

海上防砂地面橇模块化研究

周新卫

(中海油田服务股份有限公司, 天津 300459)

摘要:为减少防砂作业地面设备占地面积,满足后续防砂作业的快速灵活安装和拆卸及后期的检查、保养、检验和维修,通过对深水气田防砂设备和流程布局进行研究,进行平台模块化适应性分析以及模块化设备设计、选型和模块关键连接处设计,实现地面流程设备的模块化组合,保障开发井完井作业安全顺利。最后通过有限元分析软件SACS对模块三维建模仿真,分析并计算模块所承载荷工况。模块化相关设计满足作业的设计指标和安全分析,对于相关模块化技术及方案在自营深水开发项目进行推广具有一定借鉴意义。

关键词:防砂作业;撬装设备;平台;模块化;三维分析

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)13-0051-06

砾石充填防砂技术是通过在筛套、筛管井眼之间充填砾石或陶粒,将砾石密实地堆积在筛套环空或筛管与裸眼之间的环空,从而达到防砂的目的^[1]。由于深海开发的特殊性,作业装备种类繁多,要求深水作业平台各系统协同作业,提高利用深水平台甲板的效率,该技术作为其中的重要一环^[2],在深水油气田开发中涉及高压设备,地面设备更多,连接测试程序更为繁杂。地面防砂作业设备在有限的空间和时间内完成既定的防砂作业,成为防砂作业的新课题^[3]。因此,为达到地面防砂作业设备快速拆装和吊运,提高作业效率,本文针对防砂作业的工艺特点、深海平台限制条件、各设备的特性进行专项研究。

该集成撬成功应用后可取得如下效果:①集成后减少拆装和吊运模块数量,大大减少现场工作量。根据深水防砂作业工艺要求地面设备,所需撬装设备^[4]约20台,集成后模块数量为5个,现场只需操作5个模块,大大减少了现场工作量。②减少现场拆装时间,提高工作效率。安装时间由6h缩减到2h,解体时间由5h缩减至2h,极大节约现场整体作业时间。③减小平台甲板占地面积,提高整个平台的容积率。甲板占用面积由300m²左右,缩减至160m²左右,减小平台面积效果明显,同时便于集中检查、巡检。

模块化在机械装备研制中彰显出了巨大优势^[5],而对模块化理论和方法的研究是推动模块

化发展的重要原动力^[6]。同时,机械装备的模块化设计已逐渐被各国工程技术人员所重视。科学、合理地划分和处理模块的层次、规模和数量是模块化设计成功的重要保证^[7]。20世纪20年代欧美将模块化原理应用到机床并提出了模块化设计的概念^[8]。德国Lerinc公司研制的柔性生产系统(FMS),根据需求可以模块化组装^[9]。卢贤林和鲁玉军^[10]通过阐述模块化中采用大批量定制设计技术和产品数据管理技术的原理,结合某新能源车企的实际数据,实现了零部件模块的线上化管理,解决了新能源汽车装配产线零部件模块替换容易出错的问题对地面防砂设备进行模块化研究。孙栋等^[11]利用“以机代人”进行自主特种作业的实际需求,设计研发模块化可重构水下机器人,该控制策略可以快速形成队形且轨迹误差小于5%。张学东等^[12]利用SolidWorks三维设计软件参数化功能,分析了液压支架参数化模块化设计的实现途径推进液压支架研发效率和质量的提升。罗雨等^[13]采用模块化的设计方法,完成了焊接机器人的机械结构设计。吴磊等^[14]对近年来群智模块化机器人领域的工作进行了系统性研究,构建并拓展其概念空间体系,阐释其自重构、自组织、自适应、持续演化等关键技术及最新发展趋势,对地面防砂设备进行模块化研究,通过三维软件进行强度计算分析,以保证各模块的强度安全。

