

FPSO 上层模块结构建造流程及要点

前言

本文是笔者在参与了几个 FPSO 上层模块项目结构建造及质量管理后，对此类项目结构专业施工管理及安全、质量控制方面的个人心得及观点总结。旨在为后续同类型工作提供参考和查询记录。



FPSO 模块介绍

浮式生产储油卸油装置（Floating Production Storage and Offloading, FPSO）是集人员居住与生产指挥系统于一体的综合性大型海上石油生产基地，具备油气分离、含油污水处理、动力发电、供热、原油产品储存和运输等功能。FPSO 的外形与油轮相似，但其复杂程度远高于油轮，所受的外部载荷也比普通油轮复杂得多。FPSO是目前海洋油气开发应用最为广泛的浮式生产处理设施,通常由上部模块、船体、系泊系统、水下生产系统等几大部分组成。FPSO 的建造周期通常为30~36个月。

FPSO的主要生产功能依赖上部模块实现，上部模块的建造成本也在整个FPSO中占更大比例。通过不同的功能模块，以及一系列复杂的工艺流程实现原油开采、处理、储存、外输的功能。

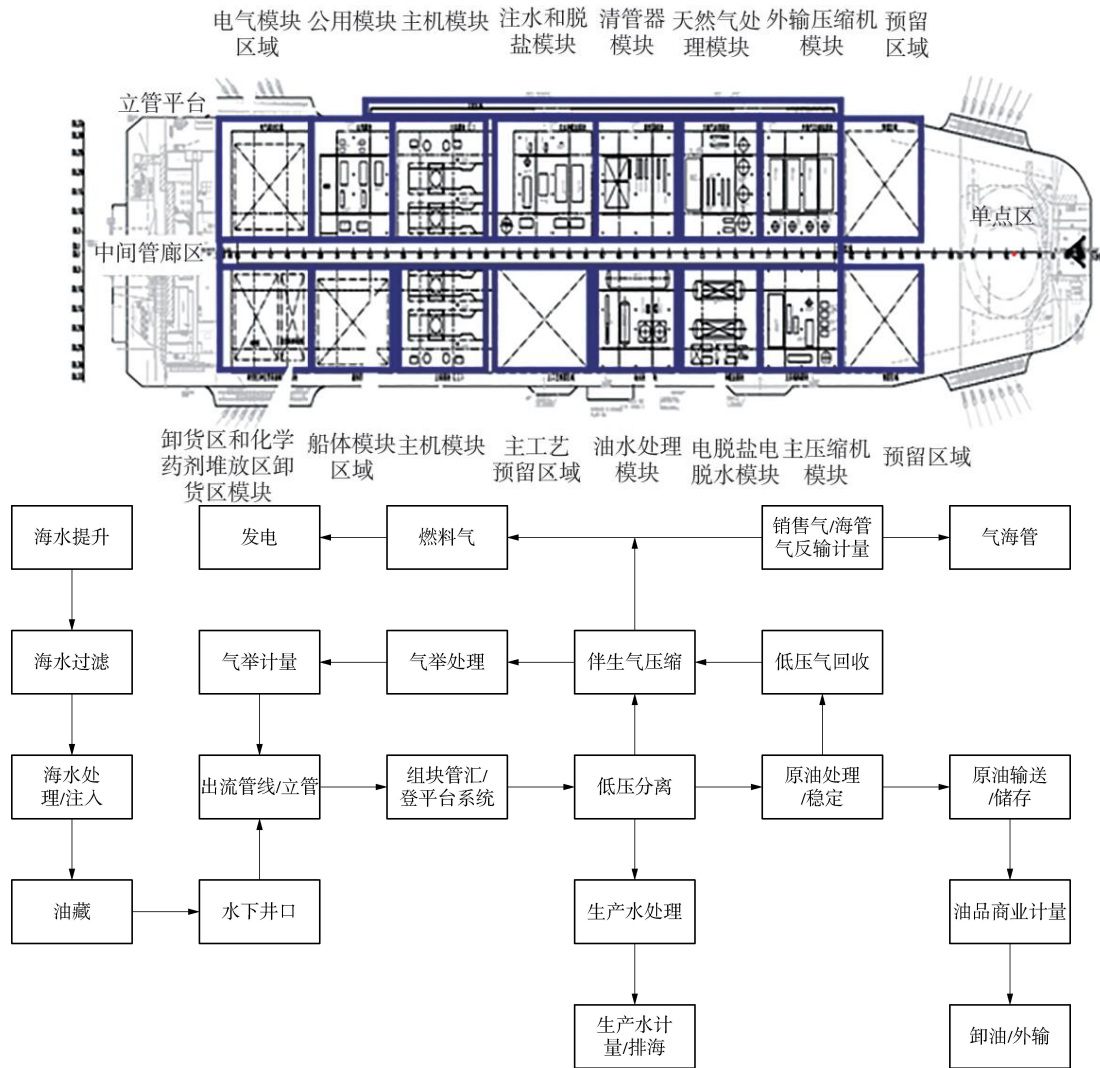


图1 通用型FPSO上部模块布置及流程框图
Fig.1 Arrangement and flow diagram for topside of General FPSO

FPSO上部模块外形为多层框架式结构，层间及整体模块与船体之间由立柱，斜撑连接。每一层称之为甲板片，甲板片的主要结构由型钢构成，板拼型钢或成品型钢组合使用。底层甲板片由于要承受更大载荷，一般为大截面H型钢或T型材，此类大截面型钢多为板拼焊接组合构件（PG梁）。上层甲板片多为小截面成品型钢，局部需要提高强度的位置仍会有加厚板拼型钢的使用。立柱，斜撑有成品管，卷管，JCOE管，或者H型钢等多种形式。

