = \frac{S_i}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中: $N_i$ 为点 $i$ 的位移插值函数; $S_i$ 为图8(a)中点5所分割的各区域面积。

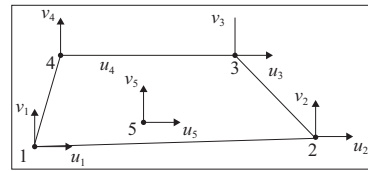
再利用下式即可计算抱杆塔身处点5相对于输电塔的水平与竖向位移:

$$\begin{cases} \Delta x = S_x \times (u_5 - u_0) \\ \Delta y = S_y \times (v_5 - v_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta x$ 与 $\Delta y$ 分别为点5相对于铁塔的实际水平、竖向位移; $S_x$ 与 $S_y$ 分别为点5处水平、竖向比例系数。



(a) 计算机视觉测量系统示意图(俯视)



(b) 视频图像示意图

图8 基于计算机视觉的抱杆位移测量原理

### 3.3 抱杆位移监测结果分析

图9给出了一次吊装提升过程中的吊重、变幅幅度、力矩和力矩差随时间的动态变化数据。在图9(a)中,随着构件安装到铁塔上,吊钩质量逐级减小;由图9(b)可见,提升过程中平臂变幅幅度逐渐减小,因为随着高度增加输电塔截面尺寸不断减小,载重小车逐渐向平臂内侧移动;由图9(a)-图9(c)可见,提升过程中力矩不断减小。平臂力矩的减小可由两方面原因引起,一是力臂的减小即载重小车向内移动,如 $t=137$ s时刻B钩水平变幅幅度从9.59m减小至5.88m,导致B钩力矩从 $116\text{t}\cdot\text{m}$ 减小至 $69.2\text{t}\cdot\text{m}$ ;二是吊重的减小即重物的卸载,例如A钩重物分别在时间 $t=547$ s、 $753$ s、 $916$ s分3次卸载,相应地A钩力矩也在相同时刻分3次减小;由图9(d)可见,此次记录过程中A、B两钩力矩差保持在6%以内,平臂两侧平衡吊装可以较好地保证抱杆整体受力均匀,减小倾覆风险。

