

# 架空配电线路电杆抗倾覆能力仿真建模与分析

李丰君<sup>1</sup>, 姚福星<sup>2</sup>, 孙 芊<sup>1</sup>, 吴 豫<sup>3</sup>, 苗世洪<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450052)

**摘 要:** 架空配电线路电杆使用数量大、分布范围广, 在极端天气条件下易发生倾覆, 对局部区域甚至整条配电线路的供电产生威胁。如何借助科学有效的方法对电杆的抗倾覆能力进行仿真建模与分析, 现已成为配电网建设与改造过程中的关键技术问题。针对该问题, 以 10 kV 钢筋混凝土电杆为例, 首先, 结合气象条件对其荷载及内力情况进行计算; 其次, 基于 FLAC3D 软件, 提出一种架空配电线路电杆抗倾覆能力仿真建模与分析方法; 最后, 结合河南某地区土体参数开展算例分析, 详细分析极端天气条件下地基基础的变形破坏过程并绘制荷载一位移曲线, 可为架空配电线路电杆的安装和加固提供技术支撑。

**关 键 词:** 架空配电线路电杆; 抗倾覆能力; 仿真建模; FLAC3D

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.008 中图分类号: TM754 文章编号: 1673-9140(2023)02-0067-08

## Simulation modeling and analysis of anti-overturning ability of overhead distribution poles

LI Fengjun<sup>1</sup>, YAO Fuxing<sup>2</sup>, SUN Qian<sup>1</sup>, WU Yu<sup>3</sup>, MIAO Shihong<sup>2</sup>

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Overhead distribution poles are widely distributed with large quantity. However, the poles are prone to overturning under extreme weather conditions, which threaten the power supply of local areas or even the entire distribution line. How to apply scientific and effective methods to simulate and analyze the anti-overturning ability of poles has now become a key technical issue in the construction and transformation of distribution networks. To address the problem, this paper takes 10 kV reinforced concrete poles as an example, the load and internal force considering meteorological conditions are calculated first. Then, based on the FLAC3D software, a simulation modeling and analysis method for the anti-overturning ability of distribution poles is proposed. Finally, a calculation analysis of example is carried out in combination with soil parameters in a certain area of Henan. The deformation damage process of the foundation under extreme weather conditions is analyzed in detail and the load-displacement curve is drawn. The contribution of this research can provide technical support for the installation and reinforcement of distribution poles.

**Key words:** overhead distribution poles; anti-overturning ability; simulation modelling; FLAC3D

近年来,随着生态破坏、全球变暖形势的日益严峻,大风、短时强降水、覆冰等恶劣或极端天气时有发生,对配电网尤其是城乡配电网的安全运行产生了极大威胁<sup>[1-2]</sup>。在众多配电设备中,架空配电线

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目(SGHADK00PJJS2100232)

通信作者: 苗世洪(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统保护与控制等研究; E-mail: shmiao@hust.edu.cn

路电杆占有举足轻重的地位。这是因为一方面,电杆使用数量大,分布范围广;另一方面,一旦电杆发生倾覆,会通过导线传递拉力致使附近相连的其他电杆出现串倒,对局部区域甚至整条配电线路的供电产生威胁,给居民正常的生产生活造成巨大影响<sup>[3]</sup>。因此,在配电走廊的规划设计过程当中,选取科学有效的方法对电杆的抗倾覆能力进行仿真建模与分析,对于实现架空配电线路的安全运行、提升极端天气下配电网的风险防控能力以及保障国民生产生活的正常需要均具有十分重要的意义。

目前,已有较多文献针对电杆的受力情况及抗倾覆能力进行研究,为电网的建设与改造提供了重要依据。文献[4]建立了电杆力学简化模型,对电杆的抗倾覆能力进行理论计算,并分析了电杆的易损部位;文献[5]计算了不同工况下10 kV钢筋混凝土电杆的受力情况,并对其计算过程进行了详细探讨;文献[6]对电杆倾覆基础计算过程中的假设和近似取值进行了详细分析,并提出了部分修正方案;文献[7]分析了底盘对电杆倾覆稳定的作用,并给出了详细的抗倾覆校核计算过程。以上研究详细计算了电杆的抗倾覆能力,但大多采用经验值或近似值对求解过程中的非线性问题进行处理,对于指导工程建设尚存在一定的误差。因此,有必要研究分析抗倾覆过程中电杆及地基基础的应力、位移等场变量,从而为架空配电线路电杆的安装和设计提供有力支撑。

部分研究人员或电杆埋设单位采用模型试验、真型试验等方法对电杆的抗倾覆能力进行分析,准确指导现场施工。文献[8]对软土地基中埋入电杆的抗倾覆承载力进行了模型试验分析,结果表明,当荷载较小时,基础发生平动和转动,且随着水平荷载的增大,基础以发生转动为主,直至基础周围土体发生剪切破坏;文献[9]通过模型试验对电杆基础倾覆过程进行了分析,得到了基础侧向土压力的分布规律;文献[10]借助真型试验研究了电杆在安装工况和大风工况下的静力受力性能,为抢修计算提供了参考;文献[11]基于原型试验对地震过程中电杆的加速度、位移、应力响应进行了详细分析,有效揭示了电杆的抗震性能。上述研究能够真实反映电杆及地基基础在外荷载作用下的变形过程,便于总结和发现规律,但试验成本较高、耗时较长,试验条件不易控制。