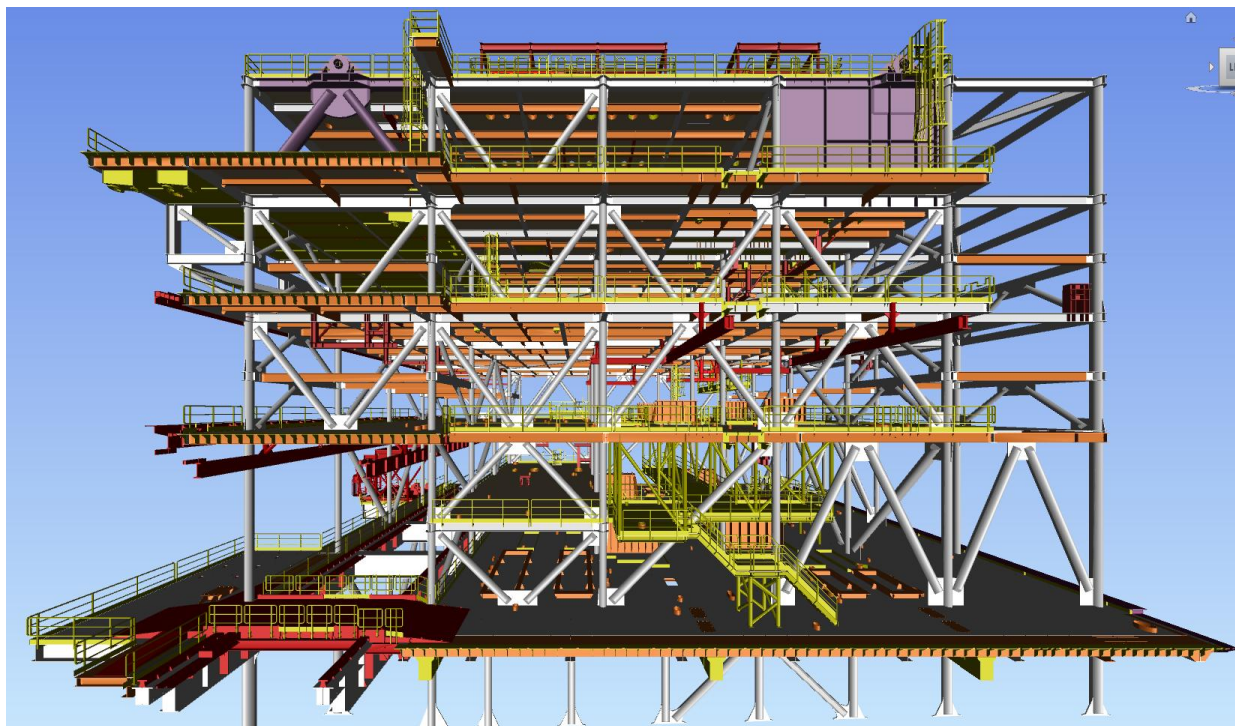


图2 通用型FPSO上部模块3D结构模型
Fig.2 3D structure model of topside on General FPSO

FPSO 上部模块结构建造施工流程

开工前准备

- ① 设计、技术方面，作为结构施工管理参与者，结构专业的技术规格书需要多次翻阅，从通读到精读，并作出一些适当、必要的总结和提炼，把关键的要求、容易忽略的非常规要求等重点标注，以方便日后随时查找。
详设图纸需要得到畅通的获取渠道，在图纸发布、升版的第一时间能够获取，并归类存档。加设方面，需要明确一般加设周期、加设最新状态、出图计划并随时可查，建立索引供随时查找。
3D模型，作为图纸外的辅助资料，帮助更形象的了解产品三维形态，需保持最新版可查，并且旧版存档，供比对。
TQ、TD、SI等，也同样需要建立发布通知、查询、存档、索引机制。
- ② 材料采购及库存
需要了解一般钢材采购周期，可用材料库存清单，对比材料采购计划、到货计划与生产计划。特殊材料、定制材料询价及采购周期。应尽早识别项目用料，核对用料清单并提前采购。
- ③ 建造
详细了解建造工厂的场地布置，场地使用计划，车间高度、宽度限制，起重设备、运输设备的能力情况，特殊设备的配备，大型工装库存情况。
起草制定程序文件及重要工序的建造工艺，并批准发布。

根据四级计划制定建造计划，以及相应的场地、人力计划，并确定图纸、材料、设备、人员资质、质量文件、安全许可等都已完备。组织完成开工前的场地联合检查，生产、安全、质量三方参与。

④ 质量

明确项目需遵循的各类标准、规范及版本。WPS审核发布，组织焊工考试、发证。

现场质量交底，明确要求，传到到生产一线。交底内容包括但不限于：装配要求，焊前检验要求，焊材检验、储存、领取、退库制度要求，外观检验要求，尤其是在项目对于表面处理有P3要求时，需要解释并明确要求内容，必要时可制作一个实物构件模型作为参照标准。

明确日常检验流程，RFI制度执行细则确定，ITP审核发布。明确已用材料追踪制度并要求文件随时可查，建立在册焊工名单等。

结构建造施工流程及重点关注

结构是基础专业，是整个上部模块的骨架与根基，也是其他专业的基础。并且FPSO海上作业环境恶劣，设计寿命25-35年不进坞。因此，结构的精确度、完整性、可靠性和耐久性的考虑是需要贯穿整个建造过程的。而除了通常大家都非常关注的焊接，尺寸、精度控制是值得全程重点关注的。

一、板拼梁（PG）预制：

根据甲板片建造计划合理安排预制顺序，在时间充裕的情况下，可以把不同模块的同规格PG梁安排在同一批次下料、预制。

在PG梁装配工作之前，应该对切割好的材料事先进行坡口准备和自由边倒角工作。

在没有专业PG梁装焊机的情况下，应使用专门的工装提高PG梁拼装焊接效率，自制埋弧焊机用焊接台架(倾斜22.5°)，以提高焊接便捷性和稳定性。多道焊应采用在腹板两侧交替焊接的方式减小热变形。

