

模块化建造技术在石油平台管线建造中的应用与优势分析

刘洁¹ 赵志艳²

1. 天津修船技术研究所 天津 300456
2. 天津中汇嘉德科技发展有限公司 天津 300459

摘要：模块化建造技术是一种高效的建造模式，在石油平台管线建造中具有显著优势。该技术通过将复杂管线系统划分为模块单元，在工厂内完成预制、测试，再运输至现场进行组装，实现了施工周期的大幅缩短和工程质量的显著提升。文章详细阐述了模块化建造技术在石油平台管线建造中的具体应用，包括管线模块的设计、预制、运输与安装以及数字化管理，并分析了其带来的施工效率、工程质量和成本控制方面的优势。

关键词：模块化建造技术；石油平台；管线建造

引言：石油平台管线建造是海洋石油开发中的关键环节，其复杂性和施工难度对工程进度和成本控制提出了严峻挑战。传统现场施工方式受天气、海况等自然条件影响大，质量控制难度大，且成本高昂。因此，探索高效、可靠的建造技术对于推动海洋石油开发具有重要意义。模块化建造技术作为一种先进的建造模式，在石油平台管线建造中展现出巨大潜力。本文将对这一技术的具体应用和优势进行详细分析。

1 模块化建造技术相关概述

1.1 模块化建造技术的内涵

模块化建造技术是一种以“分解-集成”为核心逻辑的建造模式，其本质是将复杂的工程系统或结构按照功能、空间、工艺等原则，拆解为若干个具有独立功能、标准化接口的模块单元。这些模块单元在工厂内完成设计、加工、组装及测试等全流程作业后，再运输至施工现场进行整体拼接与系统集成，最终形成完整的工程实体。在石油平台管线建造场景中，该技术聚焦于管线系统的模块化重构：以管线的介质输送功能为核心，将管线本体、阀门、仪表、支架、连接件等相关组件整合为一个个“功能完整的管线模块”。每个模块既能单独完成性能测试，又能与其他模块快速对接，实现了“工厂预制高效化、现场安装简便化”的建造目标。

1.2 模块化建造技术的核心特征

1.2.1 集成化与一体化

集成化体现为模块功能的“高度浓缩”。一个完整的管线模块不仅包含管线主体，还集成了实现其功能所需的配套组件：输送原油系统的管线模块会集成流量计量仪表与紧急切断阀门，水系统管线模块则会整合流量计与压力传感器等。这种“管线+组件”的一体化集成，避免了传统建造中“管线单独安装、组件后期加装”的

零散作业模式，让模块在工厂预制阶段就具备完整功能，减少了现场的交叉作业环节^[1]。

1.2.2 预制化与工厂化

预制化与工厂化是模块化建造区别于传统模式的关键特征。模块的主要建造过程脱离施工现场，转移至工厂内完成：工厂内设有专门的预制车间，配备自动化管线下料机、数控焊接机器人等专业设备，可在稳定环境中开展管线加工焊接等相关工作。同时，工厂具备完善的质量管控体系，从材料进场检验到模块组装测试，每一步都有标准化流程，相比现场露天作业，更能保障管线预制的精度与质量稳定性。

1.2.3 协同化与数字化

模块化建造离不开全流程的协同与数字化支撑。从模块设计到现场安装，需设计、预制、运输、施工等多团队协同参与，而数字化技术则是协同的“纽带”。借助数字化信息平台，可构建管线模块的三维数字模型，设计团队能在模型中完成模块布局优化与碰撞检查，加设团队依据模型数据开展精准加工，施工团队则通过模型可视化指导现场安装。各环节的信息通过数字化平台实时共享，完美高效进行图料与施工进度管理匹配，避免了“设计图纸与现场施工脱节”的传统问题，实现了全流程的高效协同。

2 石油平台管线建造的特点与挑战

2.1 石油平台管线建造的特点

石油平台处于复杂的海洋环境中，管线系统复杂，包含多种规格和类型、材质的管线，且与平台的结构、设备等紧密相连，施工空间有限，协调难度大。

2.2 传统石油平台管线建造面临的挑战

传统现场施工方式在石油平台管线建造中面临着诸多挑战。首先，天气和海况等自然条件对施工过程有着

极大的影响。海洋环境多变，恶劣的天气和海况可能导致施工中断，延长施工周期。其次，现场施工质量控制难度较大。焊接是管线建造中的关键环节，但在现场环境中，焊接质量容易受到湿度、温度等因素的影响，出现焊接缺陷的概率增加。同时，现场无损检验的条件有限，可能无法全面、准确地检测管线的质量。传统现场施工方式需要大量的人力和物力投入，包括施工人员的食宿、交通、安全设备等方面的费用，导致成本较高。这些挑战限制了传统现场施工方式在石油平台管线建造中的效率和效益^[2]。