相比之下,数值模拟方法具有成本低、耗时短、可重复性强以及可直接观测岩土体变形破坏过程等优点,在架空配电线路电杆抗倾覆能力分析方面具有广阔的应用前景。文献[3]建立了电杆的ABAQUS数值仿真模型,分析了埋深、底盘结构、土体类型对电杆倾斜率的影响;文献[9]将模型试验结果与数值仿真结果进行对比分析,验证了仿真模型的有效性;文献[12]基于ABAQUS软件建立了输电杆塔—地基土体仿真模型,并对其稳定性问题展开了较为系统的研究;文献[13]采用有限元程序模拟掏挖基础的抗倾覆性能,提出了杆塔基础稳定性改进措施;文献[14]应用FLAC3D软件对复合型杆塔基础进行数值模拟,结果表明,可通过增大立柱直径或基础埋深来提高基础的抗倾覆能力。以上关于数值模拟技术的研究大多集中在输电网层面,对于配电线路的实际运行情况考虑较少,有关架空配电线路电杆抗倾覆能力仿真建模与分析方法的研究尚存在一定空白。

FLAC3D是由美国ITASCA公司开发的一种岩土类仿真计算软件,它采用显式拉格朗日算法和混合—离散分区技术,能够准确模拟土体、岩石等材料的塑性破坏和流动方式,近年来被广泛应用于矿井、隧道、建筑地基等场景的数值模拟和仿真分析中,发挥了显著的工程指导作用<sup>[15-16]</sup>。本文以10 kV钢筋混凝土电杆为例,首先,结合运行环境对其荷载及内力情况进行计算;其次,基于FLAC3D 3.0有限差分软件,提出一种架空配电线路电杆抗倾覆能力仿真建模与分析方法,建立电杆及周围土体相互作用的抗倾覆数值仿真模型;最后,结合河南某地区土体参数开展算例分析,详细分析地基基础位移场、应力场及塑性区的分布状况,并结合其变形破坏过程绘制荷载—位移曲线,从而为架空配电线路电杆的安装和加固提供技术支撑。

## 1 架空配电线路电杆荷载及内力分析

架空配电线路主要面向大型工业企业或民用建筑群,一般采用三级电压,即首先由区域变电所将110 kV(或35 kV)电压降为10 kV,再由地方变电所将电压降至0.38 kV/0.22 kV向用电设备供电。

因此,10 kV 架空配电线路具有一定的代表性。

本文以10 kV 直线环形钢筋混凝土电杆为例进行抗倾覆能力分析,其尺寸如图1(a)所示。钢筋混凝土电杆埋入土中较浅,且出露段较长,计算时可视为一端嵌固的悬臂梁。若其承受的水平荷载过大,会对嵌固点产生较大的弯矩,致使地基土体发生剪切破坏。因此,针对电杆抗倾覆能力计算的研究,只需考虑最不利的水平受力状态,即大风工况下电杆所受荷载的情况<sup>[3]</sup>。如图1(b)所示,当风向与导线垂直时,电杆所受水平荷载最大,主要包括导线风荷载、绝缘子串风荷载及杆身风荷载3类。由于风向与导线垂直时横担承受风压的投影面很小,故本文对其近似作忽略处理。

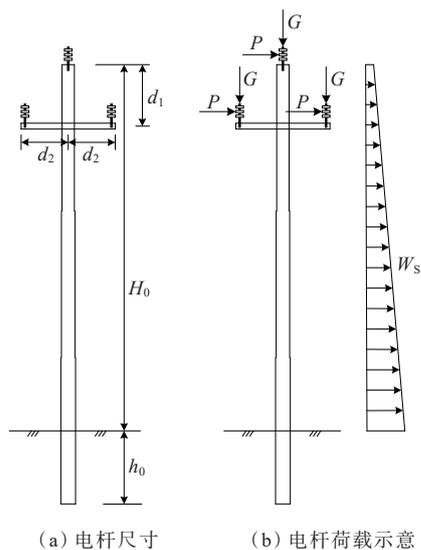


图1 电杆尺寸及所受荷载示意

Figure 1 Schematic diagram of pole size and load

1) 导线风荷载  $P_L$  计算。

$$P_L = \gamma_4 A L_P \quad (1)$$

$$\gamma_4 = \alpha_t \mu_{sc} d \frac{W_0}{A} \quad (2)$$

$$W_0 = 0.625 v^2 \quad (3)$$

式(1)~(3)中,  $\gamma_4$  为导线无冰风压比载,  $N/(m \cdot mm^2)$ ;  $A$  为导线截面积,  $mm^2$ ;  $L_P$  为导线水平档距,  $m$ ;  $\alpha_t$  为风荷载档距系数,与设计风速有关<sup>[17]</sup>;  $\mu_{sc}$  为风载体型系数,线径小于17 mm时取为1.2,否则取为1.1;  $d$  为导线外径,  $m$ ;  $W_0$  为基准风压标准值,  $N/m^2$ ,  $v$  为风速,  $m/s$ 。

2) 绝缘子串风荷载  $P_J$  计算。

$$P_J = (n + 1) \mu_z A_J W_0 \quad (4)$$

式中,  $n$  为每串绝缘子的片数;  $\mu_z$  为风压高度变化系数,其取值与地面粗糙度类别及离地面或海平面的距离有关<sup>[17]</sup>;  $A_J$  为每片的受风面积,单裙取  $0.03 m^2$ ,双裙取  $0.04 m^2$ 。

