

# 涠 11-4 平台在极端环境条件下的人员工作安全性评估\*

申仲翰 刘玉标 崔瑞意

(中国科学院力学研究所 北京市 100080)

**摘要** 本文以位于中国南海的涠 11-4 平台为对象,进行了在强台风条件下的平台关键部位动力响应及环境参数的监测;并以测试数据为基础完成了动态建模与分析计算,给出了极端环境条件下生活模块的最大动态响应;评估了工作人员的适应能力及振动对人体健康与安全的影响。

**关键词** 动力响应 监测 极端环境条件 健康与安全

**中图法分类号** TB 533

## 1 引言

对于以导管架为主要承力结构的固定式平台,现代设计与建造技术已充分保证了其在强度方面的安全;但在特大风暴环境中,工作人员对平台动态响应的适应能力却研究甚少,缺乏科学的预测和分析方法。为此,我们针对涠 11-4 平台进行了如下内容的研究。

通过对平台生活模块等关键部位的主要动态参量的测试及对平台结构进行整体动态响应分析,给出特大风暴条件下平台可能产生的最大动态响应及所在频率范围。

根据上述分析结果,参照人体对动态环境适应性的有关标准和资料,对平台工作人员的适应能力进行综合分析和评估。

总体研究过程包括现场测试、动态计算和评估分析三个阶段。

## 2 平台生活模块动态测试及分析

生活模块是平台工作人员于风暴期间集中生活与工作的场所,为了准确了解涠 11-4 平台上层部位特别是生活模块的动态性能,我们于 1996 年 9 月 13 日至 25 日,针对生活模块的基础和顶部进行了速度、加速度监测及风参数的同步记录。在此期间,正值 9618 号台风经过涠 11-4 海域,风浪巨大,接近 12 级,从而在风速为  $32\text{m/s}$  的特大风暴条件下,完成了平台真实动态参数的测定,取得了不可多得的珍贵数据。

### 2.1 主要测试方案

测点选在生活模块的顶部及底部,每个测点按水平方向  $x$  (平台纵向)和  $y$  (平台横向)分

\* 收稿日期: 1998-2-16

申仲翰 男 59 岁 研究员

别配置传感器,这是具有超低频、高灵敏度的 DL S-200 型多能力平衡拾振元件,兼有速度和加速度的双重输出功能。有关测点布局可参看图 1。

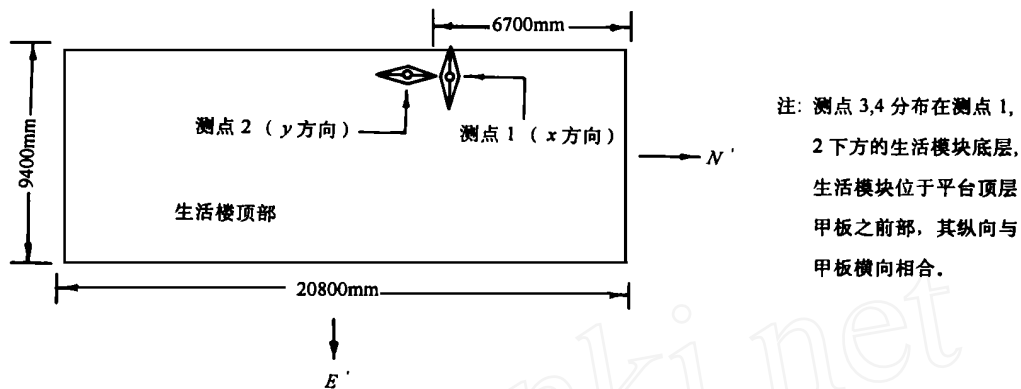


图 1 测点分布示意图

### 2.2 测试结果及分析

监测工作历时 13 天,各项记录 70 次,监测期间的风速分布示于图 2。由风速-时间曲线可知,最大风速出现在 9 月 20~ 21 日,最大平均风速 26m/s,最大阵风速度 32m/s。根据风浪相关规律,通过计算并结合现场观测可得知,相应波高约为 6m。在如此环境载荷条件下,平台产生了相当的动态响应,生活模块顶部 x 方向最大峰值加速度为 0.025m/s<sup>2</sup>,相应的平均加速度为 0.005m/s<sup>2</sup>,这表明大的加速度幅值发生的时间较短。另外由图 2 的风速与生活模块顶层加速度相对于时间的分布曲线还表明,风速与加速度之间存在着相关性。

