

# 水下生产系统测试技术研究

陈 斌, 苏 锋, 周 凯, 刘冬冬, 刘华建

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

**摘要** 水下生产系统工程技术是未来深海油气田开发过程中的关键技术,而水下生产系统测试技术是其中的一个重要分支。根据我国目前深海油气田开发技术的现状,介绍了水下生产系统测试技术的内容及其发展,同时通过研究国外生产厂家和国内油气田开发实践,提出将完整性测试与试验作为国内未来发展水下生产系统测试技术的主要方向。重点阐述了完整性测试的内容和新产品研发所必须测试的内容。

**关键词** 深海油气; 水下生产系统; 测试技术; 完整性测试

**中图分类号** TE52      **文献标志码** A      **文章编号**: 2095-7297(2014)02-0146-05

## Test Technology of Subsea Production System

CHEN Bin, SU Feng, ZHOU Kai, LIU Dong-dong, LIU Hua-jian

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

**Abstract** Test technology is an important branch of the subsea production system engineering in the future deepwater oil and gas exploitation. What and how to do in the development of deepwater oil and gas field are discussed. Based on studying the application of foreign manufacturers and the domestic oil and gas development, we suggest that the integrity test of the subsea production system is the main direction in the future. Meanwhile, we focus on the scope of work of system integrity test and qualification test for new products.

**Key words** deepwater oil and gas; subsea production system; test technology; integrity test

## 0 引 言

近年来,由于陆地石油和浅海油气的迅速枯竭,深海油气开发已成为获取能源的必由之路。截至2009年,世界上已有近110个深海油气项目(3463口深海井口)投产,而且世界各大石油公司在深海领域的投资不断增加,各国对海洋石油水下装备的需求迅速上升。深海油气开发经过多年的发展,已形成了一些成熟的开发模式,包括浮式系统+水下系统、水下系统+浅水固定平台、水下系统+陆地等。由于水下生产系统具有水下设备可重复利用、油井布置灵活、节省平台空间等优点,因此水下生产系统是我国海洋油气工业发展的未来<sup>[1]</sup>。

水下生产系统技术是国家重大专项大型油气田及煤层气开发重点支持发展方向,也是国家海洋工程装备产业创新发展战略(2011~2020)的技术发展

核心。通过一系列的水下生产系统技术研究,最终实现自主掌握水下生产系统技术,为我国深海油气田开发提供动力和支持。水下生产系统测试技术是水下生产系统工程技术的一个重要分支。随着水下生产系统在国内海上油田开发中的逐步应用,水下生产系统测试技术研究的重要性将会进一步显现出来。创建水下生产系统的测试平台,进行相关性能、功能测试和联合调试,对于保障水下生产系统乃至整个油气田顺利投产和安全运行是至关重要的。

本文通过研究相关规范以及国外生产厂家和国内油气田开发实践,提出将完整性测试与试验作为国内未来发展水下生产系统测试技术的主要方向,并重点阐述了完整性测试的内容和新产品研发所必须测试的内容。

**收稿日期**: 2014-04-23

**基金项目**: 国家科技重大专项(2011ZX05027-004)

**作者简介**: 陈斌(1983—),男,硕士,工程师,主要从事水下生产设施测试技术与水下电气设计研究。

## 1 水下生产系统技术概述

典型的水下生产系统按照空间位置可简单概括为水面支持中心系统、海底泥面上的水下生产系统和海底泥面以下的井身系统。三大系统互相联系,形成整个生产运行体系。另外在整个生产系统的生命周期内,还将涉及其他的辅助系统,如钻井完井系统、测井系统、维护修井和弃井系统等。

水下生产设施包括水下采油树、跨接管、水下管汇、海管终端和水下处理设施;控制设备包括主控站、电源通信单元、不间断电源、液压动力单元、水面控制缆终端、水下控制模块、水下分配控制缆终端和控制缆。水下生产系统<sup>[2]</sup>主要组成如图1所示。