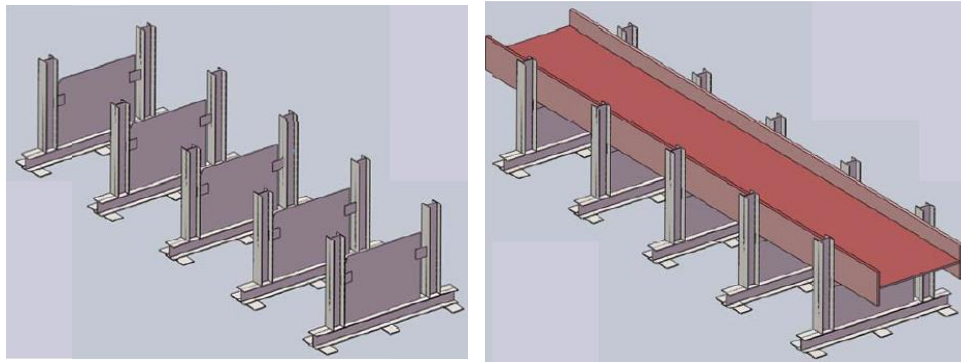


图3 PG梁组对工装
Fig.3 Foundation for PG fit up

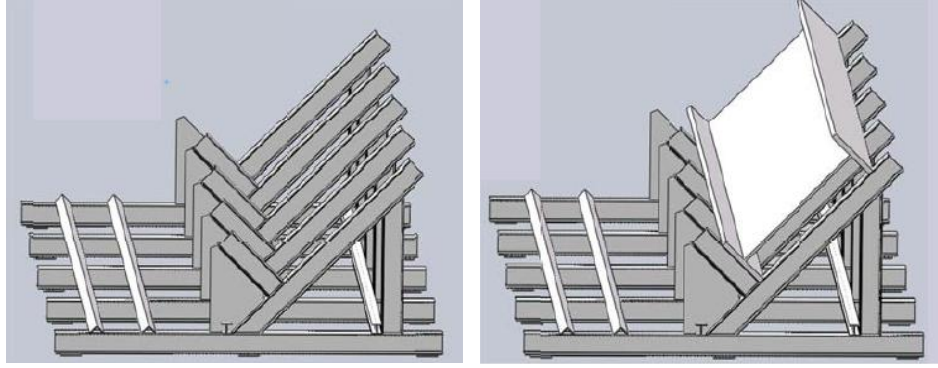


图4 PG梁焊接工装
Fig.4 Foundation for PG welding

1. 尺寸控制:

① 焊接收缩

通常以经验判断焊接收缩率（单位长度内焊接后收缩的长度/原始长度）

判断的参考要素主要有：板厚，焊接方式，破口形式，焊脚大小，焊后热处理/热矫正量等。可以把以往经验数据作为基础，第一批的前几个构件在各个环节进行测量，记录，得到修正后的数据推行实施。

② 热变形与矫正

PG梁的焊后变形是各个方向的，如：面板内收，整体旁弯，腹板倾斜于面板等。并且这些变形在相关规范、标准中都有公差范围的要求，如EEMUA_158,如下图：

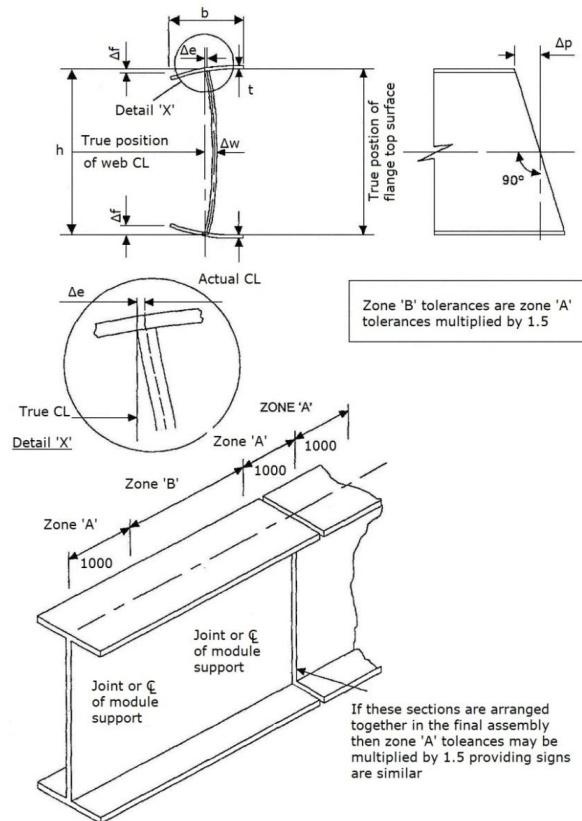


图5 PG梁截面公差
Fig.3 PG cross section tolerance

变形矫正有机器冷校和火工热校两种，两种方法可以组合使用以达到技术标准。

用面板矫平机进行冷校作业应注意滚轮本身的光洁度以及工件表面的清洁，不应有硬物杂质出现在辊压面以免压伤木材。矫平后应检查表面机械损伤，并修复。

火工矫正作业应遵循通用要求，不应温度过高以免造成钢材奥氏体晶粒粗大而引起韧性降低以及晶界局部氧化，钢材表面熔化等，也需要杜绝骤然冷却产生淬火效应使材料组织相变而变得硬脆。以上结果直接影响材料的机械性能，造成的后果无法预计。

③ 端部形式及余量

结合总体装配图及单件图确定PG梁端部形式：坡口、过焊孔、完工端（封焊）、余量长度及方向，PG梁上下面板标识确定等信息应在完工检验时予以检验确认。

2. 焊接

焊前应确定装配间隙，符合WPS并兼顾考虑收缩量。

焊材控制，完全符合焊材储存、领用、退库等程序。

焊前预热、定位焊、正式焊接参数等都应按焊接程序实施，QC巡检应随时抽查，严格控制热输入量。

腹板与面板的角接层多道焊应两面交替施焊，焊接过程中需反复翻转梁体。减小任意一面的垂直度变形。

端部为过焊孔的，需要在埋弧焊时预留一定长度，用手工焊接进行包角焊，保证手工焊最小焊接长度达标。

3. 安全

PG梁预制工序重点关注的安全隐患时吊装、构件翻身作业以及存放时防倾倒措施。

吊装作业：在遵循各类吊装安全规定的基础上，应格外注意检查吊索具的磨损，吊装时，钢丝绳夹角大小、重心判断，夹具的规范使用，起重操作、指挥人员资质时首要检查项。

防倾倒措施：PG梁在临时放置和存放待检时，多为腹板垂直于地面的立放状态，由此会造成重心较高，有倾倒、侧翻风险，可采取以下方法规避：

- a. 用脚手架管及扣件把相邻放置的多跟PG梁联结，形成整体防止倾倒。（适用于仅存放无作业情况）

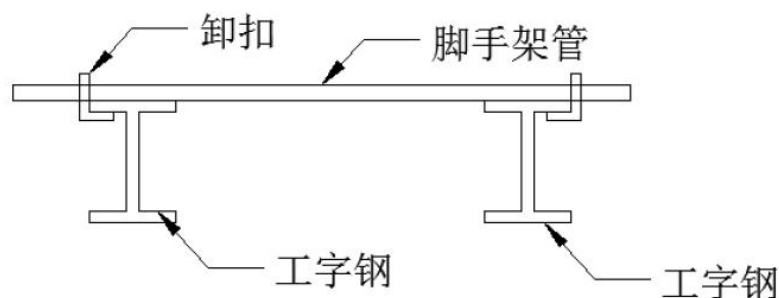




图5 PG梁防倾措施 a
Fig.5 PG overturn-preventing a

- b. 使用工装作为临时辅助支撑，可夹住腹板端部，工装支腿可增大支撑长度，从而增加翻转所需力矩，在没有发生严重碰撞情况下不会倾倒。（适用于存放并作业）



图6 PG梁防倾措施 b
Fig.6 PG overturn-preventing b

- c. 用旧型钢作“枕木”，PG梁放置其上，焊接“L”型码板压住面板翼缘，两侧对称安装至少两对。此方法可能会在翼缘板上造成电弧击伤和机械损伤，释放检验时应该注意。（适用于存放待检）



