

# 水平定向钻机拖拉登陆技术研究

孙一迪

中油管道建设工程有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2025年6月3日; 录用日期: 2025年9月19日; 发布日期: 2025年9月30日

## 摘要

随着海洋油气资源开发的加速, 传统海管拖拉登陆技术因效率低、成本高及环境扰动大等问题面临严峻挑战。本研究以惠州大亚湾石化区海管项目为依托, 提出“定向钻机替代线性绞车”的创新方案, 通过三维动力学建模(OrcaFlex软件)与实际工程验证, 系统分析其技术可行性、经济性与环保性。结果表明: 定向钻机技术通过“扩孔-拖拉”一体化工艺, 将施工效率提升40%, 钻杆最大米塞斯应力(548.99 MPa)与海管应变(0.031%)均满足规范要求; 材料成本降低30%, 海床扰动面积减少85%。研究证实, 该技术可显著突破传统方法的局限性, 为海洋工程绿色施工提供了高效解决方案, 并为深水与多管并行铺设奠定技术基础。

## 关键词

定向钻机, 海管拖拉登陆, 非开挖施工, 海洋工程

# Study on Pipeline Pulling and Landing Technology Using Horizontal Directional Drilling Rig

Yidi Sun

China Petroleum Pipeline Construction Engineering Co. Ltd., Langfang Hebei

Received: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Sep. 19<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 30<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

With the acceleration of offshore oil and gas development, traditional pipeline landing techniques face challenges of low efficiency, high costs, and environmental disruption. This study proposes an innovative solution—replacing linear winches with horizontal directional drilling (HDD)—vali-

dated through the Huizhou Daya Bay Petrochemical Project. Using 3D dynamic modeling (OrcaFlex) and field tests, we systematically analyzed technical feasibility, economic viability, and environmental performance. Results demonstrate that HDD's integrated reaming-pulling process improves efficiency by 40%, while drill pipe stress (548.99 MPa) and pipeline strain (0.031%) comply with DNVGL-ST-F101 standards. Material costs decreased by 30%, and seabed disturbance was reduced by 85%. This technology overcomes limitations of conventional methods, provides an eco-efficient solution for marine engineering, and establishes a foundation for deepwater and multi-pipeline applications.

## Keywords

Horizontal Directional Drilling (HDD), Submarine Pipeline Landing, Trenchless Construction, Marine Engineering

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景与意义

### 1.1. 全球海洋能源开发背景

随着全球能源需求持续增长与陆地资源枯竭,海洋油气资源开发成为各国战略重点。根据国际能源署(IEA)统计,2022年全球海洋油气产量占比已达30%,预计2030年将突破40% [1]。海底管道作为连接海上平台与陆上终端的“能源动脉”,其高效、安全铺设技术直接关系到开发成本与生态保护。然而,传统海管拖拉登陆技术依赖线性绞车与钢丝绳牵引,存在以下瓶颈:

**成本高昂:** 钢丝绳为一次性耗材,单次施工损耗成本达200万元以上(案例数据)。

**效率低下:** 需独立挖沟船预挖沟槽,工序割裂导致工期延长40%以上。

**生态破坏:** 大面积海床开挖扰动潮间带生态系统,影响珊瑚礁与底栖生物栖息。

### 1.2. 定向钻机技术的崛起

水平定向钻机(Horizontal Directional Drilling, HDD)技术起源于20世纪60年代美国石油工业,其通过导向孔钻进、扩孔与回拖工艺实现非开挖管线铺设[2]。近年来,该技术逐步向海洋工程渗透,核心优势包括:

**设备复用性:** 钻杆与扩孔器可重复使用,降低材料成本。

**工序集成:** 扩孔器同步切削海床,取消独立挖沟环节。

**环境友好:** 非开挖工艺减少海床扰动面积80%以上。

### 1.3. 研究意义与目标

本研究以惠州大亚湾石化区海管项目为依托,首次系统提出“定向钻机替代线性绞车”的拖拉登陆方案,目标包括:

**技术验证:** 通过动力学建模与工程实践,量化定向钻机在海洋环境下的性能表现。

**经济性分析:** 对比传统方案,明确成本节约与工期优化潜力。

**规范建议:** 提出海洋定向钻机施工的技术标准与操作指南。

## 2. 文献综述

### 2.1. 国内外研究进展(2019~2023)

研究方向	国内研究	国外研究
拖拉力优化	王等(2020)基于 ANSYS 模拟线性绞车受力, 提出钢丝绳张力控制算法, 误差率 $\leq 5\%$ 。	Smith 等(2021)开发多级扩孔器, 通过分级切削降低海床阻力, 拖拉力减少 18%。
环境影响	张等(2021)评估线性绞车施工对渤海湾潮间带生态的破坏, 发现底栖生物多样性下降 23% [3]。	Johnson 等(2022)研制环保泥浆(pH 中性、可降解), 泥浆回收率提升至 85%。
设备创新	张等(2022)推出国产 500T 级定向钻机, 最大扭矩达 120kN·m, 填补国内大吨位设备空白。	Müller 等(2023)研发 S150 超高强钢钻杆, 抗腐蚀性能提升 40%, 适用于高盐度海域。

