

海上风电导管架塔架转接段波浪冲击试验及冲击荷载概率模型

沈忠辉, 魏凯, 邓鹏

(西南交通大学 土木工程学院桥梁工程系, 成都, 610031, Email: zh-shen@my.swjtu.edu.cn)

摘要: 塔架转接段受到的波浪冲击荷载是导致海上风电导管架发生结构破坏的主要原因之一。塔架转接段通常位于海平面以上, 其受到的波浪冲击作用复杂, 并具有明显的随机性。本文通过物理模型试验, 探究了极端波浪作用下塔架转接段受到的水平冲击力峰值、冲击持续时间与波浪参数的关系, 并基于 Copula 理论, 建立了冲击荷载水平分量的概率模型。研究表明, 波浪冲击过程具有明显的随机性, 本文建立的联合概率模型可以反映不同累积非超越概率下的冲击过程, 便于工程应用。

关键词: 波浪冲击; 水平冲击力峰值; 冲击持续时间; 联合概率

1 引言

我国东部沿海地区冬、春季受北方冷空气影响, 夏、秋季受热带气旋影响, 海上风能资源十分丰富。我国近海 100m 高度层、5~50m 水深区的风能资源开发量约为 5 亿 KW。导管架式海上风电结构, 作为 30~50m 水深区海上风电开发采用最为广泛的结构形式之一, 长期受到极端波浪作用的影响。根据现有研究, 塔架转接段受到的波浪冲击荷载是导致海上风电导管架发生结构破坏的主要原因之一^[1]。然而, 塔架转接段通常位于海平面以上, 其受到的波浪冲击作用具有明显的随机性。如何确定冲击力峰值及冲击持续时间是研究波浪冲击作用的关键。Cuomo 等^[2]研究波浪冲击沉箱防波堤, 指出了冲击力峰值满足广义极值分布 (GEV), 冲击上升时间符合广义帕累托 (GP) 分布, 并运用 Copula 理论建立了冲击力峰值与冲击上升时间的联合概率模型。Serinaldi 等^[3]研究波浪冲击沿海桥梁桥面板, 也同样运用 Copula 理论联系了冲击力峰值与上升时间的关系。刘明等^[4]对规则波冲击弹性支承水平板的冲击压力进行概率分析, 表明冲击压力峰值满足三参数的威布尔 (Weibull) 分

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708455)

通讯作者: 魏 凯(1984—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事跨海桥梁防灾减灾研究(E-mail: kaiwei@home.swjtu.edu.cn)

作者简介: 沈忠辉(1995—), 男, 云南人, 硕士研究生, 主要从事跨海桥梁防灾减灾研究(E-mail: zh-shen@my.swjtu.edu.cn)

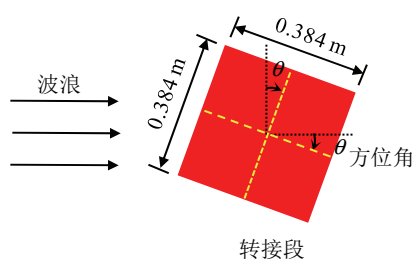
布。上述研究表明,针对具有随机性的波浪冲击过程,采用概率分析手段,能更全面地反应波浪冲击过程的可能性。

为研究海上风电导管架塔架转接段在极端波浪作用下的冲击过程,本研究开展了物理模型试验。通过对试验获取的水平冲击力峰值、冲击持续时间进行无量纲分析,研究了水平冲击力峰值、冲击持续时间与波浪参数的关系,建立了塔架转接段水平冲击力峰值及冲击持续时间的数学模型,同时基于 Copula 理论,建立了水平冲击过程的概率模型。

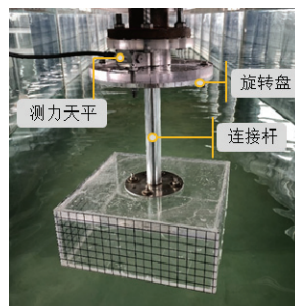
2 物理试验

本研究以 Upwind jacket 的混凝土立方体塔架转接段(下文简称“转接段”)为原型,根据 1:25 缩尺比设计物理模型,在西南交通大学深水大跨桥梁实验中心的波流试验水槽开展了 Stokes 五阶波冲击不同方位角的转接段的物理模型试验,如图 1(a)所示。物理模型长、宽、高分别为 0.384m, 0.384m 和 0.16m。试验水深 $d = 0.9\text{m}$, 塔架转接段净空 $s_m = 0.15\text{m}$, 试验有效波高 (H_s) 分别取 0.3m, 0.35m, 0.4m, 相对应周期分别 (T) 为 1.67s, 1.76s, 1.95s。