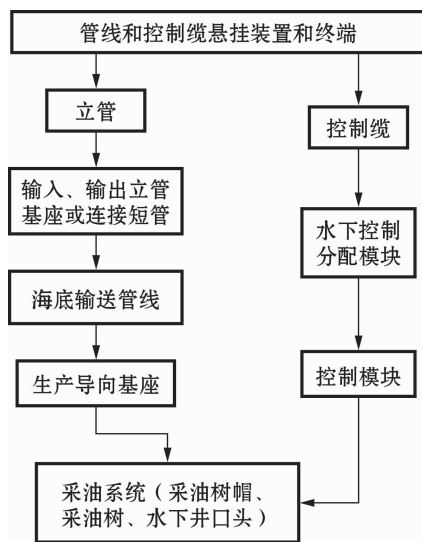


图1 水下生产系统主要组成结构图

Fig.1 Structure of subsea production system

## 2 测试标准和规范要求

根据 ISO 13628-1 的要求,水下生产设施在制造现场需要依次完成出厂验收测试(FAT)、扩展出厂验收测试(EFAT)和系统完整性测试(SIT)<sup>[3]</sup>。下面分别予以介绍。

### 2.1 出厂验收测试

出厂验收测试针对新制造的每一个水下生产设施单个部件和设备的零件,要求其满足具体的要求并通过出厂测试。

出厂验收测试是重要的项目里程碑,卖方以此证明系统设计和制造满足合同规范。因此,需要在买方在场的情况下正式进行出厂验收测试,并记录

差异和不符合项,以及不符合项处理措施。出厂验收测试要求为:

(1) 在整个出厂验收测试的某些阶段,可要求客户代表见证测试取得成功;所有数据采集点必须无一例外地完成;测试程序给出推荐的测试顺序。

(2) 出厂验收测试程序详细阐述了测试要求,以确认被测试设备的完整性及适用性。出厂验收测试包括:通畅检验;内部和外部压力测试(仅限水压测试);功能测试;电气连续性检查;互换性测试;提升测试;称重和测定重心位置;耳轴载荷测试;基桩接口测试。

(3) 出厂验收测试应检查下列各项:需要确认阀门位置指示器;位置指示器正确指示阀门位置;位置指示器弹簧按照遥控作业机器人面板开孔确定尺寸。

(4) 指示器运行顺利,无束缚或跳跃现象。施工后,应按照 ASME B31.8<sup>[4]</sup>施工后测试要求进行阀体静水压测试。

### 2.2 扩展出厂验收测试

扩展出厂验收测试阐述了部件之间的测试,以确保接口符合要求。水下生产设施的典型扩展出厂验收测试包括:(1)水下生产设施之间的连接压力测试(如管汇和清管环路、跨接管和管线终端等);(2)阀门阻挡层确认;(3)铰接部件的运转;(4)可回收模块的更换(如节流器、清管环路、保护盖等);(5)锁定机构。

### 2.3 系统完整性测试

系统完整性测试在完成出厂验收测试和扩展出厂验收测试后进行。

系统完整性测试的目的是确保各供应商提供的水下生产设施(管汇、水下采油树、管线终端、跨接管和清管环路等)相互连接,并正常工作。根据不同的项目,系统完整性测试需要进行许多类型的检查。如果可能的话,最好采用实际的水下设备和工具进行测试。如果无法进行全面测试,应采用验证分析法证明系统性能符合要求。

一般来说,系统完整性测试程序以设备实际的海上安装程序为依据,因此,每一步验证应严格遵守完整性测试程序。在系统完整性测试过程中,如果程序出现问题,任何变化的协调、记录和实施均应执行变更控制程序(CCP)。系统完整性测试利用“模拟水下机器人”检查间隙,操作遥控作业机器人

