

深水气田几项完井技术研究

田 峥, 叶吉华, 刘正礼, 罗俊丰, 张春杰, 金 颖

[中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067]

摘要 随着海洋石油进军深水步伐的推进,在南中国海深水作业实践中遇到一系列作业难点和挑战。恶劣的作业自然环境对深水完井提出了更高的技术标准和要求,在完井工具和设备、施工工艺与完井技术策略上与浅水及陆地完井差异明显。我国在深水钻完井方面处于起步阶段,相比国外存在不小差距。针对深水作业特点,分析了作业中的一些难点与关键技术以及深水完井的策略,研究了M深水气田完井关键技术,对射孔技术、精细化完井防砂控制技术、压裂充填技术进行了分析和研究。结合我国南中国海深水完井作业实践,对深水完井作业中的可能风险点和现场应对技术措施进行了总结和梳理。研究结果可为后续设计和作业提供参考。

关键词 深水完井; 策略; 防砂; 射孔; 压裂

中图分类号 TE257; TE52 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2015)01-0012-06

Several Well Completion Technologies for Deepwater Gas Field

TIAN Zheng, YE Ji-hua, LIU Zheng-li, LUO Jun-feng, ZHANG Chun-jie, JIN Hao

(Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518067, China)

Abstract With the development of offshore oil exploitation into the deepwater region, we encounter a series of difficulties and challenges in practice in the South China Sea during deepwater operation. The severe natural environment puts forward higher technology standards and requirements on deepwater well completion. In the aspects of well completion tools, equipment, construction technology and strategy, there exists obvious difference between deepwater tasks and shallow water or land operations. According to the characteristics of deepwater operation, some difficulties and key technologies are analyzed. The completion sand control, perforating technology, and fracturing filling technology are studied separately. In the deepwater well completion practice in South China Sea, the possible risk points and technical solutions are summarized. The results can provide reference for the subsequent design and operation.

Key words deepwater well completion; strategy; sand control; perforation; fracturing

0 引言

全球的重大勘探发现一半以上来自海洋,同时,未来世界油气总储量的44%来自深水。作为四大海洋油气资源带之一的南中国海(另外3个是波斯湾、欧洲北海和墨西哥湾),地质储量为 $200 \times 10^8 \sim 300 \times 10^8$ t。深水油气勘探开发潜力巨大,是中国油气资源的重要战略接替区。

M气田是我国开发的第一个深水气田,作业水深1350~1500 m,位于南中国海珠江口盆地29/26区块,香港东南310 km处,距离PY30-1油田64 km,

距离LH11-1油田102 km。2006年开始成功钻探,钻遇55.5 m共4个含气沙岩层,珠江组Sand1和珠海组Sand2、3、4。M气田属于正常压力和温度体系、中孔中高渗气田。该气田于2011年6月进入完井现场施工阶段,已完成全部9口井的完井作业,于2014年3月底成功投产。投产初期单井最大产量 425×10^4 m³/d,计划生产15年。

本文旨在通过M气田深水完井项目的完井作业实践,对相关作业难点和挑战进行总结,对深水完井技术的特点进行分析和研究,为相关技术的深入研究提供参考。

收稿日期:2015-01-26

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05026-001-04)

作者简介:田峥(1984—),男,硕士,工程师,主要从事海洋深水钻完井技术方面的研究。

1 深水完井特点

从完井的角度来看,深水油气田与浅水和陆上油气田没有本质的区别。由于深水油气田往往开发的是高渗透的油气层,故其完井方法一定程度上反而比陆上油田更加简单。然而,深水井恶劣的作业环境、高风险和经济效益的影响,给深水油气田常规技术的开发带来不少的挑战。

随着我国南海深水油气开发的逐步实践和深入,深水完井方面的作业难点和挑战逐步显现:(1)风、浪、流等自然海况环境恶劣,南海台风季节长,频繁的台风运移对深水钻井完井作业影响较大。(2)流动安全保障的影响,深水低温对井筒流体的物性作用,水合物堵塞、结蜡、结垢等方面的影响。(3)防砂方案的制定。深水油气田出砂后修井成本极高,因此一般采取保守而稳妥的防砂方法。(4)远控操作、长距离回接引起的环境负载高,极大地增加了施工风险和作业难度。(5)深水完井设备复杂,维护代价高昂,对作业系统的可靠性提出了较高要求。(6)安装维修等一系列水下作业需要水下机器人(ROV)配合,成本较高,到后期投产始终需要水下控制系统的配合^[1]。此外,完井作业结束后,生产阶段还面临管柱防腐、环空圈闭压力控制、控制管线无损连接等一系列技术挑战。