图7 PG梁防倾措施 c
Fig.7 PG overturn-preventing c

二、节点预制

节点结构应用于某些结构梁交叉位置连接各方向的主结构梁，上下用立柱连接两层甲板片，是受力集中的结构，有结构强度要求高，尺寸精度要求高，钢材等级高，结构布置密集的特点。

1. 生产计划：与PG梁预制一样，需要按照甲板片制作计划，安排节点预制顺序。
2. 所有节点按形式分类，区分出不同形式节点的细小差别，如：板厚，材质，是否“Z”向性能，焊接形式等。
3. 设计合适的装配辅助工装，制定合理装配顺序。保证全熔透焊缝的作业优先，以免无法施焊而增开过焊孔甚至拆除已焊接构件的情况。提前考虑近半与其他焊脚/余高干涉位置可否切角处理从而减少过焊孔。

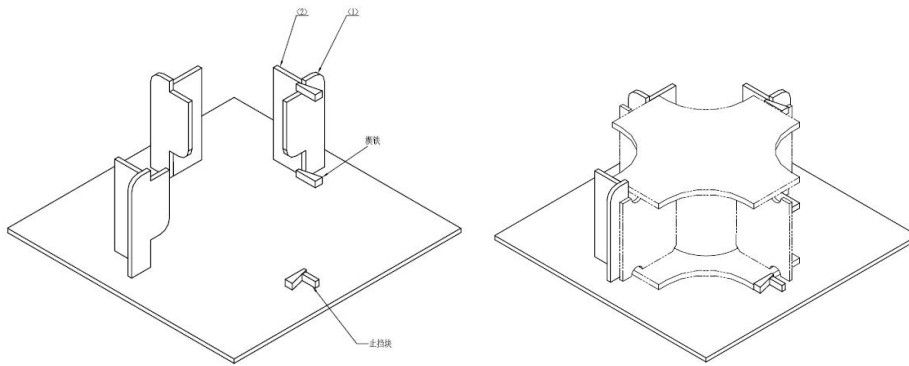


图8 节点预制装配辅助工装示意
Fig.8 tooling for node prefabrication

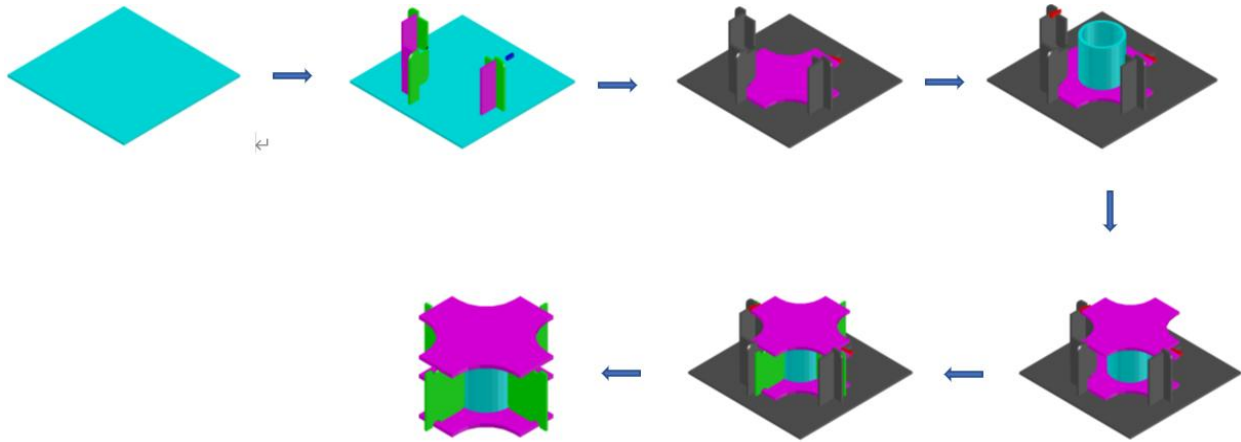


图9 节点预制装焊流程
Fig.9 node prefabrication sequence

4. 装配时考虑焊接收缩率，确定合适的装配间隙，以保证焊后高度尺寸符合公差要求。
5. 节点面板与结构梁相连接的边如有板厚差，通常大于4mm应按项目要求在厚度方向切割出一定比例的斜边过渡。应注意过渡面的装配方向，通常上面板的下表面和下面板的上表面为过渡面，保证外表面平齐。
6. 变形控制与矫正：焊接前安装必要的临时加强以抵抗焊接应力产生的变形，焊后火工矫正。
7. 检验：焊接前应检查构件的材料规格、等级，装配尺寸，定位焊成型，重点检查仅能从单面施焊的全熔透接头，并在打底焊接过程中监控焊材、焊工资质，参数等。
8. 缓存配送：完成检验后的节点可以考虑对与结构梁连接端进行保护、防锈措施的可行性，以提高后道工序的效率。按节点所属甲板片分垛缓存，并在配送时一次性供应完所有节点，以保证后续甲板片制作工序的连贯性。

三、甲板片预制

模块甲板片结构形式相对简单，总体技术难度不高。按宏观形态分为两类：底层片（Pancake）和上层片（Superstructure）。底层片为大截面的PG梁纵横交错拼接而成的框架结构，一般上表面满铺甲板板。上层结构为小截面PG梁或成品H型钢组成。技术重点和难点在于尺寸和变形控制。