3) 杆身风荷载  $W_s$  计算。

$$W_s = \mu_s \mu_z \beta_z A_t W_0 \quad (5)$$

式中,  $\mu_s$  为构件体型系数,环形截面的钢筋混凝土杆取值为0.7;  $\beta_z$  为风荷载调整系数,其取值与杆塔高度有关<sup>[17]</sup>;  $A_t$  为构件承受风压的投影面积,  $m^2$ 。

4) 电杆内力  $M_x$  计算。正常运行时由外力作用在电杆任意截面  $x$  处的弯矩值为

$$M_x = 1.15 \gamma_0 \gamma_Q \varphi (\sum P h q_x h_x Z) \quad (6)$$

式中,  $\gamma_0$  为结构重要性系数,可取1.0;  $\gamma_Q$  为可变荷载分项系数,宜取1.4;  $\varphi$  为可变荷载组合系数,运行工况宜取1.0;  $\sum P h$  为所有横向水平风荷载对  $x$  截面处的弯矩,  $N \cdot m$  ( $P$  为电杆所受的荷载,  $N$ ;  $h$  为荷载所对应的矩,  $m$ );  $q_x$  为截面  $x$  以上杆身单位长度风荷载,  $N/m$ ;  $h_x$  为杆顶至任意截面  $x$  处的垂直距离,  $m$ ;  $Z$  为  $x$  截面以上风压合力作用点至  $x$  截面处的力臂,  $m$ 。

需要特别说明的是,架空配电线路采用锥形电杆,其风压投影面为梯形,只需将式(5)中的  $A_t$  替换为  $(D_0 + D_x)/2$  即可得到  $q_x$ ,其中  $D_0$  为电杆顶径,  $D_x$  为任意截面  $x$  处电杆的杆径,二者单位均为  $m$ 。合力作用点力臂  $Z$  可按照梯形重心高度进行计算:

$$Z = \frac{2D_0 D_x}{D_0 + D_x} \cdot \frac{h_x}{3} \quad (7)$$

## 2 架空配电线路电杆抗倾覆能力仿真建模

多数岩土工程问题最终都可转化为给定边界条件下的偏微分方程求解问题。然而,由于地基岩土体类型多样,且其在外力作用下的应变过程具有高度非线性特征,很难直接通过数学方法求得方程的解析解。而数值仿真方法可将偏微分方程在研究域内进行离散,转换成由多个网格点场变量构成的代数方程组进行求解,从而简单快速地获得各节点场变量分布的近似解,具有成本低、耗时短、可重复性强等优点<sup>[18]</sup>。基于此,本文借助目前国内外通用的FLAC3D 3.0有限差分软件,提出一种电杆抗

倾覆能力仿真建模方法,具体流程如图2所示。

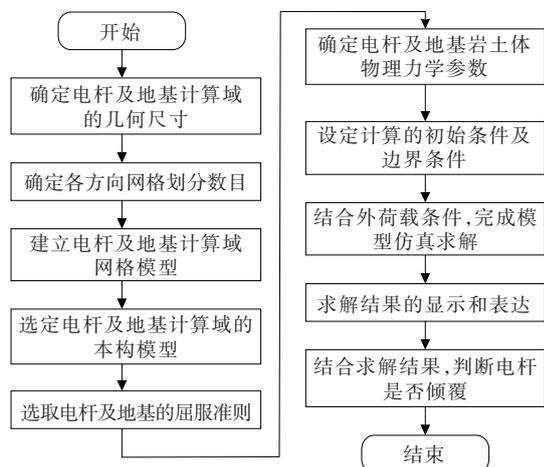


图2 架空配电线路电杆抗倾覆能力仿真建模流程

Figure 2 Flowchart of simulation modeling for anti-overturning ability of overhead distribution line poles

## 2.1 地基计算域几何尺寸的确定

电杆模型的几何尺寸可直接根据其出厂参数确定,而地基计算域模型的几何尺寸则需要计算确定。考虑到架空配电线路电杆大多直接埋入地下,其地基可视为半无限体,在数值仿真时,只能近似采用有限的地基计算域模拟半无限体。为减小由近似模拟引起的计算误差,依据弹塑性力学中的圣维南原理,地基计算域的几何尺寸不应小于基础三维几何尺寸中最大尺寸的3~5倍<sup>[19]</sup>。参考电杆的埋深及底径,可采用边长较大的立方体(需满足圣维南原理)近似代替电杆地基基础计算域。

## 2.2 电杆及地基计算域本构模型的选择

本构模型,又称为本构方程,是一组描述材料应力—应变—强度—时间关系的数学表达式。目前已建立的本构模型主要可分为线弹性、超弹性、次弹性、理想弹塑性以及粘弹塑性模型等。电杆及地基岩土体在外荷载作用下的本构模型一般需要通过力学试验确定,但有一定规律可循。

1) 地基岩土体本构模型的选取。由于电杆埋深相对较浅,地基岩土体在承受荷载的过程中处于低围压状态,其本构模型可作近似线性处理,基本符合理想弹塑性模型。

2) 电杆本构模型的选取。一般情况下,钢筋混凝土电杆的抗拉、抗压和抗剪强度都远大于周围岩土体。在外荷载的作用下,即使周围岩土体发生破坏,电杆仍然处于弹性状态。因此,选取线弹性模