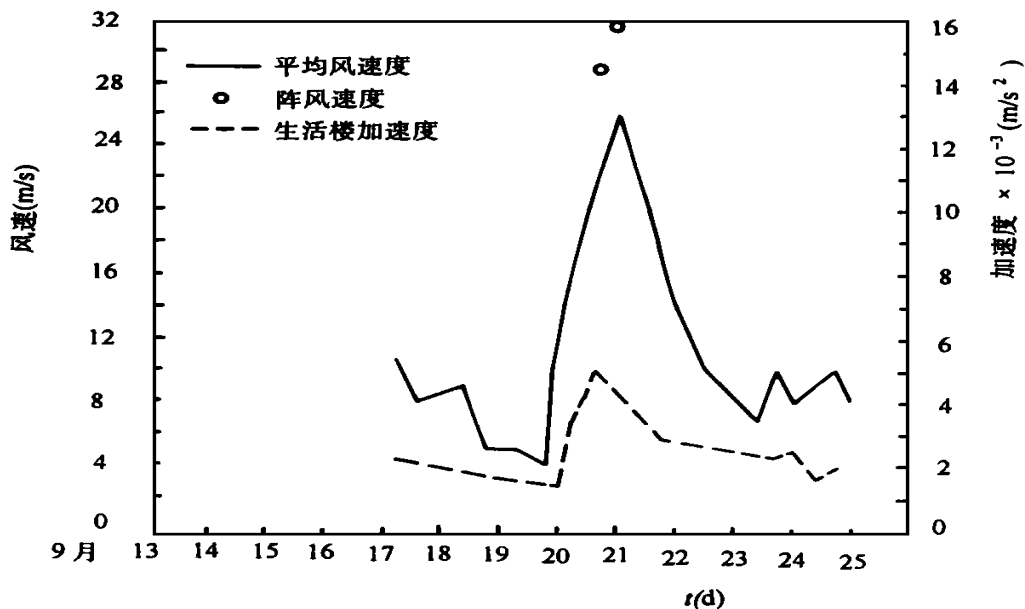
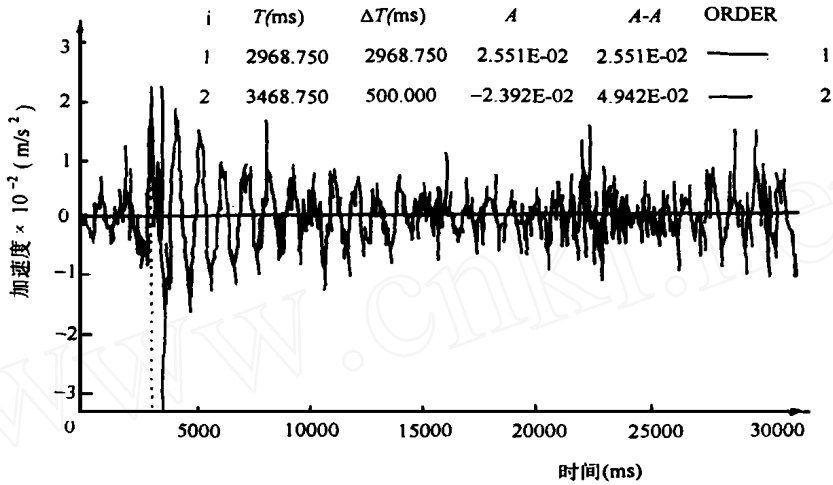
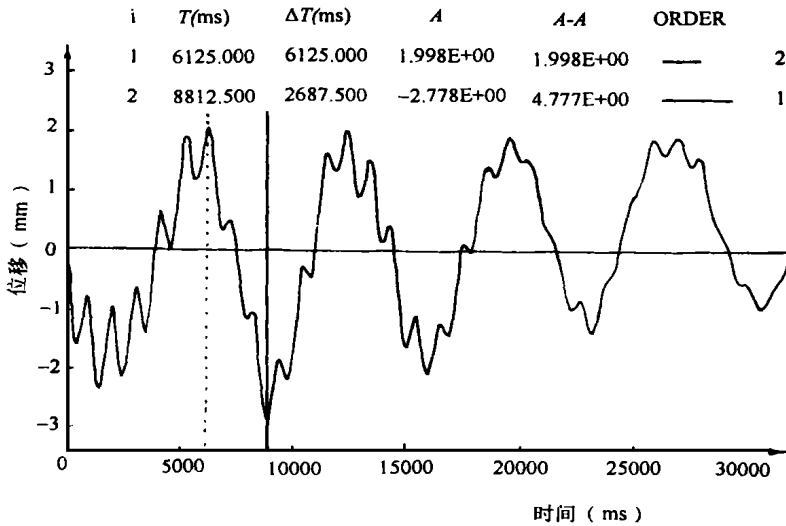


