



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD005-2024

中国船级社

海上 FPSO 状态监测和数字 孪生系统认证实施指南

2024

2024 年 7 月 1 日生效

北京
Beijing

目 录

第1章 总 则	3
第1节 一般规定	3
第2节 规范与标准	4
第3节 等效与免责条款	4
第4节 附加标志与符合证明	4
第2章 系统技术要求	6
第1节 一般规定	6
第2节 状态监测系统技术要求	6
第3节 数字孪生系统技术要求	10
第3章 产品检验	13
第1节 一般规定	13
第2节 设计审查	13
第3节 产品持证要求	13
第4节 设备检验	14
第5节 系统试验	14
第4章 建造中检验	16
第1节 一般规定	16
第5章 建造后检验	18
第1节 一般规定	18
第2节 附加标志检验	18
第3节 符合证明检验	18

第 1 章 总 则

第 1 节 一般规定

1.1.1 目的

1.1.1.1 中国船级社（以下简称“CCS”）制定《海上 FPSO 状态监测和数字孪生系统认证实施指南》（以下简称“指南”）的目的是为 FPSO 状态监测和数字孪生系统的检验提供实施依据。

1.1.2 一般要求

1.1.2.1 本指南适用于 FPSO 状态监测和数字孪生系统。FPSO 状态监测系统系指海洋环境监测系统、结构状态监测系统和设备监测系统，FPSO 数字孪生系统系指船体、工艺流程、设备的数字孪生系统。

1.1.2.2 FPSO 状态监测和数字孪生系统（以下简称“系统”）是指 FPSO 中采用传感技术、现代通信与信息技术、计算机网络技术、人工智能等数字化技术以实现 FPSO 状态监测和数字孪生功能的系统。

1.1.2.3 FPSO 结构状态监测系统主要对船体运动姿态、结构腐蚀、结构受力、系泊与立管、液舱等进行监测，获取 FPSO 的状态。

1.1.2.4 FPSO 设备监测系统主要对机电设备、工艺流程、外输系统、气体泄露和火灾等系统进行状态检测，可以利用机电设备、工艺流程、外输系统、气体泄露和火灾等系统的原有监测数据，但不能对设备的原有监测系统产生干扰。

1.1.2.5 FPSO 数字孪生系统在状态监测系统基础上，主要通过对船体、工艺流程或设备建立数字孪生体，并且将数字孪生体与物理实体之间进行同步映射并协同交互，能够实现 FPSO 的实时管理、风险评估和辅助决策。系统参考架构如图 1.1.2.5 所示。

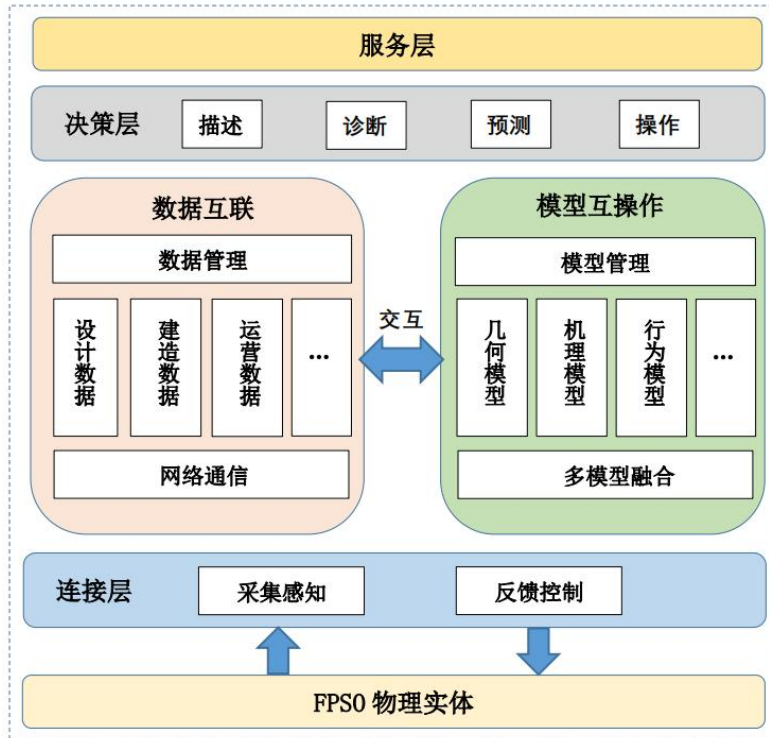


图 1.1.2.5 FPSO 状态监测和数字孪生系统功能框架示意图

第 2 节 规范与标准

1.2.1 一般要求

1.2.1.1 本系统的设计、制造、安装和检验应满足所在海域主管机关相关法规要求以及国家行业和船级社规范标准。一般参照如下规范标准（凡是未注明日期的，以最新版本为准）：

- | | | |
|------|----------------|--|
| (1) | 国家安监总局 | 浮式生产储油装置（FPSO）安全规则 |
| (2) | IMO A.830(19) | Code on alarms and indicators |
| (3) | CCS | 《钢质海船入级规范》 |
| (4) | CCS | 《海上浮动设施入级规范》 |
| (5) | CCS | 《材料与焊接规范》 |
| (6) | CCS | 《海上单点系泊装置入级规范》 |
| (7) | CCS | 《移动平台和海上设施结构及设备监测系统检验指南》 |
| (8) | CCS | 《船舶与海上设施数字孪生系统指南》 |
| (9) | CCS | 《船舶与海上设施数字系统验证指南》 |
| (10) | CCS | 《船舶数据质量评估指南》 |
| (11) | CCS | 《船舶网络安全指南》 |
| (12) | CCS | 《电气电子产品型式认可试验指南》 |
| (13) | CCS | 《船用软件安全及可靠性评估指南》 |
| (14) | IEC 60092-504 | Electrical installations in ships-part 504:Special features-Control and instrumentation |
| (15) | ISO 21451-2010 | Standard for Information technology - Smart transducer interface for sensors and actuators |
| (16) | JJF 1804-2020 | 布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范 |