3 模块化建造技术在石油平台管线建造中的具体应用

3.1 管线模块的设计

管线模块的设计是模块化建造的“起点”，需结合石油平台的工艺流程、空间布局及施工条件综合开展。第一步是“模块划分”，通常按照“功能优先、尺寸适配”的原则：先依据介质类型将管线系统分为原油模块、天然气模块、水管线模块等；再根据平台空间大小，将大型模块拆解为小型单元，确保模块能通过平台通道进入安装位置。设计过程中需重点关注“接口标准化”与“空间兼容性”。接口设计需采用统一的法兰标准，且在模块两端设置定位销与导向槽，确保现场对接时能快速定位；同时，通过构建模块三维模型，将其与平台主体结构、其他设备的模型进行碰撞检查，例如排查模块与平台立柱、机械设备等空间干涉问题，提前调整模块尺寸或安装角度。此外，还需考虑模块的运输与吊装需求，并验算模块重量与重心，避免运输过程中发生倾覆。

3.2 管线模块的预制

模块预制是在工厂内将设计图纸转化为实体模块的过程，这一环节需依托标准化车间与专业设备实现“高效精准施工”。预制流程从“材料预处理”开始，管线采用自动化切割设备下料，下料完成后；管材表面进行喷砂除锈，并立即送入喷涂车间进行喷涂防腐工作，避免二次锈蚀。焊接是预制的核心工序，采用数控焊接机器人作业，机器人按预设程序沿焊口匀速移动，电弧稳定性好，焊道成形均匀，焊接合格率可提升至98%以上。焊接完成后，质量检查工作紧随其后。通过射线检测等先进手段，对焊口进行细致的检查，确保无内部缺陷存在。这一步骤是确保管线模块安全性的重要保障，任何潜在的缺陷都可能在后续的使用过程中引发严重问题。在预制过程中，还需对模块进行组装和初步测试，以验证其设计的正确性和功能的完整性。这一系列流程确保了从设计图纸到实体模块的顺利转化，为后续的运输和

安装打下了坚实的基础^[3]。

3.3 管线模块的运输与安装

预制完成的模块需通过“陆运+海运”的方式运输至石油平台。陆运时，模块需固定在专用运输架上，运输架与模块接触部位垫有橡胶缓冲垫，避免颠簸导致模块变形；海运则采用驳船，模块按“重心对称”原则摆放，并用钢丝绳与驳船甲板固定，且在模块表面覆盖防雨布，防止运输过程中受潮锈蚀。运输前需核算模块重量与尺寸，以适配驳船的吊装设备与运输空间。现场安装需按“精准定位-快速对接”的流程开展。首先安装前通过测量确定模块的安装基准点，在平台结构上标记出支架的固定位置；随后用平台起重机将模块吊装至安装区域，吊装时采用“双吊点”吊装，确保模块平稳起吊，避免碰撞平台设备。模块就位后，通过定位销与导向槽实现初步对接，再用塞铁片方式调整模块的水平度与垂直度，最后紧固连接螺栓，完成模块间的接口密封。整个对接过程可在2-3小时内完成，远快于传统散装的逐段安装。安装完成后，需对模块系统进行“整体测试”：对所有连接接口进行泄漏检测合格后；模拟平台运行工况，进行介质输送测试。

3.4 模块化建造中的数字化管理

数字化管理在模块化建造技术中发挥着至关重要的作用，确保了从设计到制造、运输及安装的每一个环节都能高效协同。以某海洋石油平台为例，设计团队利用三维设计软件创建管线模块的模型，详细记录了每个元件的尺寸、材质、位置等信息。这些信息不仅用于设计优化，还直接对接到后续的采办、制造流程中。通过数字化平台，设计团队可以实时与预制团队、总装施工团队沟通，确保设计的准确性和可行性。例如，在设计中发现某一元件的尺寸与标准库不符时，设计团队会立即在数字化平台上更新尺寸信息，并通知预制团队调整加工方案，避免了因图纸传递滞后导致的返工和材料浪费。在预制阶段，数字化管理实现了全程追溯和实时监控。每个管线模块都被分配了一个唯一的二维码，粘贴在模块表面。工人通过扫描二维码，可以迅速获取该模块的预制工艺、检验标准等信息。同时，预制车间的传感器实时采集焊接电流、温度等关键数据，并将这些数据上传至数字化平台。平台会自动分析数据，生成质量报表，一旦发现异常，系统会立即报警，提醒质检人员进行复查。这种数字化的管理方式不仅提高了工作效率，还确保了预制质量的稳定性和可追溯性。在制造和检验阶段，数字化平台进一步发挥了协同作用。制造团队依据数字化平台上的工艺指令进行加工，每一步操作