图 2 风速与生活模块顶部加速度的时间历程曲线

为对测量结果作出形象化表示, 现将测值处理成各种图形和曲线, 图 3a 和图 3b 分别表示生活模块顶层测点 1 的加速度及位移相对于时间的分布曲线。其中最大峰值加速度为  $2.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ , 最大峰值位移为  $2.4 \times 10^{-3} \text{ m}$  (即取最大峰——峰值  $4.77 \times 10^{-3} \text{ m}$  之半), 从加速度到位移的变化表明, 高频成分逐渐减少, 低频成分明显增加。



a 测点 1 加速度~时间曲线



b 测点 1 位移~时间曲线

图 3

图 4 中的 a, b 两组分别表示测点 1 和 2 的速度频谱, 分析表明,  $x$  向速度的主峰能频率为  $0.1563\text{Hz}$  和  $0.9688\text{Hz}$ ,  $y$  向速度的主峰能频率为  $0.1563\text{Hz}$  和  $1\text{Hz}$ 。其中  $0.1563\text{Hz}$  为无耦合情况下波浪力激励平台所产生的振动频率,  $0.9688\text{Hz}$  及  $1\text{Hz}$  分别为平台纵向和横向弯曲固

有频率。频谱图 b 中还含有一个能量较小的 1.4063Hz 的频率,这是平台的一阶扭转频率。另外在 a, b 两图中还分别有 4.0938Hz 和 4.1250Hz 的频率,它们分别对应生活模块的横向和纵向弯曲,由于这一能量很小,因此只在顶层测点上有所反应。