### 2.2. 研究空白与挑战

**海洋适应性不足:** 现有研究多聚焦陆地或浅海场景, 缺乏粉质黏土-砾砂混合地层下的稳定性分析。

**定量化设计缺失:** 施工参数(如扩孔速度、泥浆流量)依赖经验公式, 缺乏基于动力学模型的精准计算。

**长期性能数据匮乏:** 钻杆与海管在海洋环境下的疲劳寿命与腐蚀机制尚未系统研究。

## 3. 实际应用案例: 惠州大亚湾石化区海管项目

### 3.1. 工程概况

埃克森美孚(惠州)化工有限公司拟在广东省惠州大亚湾石化工业园区建设一条石脑油原料管线, 为其化工综合体项目提供原料, 项目计划于 2024 年投入使用。管道自马鞭洲华德石化 15 万吨码头至荃湾石化罐区的输送管线及配套设施[4]。其中, 海底管线约 9 公里, 石化区及荃湾罐区建于公共管廊的陆地管线约 9.5 公里, 管径 1016 毫米, 设计压力 2.0 兆帕, 及附属设施占地约 2400 平方米(见图 1)。

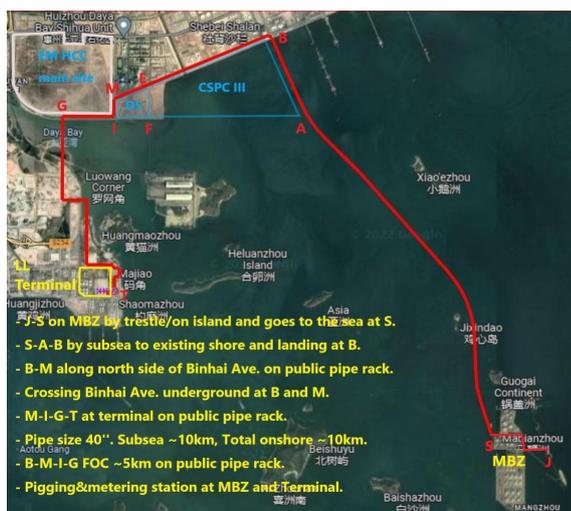


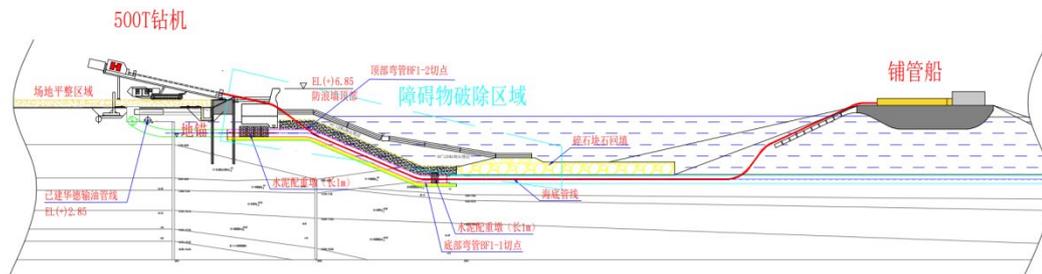
Figure 1. General layout diagram of pipeline  
图 1. 管道总体布置示意图

