

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.06.013

# 风力发电机的一致概率风-地震作用组合方法

席仁强,蒋学东,何云松,班书昊

(常州大学 机械工程学院,江苏 常州 210416)

**摘要:**针对高地震危险性区域的风电场,提出一致概率风-地震作用组合方法。采用 Weibull 分布描述轮毂高度处平均风速随机特征;通过地震危险性分析,确定地震动参数;假定风、地震为独立事件,建立二者联合概率模型。随后,以 NREL 5 MW 风力发电机为例,基于一致概率风-地震作用组合,分析结构动力响应。结果表明:风-强震激励下,地震动控制结构响应;风-弱震作用下,风-地震共同控制结构响应;一致概率风-地震作用下,结构动力响应特征与地震动特性有关。

**关键词:**风力发电机;地震危险性分析;一致概率风-地震组合;结构动力响应;输入地震动方向

**中图分类号:** TK 89

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-0411(2020)06-0083-08

## Uniform-Probability Wind-Seismic Load Combination Method of Wind Turbines

XI Renqiang,JIANG Xuedong,HE Yunsong,BAN Shuhao

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** A uniform-probability wind-seismic combination method is established for the wind farms in the high seismic-hazard region. Weibull distribution is selected to describe the stochastic behavior of the mean wind speed at hub-height in this study. Based on the seismic hazard analysis, probabilistic model of ground motion is established. Assuming that winds and seismic, are independent events, a joint probabilistic model of wind and seismic is set up. Taking the NREL 5 MW wind turbine for example, dynamic response is analyzed based on this wind-seismic combination model. The result shows that under the excitation of wind and strong seismic combination, dynamic response of wind turbines is dominated by seismic wave while it is regulated by wind and seismic jointly under excitation of wind and weak earthquake. The dynamic behavior of wind turbine is connected with the characteristics of seismic wave under the excitation of uniform-probability wind seismic combination.

**收稿日期:** 2020-08-01。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51808061)。

**作者简介:** 席仁强(1984—),男,河南三门峡人,硕士,讲师。E-mail: xirenqiang@cczu.edu.cn

**引用本文:** 席仁强,蒋学东,何云松,等. 风力发电机的一致概率风-地震组合方法[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(6): 83-90.

**Key words:** wind turbine; seismic hazard analysis; uniform-probability wind-seismic combination; dynamic response of structure; incident angles of earthquake waves

风能正逐渐成为可再生能源的重要组成部分,截至 2018 年底,中国风电累积装机容量已突破 2.1 亿 kW。随着风电场在高地震危险性区域的建设,风力发电机抗震受到关注。ZHAO 等<sup>[1]</sup>发现地震动( $m(\text{PGA})=0.056\text{ g}$ )显著增大塔底弯矩幅值。随后,相关研究<sup>[2-5]</sup>也表明地震荷载控制高地震危险性区域风力机支撑结构强度,因此,深入探讨风力发电机抗震是必要的。风力发电机属于高柔结构,对风、地震等侧向作用敏感。ASAREH 等<sup>[6]</sup>分析了 5 MW 风力发电机地震响应,发现额定风速-地震组合时,塔底弯矩幅值最大。PROWELL<sup>[7]</sup>通过室外振动台试验和数值模拟,探讨了 65 kW 风力发电机的地震响应,发现风-地震荷载组合引起的结构响应大于极端风荷载作用。上述研究基于确定性方法,将地震动与不同风速组合,分析了结构响应,但未考虑这些荷载组合发生概率的差异。

地震动和风速场具有显著的随机性,KIYOMIYA 等<sup>[8]</sup>通过 Weibull 分布描述平均风速和 PGA 的分布,建立风-地震联合概率分布函数,认为极端风-强震的发生概率低,可不考虑。MENSAH 等<sup>[9]</sup>依据风-地震联合概率分布函数选定风速和地震动参数,通过 TurbSim<sup>[10]</sup>生成湍流风速场,选取强震记录作为输入地震动,采用 FAST 软件进行地震反应分析,结果表明风荷载的影响小于地震。MARDFEKRI 等<sup>[11]</sup>对美国西海岸和墨西哥湾的海上风力发电机进行了风-地震-波浪多灾害风险分析,发现结构破坏概率超过 DNV 推荐的目标值。这些研究建立风-地震联合概率分布模型,如果给定结构目标可靠度,通过逆可靠性分析,可以确定风-地震荷载作用组合。然而,其结果与风力机型号、场地等条件有关,且计算量大,难以推广到工程设计。

