

卧式新建导管架张紧式外加电流阴极 保护系统安装方案研究

喻发令¹, 唐静¹, 董晓雨¹, 王超², 王崴³,
邵彦峥², 秦铁男², 徐云泽⁴

(1.中海石油(中国)有限公司海南分公司,海口 570311; 2.大连科迈尔防腐科技有限公司,辽宁 大连 116082; 3.海洋石油工程股份有限公司,天津 300451; 4.大连理工大学,辽宁 大连 116081)

摘要: 目的 填补卧式新建导管架平台施工技术的空白,同时解决张紧式 ICCP 系统在卧式新建导管架平台的工程应用问题。**方法** 以张紧式 ICCP 系统在某卧式新建导管架的首次工程应用为背景,对张紧式 ICCP 复合缆-电极系统在该导管架上的陆上安装、导管架运输、海上安装等环节开展方案研究,设计出适用于卧式新建导管架张紧式 ICCP 系统的安装方案。**结果** 为了保证卧式建造导管架张紧式 ICCP 系统的可靠安装,设计采用滑索牵引方法,并对复合缆-电极系统海上安装期的自存工况进行校核,可保障张紧式 ICCP 复合缆-电极系统的安全和顺利安装。**结论** 该套张紧式 ICCP 安装方案不仅实现了张紧式 ICCP 在卧式新建导管架的首次工程应用,也为后续新建导管架张紧式 ICCP 系统的设计与安装提供了参考。

关键词: 海洋平台; 卧式新建导管架; 腐蚀防护; 张紧式外加电流阴极保护; 复合缆-电极系统

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0135-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.017

Installation Scheme of Horizontal New Jacket Tensioned Impressed Current Cathodic Protection System

YU Fa-ling¹, TANG Jing¹, DONG Xiao-yu¹, WANG Chao², WANG Wei³,
SHAO Yan-zheng², QIN Tie-nan², XU Yun-ze⁴

(1. Hainan Branch of CNOOC China Limited, Haikou 570311, China; 2. Dalian Kingmile Anticorrosion Technology Co., Ltd., Liaoning Dalian 116082, China; 3. Offshore Oil Engineering Co. Ltd., Tianjin 300451, China;
4. Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116081, China)

ABSTRACT: The work aims to fill the gap in the construction technology of horizontal new jacket platform and solve the engineering application problem of tensioned ICCP system in horizontal new jacket platform. Based on the first engineering application of tensioned ICCP system in a horizontal new jacket, the onshore installation, jacket transportation and offshore installation of the tensioned ICCP composite cable-electrode system on the jacket were studied, and the installation scheme suitable

收稿日期: 2023-01-04; 修订日期: 2023-03-23

Received: 2023-01-04; Revised: 2023-03-23

作者简介: 喻发令(1986—),男,高级工程师,主要研究方向为海洋工程建设。

Biography: YU Fa-ling (1986-), Male, Senior engineer, Research focus: marine engineering construction.

引文格式: 喻发令,唐静,董晓雨,等. 卧式新建导管架张紧式外加电流阴极保护系统安装方案研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 135-141.

YU Fa-ling, TANG Jing, DONG Xiao-yu, et al. Installation Scheme of Horizontal New Jacket Tensioned Impressed Current Cathodic Protection System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 135-141.

for the horizontal new jacket tensioned ICCP system was designed. In order to ensure the reliable installation of the horizontal construction jacket tensioned ICCP system, the zipline traction method was used for the design and the self-storage working conditions of the composite cable-electrode system during the offshore installation period were checked, which could ensure the safe and smooth installation of the tensioned ICCP composite cable-electrode system. This set of tensioned ICCP installation scheme not only realizes the first engineering application of tensioned ICCP in horizontal new jacket, but also provides reference for the design and installation of subsequent new jacket tensioned ICCP system.