型作为电杆的本构模型。

3) 地基与电杆接触面本构模型的选取。由于地基与电杆接触面在荷载作用下的力学响应涉及复杂的非线性、大变形、局部不连续等问题,因此其研究具有极大的难度。近年来,国内外学者对此开展了许多卓有成效的研究工作,提出了诸如厚度薄层单元的刚塑性模型、有厚度的双曲线模型、无厚度的四节点刚塑性模型等众多本构模型<sup>[20]</sup>,但在模型的选取方面尚未形成一套通用的准则。目前,相关单位大多通过试验获取接触面的应力—应变关系,而后据此建立相应的本构模型,并在工程中进行应用和验证。为便于仿真分析,本文选取无厚度的刚塑性模型作为地基与电杆接触面的本构模型,虽然该模型为避免受压情况下两侧材料发生重叠,会设置较大的法向刚度,从而带来一定的误差,但胜在模型简单、概念清楚、易于理解和分析<sup>[21]</sup>。

## 2.3 电杆及地基计算域屈服准则的选择

屈服准则是指物体内部某一点开始产生塑性应变所必需满足的条件,可用于判断材料是否进入塑性状态。相同荷载条件下不同材料的屈服准则是不同的,因此需要根据试验结果或工程经验妥善选取。

1) 地基岩土体屈服准则的选取。目前,国内外通用的岩土体屈服准则主要包括 Drucker-Prager、Mohr-Coulomb 以及 Zienkiewicz-Pande 屈服准则 3 种。其中, Mohr-Coulomb 屈服准则形式简单、参数易测,并且能够准确反映土体抗压强度不同的 S-D 效应及其对静水压力的敏感性,近年来被广泛应用于地基土体变形破坏过程的数值仿真<sup>[13]</sup>。本文也选用其作为地基岩土体的屈服准则。

2) 电杆屈服准则的选取。由于电杆在外荷载作用下一直处于弹性状态,不会发生屈服,因此,在数值仿真过程中无需设置其屈服准则。

3) 地基与电杆接触面屈服准则的选取。地基与电杆接触面的屈服准则也满足 Mohr-Coulomb 屈服准则。

## 3 算例分析

本文以河南某地区 10 kV 直线环形钢筋混凝土电杆为例开展算例分析。电杆高为 15 m,顶径为 190 mm,底径为 390 mm,埋深为 2.5 m,水平档距为

60 m,垂直档距为 65 m。采用 LGJ-10 1×185 型钢芯铝绞线,导线外径为 18.90 mm,单位长度质量为 732.6 kg/km。绝缘子串型号为 FXBW-10/70,片数为 1,质量为 1 kg。该地区属于 V 类典型气象区,大风工况及暴风雨工况下的风速取为 30 m/s。

结合图 2 所示流程,本文分别建立大风工况及暴风雨工况下的电杆抗倾覆能力仿真分析模型。首先,根据电杆周围环境参数,计算导线风荷载  $P_1$ 、绝缘子串风荷载  $P_2$  和地面处单位长度杆身风荷载  $W_s$ ,并进一步得出电杆与地面接触处所承受的弯矩  $M_G$ ,求得杆顶等效作用力  $F_0$ ,计算结果如表 1 所示;其次,基于 FLAC3D 3.0 有限差分软件,建立电杆及周围土体相互作用的抗倾覆数值网格模型,并结合表 2、3 分别设定 2 种工况下电杆、地基基础及二者接触面的物理力学参数;最后,根据电杆杆顶等效作用力,设定电杆承受沿 X 轴正方向的外荷载,完成模型的仿真求解。

表 1 电杆荷载及内力计算结果

**Table 1** Calculation results of pole load and internal force

$P_1/N$	$P_2/N$	$W_s/N$	$M_G/(N \cdot m)$	$F_0/N$
596.413	51.300	107.625	54 010.638	4 320.851

表 2 大风工况下的材料物理学参数

**Table 2** Physical parameters of material under strong wind conditions

地基岩土体						
容重/ ( $N/m^3$ )	弹性模 量/Pa	泊松比	粘聚力/ Pa	摩擦角/ ( $^\circ$ )	抗拉强 度/Pa	剪胀角/ ( $^\circ$ )
1 948	$2 \times 10^7$	0.35	$2 \times 10^4$	25	$1 \times 10^5$	5
电杆			地基与电杆接触面			
容重/ ( $N/m^3$ )	弹性模 量/Pa	泊松比	切向刚度/ ( $N \cdot m$ )	法向刚度/ ( $N \cdot m$ )	摩擦 角/( $^\circ$ )	粘聚力/ Pa
2 651	$3 \times 10^{10}$	0.2	$1 \times 10^8$	$2.1 \times 10^9$	26	$1.5 \times 10^5$