基于风-地震联合概率,提出一致概率风-地震作用组合方法。针对典型场地,根据平均风速概率分布,确定不同发生概率的平均风速,通过地震危险性分析,获得地震动参数,从而选定风-地震作用组合。随后,以 NREL 5 MW 风力发电机为例,考虑两类场地,采用一致概率风-地震组合分析结构响应,并考虑输入地震动方向的随机性。

## 1 风-地震组合方法

### 1.1 一致概率风-地震组合

地震工程领域通过超越概率衡量设计地震动的概率水准<sup>[12]</sup>,因此,本文采用该参数表示风-地震作用组合发生的可能性。风、地震具有不同的物理机理,假定二者独立,风-地震组合的超越概率  $P$  可表示为

$$P = F_{\text{EX}}(U)F(E) \quad (1)$$

式中:  $F_{\text{EX}}(U)$  为风速  $U$  的超越概率;  $F(E)$  为地震动  $E$  的年超越概率。令超越概率  $P$  为常数,可获得一组风-地震组合,形成地震动-平均风速超越概率平面的一条曲线,如图 1 所示。超越概率  $P$  的取值根据结构重要性及社会经济政策确定。这一风-地震作用组合具有相同的超越概率,可称为一致概率风-地震组合,由此得出的支撑结构荷载效应设计值具有明确的概率意义,符合可靠度设计理念。

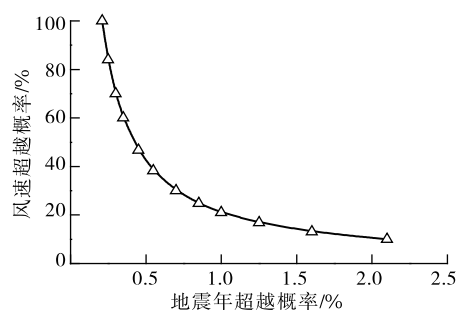


图 1 一致概率风-地震组合

Fig.1 Uniform-probability wind-seismic combination

## 1.2 风速场模型

统计表明:Weibull 分布能准确描述 10 min 平均风速的概率分布<sup>[13]</sup>。因此,为建立三维湍流风速场,风力机轮毂高度处平均风速采用 Weibull 分布,概率分布函数  $F(U)$  为

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式中:  $U$  为 10 min 平均风速;  $k, c$  为 Weibull 分布参数,采用下式确定<sup>[14]</sup>:

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^{-1.086} \quad (3)$$

$$\frac{c}{\bar{U}} = (0.568 + 0.433/k)^{-\frac{1}{k}} \quad (4)$$

式中,  $\bar{U}$  和  $\sigma_U$  分别为 10 min 平均风速均值和标准差。同时,根据 IEC 61400-1<sup>[15]</sup> 建议,脉动风速功率谱采用 Kaimal 谱,湍流强度为 B 类;风廓线采用幂函数,地面粗糙度指数  $\alpha$  取 1/7。

## 1.3 地震动模型

根据式(1),为保证风-地震作用组合具有相同概率,风速改变时,地震动应随之变化。为确定不同超越概率的地震动,需要根据地震地质条件和地震动衰减关系,通过地震危险性分析,获得场地地震危险性曲线。现代大型风力发电机结构自振周期较长,例如:NREL 5 MW 风力发电机前后向基准周期达 3.1 s,因此,所选地震动参数须反映长周期成分。