第 3 节 等效与免责条款

1.3.1 当具有新颖结构和新型特征的状态监测和数字孪生技术超出本指南规定的范围，经风险评估和试验或其他方法验证，证明采用新技术的系统和设备能够达到本指南要求的同等安全水平，经 CCS 同意，可以接受作为替代和等效方法。

第 4 节 附加标志与符合证明

1.4.1 附加标志

1.4.1.1 入级 FPSO 的业主可向 CCS 申请如下附加标志：

- (1) FPSO 结构监测附加标志：HMS(X)；
技术要求参考 CCS《移动平台和海上设施结构及设备监测系统检验指南》。
- (2) FPSO 设备监测附加标志：EMS(X)；
技术要求参考 CCS《移动平台和海上设施结构及设备监测系统检验指南》。
- (3) 智能 FPSO 附加标志：i-Installation (PPS(Od), APS(CI(ox, gx, wx)), ILS, ISS, US, DC)；
技术要求参考 CCS《海上浮动设施入级规范》及其 2023 年第 1 次技术变更通告。
- (4) FPSO 船体结构数字孪生附加标志：SDT(d)；含义如下：
SDT --- FPSO 船体结构数字孪生功能标志，应满足本节 1.4.1.2 及 CCS《船舶与海上设施数字孪生系统指南》的相关要求。

d--- 数字孪生功能补充标志, 包括 d1、d2、d3、d4、d5, 分别代表数字孪生的五个功能: 镜像、归因、预知、优选、自主。

1.4.1.2 FPSO 船体结构数字孪生功能要求:

(1) 镜像:

- ① 建立 FPSO 船体结构的数字孪生体, 并与 FPSO 船体结构的受力状态保持适当的同步频率;
- ② 能对 FPSO 船体结构的数字孪生体进行可视化展示, 并可以进行不同工况的模拟;
- ③ 模拟的精度应能满足系统数字孪生的设计要求;
- ④ 满足此功能可授予功能补充标志 d1。

(2) 归因:

- ① 通过 FPSO 船体结构的数字孪生体, 实现对 FPSO 船体结构受力状态的实时监测;
- ② 基于监测/计算所得的数据和历史信息, 实现对 FPSO 船体结构当前结构响应及其成因的判断;
- ③ 满足此功能可授予功能补充标志 d2。

(3) 预知:

- ① 通过 FPSO 船体结构的数字孪生体, 在数字空间对 FPSO 船体结构的受力状态进行模拟、仿真与验证, 预测 FPSO 船体结构未来的受力状态, 从而判断其潜在的缺陷与风险并能进行预警;
- ② 满足此功能可授予功能补充标志 d3。

(4) 优选:

- ① 通过 FPSO 船体结构的数字孪生体, 在预知的基础上, 分别对多种决策方案下的 FPSO 船体结构性能、缺陷、风险等进行模拟和对比;
- ② FPSO 船体结构的数字孪生体能根据实际需求选择决策方案或对决策方案提出建议, 包括决策支持、自动化决策;
- ③ 满足此功能可授予功能补充标志 d4。

(5) 自主:

- ① 系指 FPSO 船体结构的数字孪生体与 FPSO 船体之间动态互动, 数字孪生体向 FPSO 船体发出控制指令, FPSO 船体执行指令后, 将执行结果反馈给数字孪生体, 从而实现系统的自动运行;
- ② 在必要时或紧急情况下, 操作人员可以接管系统控制权限, 切换为人工控制;
- ③ 满足此功能可授予功能补充标志 d5。

1.4.1.3 在完成系统检验与试验后, 现场验船师按照本指南及 CCS《海上浮动设施入级规范》及其 2023 年第 1 次技术变更通告第 1 篇第 2 章第 3 节的要求, 签发相应的检验报告, 授予相应的附加标志, 并在 FPSO 入级证书中标记。

1.4.2 符合证明

1.4.2.1 根据业主或设计单位或建造厂的申请或合同/协议, 非 CCS 级 FPSO 上使用的系统, 验船师在完成系统的检验和试验后, 可签发符合证明。签发的与检验有关的任何文件, 只反映检验当时的情况。