KEY WORDS: offshore platform; horizontal new jacket; corrosion protection; tensioned impressed current cathodic protection; composite cable-electrode system

海上桩基固定式石油平台作为开采、传输海底石油、天然气、可燃冰等海洋能源的主要海上基础设施,是我国海洋石油生产的主要结构形式^[1-3]。其长期安全稳定服役是关系国家海洋油气资源安全保障的关键^[4-6]。我国海上石油平台基础主要以桩基固定式钢质导管架为主,主要应用于滩涂、20~300 m 水深海域,在诸多海域均有广泛应用^[7-10]。钢质导管架长期服役在海水环境中会发生腐蚀,导致结构发生不可逆损伤,严重情况下甚至会导致导管架结构失稳、坍塌^[11-13],其结构的耐久性一直备受关注。

阴极保护技术作为极为有效的防腐措施之一,被广泛应用于桩基固定式导管架基础在海水环境中的长期腐蚀防护^[14-15]。传统方式普遍采用牺牲阳极的阴极保护方法^[16-17]。由于导管架规模及应用水深的不尽相同^[18-19],尤其是 300 m 水深级别的导管架结构,其牺牲阳极用量、安装数量巨大,且在服役期容易出现牺牲阳极局部消耗过快,导致导管架局部保护不足^[20-22]。针对这一现实情况,并基于桩基固定式导管架基础的防腐需求,张紧式 ICCP 系统被广泛应用于桩基导管架平台阴极保护延寿,其以集成有辅助阳极和参比电极的复合缆-电极系统为核心构件,可通过导管架首尾的锚固结构张紧固定在导管架内部,实现辅助阳极及参比电极的分布式一体化安装^[23-24]。该技术及国产化装备已于 2017 年首次应用于陆丰 13-2 WHP 导管架平台,是国内首个深水在役导管架平台阴极保护系统延寿的国产化工程案例,系统至今正常运行,导管架保护状态良好。随后,又陆续应用在文昌 13-1/13-2 井口平台、番禺 30-1DPP 平台等深水在役导管架阴极保护延寿项目,及垦利 6-1、渤中垦利岸电、渤中 29-6 等渤海海域新建导管架平台。

张紧式 ICCP 技术已成为海上桩基固定式导管架平台阴极保护的主要技术手段,其应用项目已覆盖在役深水导管架平台和新建浅水导管架平台,但其对于卧式新建导管架平台尚无工程应用案例。本文以张紧式 ICCP 系统在某卧式新建导管架的首次工程应用为背景,对系统陆地安装、导管架运输及海上就位等方案展开研究,为后续新建导管架张紧式 ICCP 系统的

设计与安装提供参考。

1 系统概况

卧式新建导管架为 8 腿 12 裙桩结构,服役水深为 88.3 m,设计寿命为 20 a。导管架采用“牺牲阳极(初期 2 a 临时保护)+张紧式外加电流”联合阴极保护方案。张紧式 ICCP 复合缆布置于导管架内部,通过对牺牲阳极与张紧式 ICCP 共存工况、牺牲阳极耗尽仅剩张紧式 ICCP 工况进行设计校核,导管架的水下结构保护电位分布在 $-1\ 100\sim -800\text{ mV}$ (相对于 $\text{Ag}/\text{AgCl}[\text{SW}]$ 参比电极),满足阴极保护设计指标,导管架处于良好的阴极保护状态。张紧式 ICCP 系统的构成如图 1 所示,包括多路控制器(含测控软件)、张拉装置、复合缆-电极系统等,各设备的分布位置及具体功能见表 1。

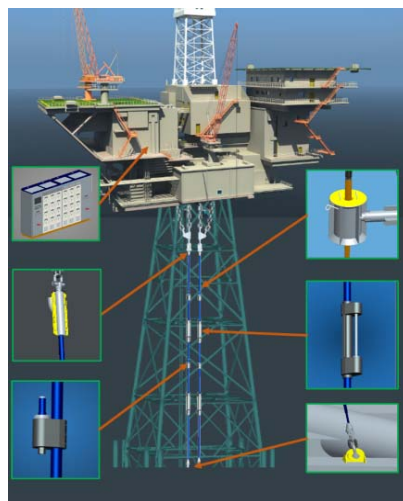


图 1 张紧式外加电流阴极保护系统

Fig.1 Tensioned impressed current cathodic protection system

2 卧式新建导管架张紧式 ICCP 系统安装方案

相比于在役深水导管架与新建浅水导管架,卧式新建导管架基础结构更复杂、尺寸更大,导管架在建

表 1 张紧式 ICCP 系统各设备的分布位置及作用
Tab.1 Distribution location and function of each device in tensioned ICCP system