## 2 模型与参数

### 2.1 数值模型

美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)依据公开资料,开发了 5 MW 风力发电机,采用变速电机和变桨距控制技术,具体参数见文献[16]。FAST 是 NREL 开发的风力发电机动力分析软件,通过了 GL 的认证,在研究领域得到了广泛应用。ASAREH 等<sup>[6]</sup> 基于该软件,在塔底添加弹簧和阻尼器,实现了地震动输入。随后,PROWELL<sup>[7]</sup> 通过室外振动台试验证实了该方法的准确性。本研究旨在探讨一致概率风-地震作用组合方法,因此,暂不考虑地基土-基础结构动力相互作用。图 2 为计算模型,塔底弹簧刚度  $k = m(2\pi f)^2$ , 阻尼器黏滞阻尼系数  $c = 2m(2\pi f)\xi$ , 阻尼比  $\xi$  取 0.67, 频率  $f$  取 30 Hz, 系统质量  $m$  取 696 460 kg。为计算气动荷载,将塔架分为 20 个等长度单元,将叶片分为 17 个单元,从翼根至翼尖长度分别为:3 个 2.73 m, 11 个 4.1 m 和 3 个 2.73 m。

一致概率风-地震组合涉及不同概率的风速场和地震动,因此,需要详细的场地气象、地质和地震学资料。美国加利福尼亚州 Sandberg 气象站自 1933 年开始进行气象观测,具有完备的气象资料。同时,20 世纪 30 年代,加州建立了强震观测台网,有大量强震记录和详细的地震、地质资料。此外,加州具有丰富的风能资源可供开发。因此,选择美国加州 Sandberg 为研究场点。

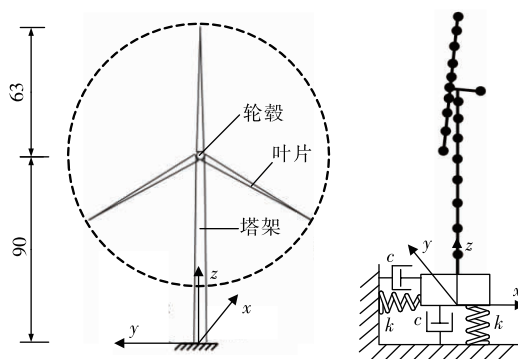


图 2 NREL 5 MW 风力发电机

Fig.2 NREL 5 MW baseline wind turbine

## 2.2 风速场参数

Sandberg 气象站地理坐标为  $34.741\ 093^{\circ}\text{N}$ ,  $118.709\ 534^{\circ}\text{W}$ 。根据 ARCHER 等<sup>[13]</sup> 的统计,2000 年,场点 80 m 高度处 10 min 平均风速的均值为 10.6 m/s,标准差为 6.3 m/s。由式(3),式(4)得平均风速 Weibull 分布参数  $k=1.75$ ,  $c=11.8$ 。结合风廓线函数,可得 90 m 高度处平均风速的超越概率为

$$F_{\text{EX}}(U)=1-F(U)=\exp\left[-\left(\frac{U}{12.004}\right)^{1.75}\right] \quad (5)$$

为涵盖各种工作状态,平均风速分别取 0, 4.4, 6.7, 8.2, 10.3, 11.7, 13.3, 14.5, 15.5, 16.7, 18.0, 19.3 m/s。根据选定的平均风速及风速场模型,采用随机相位,生成三维湍流风速场。考虑湍流风的随机性,每个平均风速值生成 5 个风速场样本。

## 2.3 风-地震组合

参照中国建筑抗震设计规范<sup>[12]</sup>,一致概率风-地震作用组合采用 50 a 超越概率 10% 的概率水平。假定该组合满足稳定泊松过程<sup>[17]</sup>,对应的,年超越概率为 0.21%,即式(1)中  $P=0.21\%$ 。根据 2.2 节选定的平均风速及式(5),与之组合的地震动年超越概率,见表 1。表 1 所列风-地震作用组合具有相同超越概率,即为一致概率风-地震组合。

表 1 风-地震组合

Table 1 Combination of wind and earthquake

荷载组合	地震超越 概率/%	平均风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	风速超越 概率/%	荷载组合	地震超越 概率/%	平均风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	风速超越 概率/%
1	2.10	19.3	10.0	7	0.55	11.7	38.2
2	1.60	18	13.1	8	0.45	10.3	46.7
3	1.25	16.7	16.8	9	0.35	8.2	60.0
4	1.00	15.5	21.0	10	0.30	6.7	70.0
5	0.85	14.5	24.7	11	0.25	4.4	84.0
6	0.70	13.3	30.0	12	0.21	0	100.0