第 2 章 系统技术要求

第 1 节 一般规定

2.1.1 一般要求

2.1.1.1 系统宜支持多源异构数据、结构化数据、非结构化数据融合，支持的数据格式包括文本、图片、视频、音频及其它常见格式。

2.1.1.2 系统应具备一定的可扩展性，具备完善的数据接口方案，方便其它新增模块的接入。通过新增模块采集的数据可以在系统数据库中进行统一存储。

2.1.1.3 系统宜预留同外部系统的通信接口，根据外部系统的需求提供必要的数据共享服务。

2.1.1.4 系统宜具备数据回传和回传确认功能，需要时，可以将数据准确完整的回传到陆地端指定的服务器数据库中。

2.1.1.5 能够实现台风生产模式^①的 FPSO，在台风生产模式下，系统产生的数据应至少能完整保存在本地。

2.1.1.6 FPSO 与陆地端的数据同步过程，应保存完整的日志记录，并且可通过日志回溯定位问题。

2.1.1.7 系统应具备进程监控程序，当程序异常终止时能够自动进行重启操作，并且确保数据记录不中断。

2.1.1.8 系统的安装应当不降低 FPSO 原有的构造安全，并且不干扰机电设备的正常运行。

2.1.1.9 系统应便于使用，并且不显著增加 FPSO 操作人员的工作量或过分转移注意力导致新的安全风险。

2.1.1.10 系统应不干扰 FPSO 中控系统的数据，FPSO 中控系统的数据应具有独立性。

2.1.1.11 系统的供电应满足 CCS《海上浮动设施入级规范》2023 年第 1 次技术变更通告第 9 篇第 9 章 9.1.1 的要求。

2.1.1.12 系统的数据质量评估应满足 CCS《船舶数据质量评估指南》的相关要求。

2.1.1.13 系统的数据安全应满足 CCS《船舶数据质量评估指南》附录 8 的相关要求。

2.1.1.14 系统的网络安全应满足 CCS《船舶网络安全指南》的相关要求。

2.1.1.15 除本章已有规定外，本系统应满足 CCS《移动平台和海上设施结构及设备监测系统检验指南》的相关要求。

2.1.1.16 除本章已有规定外，本系统应满足 CCS《海上浮动设施入级规范》及其 2023 年第 1 次技术变更通告的相关要求。

第 2 节 状态监测系统技术要求

2.2.1 一般要求

2.2.1.1 FPSO 状态监测系统应能准确反映被测物体的真实状况。

2.2.1.2 根据不同的监测功能需求，传感器的选择应至少考虑以下因素：

- (1) 采集频率；
- (2) 采集数据的量程及准确度；

^① 台风生产模式：是指在台风来临时，海上平台人员全部撤离到陆地后，通过陆地中控系统远程操作海上平台持续生产油气，实现台风期间少停产甚至不停产。

- (3) 作业环境适应性，如防水、防油雾、防盐雾、防腐蚀、耐高温、防爆、防震动等；
- (4) 施工便捷性；
- (5) 使用寿命。

2.2.1.3 传感器采集的数据质量评估应满足 CCS《船舶数据质量评估指南》的相关要求。

2.2.1.4 监测数据质量评定可分为好、中、差 3 个等级，见表 2.2.1.5。质量被评定为差的监测数据不应用于后期的预警和/或预报。

2.2.1.5 监测数据质量评定应考虑以下因素：

- (1) 无效数据格式比例；
- (2) 数据丢失比例；
- (3) 数值超出正常范围比例；
- (4) 数据信号持续时长与总时长比值。

监测数据质量评定 **表 2.2.1.5**

质量评定指标	质量评定等级		
	好	中	差
无效数据格式比例	<0.1%	0.1% ~ 0.5%	>0.5%
数据丢失比例	<0.1%	0.1% ~ 0.5%	>0.5%
数值超出正常范围比例	<0.1%	0.1% ~ 0.2%	>0.2%
数据信号持续时长与总时长比值	>90%	80% ~ 90%	<80%

注：在测试或运营期间至少进行 3 次随机抽样，建议每次样本数据的时长 30 分钟。

2.2.2 海洋环境监测

2.2.2.1 海洋环境监测参数包括水深、气象参数、波浪参数和海流参数。

2.2.2.2 一般应获得下列气象参数（包括但不限于）：

- (1) 温度；
- (2) 湿度；
- (3) 气压；
- (4) 风速；
- (5) 风向。

2.2.2.3 风速风向的测量，应减少结构对测量结果的影响。测量仪器应安装在无遮挡、风场稳定、迎风路径长、湍流系数稳定的区域。

2.2.2.4 气象参数监测一般通过安装在 FPSO 顶部的气象站进行长期连续监测。

2.2.2.5 环境监测传感器/监测设备布置应避免对 FPSO 的结构和设备产生不良影响。

2.2.2.6 波浪参数测量设备应根据使用场合和现场工作条件选择适合的测量设备。

2.2.2.7 一般应获得下列波浪参数（但不限于）：

- (1) 有义波高；
- (2) 最大波高；
- (3) 平均跨零周期；
- (4) 谱峰周期；
- (5) 波浪方向。

2.2.2.8 波浪测量设备安装位置应考虑 FPSO 的风标效应和船体安全。

2.2.2.9 海流计的安装位置不应影响 FPSO 的构造安全。

2.2.2.10 海流的监测参数包括但不限于流向和流速剖面。

2.2.2.11 海洋环境监测宜设置环境条件参数的统计算法，以获得长、短周期监测的数据。

2.2.2.12 海洋环境数据的收集和传输应符合《中华人民共和国数据安全法》的相关要求。

2.2.3 运动姿态监测

2.2.3.1 FPSO 运动姿态监测数据包括但不限于船艏方向、船体位置坐标、船体六自由度运动分量、与相邻设施的安全距离、吃水、船底与海床的间距。

2.2.3.2 单点系泊系统的姿态监测包括但不限于单点旋转方向、单点位置坐标。

2.2.3.3 应通过安装在 FPSO 船体以及系泊系统的倾角传感器、惯导传感器、加速度传感器以及 GPS 或北斗定位传感器等设备监测 FPSO 船体以及系泊系统的姿态信息和位置信息。

2.2.3.4 安装在 FPSO 船体上的倾角传感器应按照其位置进行修正,参考轴向与船体所在坐标系平行,确保测量精度。

2.2.3.5 宜将 FPSO 运动姿态数据与现场环境数据进行融合处理和关联,以评估姿态监测传感器的数据可靠性。

2.2.3.6 FPSO 运动姿态监测系统应具备预警功能,当 FPSO 船体运动轨迹超过设定参数时及时发出报警信息。

2.2.3.7 FPSO 运动姿态监测系统应为数字孪生系统执行报警或预警提供有效数据。

2.2.4 结构腐蚀与防腐监测

2.2.4.1 FPSO 结构腐蚀监测主要进行板厚监测。

2.2.4.2 FPSO 防腐监测一般包括阴极保护电位监测、牺牲阳极电流监测和涂层监测等。

2.2.4.3 应设置合理报警阈值,当所监测区域的腐蚀程度超过阈值时进行报警。腐蚀极限参考《海上浮动设施入级规范》第 2 篇第 3 章表 3.2.2.2 的要求。

2.2.5 结构应力监测

2.2.5.1 FPSO 结构应力监测应满足 CCS《移动平台和海上设施结构及设备监测系统检验指南》第 3 章中关于传感器、采集数据质量、用户界面及试验大纲的技术要求。

2.2.5.2 FPSO 整体应力监测用于获取船体梁的静水弯矩/剪力和波浪弯矩/剪力等受力状态,以及它们随时间和沿船舶长度/宽度方向位置的变化。

2.2.5.3 FPSO 整体应力监测应具备实时指示船体梁应力是否接近设计极限值,用于警告操作人员,并建议采取缓解措施。许用应力参考《海上浮动设施入级规范》第 2 篇第 9 章相关要求。

2.2.5.4 FPSO 局部应力监测用于获取船体或设备及其基座等重点关注位置应力水平随时间的变化。许用应力参考《海上浮动设施入级规范》第 2 篇第 9 章相关要求。

2.2.5.5 FPSO 局部应力监测应具备实时指示局部应力超过预警水平的可能性的能力,并以预警水平给出对应后果趋势的提示,用于警告操作人员,船舶对应结构部件的局部应力水平接近批准的极限,并建议采取缓解措施。

2.2.5.6 对于船型海上 FPSO,结构应力监测部位宜考虑以下结构:

- (1) 船中主甲板、舷侧结构;
- (2) 距船首、船尾 1/4 船长处主甲板及舷侧结构;
- (3) 吊机基座及其加强结构;
- (4) 上部模块基座及其加强结构;
- (5) 燃烧臂基座及其加强结构;
- (6) 外输系统;
- (7) 其他承受较大集中载荷或/和受较大交变载荷影响的结构。

2.2.5.7 对于非船型海上 FPSO,结构应力监测装置应布置到能够反映整体结构响应的位

置,来获得整体应力。布置到应力大的位置检测局部应力。

2.2.5.8 用于局部结构应力监测的传感器的采样频率,可根据局部结构固有频率调整,但不应低于局部结构 1 阶(或潜在被激励模态)固有频率的 3 倍。

2.2.5.9 由监测点的疲劳应力数据到疲劳热点应力数据的推导应使用与疲劳评估相应的计算方法,并得到 CCS 的批准。

2.2.5.10 结构应变传感器作为易损设备,应提供设备损坏补偿算法(即根据历史数据或者

临近测点位置结果的数值补偿算法) 或者快速修复措施。

2.2.5.11 用于 FPSO 结构应力监测的应变传感器宜满足以下具体要求:

FPSO 结构应力监测应变传感器要求

表 2.2.5.11

特性		推荐值
测量范围		$\geq \varepsilon_{\text{静水}} + \varepsilon_{\text{动载}} \pm 2000 \mu\varepsilon$ (对于钢结构)
不确定度 (最低要求)		测量值的 3% 或 $20 \mu\varepsilon$, 取大值
分辨率		$5 \mu\varepsilon$
运动及波浪载荷	频宽 (Hz)	0~5
	频率 (Hz)	所需频率的 3 倍, 推荐 20
砰击	频宽 (Hz)	5~100
	频率 (Hz)	所需频率的 3 倍, 推荐 300
晃荡	频宽 (Hz)	30~1200
	频率 (Hz)	所需频率的 3 倍, 推荐 2000
备注 1: ε 表示应变, 即单位长度的变形量。		
备注 2: $\mu\varepsilon$ 表示微应变, $1\varepsilon = 10^6 \mu\varepsilon$ 。		

2.2.6 系泊系统监测

2.2.6.1 对于单点系泊的海上 FPSO, 系泊装置监测宜考虑以下设备或参数:

- (1) 系泊系统;
- (2) 主要系泊载荷传力构件 (如: 轴承支撑结构、系泊索与单点连接构件、锁紧装置等);
- (3) 锚链的张力;
- (4) 锚链倾斜角度;
- (5) 主轴承;
- (6) 扭矩臂;
- (7) 液滑环内液体温度、压力;
- (8) 滑环堆视频监控;
- (9) 软管支撑结构。

2.2.6.2 对于分布式系泊的海上 FPSO, 系泊装置监测应使用可靠方法监测系泊索的受力状态, 为数字孪生系统执行系泊索的安全状态评估提供有效数据。

2.2.6.3 系泊索应力监测系统宜选择可靠性高、使用寿命长的监测设备。

2.2.6.4 对于浅水软钢臂系泊系统, 应通过数据采集或计算分析对软钢臂的受力状态进行监测。

2.2.6.5 具有锁紧装置的系泊系统, 应优先监测锁紧装置的受力状态。

2.2.6.6 使用自润滑滑动主轴承的系泊系统, 可监测轴承相对旋转圈数、轴承温度、滑油温度及压力等, 采用合理计算模型确定轴承磨损量。

2.2.6.7 使用滚珠主轴承的系泊系统, 可监测润滑油脂的成分, 确定主轴承的工作状态。

2.2.7 立管系统监测

2.2.7.1 立管系统监测宜对立管顶部及底部的张力、弯曲半径、立管运动进行监测, 设置相应的预警阈值。

2.2.7.2 柔性立管宜对立管环空状态进行监测。

2.2.7.3 立管系统监测应考虑传感器/监测设备的布置, 监测点位数据可以构建立管整体状态监测模型或数字孪生模型。

2.2.7.4 立管系统监测应考虑信息传输的要求, 满足无线传输或有线传输的要求。

2.2.8 液舱状态监测

2.2.8.1 液舱状态监测主要是对液货的液位、温度、压力等进行不间断状态监测。

2.2.8.2 液舱状态监测系统应具备报警功能，当液位、温度、压力等参数超出预设范围时，及时发出警报，提醒操作人员采取措施。

2.2.8.3 液舱状态监测系统应具备数据记录和分析功能，能够记录历史监测数据，进行数据分析和趋势预测。

2.2.8.4 液舱状态监测系统应具备远程监控功能，能够通过网络实时监测液舱状态，方便远程操作和管理。

2.2.9 工艺流程监测

2.2.9.1 FPSO 的工艺流程监测应满足《浮式生产储油装置（FPSO）安全规则》第 6 章和第 10 章规定功能的要求。

2.2.9.2 FPSO 的工艺流程监测应能满足生产过程控制的信号采集要求。

2.2.9.3 对于有数字孪生功能的 FPSO 工艺系统，其监测参数应能满足工艺系统模拟和孪生的要求。

2.2.9.4 工艺系统宜对下列工艺参数进行监测：

- (1) 压力；
- (2) 温度；
- (3) 流量；
- (4) 油、气、水含量；
- (5) 液位；
- (6) 界面；
- (7) 转速；
- (8) 功率；
- (9) 振动位移；
- (10) 振动频率；
- (11) 电压；
- (12) 阀门开度。