表 3 暴风雨工况下的材料物理学参数

**Table 3** Physical parameters of material under storm conditions

地基岩土体						
容重/( $N/m^3$ )	弹性模 量/Pa	泊松比	粘聚力/ Pa	摩擦角/ ( $^\circ$ )	抗拉强 度/Pa	剪胀角/ ( $^\circ$ )
1 734	$2 \times 10^6$	0.30	$1 \times 10^4$	23	$5 \times 10^4$	5
电杆			地基与电杆接触面			
容重/ ( $N/m^3$ )	弹性模 量/Pa	泊松比	切向刚度/ ( $N \cdot m$ )	法向刚度/ ( $N \cdot m$ )	摩擦角/ ( $^\circ$ )	粘聚力/ Pa
2 651	$3 \times 10^{10}$	0.2	$6 \times 10^7$	$1.6 \times 10^9$	24	$1.0 \times 10^5$

### 3.1 大风工况下电杆抗倾覆能力仿真分析

为详细探究大风工况下架空配电线路电杆的抗倾覆能力,本文从应力、位移、弹塑性状态 3 个角度分别对模型仿真结果进行分析。

大风工况下模型求解得到的电杆及地基基础 Z 方向的应力云如图 3 所示,可知从上到下电杆内部的应力不断增大,这是由于在电杆的出露段,越靠近地面,电杆承受风压的投影面就越大,电杆所受的弯矩就越大,相应地,电杆内部的应力也越大。因此,单根直线电杆适宜采用锥形杆柱,根部的配筋量也较大。此外,还可以看出,靠近电杆根部的地基基础土体应力较大,呈环状分布,并没有明显的方向性。这是因为地基基础土体仍处于弹性状态,没有发生明显的变形和破坏,由电杆根部附近的环状土体共同对抗由电杆基础传递而来的压应力和剪应力,保障电杆的稳定,并将应力的作用结果以环形传递给周围离电杆较远的土体。

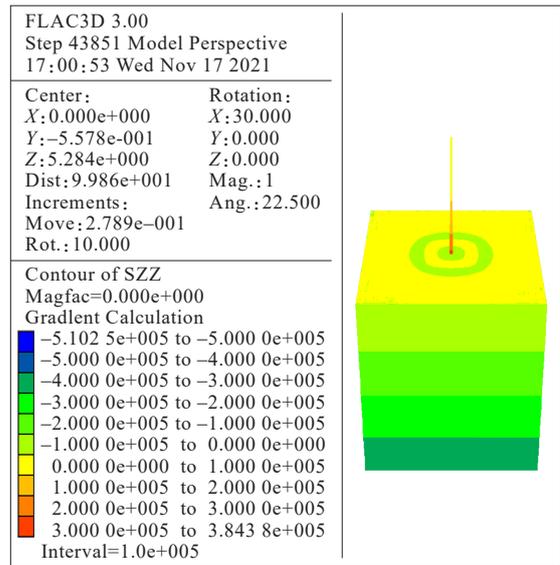


图 3 大风工况电杆及地基基础 Z 方向的应力云

Figure 3 Stress cloud diagram of pole and foundation in Z direction under strong wind condition

大风工况下模型求解得到的地基基础 X 方向的位移云如图 4 所示,可知地基基础土体的位移变化范围均在  $1.35 \times 10^{-2}$  m 以内,这再次表明,地基基础土体仍处于弹性应变范围内,并未发生明显的变形和破坏;为印证该结论,输出当前处于塑性状态的地基基础土体单元,如图 5 所示,可知所有地基基础土体单元均处于弹性状态,并未发生塑性变形。

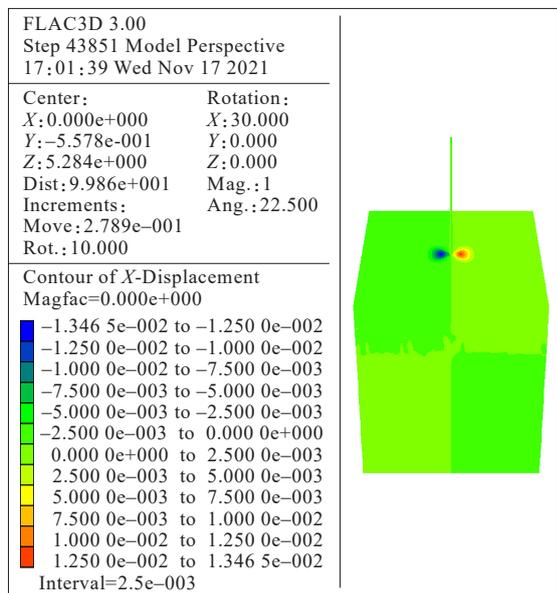


图4 大风工况地基基础X方向的位移云

Figure 4 Displacement cloud diagram of foundation in X direction under strong wind condition

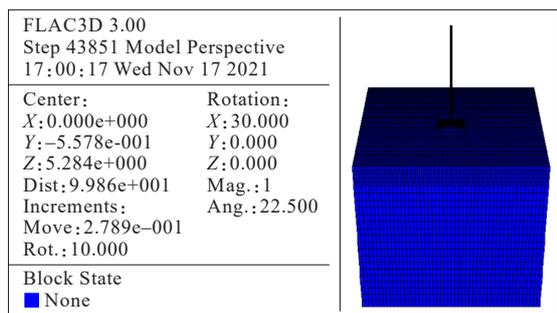


图5 大风工况处于塑性状态的地基基础单元

Figure 5 Diagram of foundation element in plastic state under strong wind condition