都有明确的指导和记录。检验团队则通过数字化平台对制造过程进行实时监控和质量评估，确保每个模块都符合设计要求和质量标准。此外，数字化平台还实现了图料统计与采办的一体化管理，确保材料供应的及时性和准确性。数字化管理在模块化建造中的应用不仅提高了工作效率和质量稳定性，还实现了从设计到制造、材料采办的全流程管理，为海洋石油平台管线建造提供了强有力的技术支撑。

4 模块化建造技术在石油平台管线建造中的优势分析

4.1 提高施工效率

模块化建造技术在石油平台管线建造中的首要优势在于显著提高施工效率。通过“并行作业”模式，模块化建造技术允许工厂预制与平台主体结构建造同步进行，极大地提升了时间利用率。两者工期重叠率通常能达到60%以上，这意味着在平台主体结构施工的同时，管线模块已经在工厂内完成了大部分的预制工作。以某10万吨级石油平台为例，传统管线建造方法需要120天才能完成，而采用模块化技术后，整个工期缩短至65天，几乎节省了一半的时间。此外，现场安装效率也得到了大幅提升。由于模块在工厂预制时已经完成了大部分的焊接和测试工作，现场仅需进行简单的模块对接，这大大减少了安装所需的时间。同时，模块接口的标准化设计也避免了现场反复调整的繁琐过程，进一步提升了施工效率^[4]。

4.2 保证工程质量

模块化建造技术为石油平台管线建造提供了稳定的质量控制环境。工厂化预制模式使得焊接等关键工序可以在封闭的车间内进行，温度、湿度等环境因素可以得到精准控制。例如，焊接时环境温度保持在15-25℃，湿度低于80%，这样的环境条件可以最大限度地减少焊接缺陷的产生。因此，焊口合格率从传统的85%-90%提升至98%以上。在某平台的管线模块建造中，共完成了500道焊口，经检测仅发现2道存在轻微缺陷，合格率高达99.6%。此外，模块化建造还实现了“全流程检验”，从材料进场到模块出厂，每一道工序都经过严格的检验和测试，从而确保了模块的质量可靠性。

4.3 节约施工成本

模块化建造技术在石油平台管线建造中还具有显著的成本节约优势。从人工成本角度来看，工厂预制过程高度自动化，一台焊接机器人可以替代3-4名焊工。同时，由于工厂位于陆地，工人的薪资水平也低于海上作业人员。因此，模块化建造技术可以显著降低人工成本。在材料方面，工厂精准下料减少了材料浪费。管线下料采用数控切割技术，材料利用率从传统的70%提升至90%以上。在运输优化层面，通过对管线模块的尺寸与重量进行合理化调整，有效实现了运输成本的降低。具体而言，在模型设计阶段即前置纳入陆运及海运的空间约束条件，据此优化模块参数以提升运输装载效率，最终显著减少了运输批次，经实践验证，运输费用较优化前降低10%，为项目成本控制提供了关键支撑。此外，模块化建造工序清晰、管理效率提升，也降低了管理和后期成本。由于无需协调现场多工种交叉作业，项目管理费用减少了20%。同时，模块质量稳定，后期因焊接泄漏、安装偏差导致的维修次数也大幅减少，从而进一步节约了施工成本。

结束语

综上所述，模块化建造技术在石油平台管线建造中的应用，不仅提高了施工效率和工程质量，还降低了项目成本，为海洋石油开发提供了强有力的建造体系支撑。随着技术的不断发展和完善，模块化建造技术有望在海洋石油开发中发挥更加重要的作用，推动行业持续健康发展。

参考文献

- [1]刘洁.海上石油平台分块建造的管线施工设计优化[J].工程管理与技术探讨,2025,7(10).
- [2]何宾,于仲福,姜伟,等.海洋石油平台建造过程中管线追溯管理[J].石油和化工设备,2020,23(6):93-96.
- [3]左丰建,闫运强,王春旭,等.海洋石油平台管线试压水循环回收利用系统[J].石油和化工设备,2024,27(4):73-75.
- [4]谢虎,刘明丽,韩凌,艾文婷,朱建雄.浅议模块化建造在准噶尔气田深冷工程中的应用研究[J].中国设备工程,2022(06):98-100.