

文章编号: 1006-2467(2022)03-0361-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.066

海洋平台风载荷试验不确定度分析

代 燚, 陈作钢, 王 飞

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室; 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要: 海洋平台上层建筑一般形状复杂, 风洞试验是获得风载荷最为可靠的方法. 现阶段海洋平台风载荷不确定度分析流程及要点鲜有探讨, 各因素影响程度尚不明确. 率先针对某型海洋平台风载荷试验, 基于国际拖曳水池会议 (ITTC) 推荐规程确立了不确定度分析流程, 并进行风洞试验结果不确定度分析. 根据试验流程梳理误差源, 计算各相对不确定度分量大小, 按其值对误差源进行等级评定, 提出降低试验不确定度的方法. 研究表明: 风剖面、模型精度、气压测量以及天平测量状态对风载荷测量有较大影响, 占总合成不确定度比例达到了 96.13%. 采用适当简化模型、合理校测风剖面、提高气压测量精度以及稳定测量状态等手段能有效降低试验不确定度.

关键词: 海洋平台; 风载荷试验; 不确定度分析

中图分类号: U 661.71

文献标志码: A

Uncertainty Analysis of Offshore Platform Wind Load Tests

DAI Yi, CHEN Zuogang, WANG Fei

(State Key Laboratory of Ocean Engineering; School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The superstructures of offshore platforms are usually complex in shape, and wind tunnel test is the most reliable method to obtain the wind loads. Few researches about the procedures of uncertainty analysis (UA) and key points have been conducted, and the influences of error sources are not clear. The UA of an offshore platform wind load tests is first performed based on the International Towing Tank Conference (ITTC) recommended procedures. According to the wind load test procedure of the offshore platform, the uncertainties due to many error sources are analyzed. In order to obtain the remark of all error sources and propose the approach of reducing uncertainties, error sources are evaluated and graded. The results show that the wind profile, the accuracy of the model, the air pressure measurement, and the balance measuring state have a great influence on wind load coefficients, which contribute to 96.13% of the combined uncertainty. The uncertainties can be effectively reduced by model simplification, high quality wind profile, high precision air pressure measurement, and stable measurement state.

Key words: offshore platform; wind load tests; uncertainty analysis (UA)

风载荷是海洋平台所受十分重要的环境载荷, 是平台结构设计、运动响应预报与定位以及运行经

济能效等研究中的重要因素. 海洋平台风载荷预报一般有 3 种方法: 规范预报、数值模拟以及风洞试

收稿日期: 2021-03-02

作者简介: 代燚 (1988-), 男, 湖北省武汉市人, 工程师, 主要从事风洞循环水槽试验研究.

电话 (Tel.): 021-34208380; E-mail: yidai@sjtu.edu.cn.

验. 美国船级社(ABS)、中国船级社(CCS)以及挪威船级社(DNV)等对于风载荷有各自的规范预报方法, 付德健等^[1]对主流规范的风载荷预报方法进行了分析, 指出了各方法的差异. 彭超等^[2]针对半潜式平台进行了风载荷数值模拟, 结果显示湍流强度及湍流模型影响较小, 风速剖面分布影响最大. 乔丹等^[3]对不同堆垛模式下集装箱船风载荷进行试验, 发现船舶横、纵向受风区域的形状参数对于风载荷特性影响显著. 前述研究表明, 由于海洋结构物上层建筑的形状特性, 造成流动的强扰动与分离, 通过数值模拟与规范计算很难得到风载荷精确结果, 风洞试验是最为可靠的方法, 同时也是其他研究的基础. 但不同试验机构由于模型、设备以及环境条件等因素的差异, 往往试验结果也会存在一定偏差, 在对风载荷试验结果进行对比之前, 按标准流程确定其不确定度是重要的.

在船舶与海洋工程领域不确定度研究已进行多年, 国际拖曳水池会议(ITTC)基于国际标准化组织(ISO)的《测量不确定度表示指南》形成了实验流体力学不确定度分析指南(ITTC Procedures 7.5-02-01-01)^[4]. 张立等^[5]根据指南对多用途船标模进行了阻力试验的不确定度分析, 确定总阻力不确定度水平以及各因素对阻力不确定度的影响. 刘晗等^[6-7]对大型油船标模进行了操纵性岸壁效应不确定度分析, 研究表明, 速度、岸壁距离和吃水等对于不确定度都有较大影响. 童寿龙等^[8]采用试验及数值计算相结合的方法对循环水槽中船模阻力进行不确定度分析, 研究表明湍流强度和均匀度影响最大.

