

API RP 2A 设计参数的合理选取

谢彬于皓

中海石油海洋工程公司, 天津塘沽, 300452

摘要 针对 API RP 2A 第 20 版关于波流力分析所做的重大修改, 概述了 API RP 2A 第 20 版与第 19 版关于波浪静力与海流静力分析设计准则的异同点, 通过工程实例的分析比较, 定量地分析了各设计参数及其组合对设计荷载的影响, 为工程设计人员更合理地选择设计标准和设计参数提供参考。

关键词 波流力 表观波周期 遮蔽系数 阻挡系数

API RP 2A 作为我国等同采用的行业标准, 是目前海洋工程结构设计中的主要依据和基准。API RP 2A 第 20 版较第 19 版做了较大的修改, 其中较为主要的部分包括波流力设计准则。修改后的设计准则对设计荷载的影响如何, 是标准的应用者需要了解的问题, 也是实现优化设计的前提条件。本文在波流静力分析方法、波浪运动系数、表观波浪周期、拖曳力及惯性力系数、隔水套管的遮蔽系数和流的阻挡系数等方面比较了 API RP 2A 19 版与 20 版的异同点, 并通过工程实例的分析比较, 定量地分析了各设计参数及其组合对设计荷载的影响, 以便加深设计人员对标准的理解和有利于在设计中更合理地选择设计标准和设计参数。

1 波流静力分析方法

波流荷载是设计海洋桩基平台的主要环境荷载之一。根据 API RP 2A 第 20 版, 计算作用在固定平台上的设计波流力的具体步骤如图 1 所示, 当波长与构件直径之比大于 5 时, 波流力可按 Morison 方程计算,

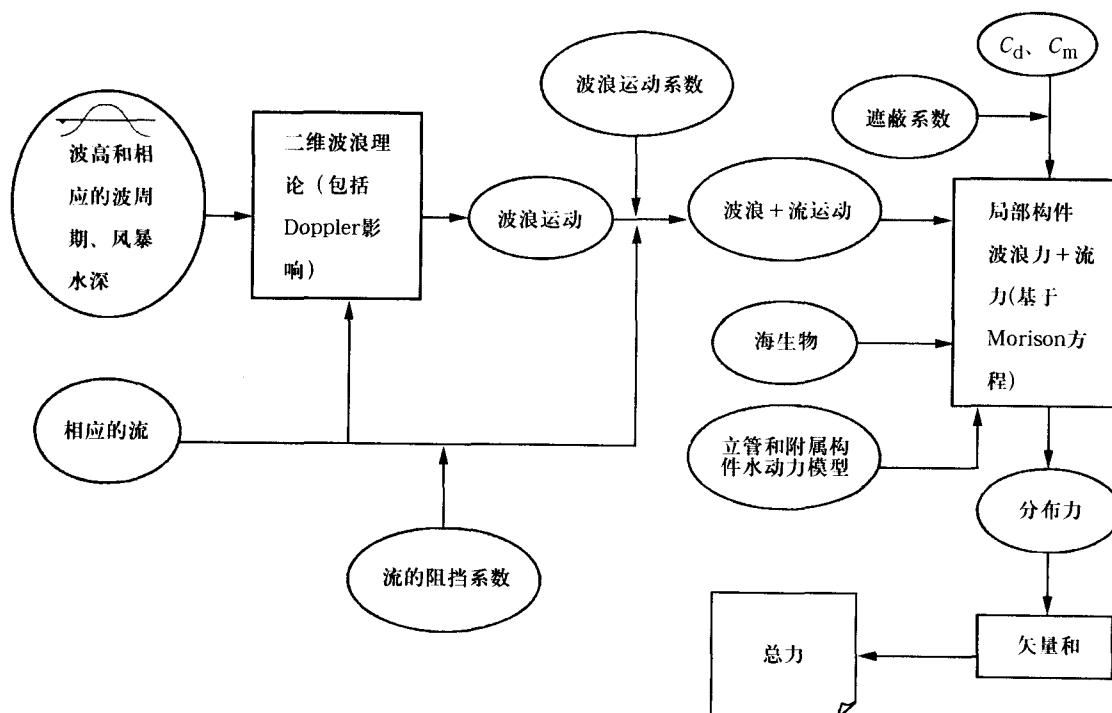


图 1 设计波流力的步骤

其公式为

$$F = F_D + F_I = C_d \frac{W}{2g} Du |u| + C_m \frac{W}{2g} \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\delta u}{\delta t}$$