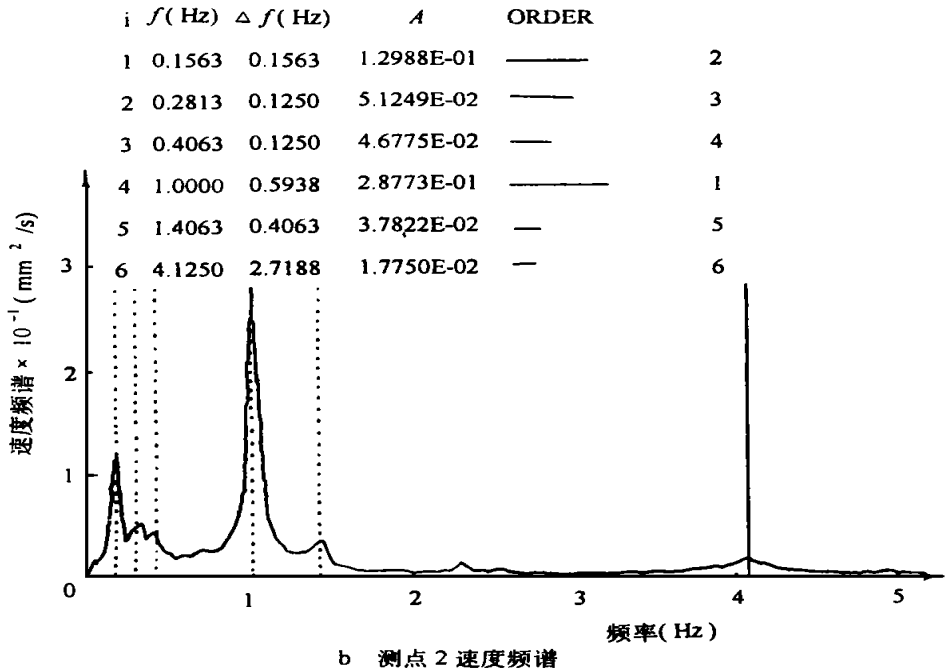
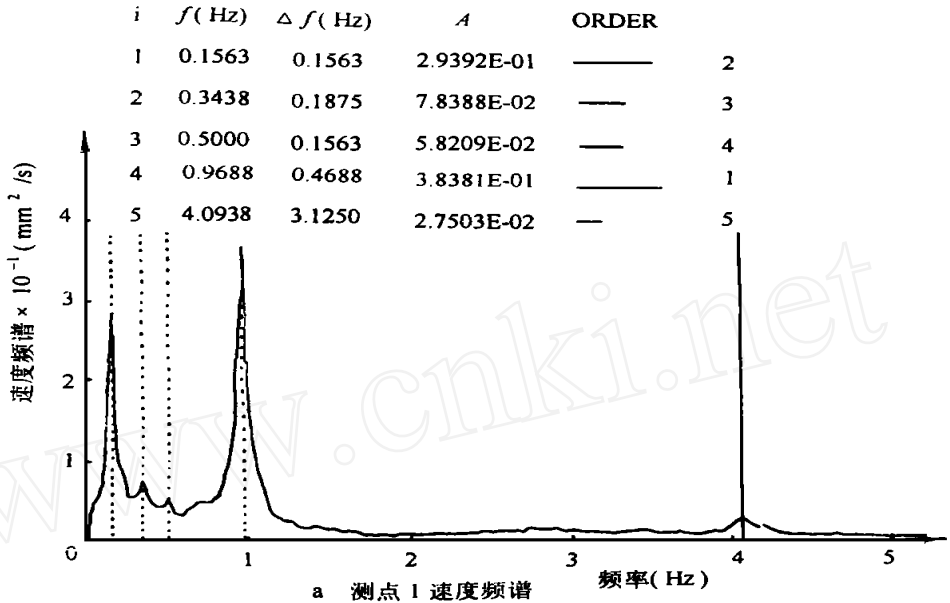


图 4

### 3 平台动力响应分析

#### 3.1 计算模型与方法的建立

为了解平台在各级风浪作用下的动力响应,首要的工作是建立一套合理的有限元模型,并藉助于平台与运输船相撞的响应测试,求出平台结构的模态阻尼<sup>[1]</sup>,最后通过测试结果验证模型的正确性。

表 1

阶数	模态	频率(Hz)	阻尼系数
1	x 向弯曲	1.001	0.016
2	y 向弯曲	1.084	0.016
3	绕 z 轴扭转	1.366	0.016

通过实施上述过程,得出列于表 1 的平台有限元模型参数,其中前三阶频率值为 1.001, 1.084, 1.366Hz, 与相应的监测值 0.9688, 1, 1.4Hz 相比,最大误差为 8%;此外还通过测量得到平台结构的实际阻尼参数为 0.016。上述表明,这一有限元模型是采用试验结果进行修正后而最终确定的,从而使得在此基础上进行的动力响应分析更接近实际,更为可信。又由于修正后的模型已考虑了附连水质量和海水阻尼,所以根据 Moreson 公式,在波浪力的表达式中去掉了结构与水的耦合项,而简化表达为

$$f_e = \frac{\pi}{8} C_m \rho D^2 L_e N_e V + \frac{1}{4} C_D \rho D L_e |N_e V| N_e V \quad (1)$$