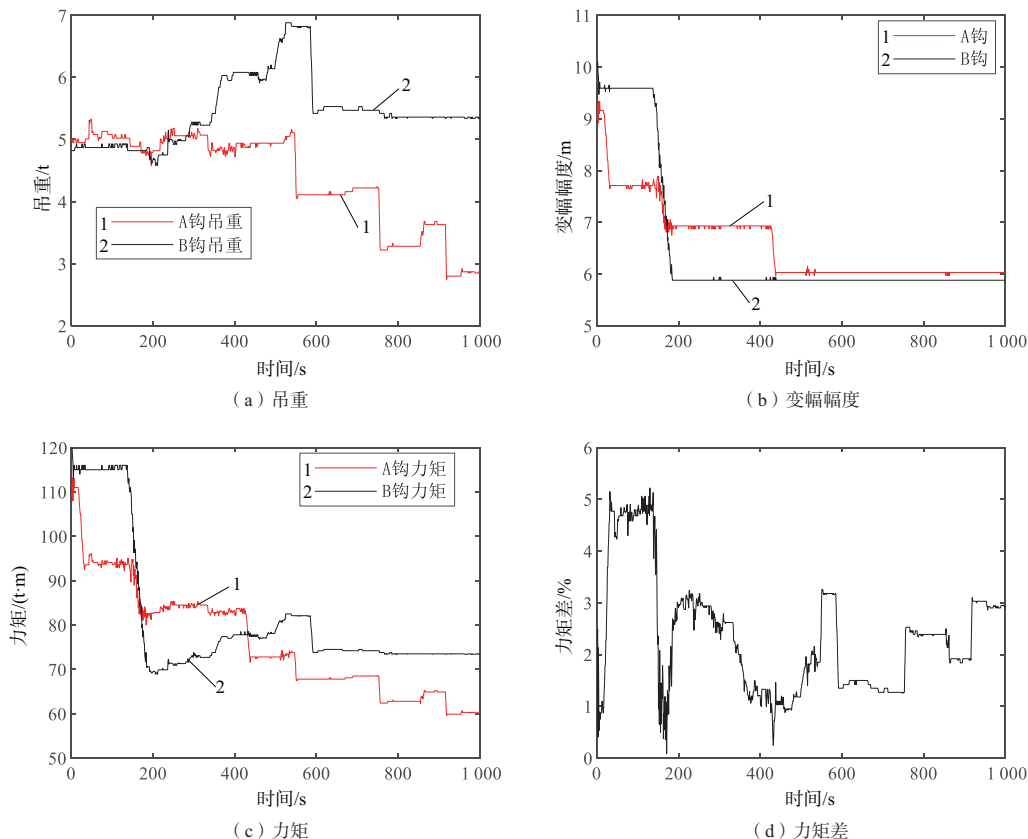


图9 吊装提升过程中的吊重、力矩等动态数据

如图10所示,某吊装提升过程A钩吊重5.02t,B钩吊重4.93t,平臂相对抱杆中心完成了一次逆时针回转。图11给出了由计算机视觉位移测量系统获得的抱杆位移时程曲线,包含此回转过程。在 $t=50\text{s}$ 时平臂回转,导致抱杆塔身相对铁塔发生了最大约27mm的水平位移。在回转动作停止后,抱杆相对铁塔并未完全静止,而是继续以大约14s的周期、8mm的振幅来回摇摆,直至振幅逐渐衰减。

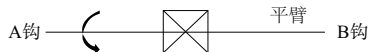


图10 平臂回转示意图

可见本文提出的利用有限元与计算机视觉技术有机融合的施工新技术,不但确保了大吨位抱杆提升、回转等工作工况标准动作的规范安全完成,也为大风环境非工作工况施工现场铁塔-抱杆耦合系统的安全评估和防风措施提供了可靠依据,实现了高塔组立全过程安全施工。2022年1月12日,高385m的世界最高输电铁塔顺利封顶。

## 4 结语

本文以江苏凤城-梅里500kV线路长江大跨越工程385m高输电塔的施工为背景,提出了基于有限元与现场实测的超高杆塔组立施工安全监控方法,为高塔组立施工安全与预警提供了可靠有效的方法和技术支撑。

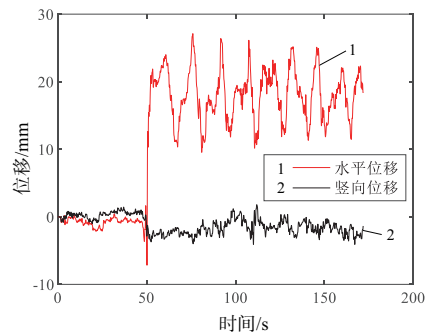


图11 平臂回转过程抱杆相对铁塔位移时程

## 参考文献:

- [1] 黄铭枫,魏歆蕊,叶何凯,等.大跨越钢管塔双平臂抱杆的风致响应[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(7):1351-1360.
- [2] 刘遥.汉江大跨越输电塔动态安全评估方法研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- [3] 汪江,杜晓峰,田万军,等.500kV大跨越输电塔振动在线监测与模态分析系统[J].电网技术,2010,34(10):180-184.
- [4] 陈志辉.±500kV同塔双回直流线路铁塔组立工艺[J].电力建设,2012,33(1):105-108.
- [5] 利小兵,张耀,宋洋,等.超高压输电线路大跨越利用座地双平臂抱杆组立钢管高塔施工技术[J].广东电力,2011,24(6):42-46.
- [6] 高正平,黄土君,黄风华,等.超高跨越输电铁塔高空构件吊装施工安全风速[J].南京工业大学学报(自然科学版),2019,41(2):206-211.

收稿日期:2022-05-16