式中: F ——垂直作用于构件轴线单位长度上的水动力矢量;

F_D ——垂直作用于构件轴线并在构件轴线和速度 u 平面内单位长度上的拖曳力矢量;

F_I ——垂直作用于构件轴线并在构件轴线和速度 du/dt 平面内单位长度上的惯性力矢量;

C_d ——拖曳力系数;

W ——水的重度;

g ——重力加速度;

A ——圆杆轴线单位长度上的投影面积(对圆形杆件为 D);

V ——圆杆单位长度上的体积(对圆形杆件为 $\pi D^2/4$);

D ——包括海生物在内的圆形杆件的有效直径;

u ——垂直于构件轴线的水流速度矢量分量;

C_m ——惯性力系数;

$\delta u/\delta t$ ——水流加速度矢量在与构件轴线垂直方向上的矢量。

作用在结构上的波流力的大小除与结构所在海区的环境条件以及结构自身的特征相关外,还取决于设计标准和参数的选取。第20版关于波流力的设计准则较第19版有诸多方面的修改,以下分别予以简述。

1.1 表观波浪周期

与波浪同向的流能使波长加大,而与波浪反向的流能使波长缩短。当波浪在均匀流相同方向上传播且 $0.01 \leq d/gT^2 \leq 0.1$ 时,根据第20版中的图2.3.1-2可以得出波浪的表观波周期。当 $d/gT^2 < 0.01$ 时,可以使用公式 $T_{app} = (1 + V_I/(g \times d)^{0.5})T$ 来计算波浪的表观波周期。在实际工程的设计中,表观波周期可以由 SACS 结构分析软件自动运算得出。

1.2 波浪运动系数

由波浪理论来确定波浪的二维运动并没有包括波浪的方向散射或波剖面形状的不规则性。因而在确定性的波浪分析中,可以通过波浪运动系数乘以由二维规则波所确定的水平速度和加速度来近似地模拟波浪的真实性。波浪运动系数的选取取决于控制设计的风暴类型。API RP 2A 第20版指出,根据测量结果,对热带风暴波浪运动,波浪运动系数的取值范围为0.85到0.95,对温带风暴,其范围为0.95到1.00。

1.3 拖曳力和惯性力系数

由上述所提及的 Morison 方程可以看出,波浪力的计算结果除与波浪及构件的特性相关外,还与拖曳力和惯性力系数 C_d 、 C_m 选取有关。在 API RP 2A 19 版中推荐, C_d 和 C_m 值部分地取决于被使用的波浪理论和预计的海生物,对圆柱形构件的典型值的范围, C_d 是 0.6~1.2, C_m 是 1.3~2.0, 过去的设计中通常取 C_d 值为 0.7、 C_m 值为 2.0。相对而言,API RP 2A 20 版对这2个系数的具体选取方法给出了较为详细的说明,并提供了可靠的依据。20 版中认为, C_d 和 C_m 值的变化主要考虑以下5方面的因素。

相对表面粗糙度	$e = k/D$
Reynolds 数	$Rm = u_m D/V$
Keulegan - Carpenter 数	$k = 2u_m T^2/D$
流/波的速度比	$r = V/u_{mo}$
杆件的方位	