## 2.4 输入地震动

首先,以地震动峰值加速度和 5% 阻尼比绝对加速度反应谱值为参数,采用概率化地震危险性分析方法,开展场地地震安全性评价。断层选用 Frankel 模型,震源破裂采用 USGS/CGS 2002 模型,地震动衰减关系采用 Campbell-Bozorgnia 2014 模型<sup>[18]</sup>。C 类场地,30 m 深度平均剪切波速  $V_{30}=450\text{ m/s}$ ,剪切波速  $V_s=1\ 000\text{ m/s}$  地层深 100 m,  $V_s=2\ 500\text{ m/s}$  地层深 200 m。根据表 1 的超越概率,得到基岩场地和 C 类场地地震动加速度反应谱,如图 3 和图 4 所示。同一周期,基岩地震动绝对加速度反应谱值小于 C 类场地,尤其是长周期部分。因此,对于两类场地,C 类场地地震动为强震,基岩场地地震动为弱震。随后,对于每条反应谱,生成 5 个地震动时程,C 类场地,总持时取 40 s,平稳段持时为 20 s;基岩场地,地震动总持时取 30 s,平稳段持时为 15 s。然后,将风速场与地震动组合,对每个风-地震作用组合,需进行 25 次动力响应分析,以考虑湍流风和地震动随机性影响。风-地震共同作用下,气动阻尼使得风力发电机前后向、侧向阻尼存在显著差异<sup>[19]</sup>。为考虑地震动方向影响,在塔底  $x$ - $o$ - $y$  平面内分别沿 6 个

方向输入地震波。方向1沿 $x$ 轴正向,方向6沿 $y$ 轴正向,自 $x$ 轴正向至 $y$ 轴正向,以 $18^\circ$ 为间隔,依次为方向2,3,4,5。