其中  $f_e = \begin{Bmatrix} f_{ex} \\ f_{ey} \\ f_{ez} \end{Bmatrix}$  为圆管单元等效波浪力向量。

在式(1)中,  $C_m$  为惯性系数,  $C_D$  为阻力系数,  $\rho$  为海水密度,  $D_e$  为单元外径,  $L_e$  为单位长度,  $V$  为单元所处水质点速度,  $N_e$  为单元法向矩阵,  $N_e = 1 - \{C\}\{C\}^T$ 。

$C = \begin{Bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{Bmatrix}$  为单元的方向余弦。

由于单元上各点有不同的水质点速度,所以通常将单元分成几段而计算波浪力,然后将各段波浪力叠加后施于单元两端,最终由交汇于节点的各单元力合成求出节点力向量

$$\{F(t)\} = f_e(t) \quad (2)$$

在上述解法中,水质点速度  $V$  是采用线性的 Airy 波理论由波高与波周期等参数求得的。而波高和周期可根据水上 10m 的风速由查表法得到<sup>[2]</sup>,有关结果示于表 2。

表 2

$U_{10}$ (m/s)	5	10	15	20	25	30	40	59
最大波高 $H_{max}$ (m)	0.75	2.05	3.5	5.3	6.9	9	12.9	15
波浪周期 $T$ (s)	3	5.1	6.8	8.2	9.4	10.8	12.8	14

### 3.2 生活模块动态响应

通过上述方法的使用,可计算得出生活模块在各种风浪作用下的动态响应,现以 $U_{10}=21.6\text{m/s}$ (相当于实测值 $U_{51}=26\text{m/s}$ )及 $U_{10}=59\text{m/s}$ 的两种环境条件为代表,将计算结果列于表 3,前者还与实测响应进行了比较。

表 3 生活模块动态响应

$U_{10}(\text{m/s})$	$H_{\max}(\text{m})$	响应计算值		响应实测值	
		加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	位移 ( $\text{m}$ )	加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	位移 ( $\text{m}$ )
21.6	5.8	0.028	0.0027	0.025	0.0024
59	15	0.25	0.04		

联系前文,平台有限元模型的主要频率与平台实测频率符合程度很好;又由表 3 所示,在 $U_{10}=21.6\text{m/s}$ 的特大风暴情况下,响应计算值约比实测值大 10%,这就表明,有限元计算模型有相当好的精确度,用此模型计算百年一遇( $U_{10}=59\text{m/s}$ )情况下生活模块的动态响应是可行的,而且由于计算值偏高会使计算结果相对保守,这对人员工作安全评估是有利的。

平台动态响应与环境条件密切相关,确切地说,加速度与位移将随风速的提高而加大,有代表性的几组数据列于表 4。

表 4 不同风速条件下的平台动态响应(振动环境)

风速( $\text{m/s}$ )		59	45.1	40.2	35.8	30
相应浪高( $\text{m}$ )		15	13.4	12.9	11.2	9
加速度	幅值( $\text{m/s}^2$ )	0.25	0.15	0.13	0.10	0.08
	峰能频率( $\text{Hz}$ )	1	1	1	1	1
位移	幅值( $10^{-3}\text{m}$ )	4.0	3.0	2.8	1.8	1.1
	峰能频率( $\text{Hz}$ )	0.070	0.075	0.078	0.085	0.093
振动方向		水平	水平	水平	水平	水平