所以20版推荐的系数是依据构件表面粗糙度来选取,对粗糙构件 C_d 、 C_m 分别取1.05、1.2,对光滑构件分别取0.65、1.6。

1.4 遮蔽系数

对于井口平台,隔水套管的空间分布及数量对波浪力的影响很大,如果隔水套管间距较近,由于水动力的遮蔽效应,作用在后排隔水套管上面的力会有所折减,与此相关的折减系数为遮蔽系数。在 API RP 2A第19版中规定,隔水套管中心距与套管直径之比 $S/D \geq 3.5$ 时,隔水套管的遮蔽效应可被忽略;当

$S/D < 3.5$ 时,上游隔水套管对下游隔水套管的遮蔽可能会减小总波浪荷载,至于遮蔽系数的确定,规范要求参见近海工程会议论文 OTC 5008 “Hydrodynamic Forces on Dense Arrays of Cylinders”。在 API RP 2A-WSD 20 版中给出了作用在隔水套管组上的遮蔽系数的取值表,当 $S/D = 3.5$ 时,隔水套管的遮蔽系数约为 0.88,当 $S/D \geq 4$ 时遮蔽系数为 1.0,即不考虑隔水套管的遮蔽影响。不难看出,对于遮蔽系数的选取,20 版较 19 版更为详细和明确,采用 20 版来确定平台的遮蔽系数更能设计人员提供可靠的依据,更有利于结构设计的优化。

1.5 流的阻挡系数

由于阻挡作用,流速在靠近平台的地方将会比“自由流速”有所减小,即结构物的存在使得入射流发生了扩散。试验结果表明,通常的空间框架结构整体上不会引起入射波浪的明显变形,但对海流而言,在平台框架内的海流较自由流动的海流存在一个折减。在 API RP 2A 20 版中推荐,墨西哥湾典型的导管架结构的流速阻挡系数如表 1。

表 1 墨西哥湾典型的导管架结构的流速阻挡系数

桩腿数	方向	系数
3	全部	0.90
4	端面	0.80
	对角线	0.85
	侧面	0.80
6	端面	0.75
	对角线	0.85
	侧面	0.80
8	端面	0.70
	对角线	0.85
	侧面	0.80

2 设计参数的选取对波流静力的影响

设计参数的选取是结构设计中的重要环节,不同的设计参数会对计算分析的结果产生很大的影响。为了判明 API RP 2A 20 版所做的上述修正对波流荷载产生的影响,下面以渤海绥中 36-1 井口平台与秦皇岛 32-6 井口平台为例,就上述各设计参数及其组合,通过计算分析来定量地评价它们对设计荷载的影响。绥中 36-1 井口平台为 1 座具有 35 口井的钻采平台,其工作点跨度为 $15\text{ m} \times 13\text{ m}$,导管架腿直径为 1524 mm,分别在 EL(-)30.4 m、EL(-)15.0 m、EL(-)3.5 m、EL(+)4.8 m 设有 3 层水平拉筋,平台场地海图水深 30.4 m;秦皇岛 32-6 井口平台为 1 座具有 35 口井的钻采平台,其工作点跨度为 $15\text{ m} \times 13\text{ m}$,导管架腿直径为 1371.6 mm,分别在 EL(-)20.4 m、EL(-)3.0 m、EL(+)5.0 m 设有 3 层水平拉筋,平台场地海图水深 20.4 m。

2.1 波浪运动系数对波流力的影响

根据规范所给出的取值范围(0.85~1.0)取一系列的波浪运动系数分别针对绥中 36-1 井口平台与秦皇岛 32-6 井口平台在相同的环境条件下进行计算分析,结果如图 2 所示。结果表明,运动系数对波流力的影响基本呈线性关系,波流力随着运动系数的增大而增加,荷载增减幅度达 20% 以上。

2.2 不同 C_d 、 C_m 取值对波流力的影响

拖曳力系数 C_d 与惯性力系数 C_m 的取值对波流力有很大的影响。按下列 2 种情况分别取不同的 C_d 、 C_m 值与井口数,在相同的环境条件下进行计算,结果如图 3 所示。