由于深水井完井及后期的修井作业成本高昂,在恶劣的作业自然环境中,对深水完井提出了更高的技术标准和需求,具体涉及作业时效、防砂效果、生产中流体携沙百分比、修井频率等诸多方面。对此,深水完井作业中采取了不同于陆地的分上部完井和下部完井的深水完井工艺,采取了压裂充填与筛管防砂相结合的保守防砂措施,在完井工具方面会考虑一趟多层管柱,射孔与防砂一趟完成,并采用国外先进的工具来作业,以减少工具出现复杂情况带来的时效性问题,降低作业成本。

2 M 深水气田几项关键完井技术

完井作业是一项复杂的系统工程,需要综合考虑的因素很多,主要有生产过程中井眼是否稳定、生产过程中地层是否出砂、地质和油藏工程特性、完井产能大小、钻井完井的成本、综合经济效益、采油工程要求等。最关键的环节是根据地层的地质特点、油藏工程特点以及采油技术需求,确定最合理的完井方法。

从深水完井技术看,保护储层、长期稳定生产、

较少的修井需要和产能最大化是深水完井技术追求的目标。实现这些目标的途径在于射孔技术、深水完井防砂技术、服务管柱优化技术、压裂充填等有较明显特色的技术环节。

2.1 射孔技术

射孔即射孔弹穿透套管、水泥环和地层的过程。射孔是影响套管抗挤抗压能力的重要因素^[2]。套管射孔后孔周边产生的射孔裂纹会在随后的采注动载作用下扩展,引发管体低载荷脆裂。孔眼的不规则还会引起应力集中,加剧裂纹扩展。在松软塑性地层中的套管会因抗挤压强度严重下降而被挤毁^[3]。因此,在射孔参数的优选上需要进行技术研究,射孔过密将影响套管强度,而射孔过疏则将影响油气井产能。

通过有限元计算研究发现^[2],射孔密度(简称“孔密”)低于每米 16 孔时,套管抗挤压强度变化不大。此外,相位角对套管侧向抗压强度影响较大。60°相位角为其临界值,与同孔密的其他相位角射孔相比,套管的侧向抗压强度高得多。对于各向异性地层,由 180°变到 0°或 90°时产能提高较大,而在 0°和 90°间变化时产能变化不大;对于各向同性地层,0°变到 90°或 180°时产能较大提高,90°和 180°之间变化时产能变化不大。

M 气田完井设计中射孔管柱采用的是油管输送射孔(TCP)。选择这种工作管柱,主要是出于射孔作业的效率与可靠性方面的考虑。考虑套管的侧向抗压强度和产能最大化,设计相位角为 60°/120°。根据完井井眼尺寸和射孔弹射孔效果考虑,选择 7 英寸(1 英寸=25.4 mm)射孔枪,根据产能与流通效率,设计孔密为每米 59 孔时,考虑射孔弹射孔穿透污染带要求选择 49.5 g HMX 型号的射孔弹。采用大孔径射孔弹,射孔直径约为 1 英寸。考虑到后续的压裂将会提高产层的渗透率,产生的气流通道远大于射孔的原始通道。

2.2 深水井防砂技术与策略

2.2.1 防砂方式选择

储层出砂对深水油气田正常生产的危害较大,轻则对管线和阀门造成磨损和冲蚀,使得橡胶密封元件气密性降低,重则影响产能,甚至掩埋储层,需要频繁修井清砂^[4]。M 气田为深水气田,采用水下井口生产系统。后期修井的作业需要动员深水平

台,费用高昂。因此,防砂方式与防砂精度的选择对于M气田来说非常重要。深水油气井防砂需要采用保守稳妥的技术策略^[4]。

M气田属于深水浅层气田,储层具有上覆岩层压力低、成岩性差、胶结强度低的特点。气层分布在珠江组的两套砂体。气田的1号产层为中等强度出砂,2号产层为强出砂。在对M气田的开发过程中必须进行先期完井防砂,配合防砂设备要抗腐蚀、具有较好的流通性并能有效持久地防砂。通过前期研究,针对该区块不同井型,推荐防砂原则如下。