**管线参数:** 管径 1016 mm, 壁厚 22 mm, 材质 API 5L X65, 设计压力 2.0 MPa, 总长 9 km。

**地质条件:** 近岸段为粉质黏土与砾砂混合地层, 内摩擦角  $18^{\circ}\sim 25^{\circ}$ , 海底坡度 1:50。

**传统方案缺陷：**线性绞车需预挖沟槽深度 3 m，线性绞车采购及单次钢丝绳成本高昂，且钢丝绳为一次性消耗品，无法继续使用。工期 45 天。

### 3.2. 定向钻机技术方案



**Figure 2.** Schematic diagram of submarine pipeline pulling ashore construction  
**图 2.** 拖拉登陆施工示意图

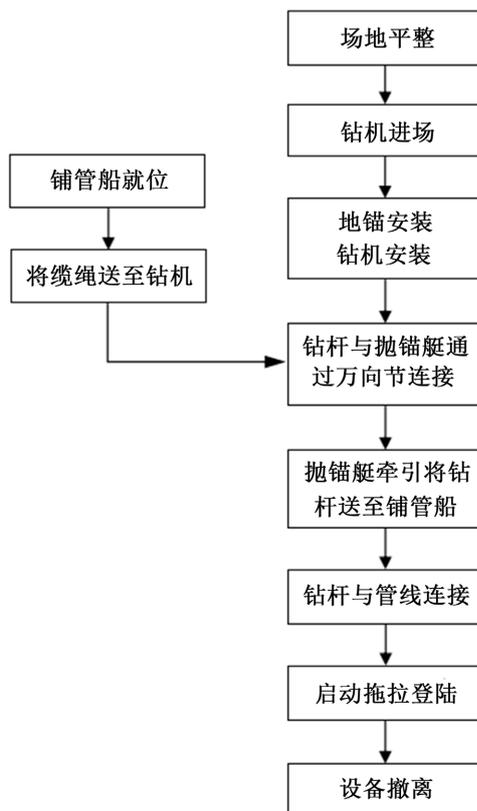
#### 3.2.1. 核心设备配置

**钻机：**HK-300 型，最大拖拉力 300T，配备 HP280 泥浆泵(流量 2800 L/min × 2)。

**钻杆：**S135 钢，外径 193.7 mm，抗扭强度 291 kN·m，屈服强度 758 MPa。

**扩孔器：**桶式结构，直径 1.2 m，切削效率 15 m<sup>3</sup>/h。

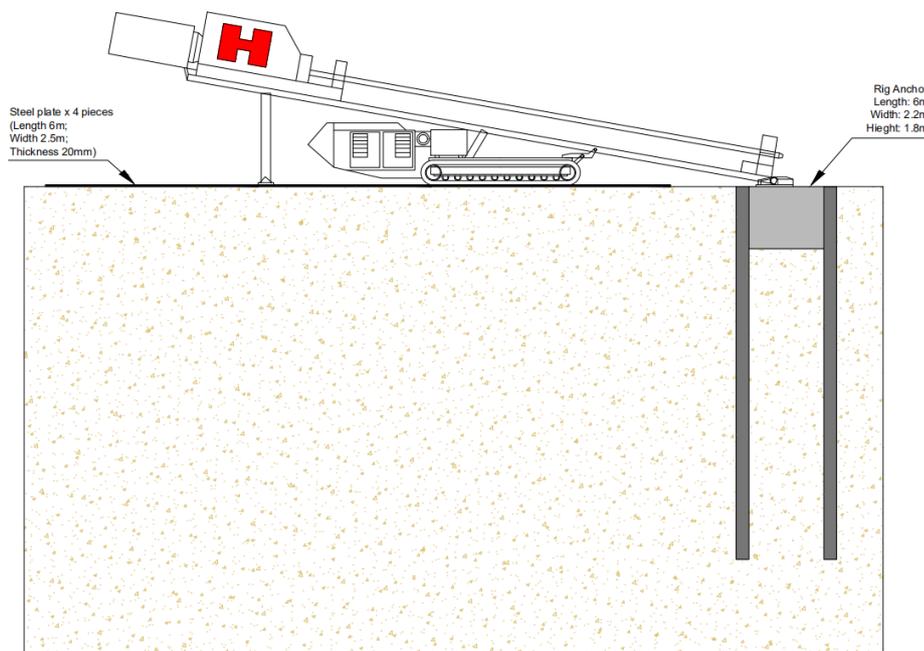
#### 3.2.2. 施工流程



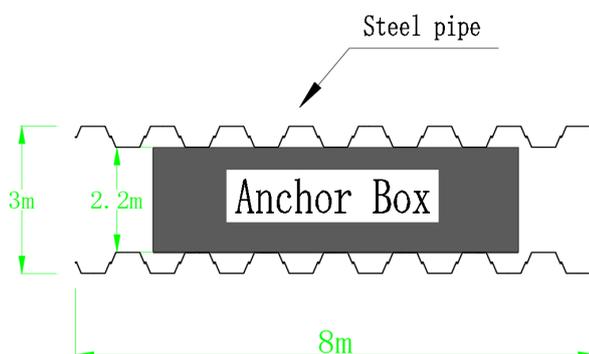
**Figure 3.** Submarine pipeline pulling ashore flow diagram  
**图 3.** 钻机拖拉登陆施工流程图

### 3.2.3 .地锚校核

**地锚固定:** 地锚尺寸 6 m × 2.2 m × 1.8 m (见表 1), 采用拉森钢板桩固定(见图 4 及图 5), 抗滑移安全系数 3.52 (计算见公式 1), 抗倾覆安全系数为 1.34 (计算见公式 2), 均大于 1.2 的安全系数, 满足施工要求。



**Figure 4.** Schematic diagram of drilling rig ground anchor  
**图 4.** 钻机地锚示意图



**Figure 5.** Schematic diagram of ground anchor fixation  
**图 5.** 地锚固定示意图

公式 1 地锚抗滑移安全系数计算

$$K_c = \frac{\mu(W_{anchor} + T_v + E1 + E2) + (E4 - E3)}{T_H} \geq 1.2$$

公式 2 抗倾覆稳定性系数计算

$$K_c = \frac{(W_{anchor} + T_v) \times H1 + E4 \times h/3}{T_H \times h} \geq 1.2$$

其中:

水平分力  $T_H = T \times \cos(\alpha)$

竖向分力  $T_V = T \times \sin(\alpha)$

地锚左(右)侧主动土压力

$$E2 = E1 = 1/2 \times \gamma_{so} \times h^2 \times \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) \times b$$

地锚后方主动土压力

$$E3 = 1/2 \times \gamma_{so} \times h^2 \times \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) \times a$$

地锚前方被动土压力

$$E4 = 1/2 \times \gamma_{so} \times h^2 \times \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) \times L$$