序号	设备名称	规格参数	数量	布置位置	作用
1	复合缆-电极系统	额定输出能力: 1 200 A/根 辅助阳极材料: Pt/Nb 辅助阳极数量: 10 组/根 每组阳极额定输出能力: 120 A 复合缆最小破断拉力: ≥ 260 kN 复合缆工作拉力: (60 ± 2) kN 耐水压不低于 3 MPa 设计使用寿命: 20 a	2 套	竖直张拉于导管架内部	为水下辅助阳极供电, 传输参比电极信号
2	张拉装置	张拉力 0~100 kN 在位高度不超过 500 mm	2 套	复合缆端部张拉操作平台	调节张力, 张紧复合缆, 复合缆端部固定
3	多路控制器	电源输入三相三线 AC380 V/50 Hz 额定输出功率: 76.8 kW 额定输出: 32 V/2 400 A 单路输出: 32 V/120 A 防护等级: IP44	1 台	组块主开关间	系统分布式供电装置, 多通路独立单元化设计, 可实现辅助阳极输出电流的精细化调节; 系统控制系统终端, 兼有控制、监测、计算、存储、人机交互、报警等功能
4	阴极保护远程监测装备 CPMS	Ag/AgCl 固态/海水参比电极测量精度: ± 1 mV Zn 参比电极测量精度: ± 5 mV 电位测量范围: $-0.4\sim 1.4$ V (相对于 Ag/AgCl [SW]参比电极) 耐水压: 不低于 3 MPa 电流测量范围: $-10\sim 10$ A 电流测量精度: ± 5 mA	16 组复合参比电极; 8 套牺牲阳极电流传感器	传感器分别分布在导管架的各个水平层上	实时监测导管架阴极保护电位与牺牲阳极输出电流

造、运输阶段均处于卧式姿态, 普遍采用滑移或吊装的下水方式。如何将长度达百米甚至几百米的复合缆-电极系统贯穿导管架首尾安装到导管架内部, 并确保其在运输及下水过程中的安全可靠, 是卧式新建导管架应用张紧式 ICCP 系统亟待解决的首要问题。

卧式新建导管架张紧式 ICCP 系统面临诸多挑战, 集中体现为复合缆-电极系统的安装: 复合缆-电极系统长度近百米, 且导管架内部结构复杂, 如何在导管架内部将其贯穿首尾安装; 复合缆-电极系统安装过程需要大量的高空作业; 复合缆-电极系统长度较长, 自重较大, 自身在大跨度下具有较大的挠度, 会产生与导管架内部结构干涉的风险。

为实现张紧式 ICCP 复合缆-电极系统在导管架卧式建造阶段的安全可靠安装, 设计采用滑索牵引安

装方法^[25], 利用钢丝绳作为复合电缆安装就位的引导滑索, 将复合电缆通过吊装索具间隔悬挂在钢丝绳滑索上, 再采用绞车牵引钢丝绳滑索就位。悬吊部分包括用于导向及悬挂复合电缆的钢丝绳滑索、锚点、导向滑轮及地面绞车; 牵引部分包括用于牵引复合电缆就位的导向滑轮、钢丝绳滑索及牵引绞车。安装步骤如图 2 所示, 主要包括: 复合缆滚筒、绞车等就位; “滑索钢丝绳” 纵穿导管架结构内部, 并保持适宜张紧力, 作为复合缆悬挂前行的滑索; 将复合缆固定在钢丝绳滑索上, 绞车通过牵引“钢丝绳滑索” 进而带动复合缆前进, 复合缆滚筒同步释放复合缆, 间隔悬挂吊装索具, 直至复合缆上端到达导管架最上层结构, 锁紧复合缆首尾两端; 复合缆张紧至设计的临时张紧力; 拆除辅助装具。该方法不仅能够安全、精确