(1) 按 API RP 2A 19 版推荐做法,取 $C_d = 0.7$ 、 $C_m = 2.0$;

(2) 按 20 版推荐做法,对粗糙构件 C_d 、 C_m 分别取 1.05、1.2,对光滑构件分别取 0.65、1.6。

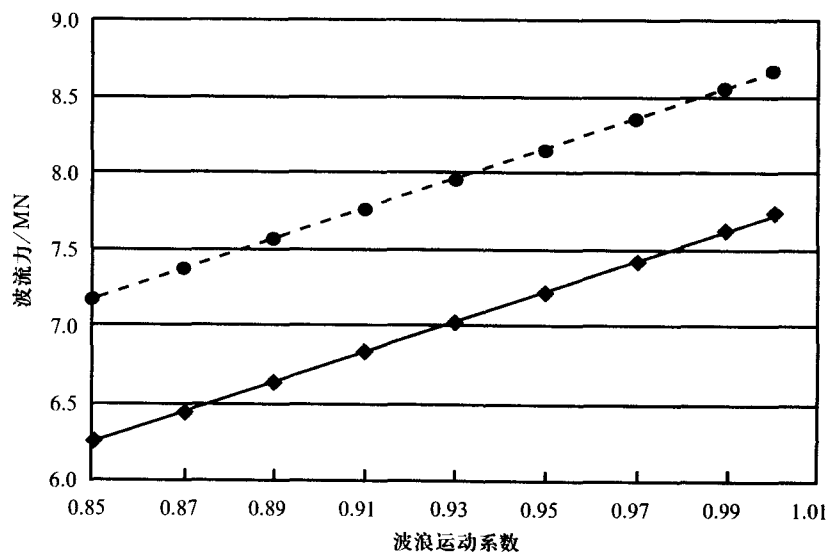


图 2 波浪运动系数与波流力的关系

由图3可见,仅考虑拖曳力系数与惯性力系数取值的不同,相同环境条件下同一结构物所受的波流力会有很大的差异。按API RP 2A 20版取值得出的波流力较API RP 2A 19版约大23%~28%;平台井数的增加会导致波流力的大幅增加,而因 C_d 、 C_m 取值不同所产生的波流力变化幅度受井口数的影响并不明显。

2.3 隔水套管遮蔽效应对波流力的影响

在相同环境条件下分别按考虑与不考虑遮蔽效应2种情况取不同的井数进行计算,结果如图4所示。

由图4可见,平台井口数越多,遮蔽效应对波流力所产生的影响就越大。当井口数为35时,遮蔽效应对绥中36-1井口平台与秦皇岛32-6井口平台波流力所产生的影响分别达

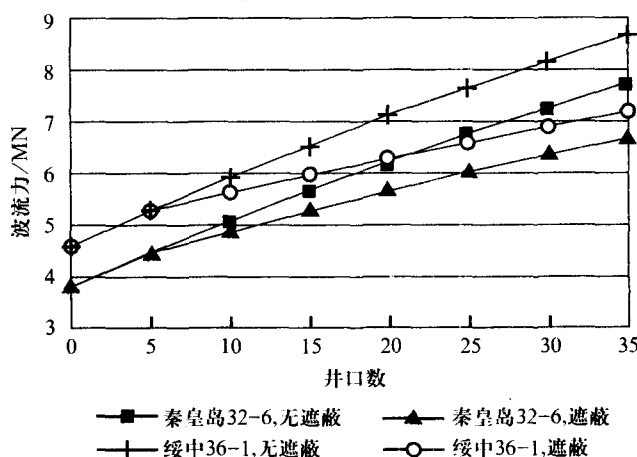


图4 井口数,遮蔽效应对波流力的影响

于秦皇岛32-6平台,阻挡作用对波流力的影响为12%至32%。可见,尤其对那些有密集井口区的平台,阻挡作用对波流力的影响十分可观,设计人员应给予足够的重视,在SACS软件中程序可自动分析阻挡作用对波流力的影响。