底层甲板（Pancake）预制流程及要点：

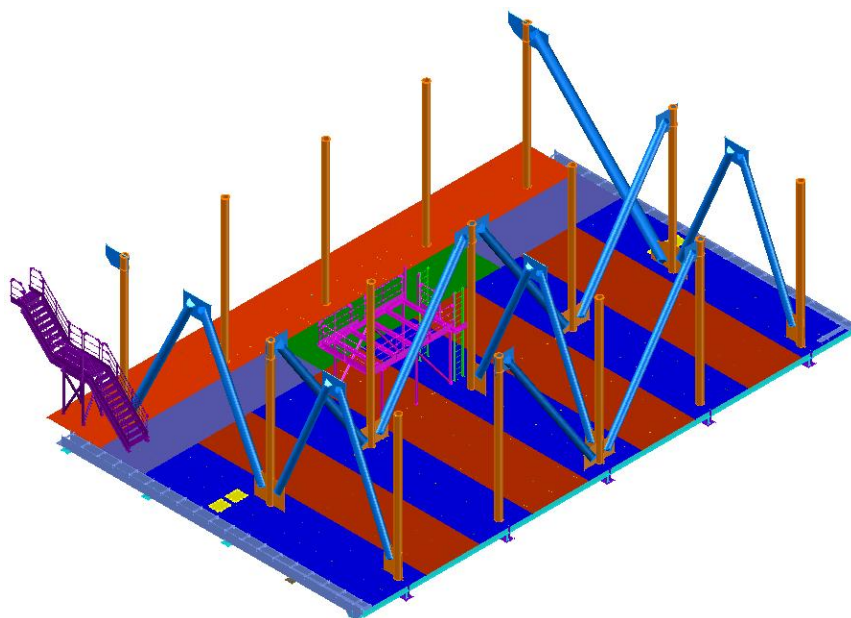


图10 底层甲板片结构形式
Fig.10 Pancake structure type

1. 摆放垫墩

① 垫墩高度考虑各专业下挂支架，支撑预装，使甲板片与地面留有足够的高度空间，同时也应兼顾结构预制过程中，作业方便，人员在大梁底部穿行便捷以及尽量减少作业时对辅助站立平台的依赖。如有条件也可以暂不考虑支架预装空间而在结构基本完成后进行顶升，使用更高垫墩二次落墩，为预装各专业支架创造空间。诸多因素需要在开工前考虑，以确定最理想的垫墩使用方案。

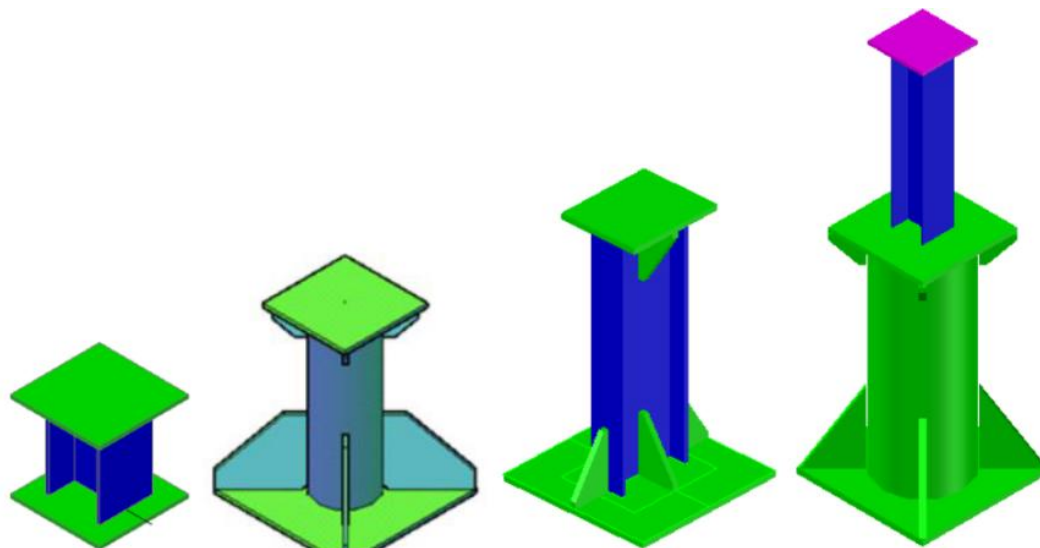


图10 参考垫墩形式
Fig.10 ref. stools type

② 垫墩水平：考虑将来焊接应力造成四角上翘，可以把垫墩水平度方程中间高，四周低的形式，相当于预放反变形量，预放量应参照以往经验充分论证，预放的高度差极限在于大梁

的挠度弹性极限。

2. 主梁安装，框架成型

① 区分框架纵横构件的连续与非连续方向，连续方向的结构主梁先上墩。（FPSO Topside为横向连续，即肋位上结构连续）如果有在加工设计中增加的对接缝，应先行接长形成整体。此阶段应格外注意防倾倒措施的使用和检查。