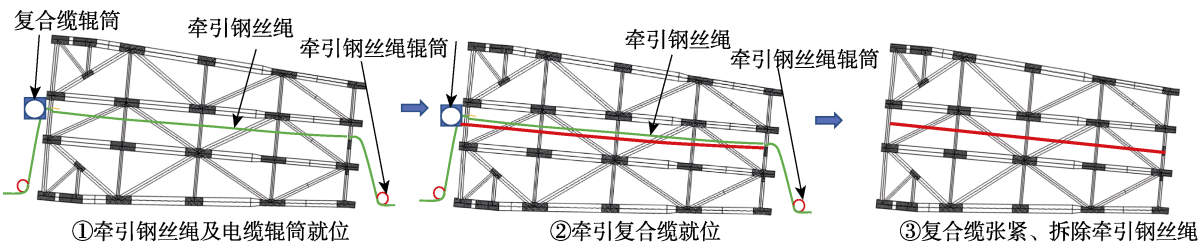


图 2 复合缆-电极系统安装
Fig.2 Installation of the composite cable-electrode system

地将复合缆-电极系统安装在导管架内部的特定位置,同时可以通过向钢丝绳滑索施加预紧力,以尽可能地降低复合缆-电极系统横向大跨度安装产生的挠度,使其能够在安装过程中避免与导管架结构产生干涉,尤其适用于卧式建造导管架,适用性强,安装简便,施工风险低。

3 复合缆-电极系统海上安装期的自存工况校核

在导管架海上安装阶段,复合缆-电极系统可能会受运输、滑移下水冲击、打桩振动等影响,因此对复合缆-电极系统的自存性进行校核尤为重要,进一步优化复合缆-电极系统的设计和陆地安装方案,以提高张紧式 ICCP 系统自存工况下的安全性。

3.1 复合缆运输过程中挠度校核

在导管架运输及下水过程中,复合缆-电极系统呈横向倾斜张拉状态,因其自重会产生挠度。若所产生的挠度大于其与导管架杆件的最近距离,复合缆-电极系统则可能会在运输及下水过程中与导管架杆件发生碰撞,并对复合缆和辅助阳极产生损坏。为了防止上述情况发生,在考虑复合缆摆幅大小的前提下,计算复合缆-电极系统安装就位后应施加的最小预紧力,以有效控制复合缆-电极系统的自身挠度。

钢丝绳挠度计算公式:

$$f_s = \frac{q \cdot g \cdot x \cdot (1-x)}{2 \times S \cdot \cos \beta}$$

式中: f_s 为挠度; q 为每米绳索的质量; g 为重力加速度; x 为绳端与下垂点之间的距离; S 为绳索的拉力; β 为绳索倾斜角度。

计算导管架运输过程中复合缆-电极系统在 10~50 kN 预张紧力下的挠度,并将其与导管架最近距离进行比较。导管架运输过程中,复合缆-电极系统在不同预紧力下的挠度曲线如图 3 所示。由图 3 可知,复合缆-电极系统至少需要施加 30 kN 的预紧力,才能使其最大挠度小于其与导管架的最近距离。为避免钢丝绳松弛导致预张力衰减,设计张紧力裕量为 10 kN,进而确定复合缆-电极系统安装后需施加 40 kN 的预紧力。

3.2 滑移下水冲击对复合缆-电极系统的影响分析

该新建导管架采用滑移下水方式,下水冲击载荷作用于复合缆及集成在复合缆上的辅助阳极组件,将产生以下影响:张紧于导管架内部的复合缆由于侧向载荷作用发生偏移,存在碰撞导管架结构杆件的风险;复合缆有效张力增大,有破断风险;辅助阳极组件有强度不足的风险。为确保导管架下水期间系统的

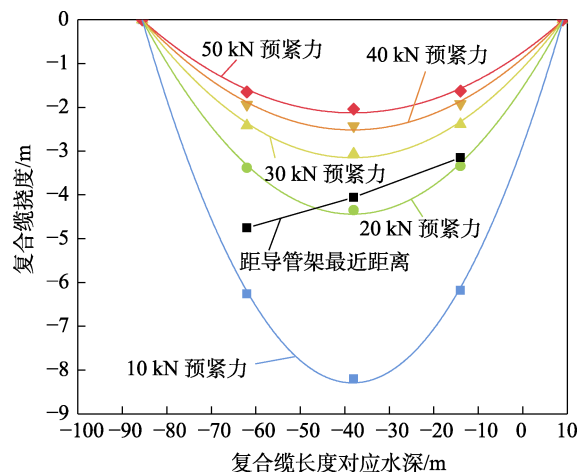


图3 导管架运输过程中复合缆-电极系统在不同预紧力下的挠度曲线及其与导管架的最小距离

Fig.3 Deflection curve of the composite cable-electrode system under different preload forces during jacket transportation and its minimum distance from the jacket