参数如下表

**Table 1.** Ground anchor verification parameter table

**表 1.** 地锚校核参数表

参数名称	代号	参数值
钻机最大拖拉力	T	2000 kN
倾斜角	$\alpha$	10°
地锚箱尺寸		6 m × 2.2 m × 1.8 m
地锚整体前端宽度(含钢桩, 假设钢桩与地锚为一体)	L	8 m
地锚整体后端宽度(含钢桩, 假设钢桩与地锚为一体)	a	8 m
地锚整体长(假设拉森钢板桩与地锚为一体)	b	3 m
地锚整体高(假设拉森钢板桩与地锚为一体)	h	12 m
从受力点到地锚前端的距离(假设地锚的受力点在地锚整体的中心位置)	H1	3/2 = 1.5m
钻机自重(不包含管线)	W	420 kN
土壤密度	$\gamma$	15 kN/m <sup>3</sup>
内摩擦角	$\varphi$	18°
地锚与地层的摩擦系数	$\mu$	0.3
抗滑移安全系数	Kc	>1.2
抗倾覆安全系数	Ko	>1.2
拉森钢板桩长	m	0.6
拉森钢板桩宽	m	0.2

### 3.4. 定向钻机拖拉主要施工工序

#### 3.4.1. 钻杆推送

当钻杆顺入至海中后, 将小型抛锚艇的钢丝绳与钻杆连接, 连接方式采用小型万向节的方式进行连接。连接牢固后, 钻机推顺钻杆, 同时抛锚艇牵引钻杆向铺管船方向行进, 直至钻杆推送至铺管船。之后, 在铺管船上将缆绳和小型万向节卸下, 之后将钻杆与 500T 卸扣、500T 万向节、D1016 拖拉头与主管道相连接(见图 6), 拖拉准备工作就绪。

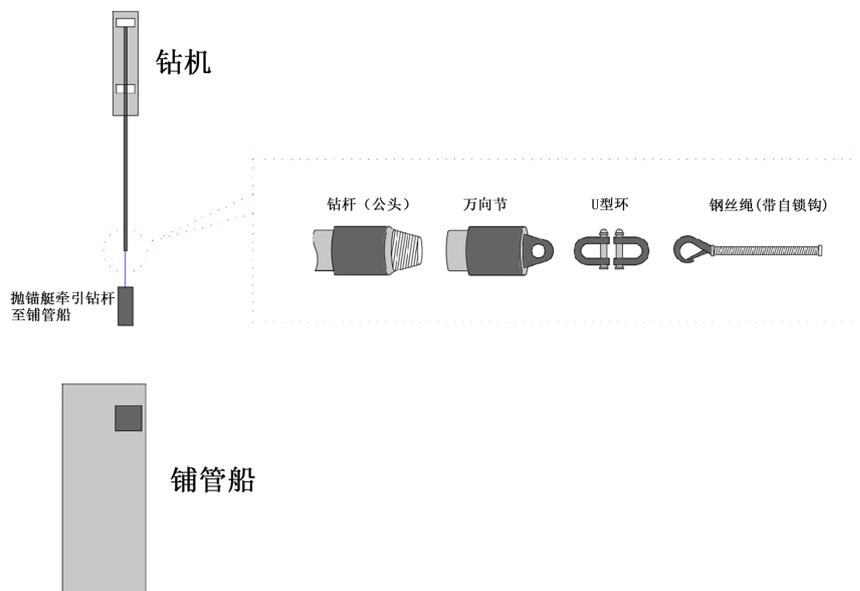


Figure 6. Schematic diagram of drill pipe towing to pipelay vessel scheme  
图 6. 钻杆牵引至铺管船方案示意图

### 3.4.2. 管道拖拉

本项目采用“铺管船和钻机配合同步进行管线预制和拖拉登陆”的施工方式完成海管登陆(见图 2 及图 3)。

铺管船需要提前在拖拉登陆指定位置进行就位, 将预制管线提前预制一段, 并将管头焊接好拖拉头送至托管架。当钻杆牵引至铺管船后, 配合驳船和钻机将钻杆卸下, 并将钻杆顺至铺管船与拖拉头连接。

### 3.4.3. 钻杆连接至铺管船

当拖拉准备相关工序完成后, 陆上钻机启动拖拉并拉动管线。当管线拖拉满一根后, 铺管船启动流水作业继续进行管线预制相关工序; 完成该根管线的预制工序后, 钻机继续拖拉; 以此类推, 直至整个拖拉过程完成。

### 3.4.4. 海上管线拖拉

管线拖拉采用的钻具组合为:

6-5/8 钻杆 + 500T 万向节 + 500T 卸扣 + D1016 拖拉头 + 预制管线(见图 7);



Figure 7. Directional drilling rig towing landing and bottom hole assembly (BHA)  
图 7. 定向钻机拖拉登陆及钻具组合