## 4 人员工作安全性评估

### 4.1 人体对振动环境的适应标准

一般说,人体对振动环境的适应能力取决于各种因素,其中最为重要的有下列几点,即振动的方向、频率、强度和持续时间等。因此以上述因素为依据,以大量试验和实际统计资料为基础,通过工程、力学、医学工作者的合作努力,可制定出各种标准。如 ISO 国际标准以及国内外已有的船舶振动标准等。

由于环境作用于人体的物理响应随着人的姿态而改变,并且伴有生理和心理反应的生物变化,从而使振动的安全近似极限在性质上成为统计量,因此通常将其概括为实用的容限标准,以适应工程需要。

估计人体承受振动能力的一般指南已经给出了国际标准(ISO),这就是人体承受全身振动的评价基准<sup>[5]</sup>。它给出了人体承受全身振动时在不同频率、不同振动方向和不同暴露时间条件下的忍受基准。也就是针对下述项目的极限状态:(1)保持健康或安全,称做“承受极限”。(2)保持工作效率,称作疲劳-工效降低界限。(3)保持舒适,即减低舒适性的界限。图 5 所示为

人体沿横向(水平)承受振动的标准<sup>[4]</sup>。由图可见,上述三个界限都是平均每日承受时间的函数,对于每天一分钟的短的承受时间,其界限最高,而对于每天承受24小时,即连续承受的状态,则界限最低。将“疲劳-工效降低限”提高一倍,即可求得关于健康和安全的承受界限,若将“疲劳-工效降低限”除以3.15,即为保持舒适的界限。

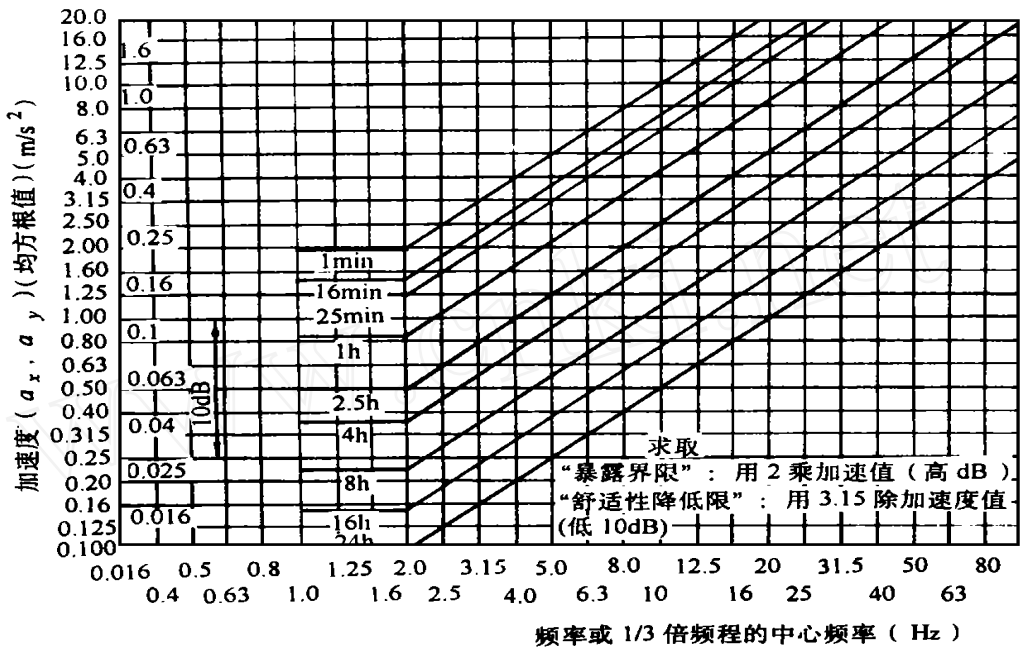


图5 人体横向加速度界限元“疲劳-工效降低限”