综合图3~5可得出结论:在风速为30 m/s的大风工况下,10 kV直线环形钢筋混凝土电杆能够保持稳定,不会发生倾覆。

### 3.2 暴风雨工况下电杆抗倾覆能力仿真分析

类似地,为详细探究暴风雨工况下架空配电线路电杆的抗倾覆能力,本文同样从应力、位移、弹塑性状态3个角度对模型仿真结果进行分析。

暴风雨工况下模型求解得到的电杆及地基基础Z方向的应力云如图6所示,可知地基基础土体的应力依然呈环状分布,但相比于图3,圆环的半径明显增大。这是因为在暴风雨工况下,地基基础土体的含水率显著增加,致使其抗倾覆能力有所下降,因此,需要更广范围的土体共同对抗由电杆基础传导而来的压应力和剪应力。此外,仔细观察图中圆环的边缘,可以发现其并不光滑,而是存在较

多的波动,这表明并不是所有的地基基础土体都处于弹性状态,而是有部分单元发生了较大的塑性变形,致使应力分布的圆环不再光滑。

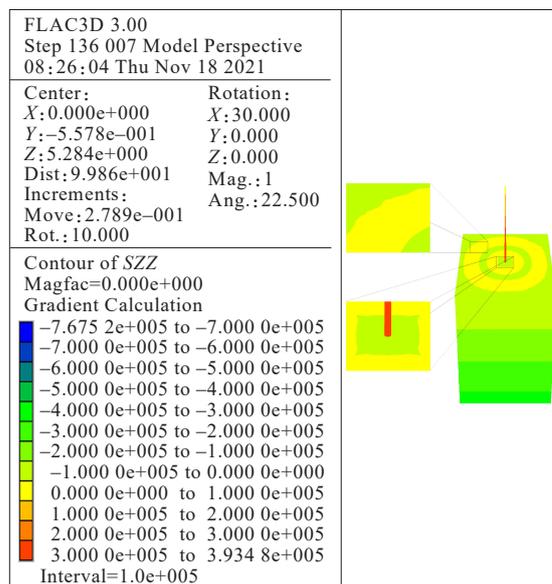


图6 暴风雨工况电杆及地基基础Z方向的应力云

Figure 6 Stress cloud diagram of pole and foundation in Z direction under storm condition

暴风雨工况下模型求解得到的地基基础X方向的位移云如图7所示,可知地基基础土体的位移变化范围在0.117 m以内,相比于图4明显增大,这表明某些地基基础土体单元处于塑性状态,已经发生了明显的变形。同样,为印证该结论,输出当前处于塑性状态的地基基础土体单元,如图8所示,可以直接看出,部分地基基础土体单元已发生塑性变形。

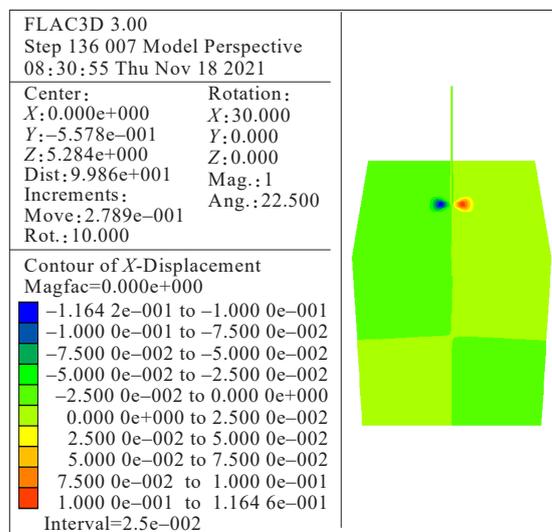


图7 暴风雨工况地基基础X方向的位移云

Figure 7 Displacement cloud diagram of foundation in X direction under storm condition

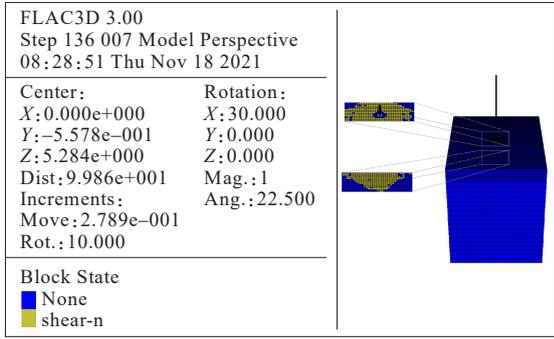


图 8 暴风雨工况处于塑性状态的地基基础单元

Figure 8 Diagram of foundation element in plastic state under storm condition

综合图 6~8 可得出结论:在风速为 30 m/s 且伴随暴雨的工况下,10 kV 直线环形钢筋混凝土电杆存在倾覆风险。

### 3.3 不同工况下的荷载—位移曲线分析

荷载—位移曲线是描述地基基础变形破坏特征最直观的表现形式,也是工程设计的重要依据。为详细探究地基土体形变量随外界气象条件的变化过程,本文分别取风速为 10、20、30 和 40 m/s,对靠近电杆根部 X 轴负方向的某地基基础节点进行监测,绘制大风工况及暴风雨工况同等土质条件下的荷载—位移曲线,如图 9、10 所示。其中,监测节点的 X 坐标初始值为 -6.746 mm。