收稿日期: 2024-10-23

作者简介: 周新卫(1986—),男,河北石家庄人,工程师,研究方向为石油机械。

1 技术分析

1.1 现有技术问题

1.1.1 深水防砂地面设备多、工作量大

根据深水防砂作业地面设备流程(图 1),满足防砂作业,所需撬装设备约 20 台,其配置主要有 PGS-1050 防砂泵、SSH-1250 防砂泵、SFS-1000A 防砂泵、BGS-35 混砂撬、数采房、液罐、方井口、沉沙池、管线框、工具箱等。

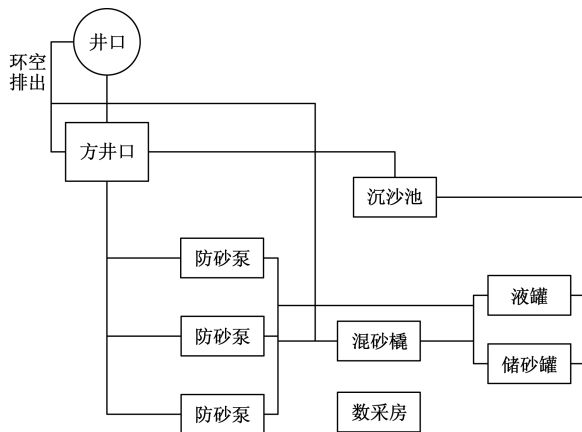


图 1 深水防砂作业地面设备流程

1.1.2 设备组装连接时间长

设备吊装次数多,设备安装时间通常需 6 h 左右;作业结束设备全部解体约 5 h 方可进行吊装,对下步作业存在较大影响。吊装次数多增加设备碰撞风险。管线连接长,连接点多,增加泄露风险。因此,每口井都重复安装和拆卸,造成了巨大的时效和成本浪费。

1.1.3 设备占地面积大

作业时,各设备需要摆放在甲板且设备间需要预留检查设备维修空间。并且设备零散分布,不便于集中检查、巡检。大量零散大体积设备在甲板摆放,不便于集中存放,占用面积较大,通常在 300 m² 左右,也同样影响其他设备的摆放。

1.2 技术指标

针对现有技术问题,为提高作业效率和模块化作业,要达到的技术指标如下。

(1)集成后撬数量 ≤ 5 个,安装和拆卸均在 2 h 内完成。

(2)5 台撬平台摆放面积 ≤ 160 m²。

(3)单撬和吊具重量 ≤ 20 t。

(4)每台撬分为双层结构,单撬加摆放设备整体重量 ≤ 36 t。

2 技术方案

模块化产品设计是在对一定范围内的不同功

能或相同功能、不同性能、不同规格的产品进行功能分析的基础上划分并设计出一系列功能模块,通过模块的组合和选择构成不同的产品,以满足市场的不同需求^[15]。

根据模块划分原则,基本上可按照质量划分、结构相关性划分或功能完整性划分^[7]。通过对工艺流程及各设备结构性和重量综合研究进行模块划分。防砂泵动力撬和泵撬按功能要求需放置在一起,防砂泵、混砂泵放置一起便于流程管线连接,液罐、储砂罐和混砂撬根据功能需要放置一起。其他附件按照重量配置模块的顶层上。

地面防砂集成撬均采用双层结构,上下撬架为桁架结构;上下撬架靠 4 角的 4 根支柱连接,并起支撑作用。地面防砂设备与集成撬的连接采用三导向自定位快速连接装置。吊点的设计采用吊架,吊架连接上下撬架,位于模块的外侧。吊架采用嵌入式自导向连接,方便拆装,同时起到连接上下和支撑作用。

采用上述结构可以提前将结构相关性较近的设备组合在一起放置在撬架上。例如,原来的防砂泵的两个模块动力单元模块和泵单元模块,可以提前组合放置于集成撬的下层底撬上,这样就可以减少一个吊装模块,并减少现场的组装工作量和节约组装时间。