相较于其他类型流体力学试验, 风载荷不确定度分析有其特殊性, 基于美国航空航天学会(AIAA)的风洞试验数据不确定度分析标准与ITTC推荐规程具有相同的适用性. 但对于试验结果的对比与评定, 有必要采用统一的分析规程. 本文参照ITTC推荐规程, 率先对某型海洋平台风载荷试验进行了不确定度分析, 确定误差来源, 并计算其相对不确定度分量大小, 为建立标准分析流程作参考. 同时提出减小不确定度的方法, 为提高试验精度提供指导.

1 不确定度理论

不确定度是由“测量误差”概念发展而来, 表征合理赋予被测物理量的分散性与测量结果相联系的参数^[9]. 国际计量学指南联合委员会(JCGM)将不确定度分为3种类别: 标准不确定度(u), 合成不确定度(u_c)和扩展不确定度(U).

以标准差表示的不确定度称为标准不确定度. 标准不确定度依据其评定方法分为A、B两类. A类不确定度可通过对一组观测量运用统计方法分析获得, B类不确定度通过非统计方法估算近似标准差获得.

当被测变量 Y 通过 N 个独立或相关的物理量 X_1, X_2, \dots, X_N 获得时, 运用其他量的不确定度合成得到 Y 的不确定度, 也称合成不确定度.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) u(x_i, y_j) \quad (2)$$

式中: $\partial f / \partial x_i$ 为函数在 $X_i = x_i$ 处的偏导数, 称为灵敏系数; $u(x_i, x_j)$ 为 x_i 和 x_j 的估计协方差, 同时 x_i 和 x_j 的相关程度可用相关系数 $r(x_i, x_j)$ 表示, $r(x_i, x_j) = u(x_i, x_j) / (u(x_i)u(x_j))$. 若 $r(x_i, x_j) = 0$, x_i 和 x_j 相互独立. 本文计算物理量 Y 合成不确定度时, 变量 X_i 不确定度分量表示方式为 $u_{X_i}(Y)$, 即变量 X_i 的标准不确定度 $u(X_i)$ 与灵敏系数的乘积, 为表达方便变量 X_i 可用数字编号代替. 相对不确定度分量表示为 $u'_{X_i}(Y)$, 即 $u'_{X_i}(Y) = u_{X_i}(Y) / Y$. 式(2)基于式(1)的一阶泰勒展开, 当函数 f 非线性十分显著时需要考虑在式(2)中加入高阶展开项.

在正态分布情况下, 标准偏差对应的置信水平为68.27%, 为了增加置信水平, 常使用扩展不确定度 U . 扩展不确定度由合成不确定度 u_c 乘以包含因子 k 得到:

$$U = k u_c \quad (3)$$

在实验流体力学中, 通常取95%置信水平, 当被测物理量有效自由度大于30且接近正态分布时 k 值可取2. 最终被测变量可表示为 $Y = y \pm U$.

2 海洋平台风载荷试验不确定度分析

对于海洋平台风载荷试验不确定度分析可按照以下流程进行:

(1) 建立测量过程的数学模型, 数学模型应尽可能包括全部影响因素.

(2) 分析试验过程中的影响因素或误差源.

(3) 划分标准不确定度, 并对标准不确定度进行评定及计算.

(4) 计算合成不确定度及扩展不确定度.

在上海交通大学多功能风洞中进行某型海洋平台风载荷试验. 风洞为回流式结构, 总体尺度为48.6 m×24.5 m(长×宽), 装机功率1 000 kW. 主

回路具有两个试验段,旁路有一个开口试验段. 本试验主要在低速试验段中进行,其主要指标如下:尺寸 14.0 m×6.0 m×3.5 m(长×宽×高),最高风速 20.0 m/s,配有直径 4.0 m 的转盘和多排可调粗糙元,该试验段可精确模拟多种地貌下的大气边界层.