试验时采用采样频率为 1000Hz 的测力天平采集模型受到的水平冲击力、竖向冲击力及弯矩数据。为获得模型周围的液面情况,分别在结构物正前方 1m 和两侧分别布置了波高仪,采样频率为 100Hz。波流水槽、物理模型实物图如图 1(b)所示。



(a) 不同方位角的转接段示意图



(b) 实物图

图 1 物理模型及试验水槽示意图

3 波浪水平冲击荷载时程模型及概率模型

3.1 水平冲击荷载时程模型

对试验获取的每一个波浪水平冲击过程(本研究只讨论沿波浪方向),先通过 Lowpassiir 低通滤波方法进行滤波处理,过滤掉结构物动力响应部分得到水平冲击力,然后以水平冲

击力峰值为基准对水平冲击时程进行标准化, 时间采用波浪周期进行无量纲处理。由于波浪冲击过程具有明显的随机性, 即使在相似的试验条件下, 测得的冲击过程也不一致^[5], 同时存在水槽底部摩擦, 试验误差等影响波浪条件的因素, 使得冲击转接段的波浪波高和周期并未是严格的试验设计波高和周期, 故将波浪周期 T_m 定义为: 侧向波高仪记录的波列中相邻波谷与波谷之间的时间间隔。最终得到的水平冲击力时程形状如图 2 所示。由图 2 知, 在净空不变的情况下, 波高较小时, 冲击力时程形状关于最大冲击力时刻对称, 随着波高增加, 对称性减弱, 冲击持续时间增长。在波高较小时, 可以选用式 (1)^[6] 描述水平冲击过程。式 (1) 记为水平冲击函数, 形式如下:

$$F_x = F_{x\max} \sin^2 \left(\frac{\pi t}{T_{\text{impact}}} \right) \quad (1)$$

其中, F_x 为水平冲击力, $F_{x\max}$ 为水平冲击力峰值, T_{impact} 为冲击持续时间。 T_{impact} 定义为标准化形状 $F_x/F_{x\max}=0.2$ 对应的 T_{impact} 值。

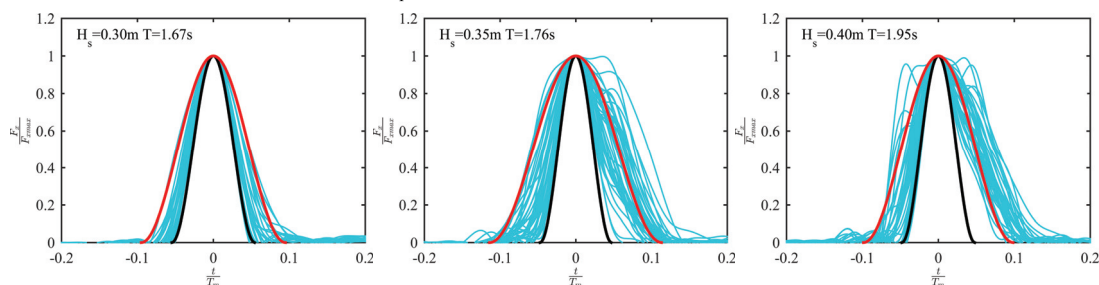


图 2 水平冲击力时程标准化形状

3.2 水平冲击力峰值和冲击持续时间

需要确定水平冲击过程, 只需确定水平冲击函数里的水平冲击力峰值 $F_{x\max}$ 和冲击持续时间 T_{impact} 。以往许多学者开展了平台、甲板上水平冲击力峰值的预测方法研究^[5,7,8]。研究表明^[5]水平冲击力峰值与有效波高 H_s 、波峰高度 $\eta_{\max}$ 、净空 s_m 有着明显的关系。

相比有效波高 H_s , 波峰高度 $\eta_{\max}$ 与冲击过程关系更为密切, 更能反应真实的波浪条件和冲击情况, 所以本文采用波峰高度 $\eta_{\max}$ 确定水平冲击力峰值的物理模型。采用静压产生的波浪力对水平冲击力峰值做无量纲处理, 得到的转接段方位角为 0° 的水平冲击力峰值与波峰高度 $\eta_{\max}$ 、净空 s_m 的关系及采用式 (2) 的拟合结果如图 3 所示。