采用上述结构根据质量分配要求,将质量轻和质量重的合理分配,达到减少集成模块的需要。如设备中方井口、工具箱等质量较轻可以和防砂泵模块放置在一个集成撬上,位于集成撬的上层撬架上。

采用上述结构根据功能完整性需要,在集成撬放置时根据工艺流程需要,功能相关撬装就近摆放、简易连接,从而实现功能完整。例如,液罐与其他设备组合集成后需摆放于混砂撬的附近以便于汲取液体用于混砂工作需要。

在上述结构中,采用了地面防砂设备与集成撬三导向自定位快速连接装置,能够实现设备与集成撬的快速连接。上下撬架的连接采用喇叭裤导向连接装置,方便快捷连接上下层撬架。吊架位于集成撬外侧,结构为可拆式连接,可以避免在公路运输时的超宽问题,同时采用嵌入式自导向连接,便于吊架快捷安装。

2.1 模块划分

总体划分为 5 个模块,如图 2 所示,占地总面积 $S=hl=10\text{ m}\times 16\text{ m}=160\text{ m}^2$, h 为 5 个模块总长, l 为 5 个模块总宽。其中最重模块 3 重量为 35 t,最

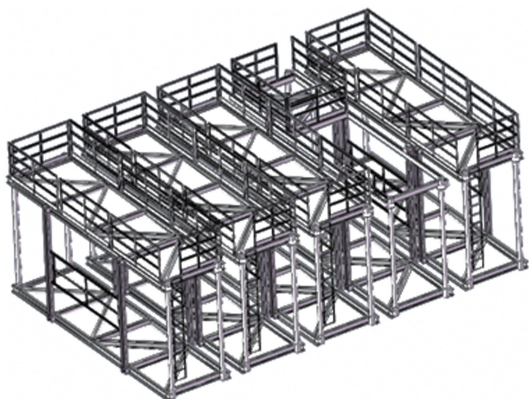


图2 总体模块划分方案

轻模块5重量为20 t。

各模块均采用双层结构,上下橇架为桁架结构。上下橇架靠4角的4根支柱连接,并起支撑作用。吊点的设计采用吊架,吊架连接上下橇架,位于模块的外侧。吊架采用嵌入式自导向连接,方便拆装,同时起到连接上下和支撑作用。

模块1(图3)组合的橇座:PGS-1050防砂橇安装于底层,其中原橇座PGS-1050防砂橇总重量为19.5 t,新设计底橇重量为5.9 t,吊具总重量为1.6 t,因此整体模块1重量为27 t。方井口和沉砂池放置于顶层,可单独吊装。

模块2组合的橇座:SSH-1250防砂橇安装于底层。原橇座SSH-1250防砂橇总重量为17 t,新设计底橇重量为5.4 t,吊具总重量为1.6 t,因此整体模块2重量为24 t。管线框放置于顶层,可单独吊装。

模块3组合的橇座:2000型防砂橇安装于底层。原橇座2000型防砂橇总重量为27 t,新设计底橇为上下两层总重量为6.4 t,吊具重量为1.6 t,因此整体模块3重量为35 t。管线框放置于顶层,可单独吊装。

模块4组合的橇座:BGS-35混砂橇和储砂罐。

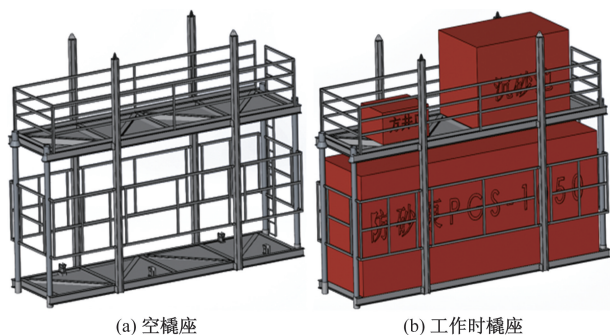


图3 模块1示意图

底层为BGS-35混砂橇,顶层为储砂罐。其中原橇座BGS-35混砂橇为14.5 t。新设计底橇为上下两层总重量为5.9 t,吊具重量为1.6 t,因此整体模块4重量为22 t。储砂罐放置于顶层,可单独吊装。