(1) 垂直井、定向井:裸眼内防砂最好采用裸眼砾石充填完井。射孔套管内防砂最好采用管内砾石充填完井,如地层条件允许,应尽量进行压裂砾石充填完井,以提高产能。

(2) 水平井:从最保险的角度考虑,以裸眼砾石充填完井和管内砾石充填完井最好。砾石充填时,直接用高级优质筛管替代常规的绕丝筛管,以增加防砂的有效性和寿命,然后再在高级优质筛管与裸

眼或者套管的环空充填砾石。为了提高产量,建议使用陶粒作为砾石(不再推荐使用石英砂作为砾石)。如果气层无底水,采用再进一步建议压裂砾石充填防砂,以提高产量。

根据前期研究,储层出砂可能性大,从产能、防砂效果和防砂寿命考虑,选择较保守的防砂方式:筛管压裂充填防砂。M气田采用单层管内压裂充填,在9-5/8英寸套管内使用绕丝筛管。

2.2.2 防砂精度控制

根据 Schwartz 均匀分选系数与 Saucier 砾石充填设计准则^[5],在岩心砂粒分析的基础上进行防砂精度计算分析。

根据 Schwartz 均匀分选系数计算 C 值($C = d_{40}/d_{90}$)的,如图1所示,1号砂体的分选系数小于5,按 d_{10} 砂粒尺寸考虑防砂精度,均匀性属于中等;2号砂体的分选系数大于10,均匀性较差,按 d_{70} 砂粒尺寸考虑防砂精度。

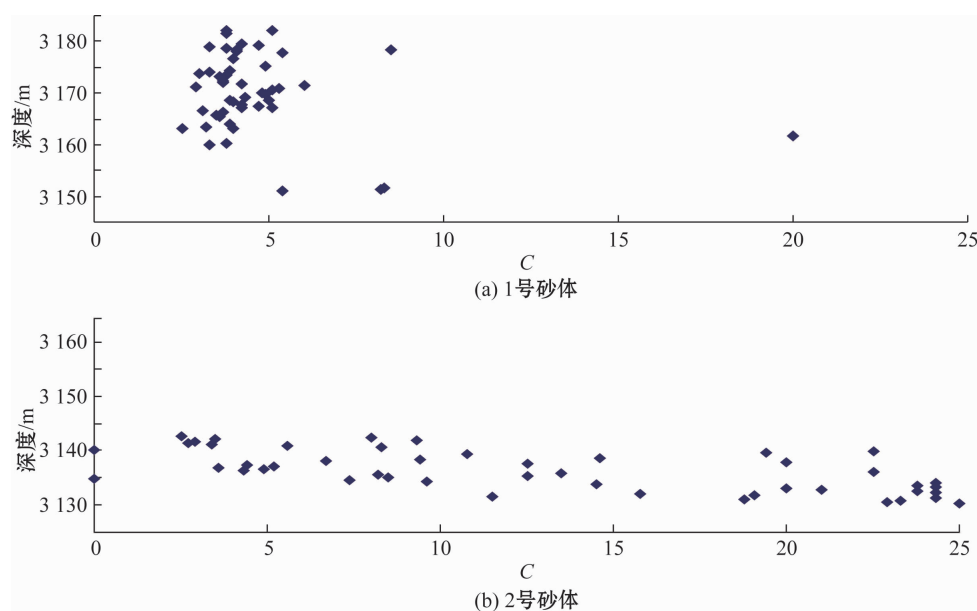
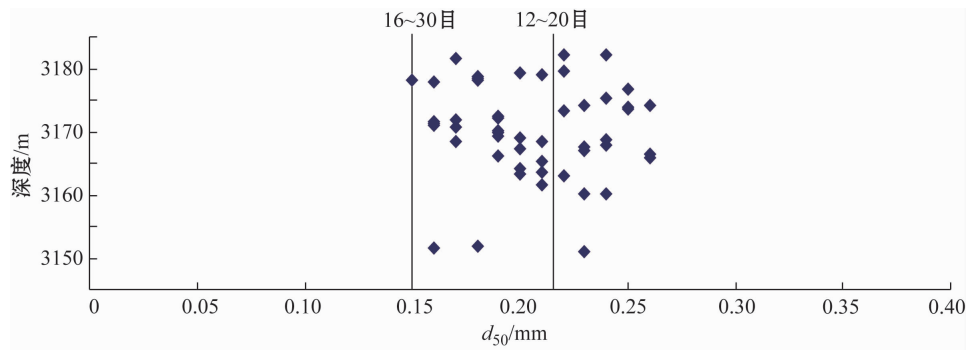