2.5 阻挡作用、遮蔽效应、 C_d 和 C_m 取值及隔水套管数量共同作用对波流力的影响

对同一结构,其他条件相同,分2种情况进行计算对比。(a)按API RP 2A 19版推荐做法取 $C_d=0.7$ 、 $C_m=2.0$,且不考虑阻挡作用与遮蔽效应,取不同的隔水套管数进行计算;(b)按20版推荐做法取参数 C_d 、 C_m ,考虑流的阻挡作用与隔水套管的遮蔽效应,取不同的隔水套管数进行计算。从图6所示计算结果来看,2座井口平台的分析结果有一定的共性。①(a)(b)2种情况下的波流力随着隔水套管数量的增加而增大的幅度都很大,这说明对于井口数多的平台,隔水套管

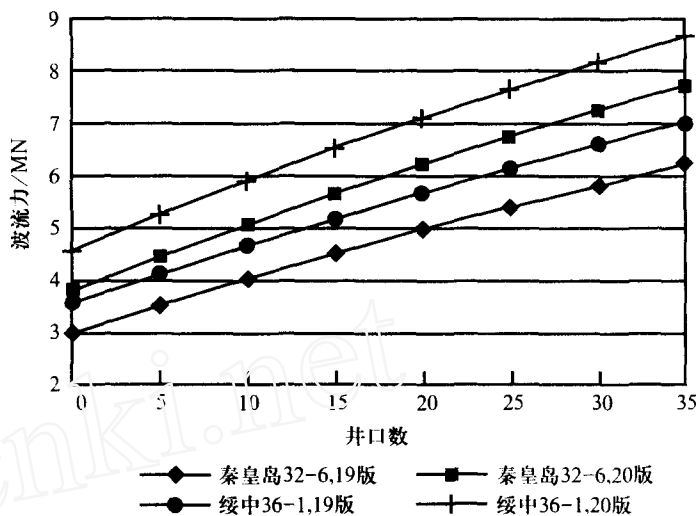


图3 波流力与井口数的关系

21%与16%,二者的差异主要因平台水深不同所致。井口数为0或5(只有1排井)时,2座平台的遮蔽效应均为0,这是由于遮蔽效应一般只发生在密集的井口区。对于井口平台的设计,通常可根据隔水套管群的 S/D 值,由API RP 2A 20版选取合理的遮蔽系数,并在SACS结构分析中通过修正隔水套管的 C_d 、 C_m 值来体现遮蔽效应的影响。

2.4 流的阻挡作用对波流力的影响

在相同环境条件下分别按考虑与不考虑流的阻挡作用2种情况取不同的井数进行计算,结果如图5所示:

当井口数从0至35的变化中,对于绥中36-1平台,阻挡作用对波流力的影响为16%至43%;对于

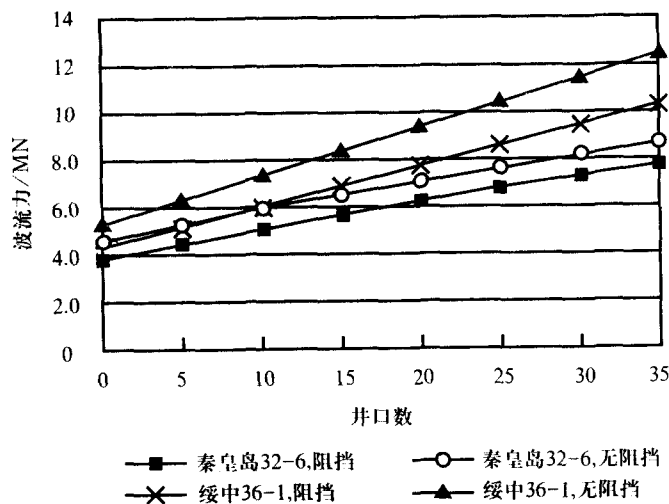


图5 流的阻挡作用对波流力的影响

上的波流力可能会占总体波流力的很大一部分;②当隔水套管数较多时,(a)情况的波流力较大;当隔水套管数量较少(对绥中36-1而言,少于13根;对秦皇岛32-6而言,少于11根)时,(b)情况下的波流力较大;③对于隔水套管数为零的4腿平台(即非井口平台),(a)情况结果较(b)情况结果小25%左右;当隔水套管数为35口时,(a)情况结果较(b)情况结果大16%左右;通过分析比较可见,并不能笼统地对2个版本的API RP 2A的保守程度下一定论。从其发展历史来看,19版在前,20版在后。19版历经多年使用,已被诸多的工程实践证明其可靠性,但其理论较为简化,考虑的因素不太全面。20版是基于理论和试验技术的发展而建立起来的,理论上更先进、方法更切合实际、考虑的因素更全面,但要用好,设计者必须根据结构特点和环境条件等因素综合考虑,并结合过去的设计经验,合理并适度地选择设计参数,才能实现平台结构的优化设计。

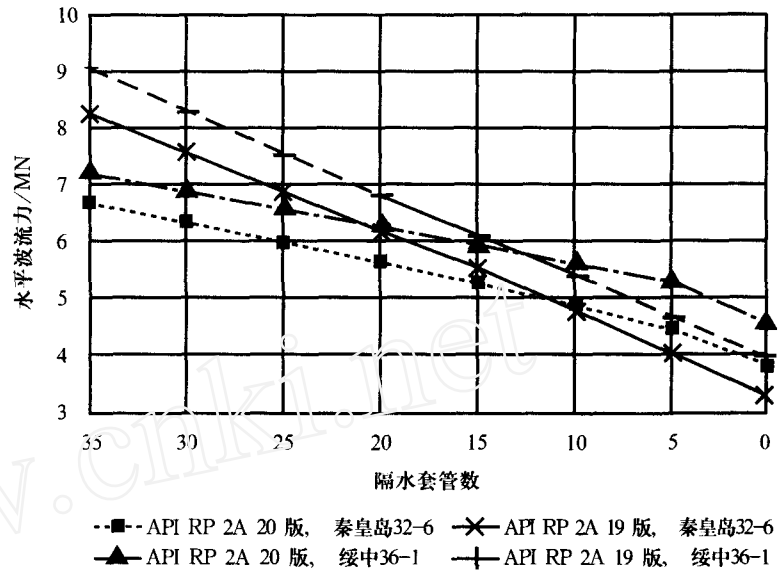


图6 隔水套管与水平波流力的关系

3 结论

针对API RP 2A 20版对波流力分析所做的修正,结合可能影响波流力大小的各主要设计参数,分别对各设计参数及其组合的不同情况进行了分析计算,得出了各设计参数对波流力的单一影响和综合影响。虽然计算分析只是针对2座特定的平台结构和环境条件,其结果会有一定的特殊性,但其规律具有一定的代表性,因此对工程设计具有一定的指导意义。根据上述分析结果可得出如下结论:

(1) 波流力随波流运动系数的增大呈线性增加,API RP 2A 20版中引入波浪运动系数可降低波流荷载。

(2) API RP 2A 20版对 C_d 、 C_m 值的修正使得波流力增加,该修正是基于大量的研究结果,粗糙构件拖曳力系数的提高对波流力的影响较大。

(3) 遮蔽效应和阻挡作用对井口平台波流荷载的影响明显,在井口平台的设计中,通过考虑这2项影响可有效降低波流荷载。

(4) 对于非井口平台,利用API RP 2A 20版计算的波流荷载较19版的结果大,但对于井口平台,当井口数量达到一定数目后,20版的结果较19版的结果小。应用20版开展设计,应该综合考虑各项影响因素、合理地选取设计参数,才能达到优化设计的目的。