(ROV)控制面板,查看运行过程,并验证运行状态。遥控作业机器人利用手持式标识线来操纵载荷,以便进行安装和/或回收作业。

在作业安全分析(JSA)过程中确定标识线位置和长度以及标识线处理者的接近路径和作业区域。各控制器需要建立一个通信系统,通过超高频听筒向标识线处理者和起重机操作者发出指令。需要干预操作控制器的其他遥控作业机器人作业,应由作业人员采用手持式工具实现。在作业安全分析过程中,还需要提供通往操作位置的通道。

这些系统完整性测试程序还作为安装承包商、遥控作业机器人承包商和其他使用或维护海上系统的人员等服务承包商的见习程序。

### 3 国外水下生产系统测试技术

对国外水下生产系统厂家 FMC、Aker、Framo、Oceaning 等公司进行了实地调研。由于它们都是在水下生产系统领域有很多年经验的工厂,技术都比较成熟,而且产品在各种海域和深海油田都有广泛应用,因此,他们的产品也经过了大量工程项目的检验。正是因为上述原因,他们一般很少做完整产品的浅水测试,只做部分部件的密封测试,但是他们都有完整的测试体系。这些厂家在产品整个建造过程中的所有测试如图 2 所示。

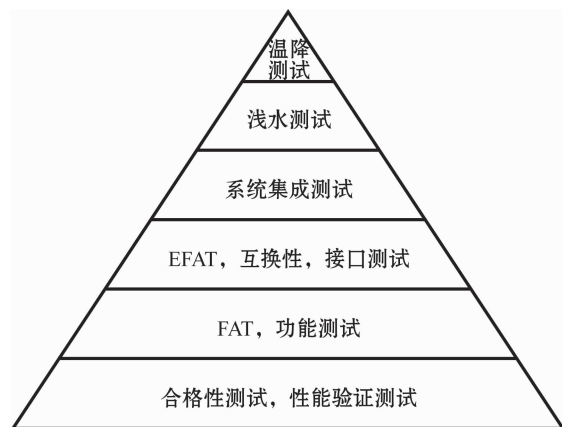


图 2 国外水下生产系统产品测试内容  
Fig. 2 Testing content of foreign subsea production system

(1) 合格性测试(QT)由厂家的系统工程师负责协调和跟进,每个工作包(组块)对其工作范围内的设备资格测试负责。合格性测试只针对原始组件进行。

(2) FAT 的目的是验证各个组成部分的功能,测试的对象是所有部件和组件,通常会在各自的生产基地完成。每个工作包(组块)对其工作范围内设备的功能测试负责。

(3) EFAT 的目标是确认系统设计、制造的正确性,验证在早期阶段的各个工作包之间的可互换性和设备之间的接口。两个不同类型的 EFAT 测试经常应用于两个方面:复杂并且完整的系统或子系统通常需要做一次完整的 EFAT 测试;在进行后续的系统功能性确认时可以进行简化的 EFAT 测试。EFAT 测试通常在采油树/管汇制造场地进行,由系统工程师与工作包(组块)共同负责完成。

控制系统在完成部件 FAT 后,要进行工厂集成测试(FIT),这实际上是控制系统特有的 EFAT。在该阶段,主要检查水面上和海底组件之间的界面。正因如此,上部组件不需要运到采油树/管汇制造现场进行控制系统 EFAT 测试。控制系统工作包完全负责控制系统的 FIT。

(4) 系统集成测试的目的是验证各承包商和设备之间的接口,证明系统功能达到了集成系统的能力。系统集成测试还可以模拟实际操作流程,达到优化海上安装程序、训练海上操作员的目标。系统工程师负责系统集成测试。

(5) 浅水测试试验(SWT)(如果对方有需要)的目的是验证各承包商和设备之间的接口,演示集成系统在水中的系统能力。测试范围与系统集成测试一样,但是 ROV 的操作性可以在更大的程度进行测试。系统工程师负责浅水测试。