2.2.10 卸油（气）系统监测

2.2.10.1 卸油（气）系统中应装设仪表以连续监测下列参数：

- (1) 卸油（气）压力；
- (2) 软管和缆索的连接状况；
- (3) 连接设备的张力（如软管绞车）；
- (4) 缆索的张力（如适用）。

2.2.11 机电设备监测

2.2.11.1 宜使用 FPSO 自带的机电设备传感器数据实现监测或数字孪生功能。

2.2.12 气体泄漏监测

2.2.12.1 宜使用 FPSO 自带的气体泄漏传感器数据实现监测或数字孪生功能。

2.2.13 火灾探测监测

2.2.13.1 宜使用 FPSO 自带的火灾探测传感器数据实现监测或数字孪生功能。

第 3 节 数字孪生系统技术要求

2.3.1 一般要求

2.3.1.1 FPSO 数字孪生系统应包括 FPSO 物理实体、数字孪生体、数字孪生数据和数字孪

生服务。针对 FPSO 船体、工艺流程、系泊系统、设备等物理实体构建相应的数字孪生体，该数字孪生体接收来自 FPSO 物理实体的信息并进行适当频率地演化，从而与 FPSO 物理实体保持一致，进而辅助对 FPSO 物理实体进行预警、诊断、决策或控制，实现 FPSO 的全生命周期管理和运营优化。

2.3.1.2 FPSO 数字孪生系统需要收集 FPSO 生产过程中各种传感器、监测设备和仪表的数据，通过算法对数据进行处理，形成完整的生产数据模型，以实现 FPSO 各项指标的实时监控和预测。

2.3.1.3 FPSO 数字孪生体应能够动态精准映射 FPSO 的实时状态，并能够通过仿真手段或数据处理方法在一定程度上预测 FPSO 的未来状态。

2.3.1.4 FPSO 数字孪生系统应能够以直观可视的方式显示 FPSO 数字孪生体的状态和运行过程。

2.3.1.5 FPSO 物理实体和数字孪生体的交互时间延时应保证在可接受范围之内。

2.3.1.6 FPSO 数字孪生体与物理实体之间应能够通过兼容的接口交换信息和指令。

2.3.1.7 FPSO 数字孪生体与数字孪生服务层之间应能够通过兼容的接口交换数据。

2.3.1.8 应保证 FPSO 物理实体和数字孪生体之间数据交互的准确性、完整性和一致性。交互过程数据不漏传、误传、重复传。

2.3.1.9 FPSO 数字孪生系统应具备数据清洗功能，包括对错误数据的修正、无效数据的过滤、重复数据的合并与消除、残缺数据的填补以及其它有效的方法。

2.3.1.10 FPSO 数字孪生系统宜采用高效的数据库设计方案，支持分布式存储和横向扩展，避免数据激增时带来的性能瓶颈。

2.3.1.11 FPSO 数字孪生服务应具有模块化、可调用、可组合、可复用和可重构等特点。

2.3.1.12 应使用更新为与当前 FPSO 物理实体状态一致的数字孪生体进行实时仿真。

2.3.1.13 若 FPSO 数字孪生系统具备自主决策和自动控制功能，应进行风险分析并制定安全保障措施，以确保 FPSO 物理实体的安全。相关文件应提交 CCS 审核。