4 参考文献

- 1 American Petroleum Institute. API Recommended Practice 2A Nineteenth Edition. 1989
- 2 American Petroleum Institute. API Recommended Practice 2A-WSD Twentieth Edition. 1993
- 3 Heideman J C. Hydrodynamic Forces on Dense Arrays of Cylinders. Offshore Technology Conference, 1985

(收稿日期:1999-11-29;编辑:郭 疆)

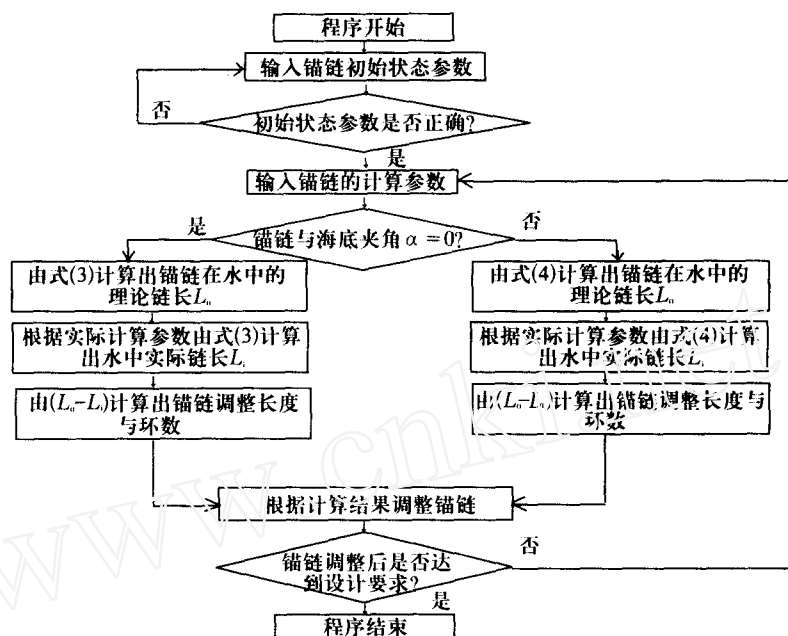


图4 锚链调整软件程序设计计算流程图

表2 调整后锚链状态(入水角 ϕ) (水深 = 24.5 m)

(°)

入水角	1号锚链	2号锚链	3号锚链	4号锚链	5号锚链	6号锚链
设计入水角	43	43	43	43	43	43
实测入水角	42	43	43	42	44	43

该结果完全满足设计精度要求(设计要求施工误差 $\phi < 1.5^\circ$)。

4 结束语

由于海上施工情况复杂,影响锚链的因素非常多,在选择计算模型中,我们忽略了波浪、风、海流力的影响,而且本程序只是从理论上对海上单点系泊系统的安装工作(主要是锚链调整)给予指导,故还缺乏实践数据的修正。相信,随着国内单点系泊系统工程的多,该理论和程序将更加成熟和完善。

5 参考文献

- 1 van Sluijs MF, Blok JJ. The Dynamic Behavior of Mooring Lines. Offshore Technology Conference, the 9th Annual OTC in Houston. 1977, 2 ~5
- 2 Stanfields, Arvesen R. Visual C++ 4 开发人员指南. 华译工作室译. 北京:机械工业出版社, 1997

(收稿日期: 1998-09-04; 编辑: 张金棣)

(上接第 28 页)

黄立新 讲师, 1992 年在西南石油学院开发系获硕士学位, 1997~1998 年在俄罗斯乌法石油大学进修, 现为江汉石油学院石油工程系讲师

杨思明 工程师, 1967 年出生, 1988 年毕业于华东石油学院石油加工专业, 1992 年在石油大学(北京)获有机化工硕士学位, 现在海洋石油生产研究中心工艺部工作

谢彬 高级工程师, 1962 年出生, 1984 年毕业于湘潭大学化工专业, 1989 年在大连理工大学工程力学专业获硕士学位, 现任中国海洋石油工程公司副总工程师