图1 M气田1号、2号砂体均匀分选系数分布

Fig. 1 Evenly sorting coefficient distribution in No. 1 and 2 sand body in M gas field

首先考虑1号砂砾石尺寸选择。根据 Schwartz 分选系数选择充填的砾石尺寸,通过计算可知,8~12目尺寸砾石满足要求。这种尺寸的砾石能直接拦截10%的较大粒径地层砂,其余的细砂粒则可通过地层砂自身砂砾架桥加以过滤和拦截。但是这种

通过砂桥挡砂的筛选砾石原则,增加了地层砂对砾石层侵入堵塞的风险。根据 Saucier 砾石充填设计准则^[5],选择按16~30目砾石防砂,如图2所示。

图 2 M 气田 d_{50} 砂砾尺寸分布图Fig. 2 Sand coefficient distribution of d_{50} in M gas field

下面讨论 2 号砂体砾石尺寸选择。2 号砂体分选系数大于 10,分选性较差,上下砂体粒度存在一定差异。根据 Schwartz 法则,以 d_{70} 为标准进行选择。上部砂体较粗,选择 20~40 目的砾石尺寸,下部砂体相对较细,根据计算需要选择 40~60 目的砾石,如图 3 所示。根据 Saucier 法则进行计算,上部 2/3 的储层适合 20~40 目的砾石,下部约 10 m 厚度的储层适合 40~60 目的砾石。如果按照通常的砾石尺寸原则,应选择 40~60 目的砾石,但是这种较细的砾石,会降低井筒周围的孔隙度和渗透率,砾石层和筛管堵塞的风险相对较高,最终对整体产量产生影响较大。而且下部 10 m 储层较致密,孔隙度和渗透率较低,气体流速小于 $0.012 \text{ m/s}^{[6]}$,出砂的风险较低。因此,综合考虑,选择 20~40 目的砾石进行该层的防砂。

2.3 压裂充填技术

压裂充填防砂技术是针对中高渗透油藏开发中因地层出砂导致油井减产或停产而研究的一种新型措施,具有防砂和增产的双重作用。其实质就是采用端部脱砂技术使携砂液在裂缝端部脱砂,然后膨胀与充填裂缝,形成短而宽的高导流能力渗流通道。

M 气田深水完井压裂充填施工作业步骤分为 6 步:(1)射孔、下入筛管,然后在高于地层破裂压力的施工压力下向地层中泵入前置液,起裂地层;(2)继续泵入前置液,使裂缝在产层中延伸;(3)再泵入低砂比携砂液,阻止裂缝面积进一步增加;(4)紧接着泵入砂比逐渐升高的携砂液,提高裂缝的导流能力,同时支撑剂从缝端到缝口逐渐充填裂缝;(5)当裂缝宽度即裂缝导流能力达到设计要求时,停止压裂施工;