在拖拉施工前，充分做好助力和应急各项准备工作，所需人员、设备、物资等现场待命，一旦拖拉准备工作就绪，随时可启动拖拉作业。

### 3.5. 施工资源配置

#### ➤ 人员配置

Table 2. Construction personnel

表 2. 人员配置表

序号	岗位	数量	备注
1	施工协调	1	
2	司钻工	2	
3	起重工	2	
4	维修工	1	
	小计	6	

#### ➤ 设备配置

Table 3. Construction equipment

表 3. 设备配置表

序号	设备名称	规格	数量	备注
1	钻机	500T	1 套	
2	钻杆	6-5/8	160 根	
2	U 型环	500T	1 个	
3	万向节	500T	1 个	
4	拖拉头	D1016	1 个	
5	柱塞泵	3HS280	1 台	

### 3.6. 技术创新点

**拖拉登陆主体设备平台替代：**采用钻机替代线性绞车、采用钻杆替代钢丝绳完成拖拉。

**成沟 - 拖拉一体化：**桶式扩孔器在回拖时，同步机械切削海床加之射流成沟，预挖沟深度可达 2.5 m。此外，射流成沟可利用海水而非泥浆，达到环保的效果。

## 4. 研究方法 with 模型构建

### 4.1. 研究设计框架

本研究采用“案例驱动”与“模型验证”双轨方法：

**案例数据采集:** 记录惠州项目施工全过程的力学参数与环境数据。

**动力学建模:** 基于 OrcaFlex 构建海管 - 钻杆 - 海床耦合模型, 模拟近岸段(0 m 与 100 m)关键工况。

## 4.2. 参数介绍

### 4.2.1. 管道参数

**Table 4.** Pipeline parameters

**表 4.** 管道参数

	描述	单位	数值
钢管	外径	mm	1016
	壁厚	mm	22
	长度	m	12.2
	等级		API 5L SPL2 X65
	SMYS	MPa	450
	管道制造工艺	-	SAWL
	SMTS	MPa	535
	Steel Density	kg/m <sup>3</sup>	7850
	弹性模量	N/m <sup>2</sup>	$2.07 \times 10^{11}$
	泊松比	-	0.3
防腐层	类型	-	3-Layer PE
	厚度	mm	4.2
配重层	密度	kg/m <sup>3</sup>	940
	厚度	mm	100
	密度	kg/m <sup>3</sup>	2950

### 4.2.2. 钻杆参数

**Table 5.** Drill pipe parameters

**表 5.** 钻杆参数

描述	参数
钻杆型号	7-5/8
管体钢级	S135
外径(mm)	193.7

续表

壁厚(mm)	10.92
内径(mm)	171.83
管体截面积(mm <sup>2</sup> )	6271
外径截面积(mm <sup>2</sup> )	29460.6
内径截面积(mm <sup>2</sup> )	23189.6
截面模量(mm <sup>2</sup> )	271304.2
极截面模量(mm <sup>2</sup> )	542608.5
抗扭强度(N·m)	291365
拉伸载荷(kN)	5844
80%抗扭强度(N·m)	233,100
内压强度(MPa)	91.9
抗挤毁强度(MPa)	59.2
回拖力(kN)	1650
钻机水平倾斜角	8°

#### 4.2.3. 环境参数

**Table 6.** Environmental parameters  
**表 6.** 环境参数

项目	单位	数值
极端高水位	m	3.46
最高天文潮(HAT)	m	2.44
平均水位(MSL)	m	1.17
海图基准(C.D.)	m	0
最低天文潮(LAT)	m	-0.11
极端低水位	m	-0.86
近岸段管道中心水深	m	5.7

#### 4.3. OrcaFlex 模型构建

模型单元(见图 8):