林影炼 助理工程师, 1974 年出生, 1997 年毕业于石油大学(华东)建筑工程系石油储运专业, 现在中国海洋石油南海东部公司工作

程铁信 1973 年出生, 现为天津大学建筑工程学院土木水利施工专业研究生

关德 高级工程师, 1962 年出生, 1983 年毕业于西南石油学院勘探系地质专业, 现在海洋石油渤海采油公司工作

Sponsor China Offshore Oil Production Research Centre, CNOOC
Publisher CHINA OFFSHORE OIL & GAS (Engineering) Editorial Department
Address P O Box 9607, Haidian, Beijing, China
Post Code 100086 ISSN 1001 - 7682, CODEN ZHYGEQ

CONTENTS

•SUMMARY•

Environmental Conditions of Dagang Tidal Areas in Bohai Gulf and Some Thoughts on the Engineering

Technology *Zhou Lihong, Wang Wenzhong, Wan Jun, Liu Yisheng* (2)

Abstract: Dagang tidal area is a main part of Bohai Gulf basin where it lies with rich oil and gas resources and has good potential for exploration. Based on detailed introduction on the environmental conditions in Dagang tidal area and the development of engineering techniques, it propose some technical guidelines of engineering solutions for oil and gas fields in different size and in different water depth. These will give some guidance to the future oil exploration and development in this region.

Key Words: Environmental conditions, engineering technology, tidal area

•DESIGN AND CONSTRUCTION•

Design of Boxi Oil and Gas Plant *Zhao Xitian* (6)

Abstract: Boxi Oil and Gas Plant is one of the key projects in Tianjing and CNOOC, and also is the first plant designed and installed by CNOOC itself. This paper overviews the plant features and design procedures, and focuses on how the design cycle was reduced from nine months to five months. The design quality and cycle both meet the advanced level in China.

Key Words: main engineering, designed itself design cycle design quality nationalization

Selection of API RP 2A Design Parameters *Xie Bin, Yu Hao* (10)

Abstract: Based on the major amendments of the 20th Edition of API RP 2A on wave analysis, this paper gives an overview of the differences of design principles in the static wave and static current analysis between the 19th and the 20th editions. By making analytical comparisons of real engineering projects, it gives analysis of the impacts on design loads by various design parameters and parameter combinations, thus providing references for the selection of design standard and design parameters.

Key Words: wave and current forces, apparent wave period, drag coefficient inertia coefficient, shielding factor, blockage factor

H₂S Corrosion Protection in Offshore Oil Fields *Yang Siming, Wang Chunsheng* (15)

Abstract: H₂S corrosion protection is a key technique in developing sour oil field. The paper discusses such issue based on the successful experience in Nanhai W11 - 4 Oil Field.

Key Words: sulfurated hydrogen, corrosion, corrosion protection, corrosion inhibitor.

•RESEARCH•

Power and Heating Co-generation for Offshore Oilfields Insufficient with Associated Gas

..... *Shan Tongwen* (19)

Abstract: For offshore oil fields with large power and heating loads, but lack of associated gas, the solution of power and heating co-generation will improve the overall energy efficiency and cut down operating costs, thus improving the rate of return and lowering the barrel oil cost. It is very important and practical for the overall development to make proper selection of power and heating co-generation solution and to make sufficient analysis and evaluation on the feasibility and technical issues of these solutions.

Key Word: deficient associated gas, offshore oil field, power and heating co-generation

Submergence Model Test of Bucket Foundation Platform *Li Wei, Tan Jiahua, Cheng Guoqing* (23)

Abstract: Bucket foundation platform is an up to date platform used in the exploitation of marginal oil fields in the world. Due to its special structure, its submergence is a key to the realization of the effective and economic performance. Based on the experiment made in the State Key Lab of Ocean Engineering of Shanghai Jiaotong University, we obtained the data of motion response in both frequency-domain and time-domain of the platform.