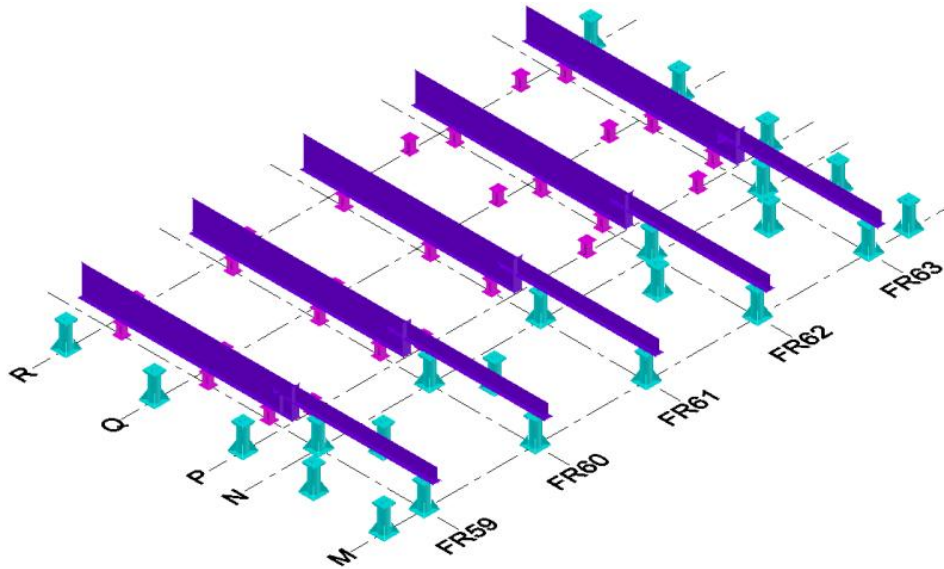


图11 横向主梁上墩

Fig.11 transvers main beams on stool

② 安装非连续方向（纵向）的主结构梁，吊装到位后，调整尺寸，在各十字交叉点调整装配间隙，按每个跨距间两个接头计算加放收缩量。

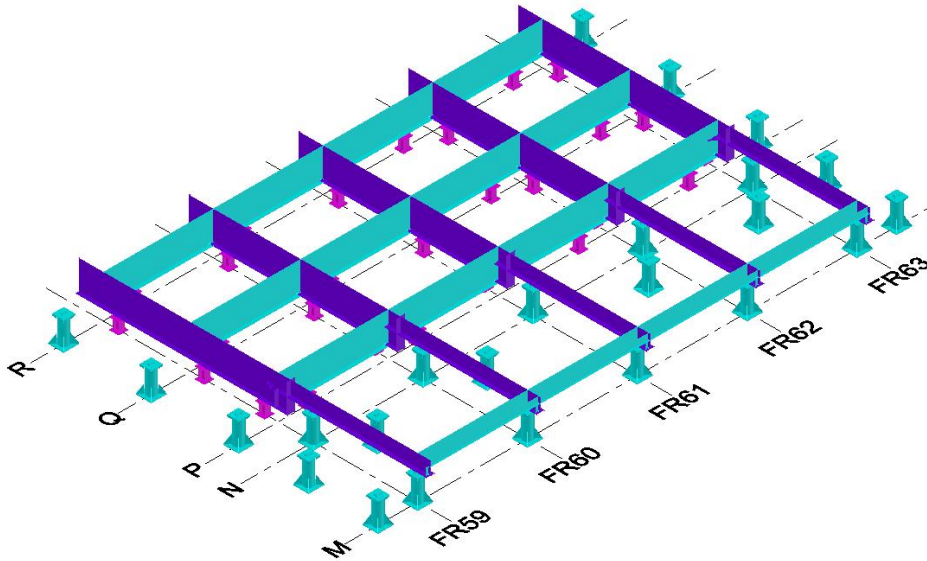


图12 纵向主梁上墩

Fig.12 longitudinal main beams on stool

③ 主结构框架装配完成，形成纵横框架结构，焊接开始前进行尺寸测量。校核外形尺寸，跨距，水平，对角线，直线度等。

④ 焊接：应注意焊接顺序，热输入量等影响整体尺寸及局部变形的因素。焊接顺序应遵循：先立焊后平焊，从中心向四周扩散的顺序。针对每个十字交叉点的四道立角焊，应采用对角同时焊接的方式。对于首制甲板片，可预留中间一道轴线不焊，相当于把一个甲板片的焊接工作从中间分为两个部分，分别按前述原则焊接。以防装配阶段凭经验加放的焊接收缩量误差过大，可以用中间一道缝调整整体尺寸。

3. 过程中尺寸监控

主梁焊接完成后，应测量跨距并对比焊前数据可以得出实际焊接收缩量，作为项目经验数据。同时测量四角水平数据，查看各坐墩点是否因焊接上翘趋势造成悬空，应及时调整垫块高度以使大梁受到足够支撑。无论是水平还是跨距尺寸，都应额外再考虑后期甲板板的焊接以及火工矫正造成的进一步收缩量和变形。

4. 二类结构

二类结构是以主结构为基础，为甲板片整体进行强度补充的与主结构形成纵横交错网格的构件，一般为小截面的型材。安装时应该注意以下：

① 横平竖直，保证跨距。

② 在二类梁两端先行各焊接一个“L”型码板，以便吊装时临时卡在主梁上。

③ 上表面安装高度不应高于主梁上表面。

④ 二类梁与主梁交叉点接头上端应适当切出斜角，作用时作为主结构梁与上部甲板板焊接角焊缝的过焊孔，以保证主结构焊缝连续性，同时避免增开过焊孔。（加工设计已经开设过焊孔的除外）

⑤ 二类梁焊接原则与主梁大同小异，但另需考虑在主梁两侧非对称安装的，或仅在主梁一侧有二类梁的情况下其焊接对于主梁直线度的影响，提前做一些临时辅助加强。

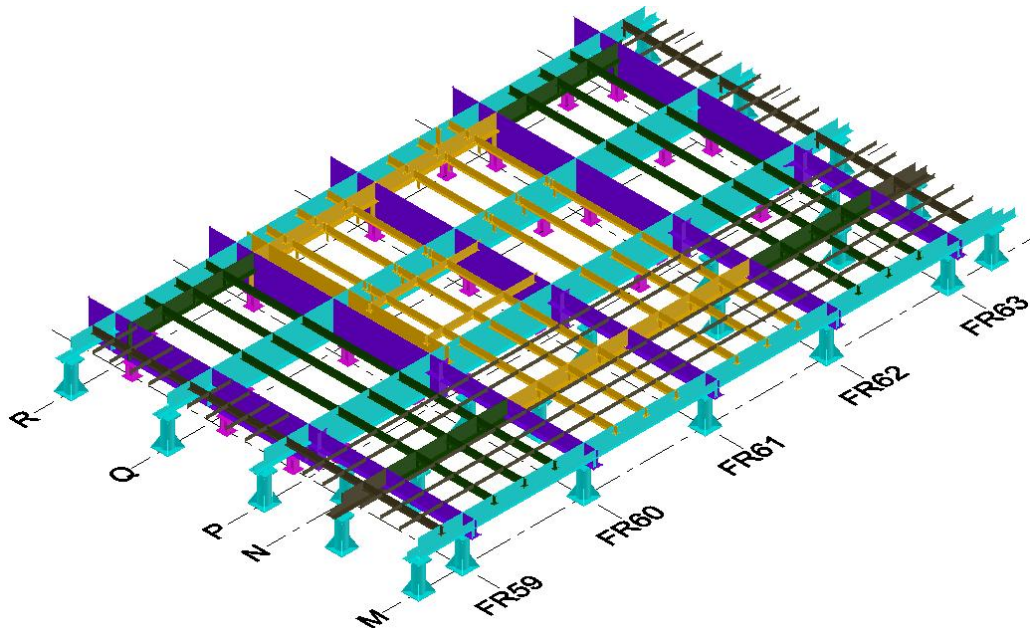


图13 二类梁安装

Fig.13 secondary beam installation

5. 甲板板安装

① 甲板板可以在地面预拼板，形成几张较大的板片，拼缝可以用埋弧焊正反面焊接，一面焊接结束后需翻板。拼板完成后进行外观，NDT检验。注意可以不必对甲板平整度做最终检验要求，但须对局部焊缝处的硬点变形，角变形进行校正，平缓的大波浪变形可以在甲板安装的装配过程中处理。

② 安装甲板应从两侧定位，保证两侧的定位尺寸，即外形尺寸，余量放中间。先把两侧甲板与结构焊接完成再安装中间的板片。焊接甲板前，应注意再模块四周上表面放适当重量的配重压块以抵消部分焊接甲板产生的上翘趋势的应力。焊接顺序应先焊拼板缝后焊结构缝。板缝尽量多使用埋弧焊以提高成形与合格率。