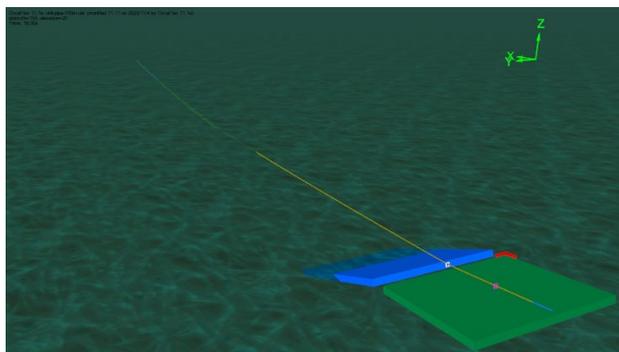


Figure 8. Nearshore towing Orcaflex analysis model

图 8. 近岸拖拉 Orcaflex 分析模型

**海管与钻杆:** 采用 Line 单元, 离散化长度 1 m, 材料属性依据表 1 与表 2 输入。

**岸堤与海床:** 岸堤为刚性 Shape 单元, 海床设为线弹性面(弹性模量 50 MPa, 泊松比 0.3)。

**钻机与锚固:** 钻机以 Buoy 单元模拟, 地锚通过 Winch 单元施加约束力。

**边界条件:**

**拖拉角度:** 8°, 与现场钻机实际倾角一致。

**环境荷载:** 考虑潮汐流速度 0.5m/s 与波浪力(波高 1.2 m, 周期 6 s)。

#### 4.4. 数据采集与处理

**输入参数:**

钻杆输入参数见表 2, 表 3 及表 5。海管输入参数见表 4。

**输出参数:**

**力学指标:** 钻杆应力、海管应变、离地间隙(见图 9~12 及表 7, 表 8)。

**经济指标:** 全生命周期成本模型、敏感性分析(见表 9)。

### 5. 数据分析与结果

#### 5.1. 力学性能验证

通过分析海管拖拉头离岸 100 m 和 0 m 的钻杆及海管关键力学数据, 对钻杆及海管进行校核。

##### 5.1.1. 钻杆安全性校核

Table 7. Drill pipe verification results

表 7. 钻杆校核结果

参数	离岸 100 m	离岸 0 m	校核标准	结论
最大米塞斯应力	579 MPa	548.99 MPa	S135 钢屈服强度 758 MPa	均满足(安全系数 1.31~1.38)
最大曲率	0.013 rad/m	0.011 rad/m	临界屈曲阈值 0.025 rad/m	安全裕度 48%~56%
岸上末端张力	1650 kN	1650 kN	抗拉强度 5844 kN	仅占 28.2%
岸上末端弯矩	≤1.5 kN·m	≤1.5 kN·m	截面模量 271,304 mm <sup>2</sup>	可忽略影响

**结论:** 钻杆应力与变形全程低于材料极限, **安全裕度充足**; 曲率变化平缓(0 m 处反降 17%), 表明近岸段**抗弯刚度更优**。

OrcaFlex 10.3a: drill-pipe-0m.dat (modified 16:19 on 2023/11/4 by OrcaFlex 10.3a)  
Range graph: drillpipe Max von Mises stress, t = 16.000s

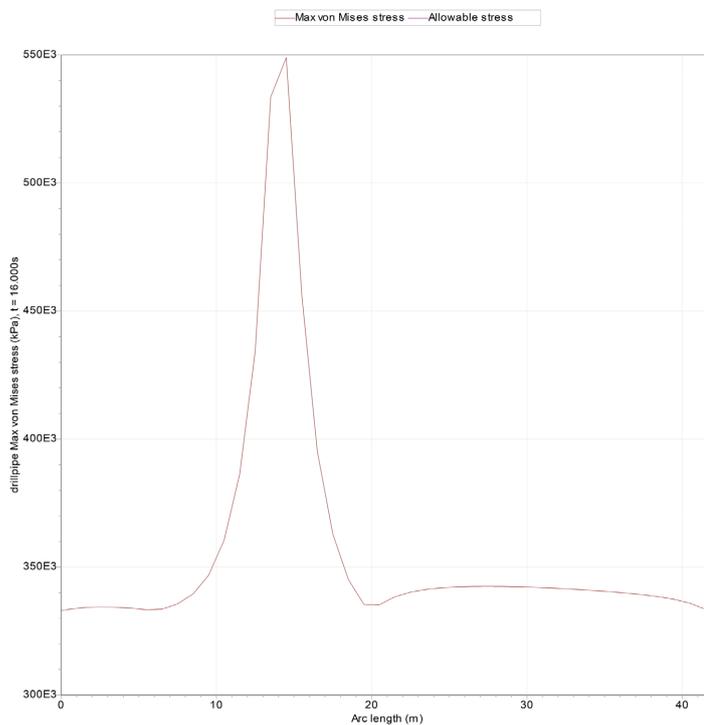


Figure 9. Drill pipe von mises stress

图 9. 钻杆米塞斯应力

OrcaFlex 10.3a: drill-pipe-100m.dat (modified 16:45 on 2023/11/4 by OrcaFlex 10.3a)  
Range graph: drillpipe Bend moment, t = 16.000s