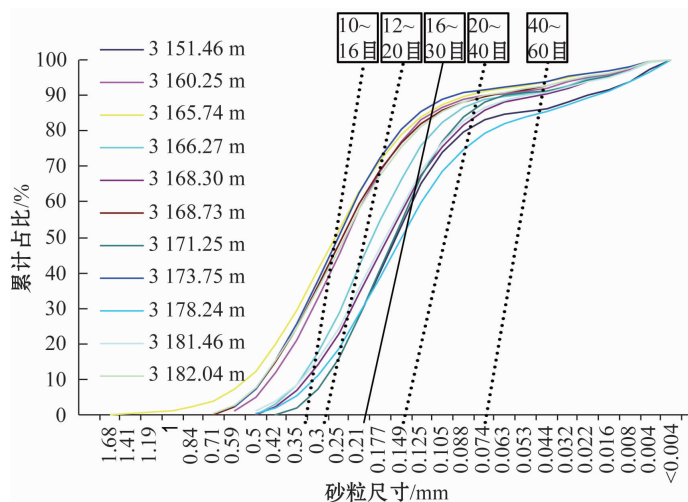


图 3 不同深度产层地层砂激光粒度分布图

Fig. 3 Laser particle size distributions of reservoir sand in different depths

(6)最后采用常规砾石充填方法充填筛管和套管之间的环空。

压裂充填防砂的核心工艺是端部脱砂。对于高

渗透油气藏,增大缝宽比增大缝长更有助于提高产量。图4为M气田压裂充填作业图。以实际程序过程进行作业说明。

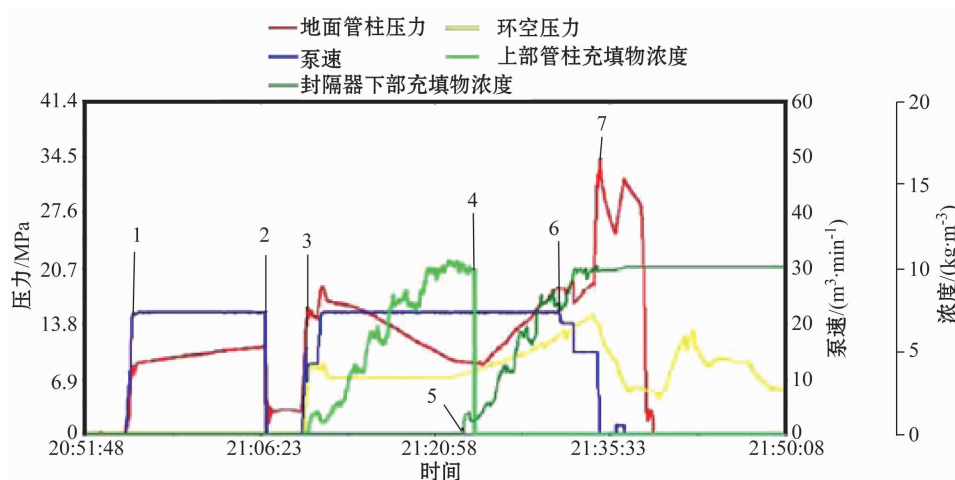


图4 M气田压裂充填作业压力图

Fig. 4 Pressure diagram of M gas field during fracturing and filling operation

1~2 阶段:泵入前置液,随泵入量的增加可见地面管柱压力逐渐增大,主要原因是前置液在管柱内的循环摩阻和内外管柱压差。2~3 阶段:关万能防喷器,前置液密度小于环空液体密度,所以此时虽然已停泵,但内管柱内仍然存在 2.41 MPa 压力。3~4 阶段:向地层内挤注前置液,同时泵入携砂液,在此期间由于液体密度随含砂浓度增大逐渐增大,地面管柱压力逐渐下降。5~6 阶段:不同浓度的携砂液逐渐被挤入地层,环空和管柱内压力逐渐上升,可见砾石充填封隔器下部充填物浓度逐渐上升。6~7 阶段:逐渐减小排量,脱砂,直到出现最大脱砂压力,当泵速降低至 $2.39 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,出现最大脱砂压力 32.41 MPa,此时砾石充填封隔器下部充填物浓度达到最大值 $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。压裂砾石充填完井所需排量一般大于水平井裸眼砾石充填完井与高速水充填完井。压裂砾石充填泵排量一般都在 $6.36 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右,砾石充填系数达到了 $953 \text{ kg}/\text{m}$,而在 Campos 盆地甚至还达到了 $1667 \text{ kg}/\text{m}$,而高速水砾石充填或裸眼砾石充填一般不超过 $1.59 \text{ m}^3/\text{min}$,砾石充填系数一般不超过 $149 \text{ kg}/\text{m}$ 。这说明压裂砾石充填完井获得的导流能力比高速水砾石充填与水平井裸眼砾石充填大。

3 深水完井作业风险分析

深水完井作业中存在诸多作业风险点,任何一

项作业失败都可能对后期投产造成影响,甚至造成完井作业失败。只有提前制定风险预案及应对措施,才能在遇到突发情况时有的放矢。表1总结了M深水气田完井作业中可能的风险点及对应的解决方案。

4 结 语

(1) 就完井作业而言,深水油气田与浅水油田和陆上油田没有本质的区别,其最大特点在于作业风险和经济成本提高了。由此对深水完井作业提出了一系列技术要求:高效、安全、可靠、成本控制。在南海深水完井作业实践中,攻克了一系列技术和工具的难点,逐步总结出相关作业经验。