(6) 温降测试(CDT)(如果需要)的目的是验证隔热性能。通常系统工程师负责温降试验的工作。

### 4 国内水下生产设施测试技术发展的思考

我国海洋工程装备产业国产化率一直较低,进口比例在 70% 以上。经过近几年来海洋工程的快速发展,国内浅水域平台、深海高技术平台的设计和建造、安装、维修技术得到了很大的提高;但是作为新型开发模式的水下生产系统依然国产率很低,关键技术主要被国外几家主要的水下生产系统厂家 FMC、Framo、Aker、Cameron、GE 等所垄断。

近年来,随着国内相关技术的发展,我国已经可以自行设计和建造具有自主知识产权的水下结构物等,例如 LH4-1 和 PY35-1/2 等国内深海油气田的水下管线终端(PLET)、管道终端管汇(PLEM)等,

但是诸如水下采油树等关键水下生产设施,主要还是依赖进口国外技术<sup>[5-6]</sup>。

针对国内目前水下生产系统技术的发展状况,我们在研究产品测试的同时,更侧重于作为集成商,如何从不同供货商那里采购各个子系统的水下生产设施,然后进行整个系统的完整性测试。根据对ISO 13628 系列标准的研究,从接收产品到最后安装调试的整个过程,测试、试验如图3所示。

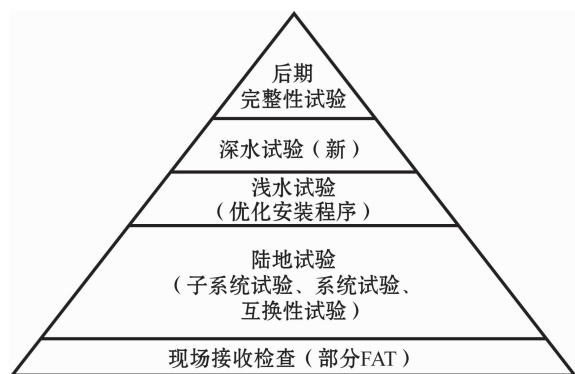


图3 完整性测试内容

Fig. 3 Testing content of integrity test

现场验收检查<sup>[5]</sup>的目的在于验证分/承包商所运送设备到货后是否损坏、能否正常工作,而不是重复全部的FAT程序。现场验收检查应该包括:开箱、组装和检查设备与系统;检查液压液的清洁度;试验所有的机械和液压功能。同时对于水下控制模块,应该从试验控制站中发送所有的应用命令,合适的应答和动作应该验证。

陆地试验主要分为子系统试验、系统试验和互换性试验<sup>[7]</sup>。

(1) 子系统试验将整个水下生产系统分解成能够同时试验的子系统,也可使故障检查更加容易。为了证明“系统限度”,子系统试验可以将相关设备处于可能在操作期间发生的异常状态下,比如低液压压力、低电压等。子系统试验是在各个子系统FAT试验和全部水下生产系统试验之间进行的中间过程,同时对于实际的项目,必须确定子系统的试验范围。

(2) 系统试验的目的是模拟在海上实际作业能完成的所有操作(是陆地应用的扩展),验证所有永久性安装在海底的设备/系统。在试验中,所有与维修相关的部位都应该加以考虑。

(3) 互换性试验适用于所有已交付系统(如采油树系统和水下控制模块等)。互换性试验的目的

是验证在井槽上的采油树、采油树帽、采油树上的水下控制模块、管汇系统和其他系统的互换性。因为对所有的组合进行试验是不现实的,所以应该建立主系统,其中模拟基盘井槽的特制试验架可用于验证采油树的互换性。