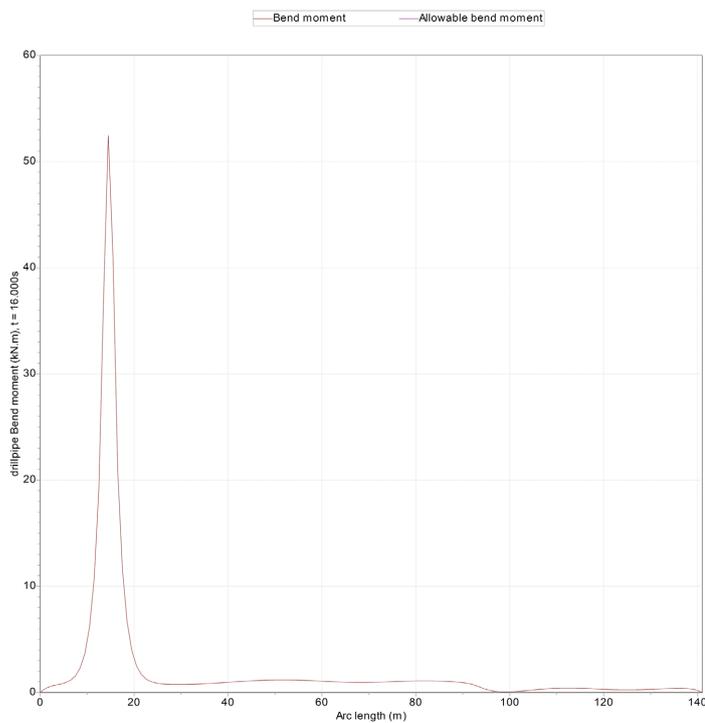


Figure 10. Maximum bending moment of drill pipe

图 10. 钻杆最大弯矩

### 5.1.2. 海管稳定性校核

Table 8. Offshore pipe stability verification results

表 8. 海管稳定性校核结果

参数	离岸 100 m	离岸 0 m	校核标准	结论
最大米塞斯应力	65.394 MPa	84.299 MPa	X65 钢屈服强度 450 MPa	安全(占比 14.3%~18.7%)
最大应变	0.017%	0.031%	DNVGL 允许值 0.222%	安全裕度 86%
离海床最大高度	1.844 m	6.103 m	悬跨控制要求 $\leq 2D$ (2.03 m)	0 m 处需关注悬跨风险