2.3.1.14 除本节已有规定外，FPSO 数字孪生系统还应满足 CCS《船舶与海上设施数字孪生系统指南》和《船舶与海上设施数字系统验证指南》的相关要求。

2.3.2 数字孪生模型

2.3.2.1 FPSO 数字孪生模型时间系统宜采用公历纪元和 UTC/GMT 标准时间。

2.3.2.2 FPSO 数字孪生模型应能准确反映 FPSO 物理实体的结构特性。

2.3.2.3 FPSO 数字孪生模型的构建应充分考虑实用性和可扩展性，以适应业务需求的扩展与变化。

2.3.2.4 FPSO 数字孪生模型应在系统中具有唯一标识。

2.3.2.5 FPSO 数字孪生系统应能够对 FPSO 数字孪生模型进行预览、搜索、导入、导出、修改等操作。

2.3.2.6 FPSO 数字孪生模型应能挂接 FPSO 的状态、行为等动态信息。

2.3.2.7 FPSO 数字孪生模型应具有结构化、语义化特征，使其能够参与仿真模拟分析。

2.3.2.8 宜对 FPSO 数字孪生模型进行轻量化处理，在保证模型精度的同时，提高模型仿真计算的效率，提高系统计算资源冗余，降低计算压力。

2.3.2.9 FPSO 数字孪生模型的实时仿真运行时间应与原始数据采集周期趋同，或者遵循预设的参考时间阈值。

2.3.2.10 FPSO 数字孪生模型的离线仿真运行时间应遵循预设的参考时间阈值。

2.3.2.11 FPSO 数字孪生模型仿真结果应能够可视化，且不同报警等级应区分明显。

2.3.2.12 FPSO 数字孪生模型构建完成后，应进行复核和验证。

2.3.2.13 应建立模型更新机制，当 FPSO 物理实体发生变化时，及时进行模型更新。

2.3.2.14 系统运行过程中，应保证模型和属性数据、元数据的一致性。

2.3.2.15 应建立模型更新的版本管理机制，模型能够根据需求进行版本间切换。

2.3.2.16 在进行模型的创建、存储、传输、更新时，应遵守国家信息安全保密管理的规定。

2.3.2.17 应制定模型精度的评价指标，例如模型仿真计算结果与实测数据的偏差。评价指标应满足设计要求，并提交 CCS 审核。

2.3.3 数字孪生数据

2.3.3.1 FPSO 数字孪生数据包括属性数据、配置数据、系统运行状态数据、控制数据、衍生数据、知识数据、仿真数据等。

2.3.3.2 FPSO 数字孪生系统应能对采集到的数据进行治理，包括数据解析、去重、同步、聚合、排序及匹配等，并且按照合理的规则进行数据分类和存储。

2.3.3.3 宜对多通道、多传感器数据进行融合处理。

2.3.3.4 应支持本地数据库与陆地端数据库的远程通信，并且保证数据传输的完整性、一致性、准确性。

2.3.3.5 宜对回传数据进行压缩处理后再回传至陆地端数据库，以节省网络带宽资源。

2.3.3.6 数据传输过程中遇到网络或者服务故障并且恢复后，应能进行数据的断点续传。

2.3.3.7 FPSO 数字孪生数据的传输介质根据具体需求可采用导向传输介质和非导向传输介质。其中导向传输介质包括双绞线电缆、同轴电缆、光纤等导体；非导向传输介质包括短波、微波、蓝牙、卫星和光波等无线电波。

2.3.3.8 FPSO 数字孪生数据的结构化信息（如几何信息、属性信息）宜采用数据库方式存储；非结构化信息（如文件）宜存储在分布式文件管理系统中。

2.3.3.9 FPSO 数字孪生系统应支持标准、开放和安全的数据访问接口对数据进行操作。

2.3.3.10 FPSO 数字孪生系统应具备数据安全机制，通过用户身份认证、权限控制、数据加密等方式，只允许授权的用户访问和修改数据。

2.3.3.11 FPSO 数字孪生系统应具备数据的容错和高可用机制，包括数据的备份功能、数据快速恢复功能。

2.3.3.12 数据的备份和恢复功能应能够支持库级别的全量备份，并且能够保存和查看备份恢复的进度、备份恢复历史记录。

2.3.3.13 宜对备份数据进行压缩处理，减少备份数据占用的硬盘空间。

2.3.3.14 应采取必要措施，保证数据备份程序不影响 FPSO 数字孪生系统的正常运行。

2.3.4 数字孪生服务

2.3.4.1 数字孪生服务系指数字孪生系统向用户（人、组织或系统）提供的业务所需的服务接口。

2.3.4.2 数字孪生服务包括监测、诊断、预测和决策等功能。

2.3.4.3 在软件架构设计时宜遵循单一职责原则、接口隔离原则、依赖倒置原则等，通过微服务化、冗余设计、无状态设计、系统容错、容灾备份以及各种过载保护机制，保障 FPSO 数字孪生服务的稳定性和高可用性。

2.3.4.4 FPSO 数字孪生服务页面应操作简洁、易用、灵活，风格统一，用户帮助文档齐备。

2.3.4.5 FPSO 数字孪生服务升级后应保证历史版本的兼容性，并且各版本可根据需要进行切换。

2.3.4.6 FPSO 数字孪生服务宜具备审计机制，及时记录用户重要行为、系统资源异常使用、重要系统命令使用等影响 FPSO 数字孪生系统安全性和稳定性的相关事件。

第 3 章 产品检验

第 1 节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 系统及相关产品应按照本章要求进行产品检验，包括产品设计图纸审查、产品检验及试验、产品证书签发。

3.1.1.2 应由产品制造厂、代理商、产品设计者等申请方向 CCS 提出产品检验申请，并将本章第 2 节规定的图纸资料提交 CCS 进行审查。

3.1.1.3 系统的产品检验除应符合本指南规定外，还应符合 CCS《海上浮动设施入级规范》、《钢质海船入级规范》与《材料与焊接规范》的规定。

第 2 节 设计审查

3.2.1 一般要求

3.2.1.1 系统的检验、试验项目表及工艺文件，如焊接工艺、设备安装工艺、试验大纲及试验程序，均应提交 CCS 现场验船师审查。

3.2.1.2 系统的开发测试流程、开发质量体系应符合 CCS 规范文件与业主技术文件的要求。

3.2.1.3 如对已经审批的图纸资料进行设计变更，则应将变更的图纸资料重新送审。

3.2.2 需要送审的图纸范围

3.2.2.1 应视系统的适用情况提交如下图纸资料（但不限于）：

- (1) 系统技术规格书（软件和硬件）；
- (2) 系统原理框架图；
- (3) 电力系统图和布置图；
- (4) 传感器/监测设备安装布置图（包含设备信息、安装要求）；
- (5) 传感器/监测设备试验大纲及试验程序；
- (6) 软件设计说明书（包括算法、模型、数据质量和网络安全等）；
- (7) 孪生算法测试报告（包括算法的正确性、完整性、可用性、容错性、易恢复性等）；
- (8) 软件测试大纲；
- (9) 软件测试报告；
- (10) 系统测试程序；
- (11) 系统操作手册。

第 3 节 产品持证要求

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 入级 FPSO 产品持证要求详见 CCS《海上浮动设施入级规范》及其 2023 年第 1 次技术变更通告第 1 篇第 3 章第 1 节 3.1.6 的要求。

3.3.1.2 非入级 FPSO 产品持证要求参考 CCS《海上浮动设施入级规范》及其 2023 年第 1 次技术变更通告第 1 篇第 3 章第 1 节 3.1.6 和《海上油气处理规范》第 2 章第 3 节的产品持证要求。

第 4 节 设备检验

3.4.1 设备测试

3.4.1.1 入级 FPSO 状态监测和数字孪生系统的设备应依据本指南 3.3.1 中的产品持证要求进行检验，产品环境可靠性、EMC（电磁兼容）等应满足 CCS《电气电子产品型式认可试验指南》相关试验要求。

3.4.1.2 试验项目及要求，应满足 CCS《移动平台和海上设施结构及设备监测系统检验指南》第 4 章第 2 节 4.2.2.2 的相关要求。

3.4.1.3 电缆的测试要求应满足 CCS《海上浮动设施入级规范》第 6 篇相关要求。

3.4.1.4 非入级 FPSO 状态监测和数字孪生系统的设备检验参照本节要求执行。

第 5 节 系统试验

3.5.1 一般要求

3.5.1.1 应对系统构建的模型进行确认，保持系统模型和物理实体的一致性。

3.5.1.2 应对系统功能进行试验，以确认系统的可靠性和稳定性。

3.5.1.3 系统功能试验应包括以下内容：

- (1) 功能的实现程度；
- (2) 内部故障或外部系统设备故障引发的安全响应；
- (3) 和其他系统间的安全互连；
- (4) 确认系统的数据采集、存储、传输、显示和应用等过程正常实施。