#### 4.2 人体对平台动态环境的适应性评估

鉴于人体对振动的适应性与其持续时间关系甚大,因此在研究这一问题时以稳态振动的强度为主。按风速分别为 35.8m/s、40.2m/s、45.1m/s 和 59m/s 的几种情况进行分析。先由表 4 查出相应的生活模块稳态加速度值为 0.10m/s<sup>2</sup>、0.13m/s<sup>2</sup>、0.15m/s<sup>2</sup> 和 0.25m/s<sup>2</sup>。又考虑振动为水平方向(人体之横向),所以依据图 5 所示“疲劳-工效降低限”的标准,查表得知与上述加速度相应的每天允许的振动持续时间分别为 24 小时、18 小时、16 小时和 6 小时。这些数值远远大于观测所得的相应风速下每天内风的实际作用时间,也就是说,包括在极端条件时的各类风速下,平台生活模块的振动效应均低于人体的“疲劳-工效降低限”。

图 6 所示为我国国家标准“船体振动评价基准”<sup>[4]</sup>,它用于船上人员正常工作和居住场所对振动的评价。由图可见,在 1Hz(60r/min)的频率处,Ⅰ类船的振动加速度上限线约为 0.28m/s<sup>2</sup>,因此,作为极端环境条件下平台生活模块的最大振动加速度是 0.25m/s<sup>2</sup> 的情况,其符合Ⅰ类船的振动标准,是满足安全与舒适性要求的。

又由中国船舶科学研究中心所提出的人员对振动的忍受能力衡准(见表 5)可知<sup>[5]</sup>,不同类型人员对振动加速度之忍受能力是不一样的。以我们所关心的平台横向(水平)加速度为例,表中按轻手工劳动,重手工劳动,智力工作,渡船旅客,邮船旅客五个档次分别列出,针对生活