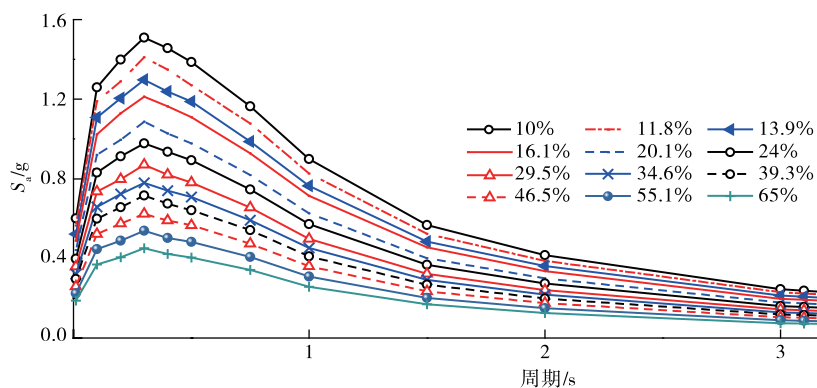


图3 C类场地加速度反应谱

Fig.3 Response spectrum of acceleration for the site of type C

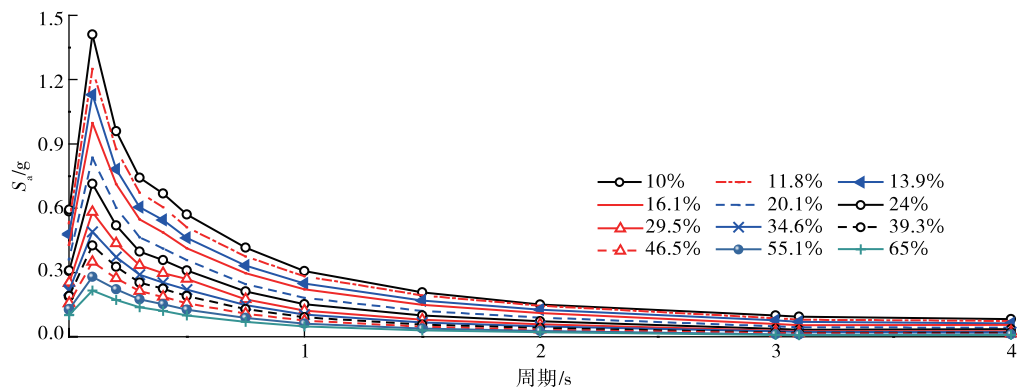


图4 基岩场地加速度反应谱

Fig.4 Response spectrum of acceleration for rock site

### 3 结果与分析

#### 3.1 C类场地结果与分析

为消除初始条件影响,地震动在400 s输入。图5为荷载组合10,12作用下塔顶位移时程。对于荷载组合10,12,轮毂处平均风速分别为6.7, 0 m/s,风力机各自处于运行、停机状态。根据图5和图6,地震结束后,气动阻尼使得结构振动迅速衰减;同时,荷载组合10作用下,塔顶位移和塔底弯矩幅值小于荷载组合12,因此,风-地震共同作用时,风荷载减小结构地震响应,表现出阻尼效应。

图7是塔顶位移幅值,荷载组合1~12,地震动增大,塔顶位移幅值随之增大,最大为1.2 m。塔顶位移幅值与输入地震动方向有关,地震动沿方向6即 $y$ 方向(下文相同)输入时,塔底位移幅值最大。输入地震动方向导致的位移幅值最大变化为15%。图8为塔底弯矩幅值,其特征与塔顶位移幅值类似。从荷载组合1~12,随地震动增大,塔底弯矩幅值增大。输入地震动沿方向1(即为 $x$ 轴)时,荷载组合12对应的塔底弯矩幅值最大,为208 MN·m。输入地震动方向变化造成的弯矩幅值最大变化为30%。对于荷载组合1~11,风力机处于运行状态,气动阻尼使得风力机前后向阻尼大于侧向<sup>[19]</sup>,因此,地震动

沿侧向(即为  $y$  方向)输入时,塔底弯矩幅值最大。对于荷载组合 12,输入地震动沿  $x$  方向,塔底弯矩幅值最大,此时,风力发电机处于停机状态,结构前后向、侧向自振特性的差异造成了地震动方向性效应。比较图 7 和图 8,输入地震动方向对塔底弯矩幅值的影响更为显著。