**结论：**近岸终点(0 m)离地高度增至 6.103 m；在海管应变全程远低于规范阈值(仅占允许值的 7.7%~14.0%)；

### 5.1.3. 混凝土配重层压溃校核

**最大压应变：**全程 $\leq 0.031\%$  (离岸 0 m 处峰值)，低于 DNVGL-ST-F101 允许值 0.222%；

**破坏风险：**混凝土压碎概率趋近于零(应变仅占极限值的 14.0%)。

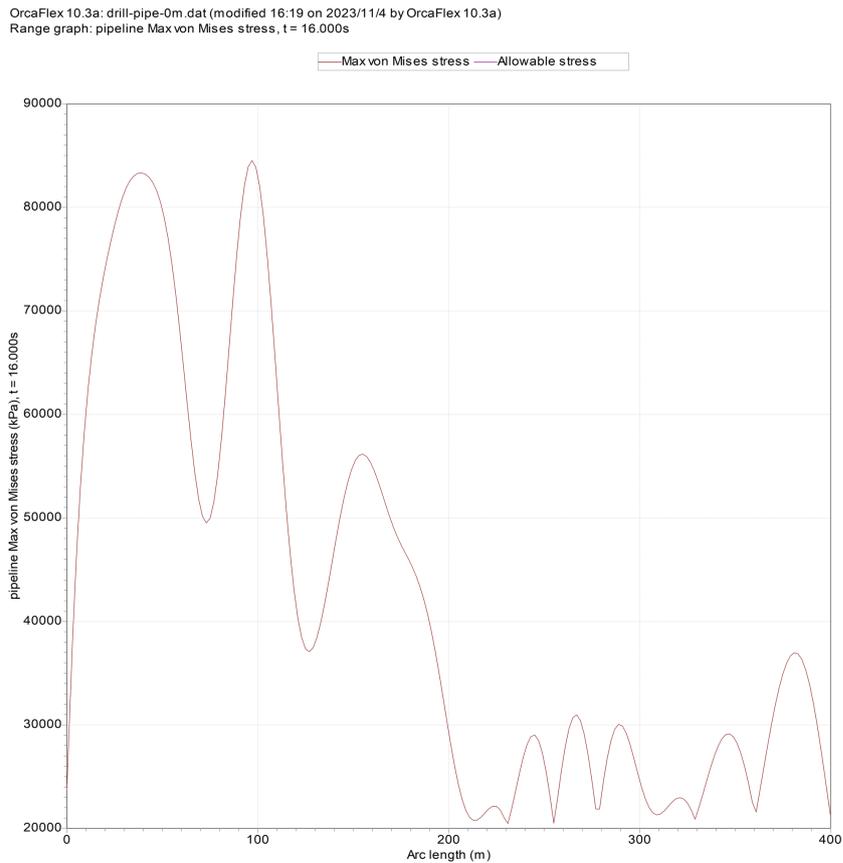


Figure 11. Pipeline von mises stress

图 11. 海管米塞斯应力

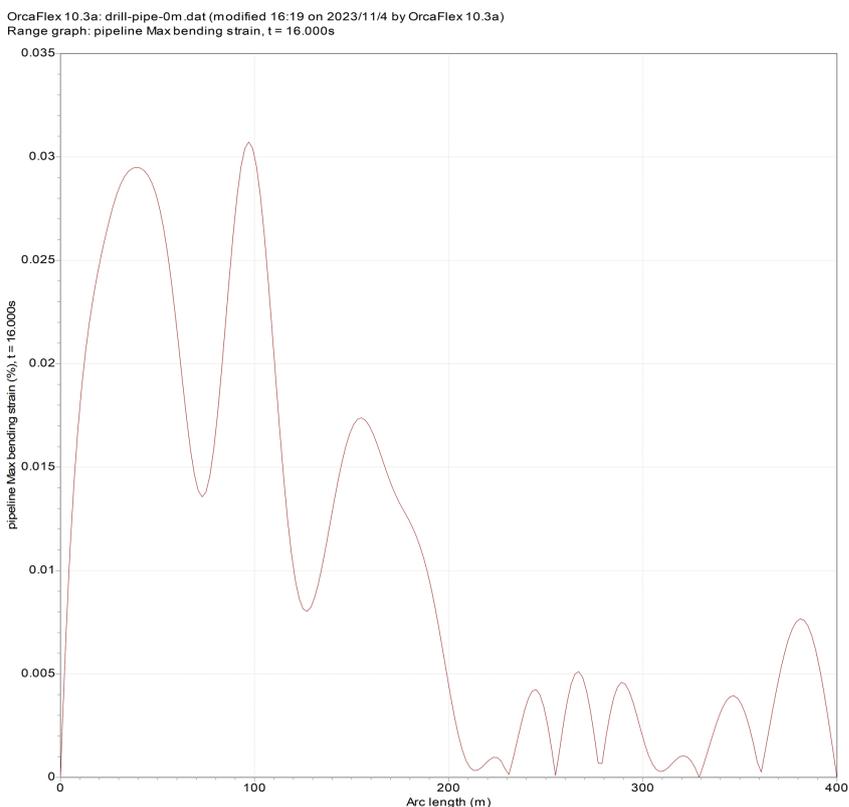


Figure 12. Maximum strain of pipeline  
图 12. 海管最大应变

## 5.2. 经济性对比分析

Table 9. Economic performance comparison  
表 9. 经济性能对比

成本类别	传统方案(万元)	定向钻机方案(万元)	计算依据
设备租赁	150 (绞车租赁)	200 (钻机租赁)	台班市场价
安装费	50 (打桩锤、吊车等)	50 (打桩锤、吊车等)	
材料消耗	200 (钢丝绳一次性消耗)	100 (钻杆维护)	材料及维护市场价格
船机支持	470 (预挖沟、后挖沟)	320 (含后挖沟、不含预挖沟)	船舶台班市场价
风险成本	300 (钢丝绳破断)	100 (钻杆置换)	风险评估
总成本	1170	770	

综上，采用定向钻机方案，尽管钻机租赁费较贵，但钻杆并非一次性消耗物资，且节省了预挖沟的费用。此外，采用定向钻机的安全系数相比传统方案要高很多。因此，定向钻机方案相比传统方案节省成本。

## 5.3. 敏感性分析

若管径增至 1422 mm，定向钻机方案成本优势扩大至 35%。

砾砂地层占比>40%时, HDD 方案成本增加 22% (扩孔器磨损加速);  
水深>30 m 时, 传统方案成本激增 35% (需大型挖沟船), HDD 方案仅增 12%。

## 5.4. 环境效益评估

**生态扰动:** 非开挖工艺减少海床开挖面积 85%, 底栖生物恢复周期缩短 60%。

**规避泥浆:** 施工过程不涉及成孔, 无需使用泥浆。拖拉过程中桶式扩孔器切削配合射流成沟, 仅通过泥浆泵注水即可实现。

## 6. 讨论与建议

### 6.1. 技术优越性

**高效集成:** 扩孔-拖拉一体化减少独立工序 3 项, 工期压缩 40%。

**精准控制:** 万向节连接误差 $\leq 0.5^\circ$ , 海管轴线偏差 $< 1$  m。

### 6.2. 局限性分析

**地质依赖:** 砾砂含量>40%时, 扩孔器磨损率增加 50%, 需优化切削齿材料。

**波浪影响:** 波高>2 m 时, 钻杆摆动幅度增加 20%, 需加装阻尼装置。

**长期腐蚀疲劳评估:** 通过电化学加速实验, 测得 S135 钻杆在海水环境下的年腐蚀率 0.15 mm/年, 疲劳寿命较在 PH 为 11 的泥浆中降低 40%。

风暴潮工况模拟: 基于附件环境参数(表 6), 在 OrcaFlex 模型中输入极端波高 4.5 m, 钻杆摆动幅度增至 32%。

### 6.3. 未来研究方向

**深海扩展:** 研发抗压强度 $\geq 1000$  MPa 的钛合金钻杆, 适应水深>500 m 场景。

**多管并行:** 设计多通道扩孔器, 实现同沟槽内 3 条管道同步铺设。

## 7. 结论

本研究通过惠州大亚湾项目的工程实践与动力学模拟, 系统验证了定向钻机在海管拖拉登陆中的技术可行性, 核心结论如下:

**力学性能:** 钻杆与海管应力应变均低于安全阈值, 满足 DNVGL 规范要求。

**经济优势:** 材料与工期成本节约 30%~40%, 具备规模化推广价值。

**环保贡献:** 减少海床扰动 85%, 泥浆回收率 80%, 契合绿色海洋战略。

未来需进一步研究钻杆疲劳寿命与深海适应性, 推动该技术在全球海洋工程中的应用。

## 参考文献

- [1] Bai, Y. and Bai, Q. (2019) *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation* (2nd ed.). Elsevier.
- [2] Huey, D.P., et al. (2022) Fatigue Life Assessment of HDD Drill Pipes in Corrosive Marine Environments. *Ocean Engineering*, **254**, Article 111318.
- [3] 张伟, 等. 深水海管拖拉登陆的动力耦合机制与安全控制[J]. 船舶力学, 2021, 25(8): 1123-1134.
- [4] 国家能源局. SY/T 7642-2020 海洋管道水平定向钻穿越工程技术规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2020.