模块5组合的橇座:DG-01数采房、工具箱和液罐。橇座为双层结构。底层为DG-01数采房和工具箱,顶层为液罐。其中DG-01数采房重量为6 t、工具箱重量为7 t。新设计底橇为上下两层总重量为5.4 t,吊具重量为1.6 t,因此整体模块5重量为20 t。液罐放置于顶层总重量为6 t,可单独吊装。

2.2 模块关键连接

为保证设备与模块的快速拆装,所有的连接部位均采用销轴连接。同时,为保证拆装时操作简便,连接点的设计起到决定性的作用。在模块化的研究中,连接座的设计均采用了自导向连接,以保证准确快捷的定位和安装。

2.2.1 三导向连接座

对于地面防砂设备与橇架的连接,快速定位是安装的关键所在。三导向连接座(图4)是连接地面防砂设备和橇架的关键装置。三导向连接座采用大坡度设计,在3个方向分别设置大坡度斜板,可以保证连接时在比较大的范围内自动找正定位。如果配对使用,则保证在平面 x 轴和 y 轴方向的限位,以促使地面防砂设备与橇架的快速对正连接。

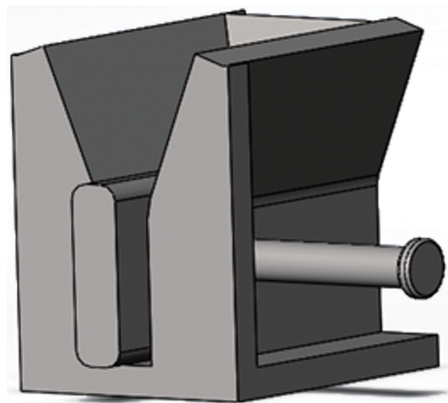


图4 三导向连接座

2.2.2 喇叭形导向连接座

每个模块均采用双层橇架设计,橇架之间的连接同样是影响拆装速度的关键部位。喇叭形导向连接座(图5)是为上下橇架快速连接而设计的。当顶部橇架悬吊位置较高时,在空中的自动找正显得更为关键。喇叭形导向连接座采用下部喇叭形开口,大坡度设计,在扩大找正范围的同时,斜坡导向更容易精准定位。

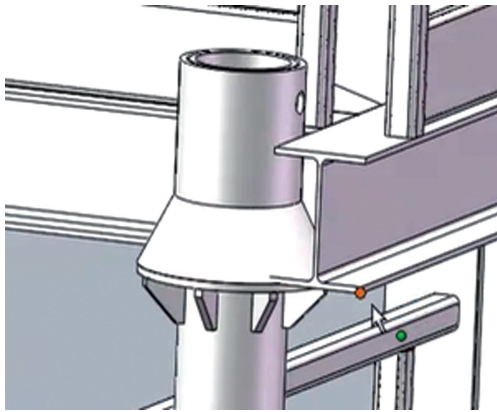


图5 喇叭形导向连接座

2.2.3 嵌入式自导向连接板

由于部分地面防砂设备宽度已经达到了国内公路运输的极限尺寸,模块橇架在设计时宽度只能与设备保持一致。由此导致了在设计模块时,上下橇架的连接只能放置在两端,而在长度方向上中间无法设置连接支架。在设计吊点时,如果仅仅将吊点设置在模块顶部橇架上,则在吊装时会增加顶部橇架的挠度变形,或者对顶部橇架进行加强。因此,在模块两侧设计了可拆卸的吊架,连接上下橇架,将吊装时的力能够传递到底部橇架,从而优化了顶部橇架的设计。同时,吊架采用嵌入式自导向设计,使拆装更加方便。