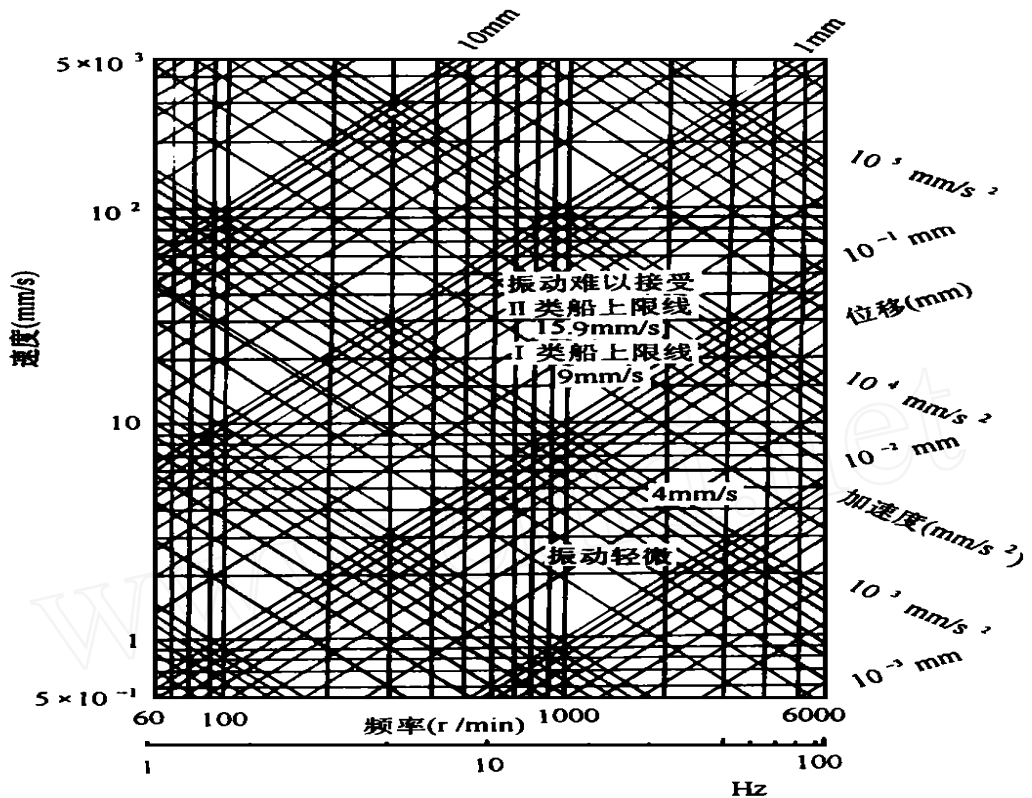


图 6 船体振动评价基准

模块顶层极端条件下的最大振动  $0.025g$  进行比较。它仅为智力工作衡准的一半, 轻手工劳动衡准的 25%, 甚至比邮轮旅客的衡准  $0.03g$  还要小, 因此在动环境适应方面是不存在问题的。

表 5 人员的忍受能力衡准

人员种类	极限衡准(均方根值)			说 明
	垂向加速度( $g$ )	横向加速度( $g$ )	横摇( $^{\circ}$ )	
轻手工劳动	0.20	0.10	6.0	适应船舶运动的人从事轻手工劳动。不能长期忍受。迅速疲劳。
重手工劳动	0.15	0.07	4.0	例如在渔船或供应船上工作。
智力工作	0.10	0.05	3.0	不那么适应船舶运动的人从事智力工作。要求更多精力的工作。船员能长期忍受。不习惯船舶运动的人经受半小时的国际标准。
渡船旅客	0.05	0.04	2.5	不习惯于船舶运动的人经受 2 小时的国际标准。 10% 左右的成年人发生运动病症。
邮轮旅客	0.02	0.03	2.0	老年人。 接近于发生呕吐的临界值下限。低于此值就不太会发生呕吐。



## 5 结 论

1. 实际监测得到, 在平均风速  $26\text{m/s}$ , 阵风  $32\text{m/s}$  的特大风暴条件下, 平台生活模块之最大加速度为  $0.025\text{m/s}^2$

2. 以测试为基础的建模与计算分析结果给出, 在百年一遇的极端环境条件下, 平台生活模块的最大稳态水平振动加速度为  $0.25\text{m/s}^2$ 。

3. 在各级风暴中, 甚至在百年一遇的极端条件下, 平台振动量级均未达到“疲劳-工效降低限”, 更远离健康和安全界限。从船用振动标准衡量, 也属于允许的振动范围。

4. 在平台结构强度有充分保证的前提下, 仅就室内动态环境与人的关系而论, 平台生产人员对极端条件下的动态环境有较好的承受能力和适应性。

## 参考文献

- 1 申仲翰, 赵强, “溇 11-4 平台结构动态响应监测结果分析”, 《海洋工程》, 1997(3).
- 2 “海洋石油工程环境-水文分析计算”, 天津大学水文水利学教研室编, 石油工业出版社出版
- 3 C. M. HARRIS “Shock and Vibration Handbook” second Edition Mc Graw Hill Book Company, 1976
- 4 唐照千, 黄文虎等, “振动与冲击手册”第三卷, 国防工业出版社出版, 1992 年 6 月
- 5 石理国, 戴仁之, “海洋平台性能与人员忍受能力评估方法浅见”, 中国船舶科学研究中心, 1997 年 3 月

## AN APPRAISAL OF PERSONAL SAFETY ON W-11-4 PLATFORM UNDER EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITION

Shen Zhonghan Liu Yubiao Cui Ruiyi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** In this paper W-11-4 platform encountering violent typhoon in South China Sea is taken as an example, the dynamic response of the key position of the platform and environmental parameters have been monitored. On the basis of measurements we have established finite element dynamic model of the platform and made analysis, calculated maximum dynamic response of platform's living building under extreme environmental condition. Lastly, we have assessed workers personal adaptability to vibration behaviour of the platform and influence of vibration on human's health and safety.

**Key words** dynamic response monitor extreme environmental condition health and safety