③ 甲板整体焊接完成两天后撤除所有配重压块，自由状态下测量整个甲板结构尺寸。跨距，水平，外形尺寸，应结合后续需要进行的甲板背烧，平整度火工矫正工作将要造成的收缩量综合考虑和判断，并为后续火工提供数据参考。

④ 甲板火工校平：严格按火焰校正程序操作。可以先整体背烧释放部分焊接应力，然后检查各处局部平整度，超差的位置再专门进行火工校正操作。根据需要在过程中局部增加配重。

⑤ 甲板片焊接、校平作业全部结束后，再次进行整体尺寸测量、检验。水平、外形尺寸、对角线等尺寸如有超公差范围的，可以通过对甲板面、主梁等位置再次局部火工进行调整。

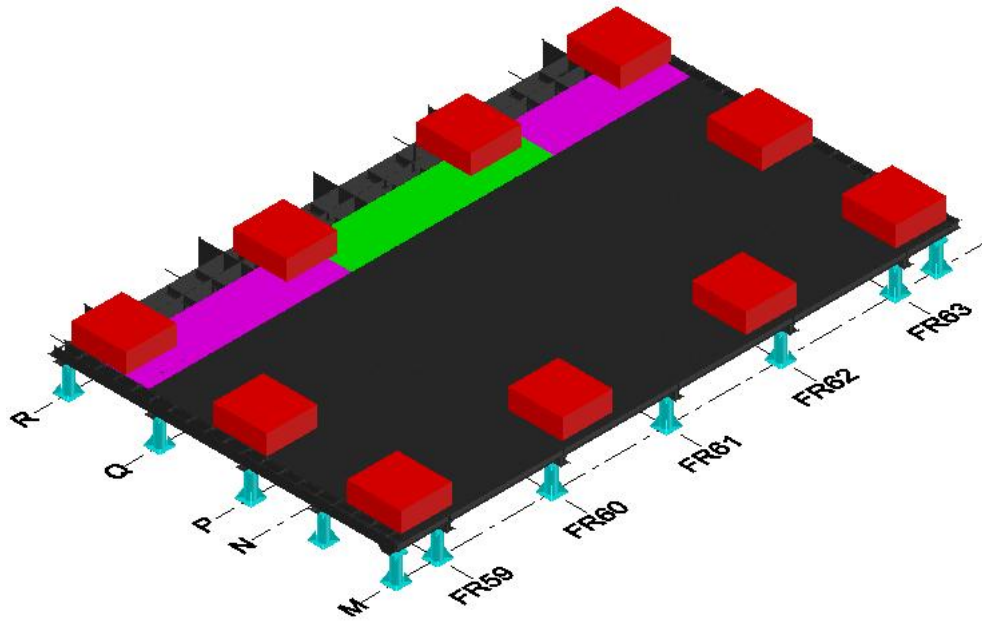


图14 甲板板安装

Fig.14 deck plate installation

6. 层间立柱及斜撑（斜拉筋）安装

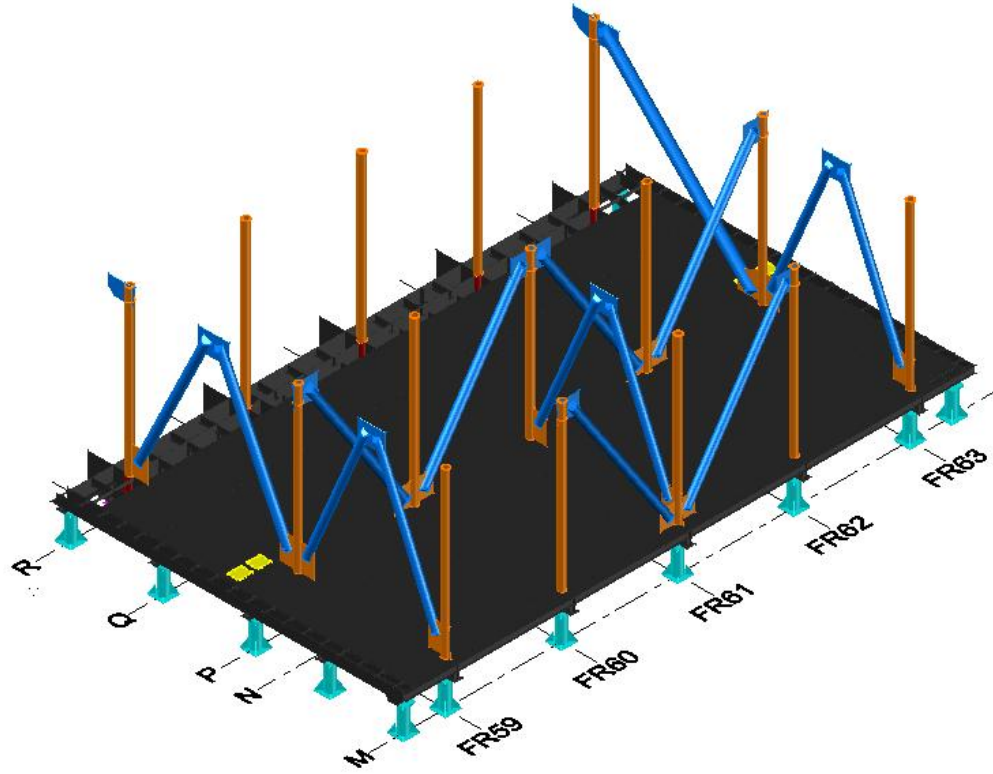


图15 立柱、斜撑安装

Fig.14 column & brace installation

在甲板上表面安装立柱及斜拉筋需要注意：

- ① 所有立柱都应注意垂直度要求，与甲板面直接焊接的立柱应注意与甲板反面结构的连续性，上下对齐，避免错位。
- ② 通过连接插板与甲板连接的立柱与斜拉筋，连接插板的焊接及NDT须在安装立柱等构件前检验合格，插板焊后垂直度满足公差要求。
- ③ 立柱焊接为单面焊，焊前应格外注意坡口角度，间隙等完全满足WPS要求，以提高焊接质量，降低返修率。
- ④ 斜拉筋在甲板片预制阶段不能最终焊接，仅定位焊或使用“L”型码板固定，留到总装阶段与上层甲板片合拢后，调整角度，定位尺寸。此阶段应安装牢固的临时支撑以防倾倒。



图16 斜拉筋临时安装及支撑

Fig.16 temporary installation and support for brace

⑤ 立柱上端连接插板应该原为安装，仅定位焊。与斜拉筋一样保证定位焊牢固并用码排与斜拉筋，直立柱的插槽连接，而连接板两侧的半圆或1/4圆立柱管则不能预装，可以作为合拢构件在总装合拢期单独配送。