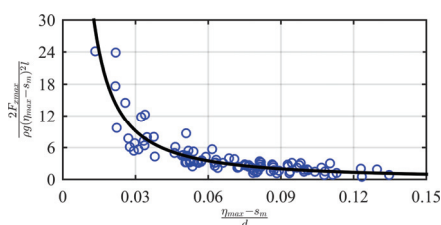


图 3 水平冲击力峰值

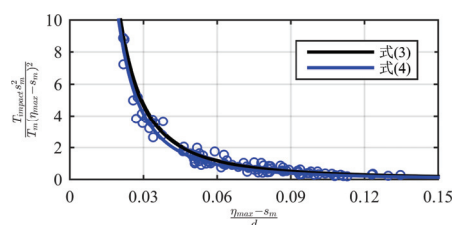


图 4 水平冲击持续时间

$$\frac{2F_{x\max}}{\rho g(\eta_{\max} - s_m)^2 l} = a_f \times \left(\frac{\eta_{\max} - s_m}{d} \right)^{b_f} \quad (2)$$

其中, ρ 为水的密度, g 为重力加速度, l 为结构物宽度, a_f 、 b_f 为拟合系数, 转接段不同方位角的拟合结果如表 1 所示。

表 1 不同方位角的水平冲击力峰值拟合系数

方位角 (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
a_f	0.070	0.089	0.072	0.056	0.108	0.061	0.137	0.059	0.119	0.071
b_f	-1.39	-1.30	-1.33	-1.43	-1.21	-1.39	-1.12	-1.38	-1.17	-1.35
R^2	0.89	0.74	0.92	0.89	0.79	0.71	0.64	0.96	0.85	0.93
RMSE	1.81	1.64	1.39	1.63	1.48	1.85	1.55	1.22	1.14	1.35

采用波浪周期对冲击持续时间进行无量纲处理, 得到的转接段方位角为 0° 的冲击持续时间与波峰高度 $\eta_{\max}$ 、净空 s_m 的关系及采用式 (3) 的拟合结果如图 4 所示。

$$\frac{T_{\text{impact}} s_m^2}{T_m (\eta_{\max} - s_m)^2} = a_t \times \left(\frac{\eta_{\max} - s_m}{d} \right)^{b_t} \quad (3)$$

其中, a_t 、 b_t 为冲击持续时间拟合系数, 转接段不同方位角的拟合结果如表 2 所示。观察表 2 的拟合系数, 发现转接段不同方位角的拟合系数 b_t 都接近于 -2, a_t 变化较小, 所以式 (3) 改写为式 (4), 拟合结果于图 4 所示。

$$T_{\text{impact}} = a_t \frac{T_m}{s_m^2 d^{-2}} = K T_m \quad (4)$$

表 2 不同波向波浪冲击持续时间拟合系数

方位角 (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
a_t	0.0024	0.0038	0.0052	0.0039	0.0037	0.0050	0.0037	0.0050	0.0052	0.0050
b_t	-2.15	-2.00	-1.92	-2.00	-2.01	-1.93	-2.01	-1.92	-1.92	-1.93
R^2	0.99	0.98	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	1.00	0.98	0.99
RMSE	0.44	0.34	0.37	0.56	0.34	0.40	0.37	0.28	0.36	0.52

式 (4) 中, 忽略转接段方位角的影响, a_t 取为表 2 拟合系数 a_t 的均值, K 为常数, 本试验 $K \approx 0.15$ 。从式 (4) 可以看出, 冲击持续时间与波峰高度无关, 这主要是由于本文选取的波浪为极端波浪, 有效波高与周期存在密切的关系 ($T = 9.224 \sqrt{H_s / g}$)。

由于冲击过程的随机性、试验误差等因素的混杂, 最大冲击力、冲击持续时间与转接段方位角的关系不易明确。从表 1 和表 2 拟合系数也可以看出, 角度的影响规律复杂, 所以为体现角度的影响, 本研究给出了转接段不同方位角的水平冲击力峰值的拟合系数。角度对冲击持续时间的的影响归到随机性里, 认为冲击持续时间与角度无关。式 (2) 和式 (4)

预测的水平冲击力峰值及冲击持续时间都近似为试验均值的情况，未能描述冲击过程的全部可能性。为了能将式（2）和式（4）运用到实际工程应用中，本研究采用概率分析手段，建立了水平冲击力峰值、冲击持续时间的联合概率模型，进一步评估了波浪水平冲击过程。