嵌入式自导向连接板(图6)是为方便拆装吊架而设计的,采用双销结构,上部销轴安装采用开口式设计,自动滑入销孔旋转定位下部销轴,从而达到吊架自动定位安装。

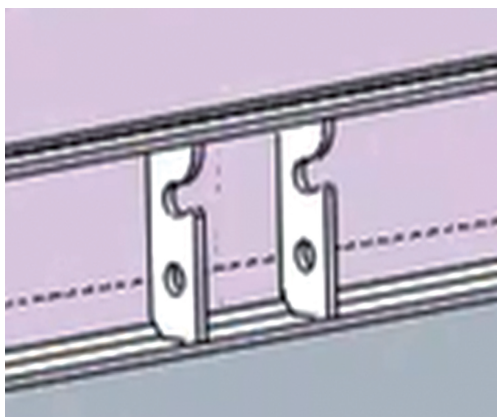


图6 嵌入式自导向连接板

3 模块的有限元分析

3.1 有限元模型

模块在设计时遵循标准《钢结构焊接规范》(AWS D1.1/D1.1M:2010)^[16]、《钢结构设计规范》

(GB 50017—2003)^[17]、API RP 2A WSD—2000^[18]要求。

为确保模块设计强度满足规范要求,应用海事结构有限元分析软件 SACS 对模块进行计算分析。模块3橇架的有限元模型如图7所示(在设计中分别对模块1~5进行建模计算,由于模块3受载荷最大,本文仅选取模块3进行分析)。SACS 软件具有风载荷自动加载功能和杆件强度校核功能,并且通过了 API(美国石油协会)认证,具有操作简单、运算速度快、查看结果方便以及计算结果可靠等特点^[19]。

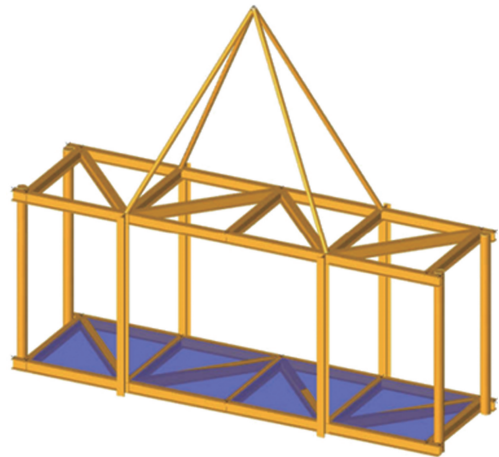


图7 模块3橇架有限元模型

3.2 计算工况

根据模块橇架实际使用工况和地面防砂设备在橇架上的重力分布,分别对模块橇架进行底橇强度分析和整体吊装强度分析。

(1)计算重力 G 。

$$G = mg \quad (1)$$

式中: m 为物体本身的质量; g 为物体所在地区的重力加速度。

(2)计算底橇载荷 C_1 。结构自重约5.2 t,重力加速度为 9.81 m/s^2 ,在底板加载均布载荷,共加载 $27 \times 9.81 = 264.87 \text{ kN}$ 。约束位置为立柱顶端所在位置, $C_1 = \text{自重} + \text{安全载荷}$ 。

(3)计算整体吊装载荷 C_2 。结构自重约5.2 t,重力加速度为 9.81 m/s^2 , $G_1 = 5.2 \times 9.81 = 51.012 \text{ kN}$ 。

吊重:在底板加载均布载荷,共加载 $G_2 = 27 \times 9.81 = 264.87 \text{ kN}$ 。

整体吊重组合工况按照2.0倍动力放大系数, $C_2 = 2.0 \times (G_1 + G_2) = 2.0 \times (51.012 + 264.87) = 631.764 \text{ kN}$ 。

(2)进行了模块载荷工况分析,并应用海事结构有限元分析软件 SACS 完成了模块橇架的有限元强度计算分析。计算结果表明,模块橇架在底橇受载工况和整体吊装工况下的最大 UC 值分别为 0.43 和 0.68。满足 API RP 2A WSD—2000 要求。