海洋平台模型缩尺比 $\lambda = 200$,正浮时坐标系 xOy 平面与海平面平行, x 轴向根据平台特点自定义. 风载荷测量时天平 x 方向与平台 x 轴对齐,刚性固定,调节风向角时天平随模型一起转动. 为节约篇幅,本文只针对单风速、 0° 风向角下的纵向风载荷系数 C_x 进行不确定度分析,其他方向载荷及不同风向角可按相同流程计算,试验示意图如图 1 所示.



图 1 风载荷试验示意图
Fig. 1 Schematic of wind load tests

2.1 数据模型

纵向风载荷系数 C_x 为纵向力 F_x 的无因次量,可按以下公式计算:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho_a v_0^2 A_T} \tag{4}$$

式中: ρ_a 为空气密度; v_0 为模型参考点风速(对应实际尺度 10 m 高处风速); A_T 为平台在风向法平面上的投影面积.

测量试验段内大气压力 p 、湿度 h 以及温度 T 后,可基于 CIPM-2007 公式^[10] 计算得到空气密度 ρ_a :

$$\rho_a = 3.486\,740 \frac{p}{ZT} (1 - 0.378\,0x_v) \tag{5}$$

式中: $p = p_t + p_s$, p_t 为试验段静压(参考室内大气), p_s 为室内绝对大气压; T 为热力学温度; Z 为压缩系数; x_v 为水蒸气的摩尔分数. 式(5)中各参数计算方法可参考文献^[10].

试验时按照挪威国家石油标准将风速剖面拟合为指数形式^[11]:

$$\frac{v(z)}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \tag{6}$$

$$v_0 = v_p \left(\frac{z_0}{z_p}\right)^\alpha \tag{7}$$

式中: $v(z)$ 为风洞中高度 z 处的风速; z_0 为模型参考高度,对应实际尺度 10 m; v_0 为 z_0 处风速; α 为指数,此试验要求 α 理论值约为 0.13; v_p 为监测点风速,测量值约为 18 m/s; z_p 为监测点的高度, $z_p = 1.5$ m. 大气边界层校测完成后,取风洞内特定监测点进行风速测量.

2.2 试验误差源分析

本试验由 3 大系统组合完成:风洞设备,测量系统及模型. 系统会产生独立或者相关的数据,数据经过处理后得到试验结果. 因此,误差源主要包括:

- (1) 风洞设备引起的误差,如风速、边界层剖面、湍流强度、气流偏角、静压与轴向梯度、洞壁效应等.
- (2) 测量系统引起的误差,如天平标定及测量、温湿度以及大气压力测量、风速测量等.
- (3) 模型误差,如模型型线、缩尺数据截断、模型加工精度、试验过程中的变形、安装偏角及高度差等.
- (4) 其他误差,如数据处理过程、雷诺数影响造成的误差等.

本文试验状态阻塞比小于 5%,因此不考虑洞壁效应干扰及修正. 此外根据变风速试验,此风速下雷诺数影响较小,不进行雷诺数修正. 误差源及流程图如图 2 所示.

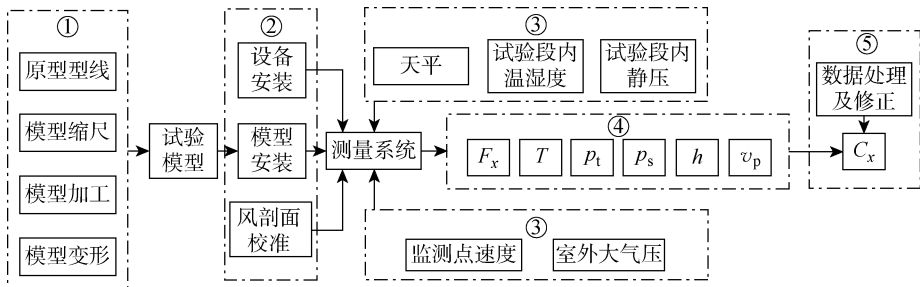


图 2 试验流程及误差源
Fig. 2 Flow chart and error sources of test

2.3 不确定度分析

根据数据模型,特定风向角下的风载荷系数是模型投影面积、纵向力、风剖面指数、监测点风速、温度、湿度以及压力等物理量的函数。 F_x 测量所受的影响因素很多,本文主要考虑天平标定,风向角以及重复性。

$$C_x =$$
$$f(F_x, A_T, T, h, p_t, p_s, v_p, z_0, z_p, \alpha) \quad (8)$$

2.3.1 模型及安装 海洋平台上层建筑结构较多且复杂,模型由许多细小的 3D 打印或精加工部件拼接而成。按照模型成型要求,其整体加工精度可达 $\pm 0.30\text{ mm}$,与原始图纸相比其精度在 $\pm 0.50\text{ mm}$ 。