3.5.1.4 系统供电试验：当为系统供电的主电源失电时，备用电源应能自动切换为系统供电。

3.5.1.5 系统故障报警试验应包括以下内容：

- (1) 电源故障；
- (2) 传感器/监测设备故障；
- (3) 传感器/监测设备的监测数据越过系统报警阈值；
- (4) 报警（或测量）线路接地故障；
- (5) 通讯系统故障。

3.5.1.6 系统失效试验应包括以下内容：

(1) 系统功能应相互独立，当其中的某一个或多个系统发生故障时，应不影响其它系统的正常工作；

(2) 一个传感器/监测设备信号通道（或一个模块，该模块可包括多个通道）的故障不影响其它非关联通道（模块）。

3.5.1.7 除本节已有规定外，本系统的试验还应满足 CCS《船用软件安全及可靠性评估指南》、《船舶网络安全指南》、《船舶与海上设施数字孪生系统指南》和《船舶与海上设施数字系统验证指南》等相关规范指南的要求。

3.5.2 FPSO 数字孪生系统试验

3.5.2.1 FPSO 数字孪生系统的试验项目包括 FPSO 数字孪生模型试验、FPSO 数字孪生数据试验和 FPSO 数字孪生服务试验。

3.5.2.2 FPSO 数字孪生模型试验主要包括以下内容：

(1) FPSO 数字孪生模型的质量检查内容包括数据完整性、表达精细度、逻辑一致性、属性精度和时间精度等；

(2) 对模型元素的查看、搜索、编辑修改、导入导出等功能进行验证；

(3) 对模型的三维展示、放大、缩小、拖拽、旋转等操作进行验证，各项操作应平滑流畅，

无明显卡顿、页面崩溃等异常；

- (4) 检查模型的在线或离线仿真运行时间是否满足预期设置的时间阈值；
- (5) 检查模型仿真结果与实测数据的偏差是否满足预期的指标；
- (6) 检查模型仿真结果是否按照不同等级进行区别展示，各等级颜色是否能够明显区分；
- (7) 检查模型在不同版本间切换的功能是否正常（如适用）。

3.5.2.3 FPSO 数字孪生数据试验主要包括以下内容：

(1) 应进行数据准确性调试，检查数据从采集、清洗、存储、处理到最终展示各个阶段是否正确无误；

- (2) 应检查数据的采集频率与系统设置的阈值是否一致；
- (3) 应检查系统数据备份的完整性、一致性、准确性、连续性和可恢复性；
- (4) 检查系统对于异常数据的容错能力。如原始数据采集异常、用户输入数据异常时，不至于影响系统的稳定运行。系统应能有效排除异常数据产生的影响，不产生脏数据/无效数据；
- (5) 检查系统对于保密数据是否具备限制访问的有效措施；
- (6) 检查系统对于备份数据是否具备限制访问的有效措施；
- (7) 如有提供对外的数据访问接口，应检查接口提供数据的完整性和准确性并检查接口是否具备限制访问的有效措施；
- (8) FPSO 数字孪生数据的质量评估应满足 CCS《船舶数据质量评估指南》的相关要求。

3.5.2.4 FPSO 数字孪生服务试验主要包括以下内容：

(1) 应根据 FPSO 数字孪生服务的功能列表，对各项功能进行检查，确认各项功能满足需求；

- (2) 对 FPSO 数字孪生服务的预警功能进行调试，检查各级别预警功能是否符合预期；
- (3) 对 FPSO 数字孪生服务的兼容性进行调试，当操作系统版本、屏幕分辨率及其他相关配置变更后，系统应能正常提供服务；
- (4) 如 FPSO 数字孪生服务提供预测功能，应对预测算法进行验证；
- (5) 如 FPSO 数字孪生服务提供审计功能，应检查审计日志是否完整和正确；
- (6) 检查服务运行期间消耗的资源情况是否稳定，包括服务器 CPU/内存/硬盘/网络带宽等资源。服务器不应出现长时间满负荷运行的情况；
- (7) 检查前端页面的加载性能，是否在可接受的时间范围内；
- (8) 系统的运行环境应具备权限控制策略。应检查确认低权限的用户账户不能进行越权操作；
- (9) 系统的配置文件应具备权限控制策略。应检查确认低权限的用户账户不能随意修改和删除系统配置文件。

第 4 章 建造中检验

第 1 节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 系统在 FPSO 上安装之前，申请人应向 CCS 提交建造中检验及附加标志的书面申请。

4.1.1.2 为保证本系统及相关设备能顺利及时检验，申请人应向验船师提供必要的检验条件以及检验必需的安全措施。

4.1.1.3 验船师应确认系统或设备的产品证书。

4.1.1.4 设备安装应满足 CCS 批准的安装工艺要求。

4.1.1.5 申请方应向 CCS 提交系统试验大纲进行审批。CCS 依据批准的试验大纲的技术要求，对系统进行检验与试验。

4.1.2 系统安装与调试检验

4.1.2.1 系统的构建与安装要求

(1) 系统的构建与安装应与 FPSO 设施的具体应用相适应。其中，用于系统的具体功能内容，应满足系统项目技术协议书或规格书相关要求，安装在 FPSO 设施上的设备应满足《海上浮动设施入级规范》及其 2023 年第 1 次技术变更通告等相关规范的要求。

(2) 系统应设计成可在 FPSO 设施现场安装的系统，根据批准的图纸对系统进行初始化设置。初始化设置完成并经 CCS 确认后，系统应有相应的保护措施，保证计算机仅用于监测数据展示、数字模型展示、仿真和报警等系统功能。

(3) 系统的构建应满足以下要求：

- ① 系统设备的制造选材应满足 CCS《移动平台和海上设施结构及设备监测系统检验指南》第 3 章 3.1.1 结构和环境工作条件的要求；
- ② 系统附属装置的建造和安装不可以影响到主结构的安全，应根据 CCS 批准的图纸进行施工；
- ③ 本系统与其他系统的接口，如控制系统、安全系统等应有明确的规定，具体接口要求应满足 CCS 批准的 FPSO 设施图纸的要求。