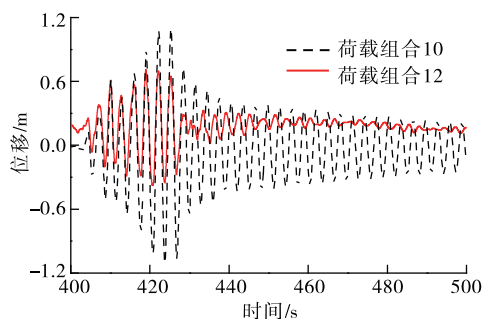


图 5 塔顶位移时程

Fig.5 Time history of tower-top displacement

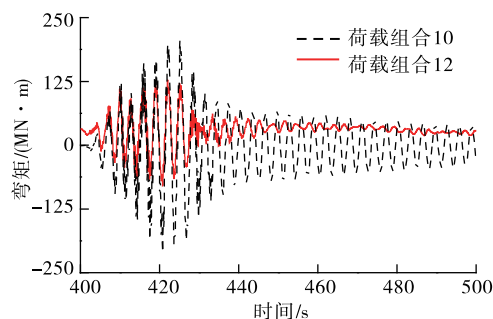


图 6 塔底弯矩时程

Fig.6 Time history of tower-base moment

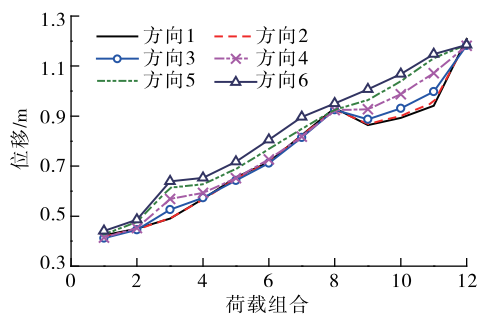


图 7 塔顶位移幅值

Fig.7 Displacement amplitude of tower-top

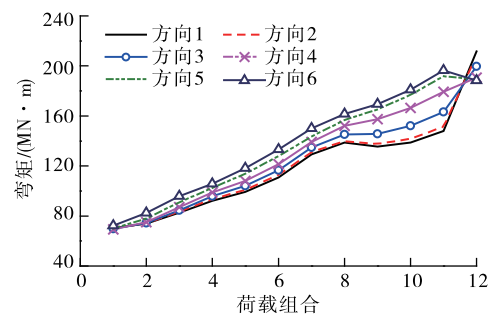


图 8 塔底弯矩幅值

Fig.8 Moment amplitude of tower-base

对于 C 类场地,强震作用下,地震起控制作用,从荷载组合 1~12,随风速减小,地震动增大,结构响应幅值增大;由于气动阻尼作用,输入地震动方向显著影响结构响应。风-地震共同作用下,输入地震动沿侧向时,结构响应最大。C 类场地地震动具有丰富的长周期成分,结构响应强烈。例如,荷载组合 12 作用下,塔底弯矩幅值达  $208 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ,接近极限弯矩  $228 \text{ MN} \cdot \text{m}$ <sup>[20]</sup>。ASAREH 等<sup>[6]</sup>探讨了该型号风力发电机的动力响应,结果表明:额定风速作用下塔底弯矩幅值为  $80 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ,显然,地震动作用效应远大于风荷载。因此,对于 C 类场地,一致概率风-地震组合作用效应受地震动控制,地震单独作用时,结构响应最大。

### 3.2 基岩场地结果与分析

图 9 为塔顶位移幅值,最大值为  $0.5 \text{ m}$ ,在荷载组合 4, 8, 12 取得,与图 7 相比,减小 50%。3 个荷载组合对应风荷载为主、风-地震共同作用及地震单独作用 3 种工况。荷载组合 1~6,地震动幅值小,塔顶位移由风荷载控制,因此,受输入地震动方向的影响小。荷载组合 7~12,结构响应由风荷载和地震动共同控制,塔顶位移幅值受输入地震动方向影响,最大变化率为 10%,小于 C 类场地。图 10 是塔底弯矩幅值,最大为  $86 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ,小于 C 类场地(见图 8),在荷载组合 8 取得,为风-地震共同作用。与塔顶相对位移类似,由于地震动较小,荷载组合 1~6 的塔底弯矩幅值受地震动方向影响小;荷载组合 7~12,输入地震动方向具有一定影响。

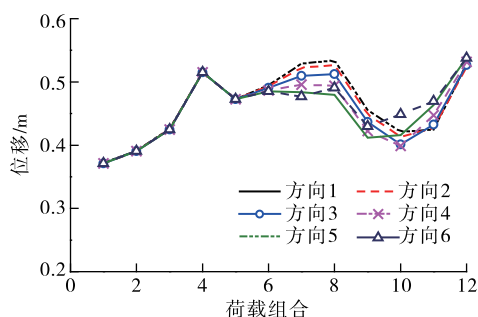


图9 塔顶位移幅值

Fig.9 Displacement amplitude of tower-top

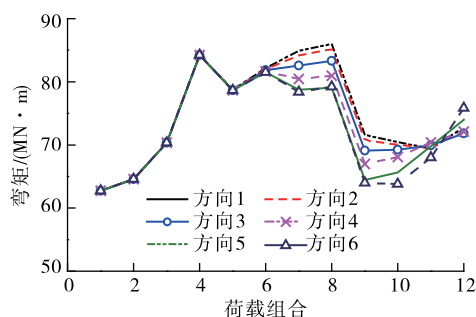


图10 塔顶弯矩幅值

Fig.10 Moment amplitude of tower-base

针对两类场地,采用一致概率风-地震作用组合,分析了风力发电机的地震响应,输入地震动特性的差异使得结构动力响应特征不同。基岩场地地震动以高频成分为主,而 NREL 5 MW 风力发电机基准周期达 3.1 s,因此,结构响应总体小于 C 类场地。对于 C 类场地,输入地震动峰值加速度大,长周期成分丰富的,结构地震响应强烈。结果表明:对于 C 类场地,一致概率风-地震组合中,地震单独作用的荷载组合为最不利组合;输入地震动方向显著影响结构动力响应。对于基岩场地,输入地震动峰值加速度小,长周期成分较少,结构动力响应显著小于 C 类场地;支撑结构响应幅值由风-地震动共同控制,输入地震动方向对结构响应幅值的影响小于 C 类场地。