模型误差会对 A_T, Z_0 产生影响,其相对不确定度分量分别为 u'_{11}, u'_{12} ,由相应标准不确定度分量除以 C_x 得到:

$$u'_{11} = \frac{u_{11}(C_x(A_T))}{C_x} = \frac{\partial C_x}{\partial A_T} \frac{u(A_T)}{C_x} =$$
$$-\frac{u(A_T)}{A_T} = -u'(A_T) \quad (9)$$

$$u'_{12} = \frac{u_{12}(C_x(z_0))}{C_x} = \frac{\partial C_x}{\partial z_0} \frac{\partial v_0}{\partial z_0} \frac{u(z_0)}{C_x} =$$
$$-\frac{2\alpha u(z_0)}{z_0} = -2\alpha u'(z_0) \quad (10)$$

模型投影面积 $A_T=0.0431\text{ m}^2$, $u(A_T)$ 按 B 类不确定度评定,根据加工精度分析其置信区间半宽为 $0.000\ 2\text{ m}^2$,均匀分布,因此 $u'(A_T)=0.28\%$ 。参考高度 $z_0=0.05\text{ m}$, $u(z_0)$ 按 B 类不确定度评定,其置信区间半宽为 0.15 mm ,均匀分布,因此 $u'(z_0)=0.17\%$, $u'_{12}=-0.04\%$ 。

模型与风向偏角 β 包含安装偏角与试验区域平均风向角,为分析其对 F_x 测量结果的影响,可进行变角度试验,获得灵敏系数。偏角 β 相对不确定度分量 u'_{13} 为

$$u'_{13} = \frac{u_{13}(C_x(\beta))}{C_x} =$$
$$\left(\frac{F_x(+\beta_i) - F_x(-\beta_i)}{2\beta_i}\right) \frac{u(\beta)}{F_x} \quad (11)$$

式中: β_i 为 β 的变化值, $u(\beta)$ 采用 B 类不确定度评定,根据本风洞流场校测结果及安装经验, β 置信区间半宽为 0.50° ,正态分布,则 $u(\beta)=0.25^\circ$,根据试验结果 $F_x=4.823\text{ N}$, $u'_{13}=0.17\%$ 。

2.3.2 天平标定 测力天平采用“端到端”模式标定(含传感器及数据采集系统),传感器为 SRI(宇立仪器)M3816BH 型六分量天平,力量程为 70.0 N 。数据采集系统为东华 DH5927N 动态信号测试分析系统,24 位分辨率。标定结果如表 1 所示,表中: M

为砝码质量; F_c 为天平标定测量结果; v_i 为第 i 次测量残差。根据等精度测量不确定度评定方法计算天平标定不确定度,天平标定不确定度为 $u(F_x)$ 的独立分量之一。天平标定相对不确定度分量 u'_2 可按下式计算:

$$u(F_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-2}} \approx 0.005\text{ N} \quad (12)$$

$$u'_2 = \frac{u_2(C_x(F_c))}{C_x} = \frac{\partial C_x}{\partial F_x} \frac{u(F_c)}{C_x} =$$
$$\frac{u(F_c)}{F_x} = 0.10\% \quad (13)$$

式中: n 为测量总次数。

表 1 天平标定结果
Tab. 1 Calibration results of balance

序号	M/kg	F_c/N	$v_i=9.807M-F_c$
1	0	0.007	4.863×10^{-5}
2	0.5	4.907	9.975×10^{-6}
3	1.0	9.807	1.257×10^{-7}
4	1.5	14.710	8.683×10^{-7}
5	2.0	19.611	1.043×10^{-5}
6	2.5	24.513	2.040×10^{-5}
7	3.0	29.417	1.836×10^{-5}
8	3.5	34.320	2.079×10^{-5}
9	4.0	39.223	2.338×10^{-5}
10	5.0	49.037	4.851×10^{-6}
11	6.0	58.850	6.771×10^{-5}