3.3 水平冲击力峰值、冲击持续时间联合概率模型

为探究水平冲击力峰值和冲击持续时间及它们联合的分布特点，本研究选用无因次冲击持续时间 $T_{\text{impact}}/0.15T_m$ 和无因次水平冲击力峰值 $\frac{2F_{x\max}d^{b_f}}{a_f\rho g(\eta_{\max}-s_m)^{2+b_f}l}$ 为 X 和 Y 变量。通过对指数分布、广义极值分布、伽马分布、威布尔分布、正态分布、对数分布、瑞利分布、逆高斯分布进行 K-S 检验，寻找 X, Y 变量最优的分布形式作为 Copula 函数的边缘分布。K-S 检验表明，变量 X 满足广义极值分布（GEV），变量 Y 满足伽马（Gamma）分布。广义极值分布和伽马分布形式如下：

$$\text{广义极值分布: } F(X) = \exp\left(-\left(1+k\frac{(X-A)}{B}\right)^{-1/k}\right) \quad (5)$$

$$\text{伽马分布: } F(Y) = \frac{1}{b^a\Gamma(a)} Y^{(a-1)} \exp\left(-\frac{Y}{b}\right) \quad (6)$$

其中， k, A, B 为广义极值分布参数， b, a 为伽马分布参数。采用最大释然法估计分布参数得： $k=0.0152, A=0.8896, B=0.1995, a=9.2328, b=0.1151$ ，故 X, Y 变量的概率密度、累计概率及拟合情况如图 5 所示。

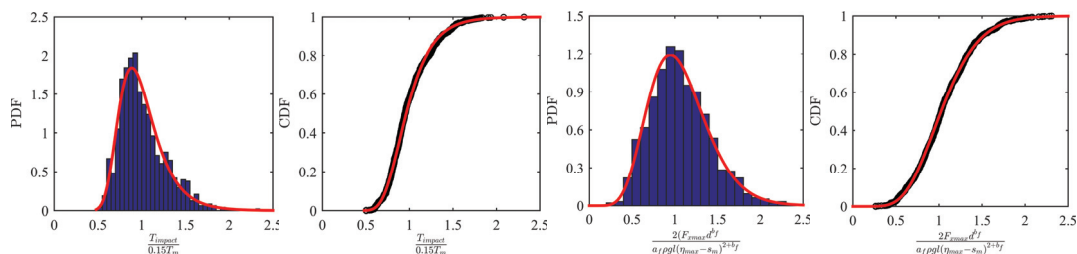


图 5 水平冲击力峰值与冲击持续时间概率分析

由于水平冲击力峰值与冲击持续时间不相互独立^[2,3]，需要建立两者之间的联系。Copula 理论是建立双变量和多变量联合概率模型的常用手段。所以本文采用 Copula 理论建立了水平冲击力峰值与冲击持续时间的概率模型，其中 Copula 函数选用 Plackett Copula 函数，并通过均方根误差（RMSE），纳什系数（NSE）对拟合效果进行检验。检验结果为 $RMSE=0.4434, NSE=0.9951$ ，拟合效果较好。Plackett Copula 函数形式如下：

$$C(u, v) = \frac{1 + (\theta - 1)(u + v) + \sqrt{[1 + (\theta - 1)(u + v)]^2 - 4\theta(\theta - 1)uv}}{2(\theta - 1)} \quad (7)$$

其中， $u=F(X)$ 为变量 X 的分布函数， $v=F(Y)$ 为变量 Y 的分布函数， θ 为 Plackett Copula 函数参数，采用贝叶斯更新和蒙特卡洛方法对 Plackett Copula 函数参数估计，估计结果为：

$\theta = 0.9309$ 。采用 Plackett Copula 函数拟合的累计概率 $P(X < x, Y < y)$ 、概率密度（标准化）如图 6 所示。由图 6 可以确定不同非超越概率和概率密度下的无因次水平冲击力峰值与冲击持续时间，如非超越概率为 90% 时，图 6 中红色点的概率密度最大，此时 $\frac{T_{\text{impact}}}{KT_m} = \frac{T_{\text{impact}}}{0.15T_m} = 1.48$, $\frac{2F_{x\max}d^{b_f}}{a_f\rho g(\eta_{\max}-s_m)^{2+b_f}l} = 1.7$ 。所以，通过 Plackett Copula 概率分布与 Plackett Copula 概率密度可以确定所需要的累计非超越概率下的无因次冲击持续时间和无因次水平冲击力峰值，以及该累计非超越概率下的最大概率点，进而可以得到相应的冲击时程，以便于工程应用。