(2) 有限元模拟分析表明,射孔作业中的孔密、相位、射孔弹类型等技术参数直接决定生产套管的强度和后期储层产能。结合地层情况,优化射孔参数,在保持套管满足生产强度要求的情况下实现产能最大化。

(3) 分析研究了M气田的深水完井方式选择及控砂精度,该技术是完井中的关键技术。其核心在于精细化控制地层出砂、油气井寿命最大化、储层生产产能最大化的综合临界度的权衡。

(4) 总结前期深水作业实践,进行深水完井作业风险评估分析,列出了深水完井中可能存在的作业风险点及应对措施。

表1 M深水气田完井作业风险点及应对措施

Table 1 Deepwater well completion operation risk points and solutions in M gas field

序号	风 险 点	解 决 方 案
1	筛管下不到井底	保证下入筛管前井眼未缩径,设计井筒条件防止井眼坍塌
2	砾石充填失效	控制最大井斜不超过 60° ,防止在充填过程中产生 $\alpha\beta$ 波。采用变换路径技术,预防砂桥产生;使用录井工具检测充填质量
3	需重新进行上部完井	下部完井时下入过油管堵塞器,压井前隔离储层;所有用于高效重新完井的应急工具和设备都必须可用;采用可回收式封隔器
4	需重新进行下部完井	采用对储层无害的压井液体系;可回收式砾石充填封隔器,下部为剪切连接;专用打捞工具可用
5	充填工具遇卡	确保作业步骤的正确性,尤其是要注意在泵入砾石前需进行压力测试
6	下部完井隔离阀无法关闭	每次下井前更换转位工具的套筒/销子;砾石充填工具配有向下冲洗的设备,能在关闭隔离阀前对其进行冲洗
7	油管挂无法坐放	有工具穿过时必须安装采油树保护器;确保油管悬挂器按程序进行施工,并利用 ROV 进行水下监测;避免落物(在井筒内部)并确保所有事故的及时报告
8	生产封隔器坐封失败	在基于剪切销钉最大强度情况下,进行坐封压力的优化,封隔器可再次进行液压坐封
9	下部完井隔离阀无法打开	上部完井过程中保持井眼清洁; 预备好连续油管设备和工具
10	井下安全阀失效	依据可靠程度选择安全阀;在用包装及夹具连接时需要保护控制线路;高压密封件等及其安装程序需符合防震设计要求,安装应遵守作业程序

参 考 文 献

- [1] 程仲,牟小军,张俊斌,等.南海东部深水气田完井作业实践[J].石油钻采工艺,2014,36(3):33.
- [2] 熊友明,潘迎德.各种射孔系列完井方式下水平井产能预测研究[J].西南石油学院学报,1996,18(2):56.
- [3] 雷征东,安小平,李相方.射孔完井出砂预测新模型及其在射孔优化中的应用[J].油气井测试,2006,15(6):10.
- [4] 熊友明,张伟国,罗俊峰,等.番禺 30-1 气田水平井精细防砂研究与实践[J].石油钻采工艺,2011,33(4):34.
- [5] 海上油气田完井手册编委会.海洋石油完井手册[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [6] 王利华,邓金根,周建良,等.适度出砂开采标准金属网布优质筛管防砂参数设计实验研究[J].中国海上油气,2011,23(2):107.

* * * * *

• 书 讯 •

海洋工程基础

罗伯特·E·兰德尔 主编
上海交通大学出版社出版

杨 樾 包丛喜 翻译
定价:¥33.00

内容简介:

海洋是人类生存环境中最重要的一部分。有志于成为船舶与海洋工程专业工程师的学子们有必要先对海洋工程有一个总的、较全面的了解。本书内容丰富全面,涵括了船舶、近海、海岸、水下工程和海洋探测等各个方面。本书取材新颖,叙述简明扼要,可作为船舶与海洋工程各专业的启蒙课程——船舶与海洋工程概论的教材,对有关专业人员也有一定的参考价值。

目 录

第1章 海洋工程综述
第2章 海洋环境
第3章 近海结构物
第4章 海岸演变过程与海岸结构物
第5章 材料与腐蚀
第6章 浮体和潜(水下)体的水动力性能

第7章 水下系统
第8章 水声学
第9章 海洋应用中的仪器
第10章 物理模型试验
第11章 环境、安全与道德
第12章 海洋工程设计