2.3.3 风剖面及风速测量 在试验开始之前,需进行风剖面校准,得到满足试验要求的风场。风剖面准确程度对于风载荷试验至关重要,但实际风剖面校准后,按测点拟合得到的函数通常不会与目标值完全一致,且拟合得到的确定系数 R^2 通常也不为 1,因此需评定风剖面指数的不确定度。指数 α 相对不确定度分量 u'_{31} 为

$$u'_{31} = \frac{u_{31}(C_x(\alpha))}{C_x} =$$
$$-\left(\frac{v_0(+\alpha_i) - v_0(-\alpha_i)}{2\alpha_i}\right) \frac{2u(\alpha)}{v_0} \quad (14)$$

式中: α_i 为风剖面指数 α 置信区间半宽,根据风洞的试验经验以及校准结果,其值为 0.005 ,按正态分布 $u(\alpha)=0.002\ 5$,则 $u'_{31}=0.85\%$ 。

监测点风速 v_p 按 A 类不确定度评定,进行 12 次独立测量,测量结果如表 2 所示。测量结果相对不确定度分量 u'_{32} 计算式为

$$u'_{32} = \frac{u_{32}(C_x(v_p))}{C_x} = \frac{\partial C_x}{\partial v_0} \frac{\partial v_0}{\partial v_p} \frac{u(v_p)}{C_x} =$$
$$-2u'(v_p) = -0.12\%$$

(15)

表 2 v_p 测量结果

Tab. 2 Measurement results of v_p

序号	$v_p/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	18.017
2	17.992
3	18.018
4	18.017
5	18.006
6	18.005
7	18.002
8	17.992
9	18.01
10	17.986
11	17.995
12	18.002

2.3.4 空气密度 试验时根据测量得到的温度、湿度($h, 0 \leq h \leq 1$)以及气压计算空气密度. 空气密度相对不确定度分量为

$$u'_4 = \frac{u_4(C_x(\rho_a))}{C_x} = \frac{\partial C_x}{\partial \rho_a} \frac{u(\rho_a)}{C_x} = -u'(\rho_a)$$

(16)

气压、温度、湿度以及其他假定与公式计算的相对不确定分量分别为 u'_{41} 、 u'_{42} 、 u'_{43} 及 u'_{44} , 根据式(5)及文献[10]有:

$$u'_{41} = \frac{u_p(\rho_a)}{\rho_a} \approx 1 \times 10^{-5} u(p)$$

(17)

$$u'_{42} = \frac{u_T(\rho_a)}{\rho_a} \approx -4 \times 10^{-3} u(T)$$

(18)

$$u'_{43} = \frac{u_h(\rho_a)}{\rho_a} \approx -9 \times 10^{-3} u(h)$$

(19)

$$u'_{44} \approx 2.2 \times 10^{-5}$$

(20)

u_p 、 u_T 以及 u_h 按 B 类不确定度评定. 试验段气压不确定度主要来源于室内绝对大气压力测量误差, 试验段内静压测量误差可忽略, 大气压力计测量置信区间半宽 550 Pa, 正态分布, 则 $u_p = 275$ Pa. 温度测量置信区间半宽为 0.25 °C, 湿度测量置信区间半宽 0.025, 正态分布, 则有 $u_T = 0.125$ K, $u_h = 0.0125$. 综上, $u'_p(\rho_a) = 0.28\%$, $u'_T(\rho_a) = -0.05\%$, $u'_T(\rho_a) = -0.01\%$, $u'_{44} = -0.28\%$, 大气压力测量对于空气密度计算影响最大.

2.3.5 重复试验 在本试验中包含许多未考虑的不确定度因素, 为更好地估计不确定度, 需要进行重

复试验计算标准差, 本试验进行了 8 次独立试验. 风剖面, 模型等因素在各次独立重复试验中尽可能保证完全一致. 对试验过程中其他测量的物理量, 如温度、气压、监测点风速等进行多设备多次测量, 以减小随机效应, 且在试验后对试验结果进行换算, 尽可能减小其他误差源对重复试验不确定度的影响. 换算结果如表 3 所示.