(4) 系统的安装应满足以下要求：

- ① 系统设备应有较为便捷的安装形式，可以进行快速的安装和拆卸；
- ② 任何情况下系统（包括传感器、监测设备）的安装不应破坏 FPSO 设施的结构和影响 FPSO 设施的性能，不能造成任何安全隐患，也不能替代 FPSO 设施上人员正确的判断和责任；
- ③ 系统（包括传感器、监测设备）的安装应满足 FPSO 设施防火、防爆和防腐等技术要求，验船师应对系统的安装进行检验；
- ④ 系统中的设备应按照 CCS 批准的图纸和设备安装工艺要求进行安装；
- ⑤ 系统中传感器/监测设备的安装，应考虑设施结构布局、被监测对象的位置、传感器/监测设备的维修及其操作模式等要求；
- ⑥ 传感器/监测设备应采取必要的密封、挡浪等防护措施，防止海浪对其造成损坏；
- ⑦ 系统置于水面以下的设备，应考虑安装、回收和更换的便捷性；
- ⑧ 系统设备电缆应根据其安装处所，选择具有满足环境条件的电缆，所有设备以外的电缆及布线至少应为阻燃型的。电缆贯穿水密舱壁或甲板时，可采用单独水密填料函，或多根电缆的水密填料函，完工后应保持隔舱壁或甲板的水密完整性。

同样，电缆贯穿有某种防火要求的舱壁和甲板时，应保证不会削弱甲板和舱壁的防火完整性；

- ⑨ 系统辅助装置应满足防潮、防盐雾、防油雾、防霉菌的要求，安装位置与其他设备互不干扰，而且不影响主结构的安全可靠性；
- ⑩ 系统中的设备安装后应进行单机调试，检验系统的联通性。

4.1.2.2 系统安装现场检验包括以下内容：

- (1) 检查传感器/监测设备的布置与已批准的图纸一致；
- (2) 检查传感器/监测设备的封装与已批准的图纸一致；
- (3) 检查传感器/监测设备安装后的标定值，确认与出厂值的误差满足要求；
- (4) 检查确认光纤接头的熔接损耗值满足要求；
- (5) 检查风速风向仪的安装位置，确认周边结构不会对风速风向构成影响。波浪雷达的安装位置应高于海平面一定距离以避免海浪对其造成损坏。运动传感器的安装应考虑振动的影响，如果使用弹性支座，应证明其自身的固有频率不影响传感器所测频段的信号；
- (6) 监测系统设备或传感器/监测设备固定设施焊接安装检验，应按照 CCS《材料与焊接规范》完成系统安装焊接的检验（如适用）；
- (7) 系统线缆的铺设应满足防火、防爆和电磁兼容的要求，穿越水密舱壁或者耐火舱壁应满足相应舱壁完整性的技术要求；
- (8) 系统其他附属设备的安装检验；
- (9) 系统设备安装后功能测试，检验单个传感器/监测设备或系统设备的联通性；
- (10) 检查确认系统接地正常。

4.1.2.3 监测系统安装完成后功能试验包括以下内容：

- (1) 验证监测系统传感器/监测设备数据采集数量、精度等参数是否满足设计要求；
- (2) 验证监测系统的的天采集、数据存储等功能是否满足设计要求；
- (3) 验证监测系统联合调试结果是否满足设计要求；
- (4) 验证监测系统的正常操作功能及应急操作功能是否满足设计要求；
- (5) 验证监测系统的其他功能、性能是否满足设计要求。

4.1.2.4 数字孪生系统安装完成后功能试验包括以下内容：

- (1) 系统功能及性能审查，验证数字孪生系统架构、功能、性能符合 CCS 规范指南与业主技术文件的要求；
- (2) 数据管理审查，验证数字孪生系统建造、安装等静态数据及在役期间动态数据等的多源数据存储方式、分析处理方法、数据融合方法、数据管理及应用等符合 CCS 规范指南与业主技术文件的要求；
- (3) 孪生体模型审查，验证数字孪生系统中各阶段孪生模型的实现的智能方法适用性及模型同步可靠性符合 CCS 规范指南与业主技术文件的要求；
- (4) 数据审查，确认数据活动的策略审核，确定数据留存周期，对满足留存周期数据，确定使用数据评估的特性、测度及权重的符合性。

4.1.2.5 系统开关试验包括以下内容：

- (1) 应进行系统开关试验，执行正常的开关操作或紧急关断正常；确认各种设备指示状态正常；
- (2) 进行系统内部分设备关断试验，确认设备的独立性，确认其他设备的状态指示正常；
- (3) 确认由意外事件（如高压、高温、火焰故障）引起的自动关断已完成并符合要求；
- (4) 对整个系统的关断逐一进行试验并确认符合设计要求。

第 5 章 建造后检验

第 1 节 一般规定

5.1.1 一般要求

5.1.1.1 依据本指南完成系统检验发证后，若发生如下变更，申请人应及时通知 CCS 并重新申请检验。

- (1) 主要设备损坏更换或修理；
- (2) 软件主要功能发生变更；
- (3) 新增子系统或者模块。

5.1.1.2 在系统检验发证后，可按照本章要求维持证明的有效性。

第 2 节 附加标志检验

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 系统的附加标志检验要求参见 CCS《海上浮动设施入级规范》及其 2023 年第 1 次技术变更通告第 1 篇第 5 章第 13 节 5.13.4 的要求。

5.2.1.2 更换有持证要求的零部件时，应提供有关部件的证书，并有相关项目的调试和功能测试记录。

5.2.1.3 必要时，业主可申请临时检验。

5.2.1.4 附加标志的检验周期与设施的检验周期协调一致。

第 3 节 符合证明检验

5.3.1 一般规定

5.3.1.1 取得 CCS 符合证明的系统，如业主申请维持证明有效性的检验，具体检验要求可参见本章第 2 节。

5.3.1.2 本系统的检验周期宜与设施的检验周期协调一致。