安全性,需对以上情况进行校核。

1) 滑移下水对复合缆的冲击作用分析。取导管架下水全过程出现的最大下水速度 7.09 m/s 为校核工况,计算不同预紧力下,复合缆-电极系统受海水冲击时,相对于复合缆各水深处理论位置的最大变形量。导管架下水过程中,复合缆受海水冲击时,各预紧力下相对于复合缆各水深处理论位置的变形最大值如图 4 所示,有效张力的最大值如图 5 所示。

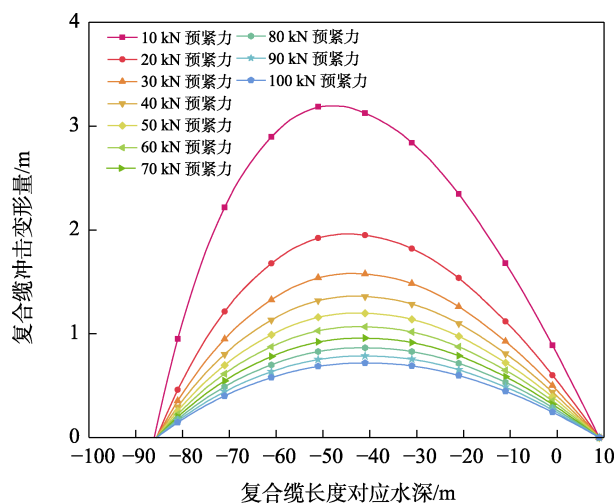


图4 导管架下水过程中复合缆受海水冲击时相对于复合缆各水深处的变形最大值

Fig.4 Maximum deformation of the composite cable relative to the theoretical position at each seawater depth under the impact by seawater when jacket is launched into seawater

由图 4 与图 5 可知,导管架下水全过程中,复合缆-电极系统所产生的位移不会导致其与导管架发生干涉,冲击载荷不会导致复合缆破断,具有足够的安全裕量。

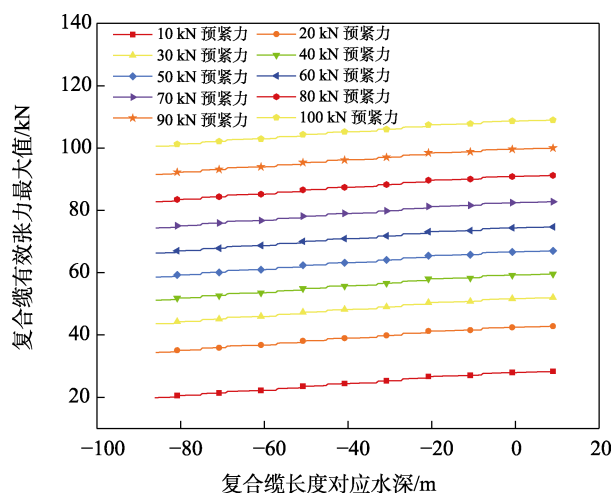


图5 导管架下水过程中复合缆受海水冲击时相对于复合缆各水深处有效张力的最大值

Fig.5 Maximum effective tension of the composite cable relative to each seawater depth of the composite cable under the impact by seawater when jacket is launched into seawater

2) 滑移下水对辅助阳极组件的冲击作用分析。为保证安全系数,校核辅助阳极在海水拍击载荷下的结构强度,施加的载荷值为实际拍击载荷值的2倍。钛壳正背面迎水时应力云图如图6所示。辅助阳极正面迎水时,最大应力为89.2 MPa;辅助阳极背面迎水时,最大应力为2.1 MPa,均远小于辅助阳极的屈服强度373 MPa。因此,当导管架下水速度为7.09 m/s时,导管架下水全过程中,辅助阳极强度满足需求,不会受下水冲击影响而产生破坏。