表 3 F_x 测量结果(换算为等风速, 等密度值)

Tab. 3 Measurement results of F_x (at a constant wind speed and air density)

序号	F_x/N
1	4.823
2	4.815
3	4.897
4	4.885
5	4.809
6	4.806
7	4.847
8	4.868

根据 A 类不确定度评定方法可得重复试验相对不确定度分量 u'_5 :

$$u'_5 = \frac{u_5(C_x(F_x))}{C_x} = u'(F_x) = 0.74\%$$

(21)

2.3.6 合成不确定度及扩展不确定度 依据以上分析结果, 对不确定度进行汇总, 如表 4 及图 3 所示, 图 3 中 λ 为相对不确定度分量; φ 为累计占比, 并根据相对不确定度分量占合成不确定度的比例 e 对各误差源进行评级. 根据影响程度大小可分为: I 级($e \geq 25\%$)、II 级($25\% > e \geq 2.5\%$)、III 级($2.5\% > e \geq 0.25\%$)以及 IV 级($e \leq 0.25\%$), 其中 I 级影响最为显著, II 级影响程度次之, III 级影响程度一般, IV 级误差源可忽略.

根据表 4 及图 3 的分析结果, 单次测量风载荷系数表达式为: $C_x = 1.496 \pm 0.036$, 置信水平 95%. 其中风剖面占总合成不确定度比例为 48.67%, 为最大影响因素, 因此试验结果对比及换算要以风剖面一致为前提, 且有必要建立统一的风剖面评定标准. 重复试验不确定度占比为 36.89%, 表明不同安装及其他试验状态对试验结果也有较大影响.

由于实验条件及成本限制, 分析流程中未包含流场均匀性、雷诺效应、湍流度以及静压梯度等因素, 实际测量不确定度会大于 2.44%, 风载荷试验

表 4 不确定度汇总
Tab. 4 Summary of uncertainties

项目	子项目	类型	参数	取值/ %	e / %	评级
模型形状	投影面积	B	u'_{11}	0.28	5.28	II
	参考高度	B	u'_{12}	0.04	0.11	IV
模型安装及风向		B	u'_{13}	0.17	1.95	III
天平测量	标定	A	u'_2	0.10	0.67	III
空气密度	气压	B	u'_{41}	0.28	5.28	II
	温度	B	u'_{42}	0.05	0.17	IV
	湿度	B	u'_{43}	0.01	0.01	IV
风速	风剖面	B	u'_{31}	0.85	48.67	I
	监测点速度	A	u'_{32}	0.12	0.97	III
重复试验	重复性(取单次结果)	A	u'_5	0.74	36.89	I
合成不确定度			u'_c	1.22	100	—
扩展不确定度(95%置信水平, $k=2$)			U	2.44	—	—

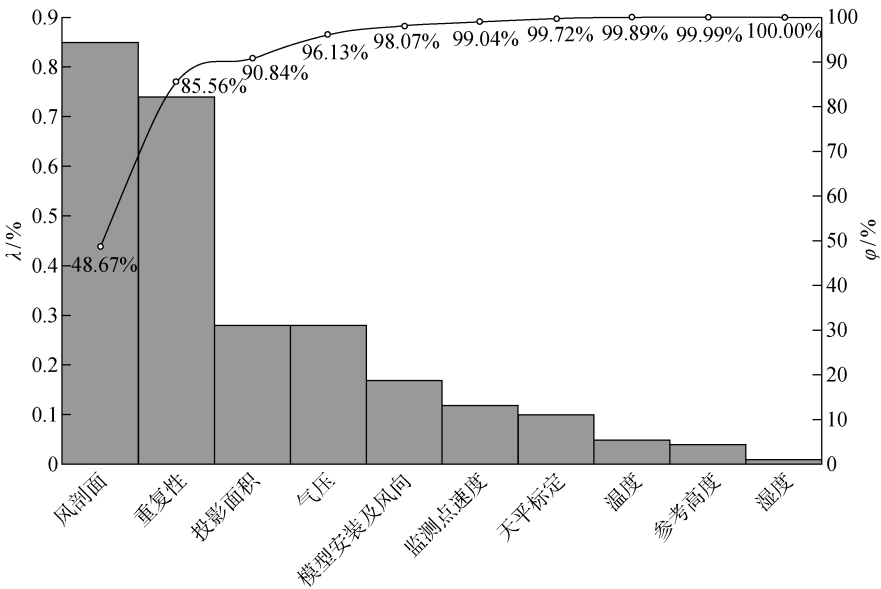


图 3 相对不确定度分量及占比
Fig. 3 Relative uncertainty components and cumulative proportion

不确定度明显高于船舶与海洋工程领域某些流体试验不确定度. 由于实际海域风环境更加复杂, 基于安全等方面的考虑, 在实际应用场景中会考虑一定安全系数, 更加全面的不确定度分析有助于建立更合理的评估机制.