参考文献

- [1] 朱岩. 砂砾岩压裂中砾石对水力裂缝扩展影响机理研究[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(2): 34-36.
- [2] 曾健, 曹林祥. 外海有限条件下深水平台施工关键技术[J]. 港口航道与近海工程, 2023, 60(4): 93-97.
- [3] 陈玉婷, 赵晨晖, 冯超, 等. 深水高产油气田智能完井与防砂一体化技术的应用[J]. 石油工程建设, 2020, 46(S1): 229-232.
- [4] 杨文来, 袁少锋, 坑超, 等. 深层煤层气一体化橇装设备应用问题及防治措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(11): 22-24.
- [5] 陶广宏, 耿世雄, 赵嘉琪, 等. 模块化机器人结构设计及运动特性分析[J]. 机床与液压, 2024, 52(5): 45-52.
- [6] 赵京, 张晓丹, 张自强, 等. 模块化机械装备及其设计方法研究综述[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(10): 19-29.
- [7] 冯定, 杨成, 王鹏, 等. 海洋钻修机模块划分研究[J]. 石油机械, 2011, 39(5): 75-78.
- [8] 顾新建, 杨青海. 产品模块化是中国成为制造强国的必由之路: 解读《机电产品模块化设计方法和案例》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(9): 1127-1133.
- [9] 沈福金. 国外发展模块化机床的趋势值得关注[J]. 制造技术与机床, 2011(3): 4.
- [10] 卢贤林, 鲁玉军. 新能源汽车装配产线模块化方法研究[J]. 软件导刊, 2024, 23(4): 59-66.
- [11] 孙栋, 汤奇荣, 刘明昊, 等. 面向模块化设计的水下机器人集群编队控制[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(2): 68-73.
- [12] 张学东, 王传齐, 姬庆涛. 基于 SolidWorks 的液压支架参数化模块化设计[J]. 机械工程师, 2024(1): 129-132, 135.
- [13] 罗雨, 叶朔朔, 许耀波, 等. 模块化管道焊接机器人结构设计与分析[J]. 机床与液压, 2024, 52(15): 22-29.
- [14] 吴磊, 郭斌, 徐若楠, 等. 泛在计算视角下的群智模块化机器人[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(11): 2107-2151.
- [15] 李云芳, 李京育, 贾志强, 等. 模块化设计在管道站场建设中的应用[J]. 交通企业管理, 2017(3): 79-80.
- [16] Structural welding code-steel; AWS D1. 1/D1. 1M; 2010 [S]. Miami: American Welding Society, 2010.
- [17] 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [18] Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms: working stress design: API RP 2A WSD—2000 [S]. Washington: American Petroleum Institute, 2000.
- [19] 侯敏, 张志伟, 孙守仁, 等. 9000 kN 深水钻机井架设计与试验[J]. 石油机械, 2016, 44(8): 37-41.
- [20] Specification for structural steel buildings allow able stress design and plastic design: AISC (335-1989) [S]. Chicago: American Institution of Steel Construction, 1989.

Research on Modularization of Ground Skid-mounted Equipment for Offshore Sand Control

ZHOU Xinwei

(China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: In order to reduce the floor area of ground equipment for sand control operations, meet the fast and flexible installation and disassembly of subsequent sand control operations, as well as the post-phase inspection, maintenance, inspection and repair, the layout of sand control equipment and process in deepwater gas field was studied. The modular adaptability analysis, modular equipment design, selection and module key connection design were carried out, the modular combination of surface process equipment was realized to ensure the safety and smooth completion of development Wells. Finally, the finite element analysis software SACS was used to model and simulate the module, and the load condition of the module was analyzed and calculated. The modular related design satisfies the design index and safety analysis of the operation, and has certain reference significance for the popularization of the relevant modular technology and scheme in the self-operated deepwater development projects.

Keywords: sand control operation; skidding equipment; platform; modularization; three-dimensional analysis