3.3 打桩振动对复合缆-电极系统的影响分析

打桩振动是一种脉冲衰减的瞬间锤击强迫振动,振动波向四周辐射,形成了振动影响场。下面分析导管架打桩振动对复合缆的影响。钢桩质量为 4.33×10^5 kg,桩锤在空气中的质量为 2.03×10^5 kg,在水中的质量为 1.693×10^5 kg,水下压载质量为 3.7×10^4 kg,锤长18.9 m,最大冲击能量为1200 kJ,最小冲击能量为120 kJ,打桩频率为10~120次/min。根据能量冲击($E = \frac{mv^2}{2}$, E 为能量, m 为物体质量)和冲击力($Ft = \Delta mv$, F 为平均冲击作用力, t 为作用时间)公式,当复合缆预张力为40 kN,钢桩直径为2134 mm,长度为125 m,质量为 4334.33×10^5 kg,最高打桩频率为120次/min时,打桩冲击力垂直向下作用于导管架主桩裙桩套筒内侧。以打入第四根主桩为例,其有限元分析结果如图7所示。经计算,导管架结构总体应力分布良好,最大计算应力与许用应力比小于1,因此导管架结构和复合缆顶部及底部连接结构强度能够满足打桩工况设计要求。打桩振动对复合缆的影响也非常小,不会对复合缆产生破坏。

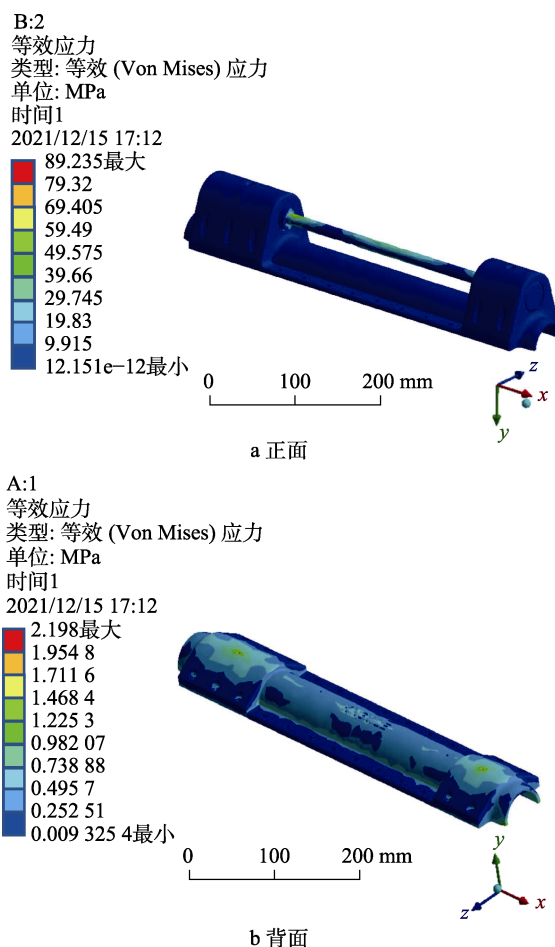


图6 辅助阳极封装外壳正背面迎水时的应力云图
Fig.6 Stress cloud of the front (a) and back (b) of the auxiliary anode package housing when facing water

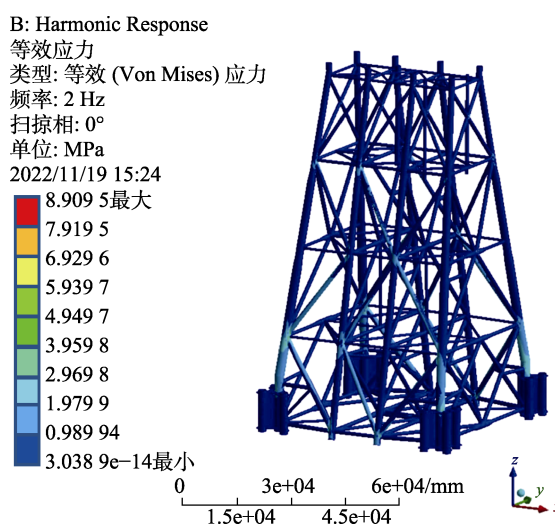


图7 打入第四根主桩时导管架振动有限元分析最大有效应力云图

Fig.7 Maximum effective stress cloud of jacket vibration finite element analysis when the fourth main pile is driven