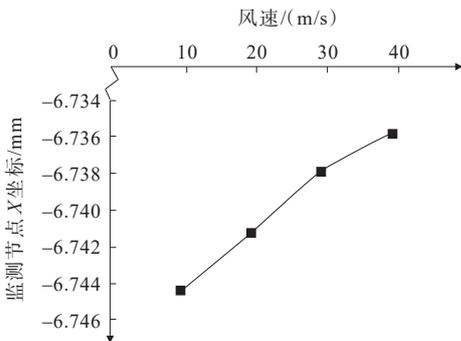


图 9 大风工况同等土质条件下的荷载—位移曲线

Figure 9 Load-displacement curve diagram under identical soil scene of strong wind condition

由图 9、10 可知,在同等土质条件下,随着风速不断提高,所监测的节点不断向零点逼近。这是因为风速越高,电杆所承受的荷载就越大,地基基础土体的形变量也随之相应增大,原本位于 X 轴负方向的监测节点受拉应力的影响,逐渐向正方向延伸,致使其不断向零点靠近。此外,对比两图还可

以看出,图 10 中监测节点的位置坐标相较于图 9 有明显增大,这主要是因为暴风雨工况下,受含水率的影响土体参数发生了较大变化,抗倾覆能力显著下降。因此,在同等荷载条件下,监测节点的形变量有明显增大,位置变化也有所增加。

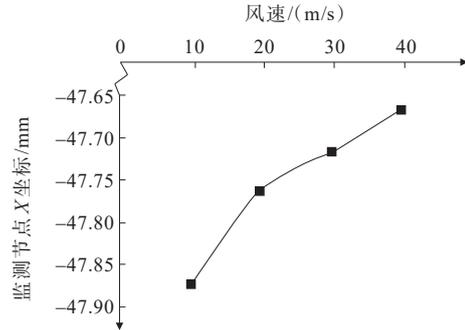


图 10 暴风雨工况同等土质条件下的荷载—位移曲线

Figure 10 Load-displacement curve diagram under identical same soil scene of storm condition

## 4 结语

本文面向配电网建设与改造过程中架空配电线路电杆的抗倾覆能力评估需求,以 10 kV 钢筋混凝土电杆为例,首先,结合其运行环境与实际尺寸,对电杆的荷载及内力情况进行计算;其次,基于 FLAC3D 软件,提出了一种电杆抗倾覆能力仿真建模与分析方法,建立了电杆及周围土体相互作用的抗倾覆仿真模型;最后,结合河南某地区土体参数开展算例分析,深入分析了极端天气条件下地基基础的变形破坏过程并获得了荷载—位移曲线,对于指导电杆的安装与加固具有重要意义。而如下两方面仍有继续改进的空间:

- 1) 加装卡盘可有效提升地基岩土体的极限抗倾覆能力,后续可对卡盘的影响进行分析;
- 2) 为保障模型准确性,后续可考虑结合现场试验结果来确定接触面的应力—应变关系。

### 参考文献:

[1] 邴悦伦,陆佳政,徐勋建,等.2016 年“超级寒潮”条件下湖南电网覆冰过程的分析[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):187-194.  
DI Yuelun, LU Jiazheng, XU Xunjian, et al. An analysis of icing process of Hunan power grid in the condition of 2016

- “Super Cold Wave”[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 187-194.
- [2] 吴刚, 王奇伟, 姜飞, 等. 覆冰线路断线导致电网连锁跳闸的状态建模[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(2): 43-50.  
WU Gang, WANG Qiwei, JIANG Fei, et al. Cascading trips state modeling caused by iced lines breakage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(2): 43-50.
- [3] 徐恒博, 孙芊, 戚建军, 等. 基于ABAQUS的混凝土电杆抗倾覆性能研究[J]. 科技和产业, 2021, 21(7): 301-305.  
XU Hengbo, SUN Qian, QI Jianjun, et al. Research on anti-overturning performance of concrete pole based on ABAQUS[J]. Science Technology and Industry, 2021, 21(7): 301-305.
- [4] 刘向峰, 张广亮, 李勇, 等. 钢筋混凝土电杆抗倾覆损伤部位简析[J]. 四川建材, 2010, 36(4): 53-54.  
LIU Xiangfeng, ZHANG Guangliang, LI Yong, et al. Reinforced concrete pole damaged parts of theoretical studies of anti-overturning[J]. Sichuan Building Materials, 2010, 36(4): 53-54.
- [5] 胡千里. 浅谈 10 kV 钢筋混凝土电杆的受力计算[J]. 低碳世界, 2020, 10(7): 59-60.  
HU Qianli. Elementary discussion on force calculation of 10 kV reinforced concrete pole[J]. Low Carbon World, 2020, 10(7): 59-60.
- [6] 于虹, 李昊, 康彪, 等. 采空塌陷区输电杆塔基础变形率限值研究[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 124-134.  
YU Hong, LI Hao, KANG Biao, et al. Study on the threshold for deformation rate of transmission tower foundation in goaf subsidence area[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 124-134.
- [7] 强培儒. 电杆基础倾覆稳定考虑底盘作用的计算[J]. 北京电力技术, 1978(3): 39-44.  
QIANG Peiru. Calculation of the overturning stability of the pole foundation considering the effect of the chassis[J]. Beijing Electric Power Technology, 1978(3): 39-44.
- [8] 施晓春. 水平荷载作用下桶形基础的性状[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.  
SHI Xiaochun. Behavior of bucket foundation under horizontal load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [9] 王梓源. 预制装配式塔桅结构基础抗倾覆性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.  
WANG Ziyuan. Study on anti-overturning property of prefabricated tower and guyed mast foundation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [10] 臧旭, 马宏忠, 吴金利, 等. 基于振动原理的 GIS 母线导电杆松动故障分析与诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 12-20.  
ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, et al. Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 12-20.
- [11] 盛金马, 张丹丹, 谢涛, 等. 110 kV 钻跨一体杆塔防反击措施研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 120-126.  
SHENG Jinma, ZHANG Dandan, XIE Tao, et al. Research on lightning protection measures on 110 kV drilling and spanning integrated tower[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 120-126.
- [12] 夏松如. 强风作用下输电杆塔—基础体系稳定性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
XIA Songru. Study on the stability of transmission tower-foundation system under strong wind load[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [13] 刘天新, 鲁先龙. 输电线路原状土基础抗倾覆特性数值模拟研究[J]. 电力建设, 2007, 28(2): 16-19.  
LIU Tianxin, LU Xianlong. Numerical simulation on anti-overturning characteristics of undisturbed soil foundation in transmission line[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(2): 16-19.
- [14] 袁清泉, 汤涛, 李政民, 等. 短桩与锚杆组合应用的复合型杆塔基础数值模拟分析[J]. 电力建设, 2012, 33(10): 34-37.  
YUAN Qingquan, TANG Tao, LI Zhengmin, et al. Numerical simulation of compound foundation with short pile and anchor[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(10): 34-37.
- [15] 柳军修, 尹振宇, 杨杰, 等. 结构性黏土边界面模型在 FLAC3D 中的开发及隧道施工数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1277-1286.  
LIU Junxiu, YIN Zhenyu, YANG Jie, et al. Implementation of a bounding surface model of structured clays in FLAC3D and numerical simulation of tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1277-1286.
- [16] 李胜林, 刘志远, 张会歌, 等. 基于 FLAC3D 对爆破振动下某土坝的安全振速预测[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1006-1011.  
LI Shenglin, LIU Zhiyuan, ZHANG Huige, et al. Prediction of safe blasting vibration velocity of an earth dam based on FLAC3D[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1006-1011.