## 4 结 论

假定风、地震为独立随机事件,根据两者联合概率分布函数,提出一致概率风-地震作用组合方法,算例表明:

- 1)在一致概率风-地震作用组合中,风-地震作用组合及其作用下结构响应具有相同的发生概率。
- 2)强震作用下,地震动控制风力发电机结构响应,对于一致概率风-地震作用组合,地震单独作用为最不利工况。
- 3)弱震作用下,塔顶相对位移和塔底弯矩幅值变化范围小于强震,在风-地震共同作用时取最大值,因此,风-地震共同作用为最不利荷载组合。
- 4)一致概率风-地震组合作用下,结构动力响应特征与地震动特性有关。算例中:C类场地,地震动峰值加速度大,长周期成分丰富的,结构地震响应幅值较大;基岩场地,结构响应幅值较小。
- 5)输入地震动方向对结构响应的影响与地震动特性有关。算例中:C类场地地震动方向的影响超过基岩场地,塔底弯矩幅值最大改变 30%。

## 参考文献:

- [1] ZHAO X, MAIBER P. Seismic response analysis of wind turbine towers including soil structure interaction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part K Journal of Multibody Dynamics, 2006, 220(1): 53-61.
- [2] 金鑫, 王磊, 刘桦. 大功率风力发电机地震动力学建模及载荷计算[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 224-229.
- [3] 何玉林, 王磊, 杜静, 等. 地震作用下的风电机组振动仿真分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 179-184.
- [4] 彭超. 风力发电机组地震动力响应分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3189-3194.
- [5] YANG Y, YE K, LI C, et al. Dynamic behavior of wind turbines influenced by aerodynamic damping and earthquake intensity[J]. Wind Energy, 2018, 21(1): 1-17.

- [6]ASAREH M A, SCHONBERG W, VOLZ J. Effects of seismic and aerodynamic load interaction on structural dynamic response of multi-megawatt utility scale horizontal axis wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 49-58.
- [7]PROWELL I. An experimental and numerical study of wind turbine seismic behavior[D]. San Diego: University of California, 2011.
- [8]KIYOMIYA O, RIKIJI T, VAN GELDER P. Dynamic response analysis of onshore wind energy power units during earthquakes and wind[C]//Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.
- [9]MENSAH A F, DUENAS-OSORIO L, PROWELL I, et al. Probabilistic combination of earthquake and operational loads for wind turbines[C]//Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering. Lisboa: Portugal, 2012.
- [10]JONKMAN J M. TurbSim user's guide: version 1.50[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [11]MARDFEKRI M, GARDONI P. Multi-hazard reliability assessment of offshore wind turbines[J]. *Wind Energy*, 2015, 18(8):1433-1450.
- [12]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13]ARCHER C L, JACOBSON M Z. Spatial and temporal distributions of U.S. winds and wind power at 80 m derived from measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(9): 469-474.
- [14]MANWELL J F, MCGOWAN J G, ROGERS A L. Wind energy explained: theory, design and application [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2006: 30-68.
- [15]IEC. Wind turbines part 1: design requirements[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2005.
- [16]JONKMAN J M, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [17]胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [18]CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y. NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped elastic pseudo-acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec[J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 1087-1115.
- [19]VALAMANESH V, MYERS A T. Aerodynamic damping and seismic response of horizontal axis wind turbine towers[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(11): 1-9.
- [20]YUAN C Y, CHEN J Y, LI J, et al. Fragility analysis of large-scale wind turbines under the combination of seismic and aerodynamic loads[J]. *Renewable Energy*, 2017, 113: 1122-1134.

(责任编辑:李艳,谭晓荷)