4 结论

1) 本文建立了卧式新建导管架张紧式 ICCP 复合

缆-电极系统的安装工艺。通过滑索牵引的方式,实现了复合缆-电极系统贯穿导管架内部的精确安装。

2) 明确了复合缆预紧力、ICCP 系统组件强度校核方法,并以某卧式新建导管架为工程案例进行了验证。

3) 本文所述安装工艺及相关计算校核,可保障复合缆-电极系统在卧式新建导管架上的安装顺利实施,为张紧式 ICCP 系统在同类卧式新建导管架项目中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 黄悦华, 任克忍. 我国海洋石油钻井平台现状与技术发展分析[J]. 石油机械, 2007, 35(9): 157-160.
HUANG Yue-hua, REN Ke-ren. The Status Quo and Technical Development Analysis of Offshore Drilling Platform in our Country[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(9): 157-160.
- [2] 任天翼. 我国海洋石油平台仪表控制系统的现状与发展[J]. 当代化工研究, 2019(6): 71-72.
REN Tian-yi. Status and Development of Instrument Control System for Offshore Oil Platforms in China[J]. Modern Chemical Research, 2019(6): 71-72.
- [3] 段梦兰, 陈永福, 李林斌, 等. 海洋平台结构的最新研究进展第9届 ISOPE 大会报告综述[J]. 海洋工程, 2000, 18(1): 86-90.
DUAN Meng-lan, CHEN Yong-fu, LI Lin-bin, et al. Recent Development of Offshore Platform Structures[J]. The Ocean Engineering, 2000, 18(1): 86-90.
- [4] 王定亚, 丁莉萍. 海洋钻井平台技术现状与发展趋势[J]. 石油机械, 2010, 38(4): 69-72.
WANG Ding-ya, DING Li-ping. Present Situation and Development Trend of Offshore Drilling Platform Technology[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(4): 69-72.
- [5] 张耀光, 刘岩, 李春平, 等. 中国海洋油气资源开发与国家石油安全战略对策[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 297-304.
ZHANG Yao-guang, LIU Yan, LI Chun-ping, et al. The Exploitation of Marine Oil and Gas Resources and the Tactic Countermeasures of Petroleum in China[J]. Geographical Research, 2003, 22(3): 297-304.
- [6] 闫伟. 我国海洋油气企业的国际竞争优势及合作模式选择研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
YAN Wei. Study on Chinese Offshore Oil-Gas Enterprises' International Comparative Advantages and Their Choice of international Cooperation Mode[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [7] 翟钢军. 基于可靠度的导管架海洋平台结构优化设计研究[J]. 中国海洋平台, 2005, 20(1): 29-34.
ZHAI Gang-jun. reliability-Based on Structure Optimum Design of Offshore Jacket Platforms[J]. China Offshore Platform, 2005, 20(1): 29-34.
- [8] 王国栋. 基于可靠性及桩基约束的导管架平台优化设计[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012.
WANG Guo-dong. Optimal Design of Jacket Platform Based on Reliability and Pile Foundation Constraints[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2012.
- [9] 修宗祥. 深水导管架海洋平台安全可靠性分析及优化设计[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
XIU Zong-xiang. Safety Reliability Analysis and Optimization Design of Deep Water Jacket Platform[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [10] 李广军, 徐常胜, 张爱恩, 等. 浅海固定式钻采平台的设计[J]. 中国海洋平台, 1997, 12(2): 73-75.
LI Guang-jun, XU Chang-sheng, ZHANG Ai-en, et al. The Design of a Shallow Water Drilling and Production Platform[J]. China Offshore Platform, 1997, 12(2): 73-75.
- [11] 连琰, 孙清, 陈宏民. 海洋油气资源开发技术发展战略研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(1): 66-70.
LIAN Lian, SUN Qing, CHEN Hong-min. Strategic Research on Offshore Oil-Gas Exploitation Techniques[J]. China Population Resources and Environment, 2006, 16(1): 66-70.
- [12] 丁泉, 王春, 王晶. 我国海洋油气资源开发有关问题研究[C]// 中国石油学会石油经济专业委员会第三届青年论坛会议论文集. 北京: 中国石油学会, 2014.
DING Quan, WANG Chun, WANG Jing. Research on Issues Related to the Development of Offshore Oil and Gas Resources in China[C]// Proceedings of 3th Youth Forum of Petroleum Economics Professional Committee of Chinese Petroleum Society. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2014.
- [13] 张振宇. 浅海导管架海洋平台系统可靠性分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2009.
ZHANG Zhen-yu. Reliability Analysis of Offshore Jacket Platform System in Shallow Sea[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2009.
- [14] 张脉松, 尹鹏飞, 马长江. 海洋平台外加电流阴极保护技术[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(3): 20-23.
ZHANG Mai-song, YIN Peng-fei, MA Chang-jiang. The Impressed Current Cathodic Protection Technology of Jacket Platform[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(3): 20-23.
- [15] 黄永昌. 电化学保护技术及其应用 第四讲 外加电流阴极保护系统[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(6): 281-284.
HUANG Yong-chang. Electrochemical Protection Technology and Its Application Lecture Iv Impressed Current Cathodic Protection System[J]. Corrosion & Protection, 2000, 21(6): 281-284.
- [16] 刘福国, 张伟, 王秀通, 等. 海洋工程用新型牺牲阳极设计与性能研究(IV)——导管架平台阴极保护应用研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 14-19.
LIU Fu-guo, ZHANG Wei, WANG Xiu-tong, et al. Design and Performance Research of New Type Sacrificial Anode for Marine Engineering(IV)—Application of Cathodic Protection of Jacket Platform[J]. Equipment Envi-