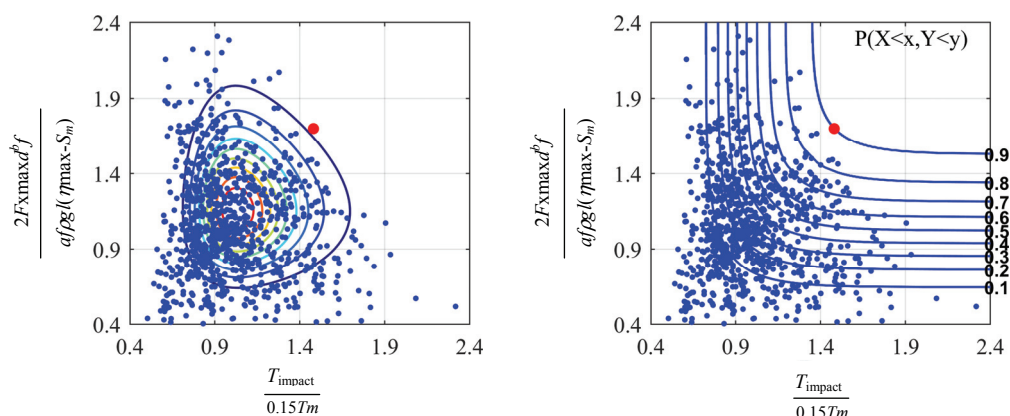


图 6 水平冲击力峰值与冲击持续时间联合概率模型

4 结论

通过物理模型试验，测试了海上风电导管架塔架转接段在极端波浪冲击下的波浪冲击荷载时程。为量化波浪冲击转接段的冲击过程，首先对水平冲击力峰值和冲击持续时间进行参数分析，建立了转接段受到的波浪水平冲击力峰值及冲击持续时间的数学模型，再通过 Copula 联合概率分析方法弥补了冲击过程的随机性，建立了水平冲击过程的概率模型。

① 极端波浪冲击海上风电导管架塔架转接段时，冲击持续时间与波峰高度无关，可表示为 $T_{\text{impact}} = KT_m$ ；② 无因次冲击持续时间 $\frac{T_{\text{impact}}}{KT_m}$ 满足广义极值分布（GEV），无因次水平冲击力峰值 $\frac{2F_{x\max}d^{b_f}}{a_f\rho g(\eta_{\max}-s_m)^{2+b_f}l}$ 满足伽马分布（Gamma）；③ 本研究建立的波浪水平冲击力峰值和冲击持续时间联合概率模型，可以确定不同累计非超越概率下的波浪水平冲击过程，便于工程应用。

参考文献

- 1 Wei K, Myers A T, Arwade S R. Dynamic effects in the response of offshore wind turbines supported by

- jackets under wave loading. *Engineering Structures*, 2017, 142: 36–45
- 2 Cuomo G, Piscopia R, Allsop W. Evaluation of wave impact loads on caisson breakwaters based on joint probability of impact maxima and rise times. *Coastal Engineering*, 2011, 58(1): 9-27
 - 3 Serinaldi F, Cuomo G. Characterizing impulsive wave-in-deck loads on coastal bridges by probabilistic models of impact maxima and rise times. *Coastal Engineering*, 2011, 58(9): 908-926
 - 4 刘明, 任冰, 王国玉, 王永学. 规则波对弹性支承水平板冲击压力的概率分析[J]. 水道港口, 2013, 34(6): 493-500
 - 5 Cuomo G, Tirindelli M, Allsop W. Wave-in-deck loads on exposed jetties. *Coastal Engineering*, 2007, 54(9): 657-679
 - 6 Paulsen B T, De Sonnevile B, Michiel V D M, et al. Probability of wave slamming and the magnitude of slamming loads on offshore wind turbine foundations. *Coastal Engineering*, 2019, 143: 76-95
 - 7 Broughton P, Horn E. Ekofisk Platform 2/4C: re-analysis due to subsidence. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 82(1): 949–979
 - 8 Kaplan P, Murray, J J, Yu W C. Theoretical Analysis of Wave Impact Forces on Platform Deck Structures. *Offshore Technology OMAE*, 1995, 1: 189–198

Wave impact experiment and probability model of impact loads on transition piece (Deck) of offshore wind turbines (OWT) supported by Jackets

SHEN Zhong-hui, WEI Kai, DENG Peng

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074.

Email: zh-shen@my.swjtu.edu.cn)

Abstract: The wave impact on the transition piece (Deck) of offshore wind turbines (OWT) is one of the main reasons for the structural damage of offshore wind turbines supported by jackets. The Deck of OWT above sea level subject to complex wave impact action which is obviously stochastic. This paper investigates wave impact on Deck via physical model experiments. The relationship, between wave parameters and wave horizontal impact maxima under extreme wave, impact durations under extreme wave, was explored respectively, and the probability model of the wave horizontal impact is established using Copula method. The results show that the wave impact process is obviously stochastic and the established joint probability model can reflect the impact process under different cumulate non-exceedance probability, which is beneficial to engineering design.

Key words: wave impact; horizontal impact maxima; durations; joint probability