3 结论

本文针对某型海洋平台风载荷试验, 进行风载荷试验不确定度分析, 主要结论如下:

(1) I 级与 II 级误差源引起的不确定度占合成不确定度比例为 96.13%, 表明风剖面、模型精度、气压测量以及天平其他测量状态对风载荷测量有较

大影响.

(2) 当成本一定时, 模型精度无法持续提高. 此时为减小 $u'(A_T)$, 在试验条件允许的情况下应尽可能增大模型尺寸. 此外, 可考虑对上层建筑进行简化, 可提高模型精度, 增加投影面积准确性, 降低试验与换算过程中的不确定度.

(3) 风剖面对风载荷测量影响最大, 其校核至关重要, 为增加风剖面准确性, 测点应尽可能多, 且有必要形成风剖面评定的量化标准.

(4) 气压测量对密度影响较大, 应采用高精度气压测量设备, 提高空气密度的准确性.

(5) 整个试验过程中影响不确定度的因素较

多,不同状态试验结果差别较大,试验时应尽量保证状态一致。

本文研究结果对于确立海洋平台风载荷不确定度分析标准流程有一定参考价值,对于改善试验精度有一定指导意义,但研究内容中还有诸多误差源未考虑在内,例如,风洞湍流强度、轴向静压梯度与流场均匀性等,更加全面的不确定度分析将在未来展开。

参考文献:

[1] 付德健,冯士伦,毛建斌,等. 海洋工程风载荷计算方法[J]. 中国海洋平台, 2019, 34(5): 89-94.
FU Dejian, FENG Shilun, MAO Jianbin, *et al.*. Calculation methods about wind load in ocean engineering [J]. **China Offshore Platform**, 2019, 34(5): 89-94.

[2] 彭超,冯光,郑文涛,等. 半潜式钻井平台风载荷 CFD 预报[J]. 船舶工程, 2020, 42(Sup. 1): 420-423.
PENG Chao, FENG Guang, ZHENG Wentao, *et al.*. CFD prediction of wind load on semi-submersible drilling unit[J]. **Ship Engineering**, 2020, 42(Sup. 1): 420-423.

[3] 乔丹,马宁,顾解仲. 不同堆垛模式下集装箱船风载荷特性研究[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(3): 105-115.
QIAO Dan, MA Ning. GU Xiechong. Study on wind load characteristics for a container ship under different stacking modes[J]. **Chinese Journal of Ship Research**, 2019, 14(3): 105-115.

[4] ITTC. ITTC-Recommended procedures and guidelines; Guide to the expression of uncertainty in experimental hydrodynamics[S]. Wuxi: ITTC, 2017.

[5] 张立,陈建挺,陈伟民,等. 拖曳水池标模阻力复合航次试验不确定度分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(4): 38-43.
ZHANG Li, CHEN Jianting, CHEN Weimin, *et al.*. Uncertainty analysis of ship model repeated resistance tests in towing tank[J]. **Ship Engineering**, 2020, 42(4): 38-43.

[6] 刘晗. 船舶近岸壁航行操纵性水动力与运动稳定性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
LIU Han. Manoeuvring hydrodynamics and stability of vessels navigating in proximity to the bank[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

[7] LIU H, MA N, GU X C. Uncertainty analysis for ship-bank interaction tests in a circulating water channel[J]. **China Ocean Engineering**, 2020, 34(3): 352-361.

[8] 童寿龙,陈作钢. 循环水槽船模阻力试验不确定度分析[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 144-152.
TONG Shoulong, CHEN Zuogang. Uncertainty analysis of ship model resistance measurement in circulating water channel[J]. **Chinese Journal of Ship Research**, 2020, 15(4): 144-152.

[9] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
LI Jinhai. Error theory and measurement uncertainty analysis[M]. Beijing: China Metrology Press, 2003.

[10] PICARD A, DAVIS R S, GLÄSER M, *et al.*. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007) [J]. **Metrologia**, 2008, 45(2): 149-155.

[11] Det Norske Veritas. Environmental conditions and environmental loads; DNV-RP-C205 [S]. Norway: DNV, 2017.

(本文编辑:陈晓燕)