- ronmental Engineering, 2018, 15(3): 14-19.
- [17] 张伟, 刘福国, 尹鹏飞, 等. 海洋工程用新型牺牲阳极设计与性能研究(V)——导管架平台阴极保护设计探讨[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 136-139.
ZHANG Wei, LIU Fu-guo, YIN Peng-fei, et al. New Type Sacrificial Anode Design and Performance Research Used in Marine Engineering(V)—Cathode Protection Design of New Type Sacrificial Anode for Jacket Platform[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 136-139.
- [18] 赵帅, 卫旭敏, 张剑明, 等. 海洋风电导管架腐蚀防护典型案例研究[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(3): 97-101.
ZHAO Shuai, WEI Xu-min, ZHANG Jian-ming, et al. Typical Corrosion Control Case of Offshore Wind Power Jacket[J]. Total Corrosion Control, 2022, 36(3): 97-101.
- [19] 李昕, 冯新, 杜超, 等. 两种导管架海洋平台的系统可靠度分析[J]. 中国海洋平台, 2007, 22(1): 29-33.
LI Xin, FENG Xin, DU Chao, et al. System Reliability Analysis on Two Kinds of Jacket Platforms[J]. China Offshore Platform, 2007, 22(1): 29-33.
- [20] 邓树滨. 杂散电流腐蚀及其对牺牲阳极阴极保护的影响[J]. 材料开发与应用, 1995, 10(2): 44-49.
DENG Shu-bin. Stray Current Corrosion and Its Influence on Cathodic Protection by Using Galvanic Anode Method[J]. Development and Application of Materials, 1995, 10(2): 44-49.
- [21] ROUSSEAU C, BARAUD F, LELEYTER L, et al. Cathodic Protection by Zinc Sacrificial Anodes: Impact on Marine Sediment Metallic Contamination[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1/2/3): 953-958.
- [22] KESSLER R, POWERS R, LASA I. Update on Sacrificial Anode Cathodic Protection on Steel Reinforced Concrete Structures in Seawater[C]// Corrosion '95: National Association of Corrosion Engineers (NACE) International Annual Conference and Corrosion Show. Orlando: NACE, 1995.
- [23] 张秀国. 外加电流式阴极保护的使用探讨[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(6): 94-96.
ZHANG Xiu-guo. Discussion on Application of Impressed Current Cathodic Protection[J]. China Water Transport, 2019, 19(6): 94-96.
- [24] 宋世德, 刘磊. 一种海洋平台张紧式外加电流阴极保护系统: CN207738843U[P]. 2018-08-17.
SONG Shi-de, LIU Lei. Platform Tensioning Formula Impressed Current Cathodic Protection System: CN207738843U[P]. 2018-08-17.
- [25] 秦铁男, 封加全, 王超, 等. 一种新建导管架的复合电缆安装方法: CN114784708B[P]. 2022-11-08.
QIN Tie-nan, FENG Jia-quan, WANG Chao, et al. Composite Cable Installation Method for Newly-Built Jacket: CN114784708B[P]. 2022-11-08.

责任编辑: 刘世忠