- 障测距[J]. 电力工程技术,2021,40(2):114-120.
- HU Bingying, LI Mei. Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time difference of zero-mode and line-mode[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2):114-120.
- [11] 李舟, 乔文, 谈震, 等. 基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 33-42+51.
- LI Zhou, QIAO Wen, TAN Zhen, et al. Fault location method for hybrid lines based on traveling wave characteristic frequency in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5):33-42+51.
- [12] REDFERN M A, BO Z Q, FIANG F. Network protection based on fault generated transients[C]//Seventh International Conference on Development in Power System Protection, Amsterdam, Netherlands, 2001.
- [13] 陈海东, 蒙飞, 赵磊, 等. 利用分布式电源注入信号的配电网故障性质识别技术[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 123-129.
- CHEN Haidong, MENG Fei, ZHAO Lei, et al. Fault identification technology for distribution line based on distributed generation injection signal[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 123-129.
- [14] 李泽文, 曾祥君, 夏翔翔, 等. 高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(3):104-121.
- LI Zewen, ZENG Xiangjun, XIA Yixiang, et al. Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2022, 19(3): 104-121.
- [15] LIU L B, LUO M K, LAI L. Instantaneous frequency estimation based on the wigner-ville distribution associated with linear canonical transform(WDL)[J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 27(1):123-127.
- [16] SHARMA R R, PACHORI R B, et al. Improved eigenvalue decomposition-based approach for reducing cross-terms in wigner-ville distribution[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2018, 37(8):3330-3350.
- [17] 李卫彬, 童欣, 黄超, 等. 基于分层定位模型的含DG配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24):160-166.
- LI Weibin, TONG Xin, HUANG Chao, et al. A fault location method for a distribution network with DG based on a hierarchical location model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24):160-166.
- [18] 黄鸣宇, 祁升龙, 芦翔, 等. 基于轨迹去伪的输电线路故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7):85-90.
- HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. A novel trajectory purification based fault location method for transmission line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7):85-90.
- 
- (上接第74页 = Continued from page 74)
- [17] 陈祥和, 刘在国, 肖琦. 输电杆塔及基础设计(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2020:88-89.
- CHEN Xianghe, LIU Zaiguo, XIAO Qi. Power transmission tower and its foundation design(Third edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020:88-89.
- [18] 王维, 曾振炜, 王劫恣, 等. 输电杆塔无线供电系统非均匀多米诺单元性能分析与优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17):4315-4325.
- WANG Wei, ZENG Zhenwei, WANG Jiechen, et al. Performance analysis and optimization of non-uniform domino unit in wireless power supply system of transmission tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17):4315-4325.
- [19] 滕振超. 圣维南原理的有限元模拟[J]. 价值工程, 2018, 37(24):188-190.
- TENG Zhenchao. Finite element simulation of Saint-Venant's Principles[J]. Value Engineering, 2018, 37(24): 188-190.
- [20] 栗学梅, 刘岩磊, 牛红章. 地基—基础接触面研究综述[J]. 山西建筑, 2013, 39(3):59-60.
- LI Xuemei, LIU Yanlei, NIU Hongzhang. On survey of study on foundation-basement contact surface[J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(3):59-60.
- [21] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3):14-22.
- YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3):14-22.