浅水试验在水下安装、完井和试产期间进行。考虑到可靠的钻井船和专业技术人员对整个项目的成功至关重要,故浅水试验设置目的就是通过优化安装程序使海上安装人员熟悉相关设备和设备操作技术,以提高水下井口在安装和操作时的效率和安全性,更有利于项目的成功实施。通常浅水试验包括以下工作:油管挂的安装和回收;带有所有附加组件的采油树的安装和回收;采油树和管汇间的安装连接;水下控制模块、采油树油嘴和插入式阀门等的安装和回收;脐带缆和管线的牵引和连接;使用修井控制系统进行的采油树功能试验;使用水下生产控制系统进行的采油树的功能试验;遥控作业工具系统的操作;使用遥控作业机器人进行接口、可接近性和功能试验,包括有意使用遥控作业机器人的安装工作;验证修井立管连接在安装和动态载荷期间维持螺母预应力的能力。上述测试工作内容需要业主与测试方根据实际需求进行合理选取。此外,如果深水试验应用的子系统中包括新设备的开发,则应考虑对子系统进行深水试验。

最后要进行的后期完整性试验应在设备的完整性试验之后、安装之前进行。主要工作包括:按程序进行维修(检查相关性和质量);应用过程中必要的试验工作的修正和重复;翻新;保存;将所有文档更新到“已试验”状况;运输和交付的准备。

## 5 结束语

目前,中国海洋石油工业正处于发展的转型期间。利用对外合作多年来取得的宝贵经验,发展自己完整的海洋石油工业体系,包括海洋工程体系,是中国海洋石油工作者的责任。正是在这种情况下,我们针对南海深海油气田开展了一系列的对水下生产系统技术研究。在未来的海洋石油行业,掌握水下生产系统技术就能掌握市场的主动权,就会逐渐摆脱依靠国外技术的状况。在引进消化吸收的过程中,一定要先发展水下生产系统测试技术,然后去理解、消化相关设计技术,最终掌握水下生产系统的设计、建造、测试及安装技术。

## 参 考 文 献

[1] 梁德炽. 水下控制系统技术[C]. 2011年(第二届)海洋石油工



- 程技术年会论文集, 2011: 370.
- [2] 白勇, 龚顺风, 白强, 等. 水下生产系统手册[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012.
- [3] International Standards Organization. ISO 13628-1. Design and operation of subsea production systems: general requirements and recommendations [S]. Geneva: International Standards Organization, 2005.
- [4] American Society of Mechanical Engineers. ASME B31.8-2012. Gas transmission and distribution piping systems[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [5] Bai Y, Bai Q. Subsea engineering handbook [M]. Amsterdam: Gulf Professional Publishing, 2010.
- [6] 苏锋. 复合电液控制系统在流花 4-1 油田开发项目中的应用[C]. 2011 年(第二届)海洋石油工程技术年会论文集, 2011: 298.
- [7] 梁稷, 姚宝恒, 曲有杰, 等. 水下生产系统测试技术综述[J]. 中国测试, 2012, 38(1): 38.

\*\*\*\*\*

## • 征订启事 •

### 《海洋工程装备与技术》征订启事(2014 年)

《海洋工程装备与技术》是由上海交通大学主管、上海交通大学出版社主办的综合性学术刊物。本刊以介绍我国海洋工程装备方面的研究、设计、实验、生产、使用和管理等方面的成果以及学术动态为宗旨。本刊主要读者对象为海洋工程装备研究与技术从业人员。2014 年本刊为季刊, 将出版 4 期。

《海洋工程装备与技术》征订单存根(复印有效)

单期定价	50 元	年定价	200 元
订阅期号	○1 ○2 ○3 ○4	订阅份数	
	□ 2014 年全年		
合计金额		汇款日期	
订阅单位			
收件地址			
收件人		收件人电话	

订阅者请先通过电子邮件或电话与编辑部联系。

汇款方式:

开户行: 中国工商银行上海华山路支行

账号: 1001271509004604749

户名: 上海交通大学出版社有限公司

汇款后请将存根填写完整, 传真至编辑部。

《海洋工程装备与技术》编辑部

地址: 上海市番禺路 951 号上海交通大学出版社(邮编: 200030)

邮箱: journalsjtup@hotmail.com

电话: 021-61675249; 61675260; 60823078 传真: 021-61675228