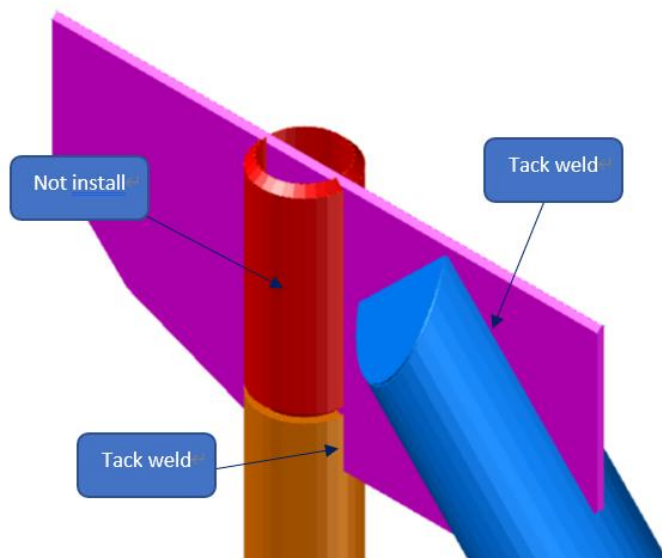


图17 上部插板临时安装

Fig.17 top gusset plate temporary installation

⑥ 立柱、斜撑管吊装及临时固定过程中安全管理：立柱、斜撑等管状构件要吊装到竖向或斜向状态，在保证安全前提下，尽量不使用临时吊耳，并且还需考虑吊装到位后摘钩迅速方便。可以使用吊带捆扎的方式进行固定，使用专业捆绑方式使管件在起吊状态形成所需要的角度，吊运过程中使用揽风绳（溜绳）并且在吊钩卸载后也能迅速松绑。吊装完成后需要用临时工装或焊接支撑立即进行固定，防止倾倒。

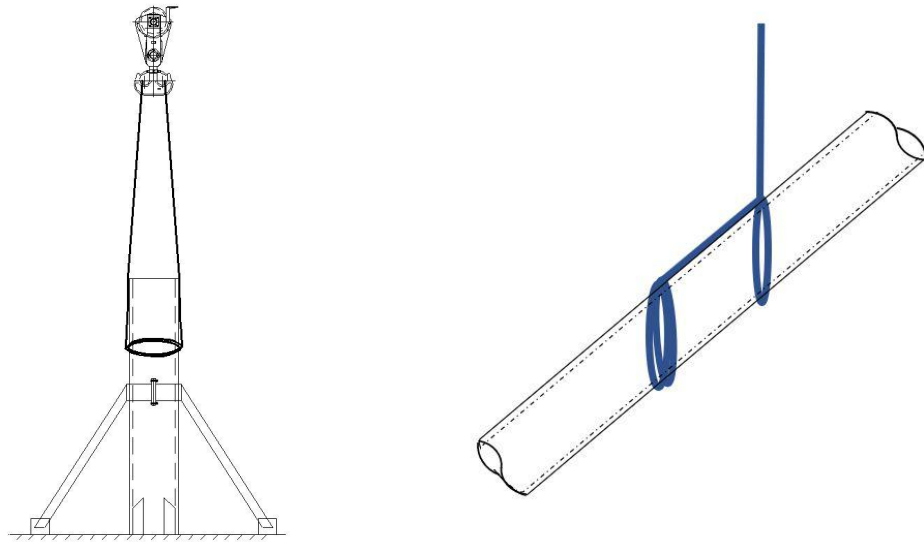


图18 立柱及斜撑绑扎、吊装
Fig.18 colligation & lifting of column & brace

7. 设备底座及附件

① 甲板片预制阶段，设备底座同时预制，但安装工作仅考虑定位，而不焊接。在后期模块总装时整层甲板片的合拢焊接工作结束再对设备底座进行最终定位，尺寸检验和焊接。

② 各专业的附件安装，原则上是应装尽装，能装尽装，需要考虑的影响因素有：

- 最终尺寸如水平、标高、位置度有严格要求的构件，比如轨道梁，可以进安装连接件，而梁主体不装。
- 运输设备（SPMT），吊装干涉及超高超宽等因素影响的，暂不能在此阶段安装。
- 后期设备安装，滑移路线上有干涉的构件，也应考虑在暂不安装的行列中。

8. 甲板片整体释放涂装前的结构终检

此环节是甲板片预制阶段结构的最终接收检验，原则上应该对整个甲板片所有结构再进行一次彻底的检查，力求查漏补缺。因此，本环节重点在于完整性，检查所有应装及已装构件，形成已装构件清单和待安装构件清单并注明未装原因，以供下道安装工序参考。排查所有检验工作已执行并接受，检验报告齐全。最后对外观明显缺陷及多余未去除的临时构件、自由边倒圆角R2mm遗漏处进行排查和整改。

上层甲板片预制：

上层甲板片与底层甲板片预制相比需要另外注意的地方如下：

- 主体结构主要由成品型钢构成，型钢端部切割下料、过焊孔、坡口，过渡斜面等都应提前做好加工设计。另外，一根H型钢由八条自由边需要倒圆角R2mm，使用手动角磨机操作工作量将特别巨大，可以考虑使用气动倒角机在型钢下料阶段倒圆角。



图19 气动倒角机

Fig.19 pneumatic chamfering machine

2. 主结构纵横交叉点由节点构件联结，可以在一个方向上把中间节点两侧的主梁进行接长，形成一根长梁，然后仍然按底层片的装配顺序，以先主后次的顺序进行装焊作业。主结构焊接结束并进行尺寸测量后再对二类结构进行焊接。特别注意，上层甲板片所用结构梁相比底层甲板片属于“小截面”H型钢，整体刚性不如底层片，更容易产生整体变形，因此上层甲板片可以在焊主梁前先安装一部分二类梁，为结构整体提供刚性。并且整体水平，方正度等尺寸数据应该在焊接过程中全程跟踪测量。
3. 重要设备底座区域的结构件应考虑在预制最后阶段进行焊接，以免焊接其他结构对设备底座区域的尺寸造成影响。
4. 对于任何一根梁两侧与之焊接但非对称布置的构件，应注意非对称焊接产生的拉应力将会使梁的直线度产生变化。在上层甲板片预制中这种情况将会比底层甲板片更多，也更严重。应在焊接前识别，并预先采取控制措施，如：反变形量，反面临时加强等。

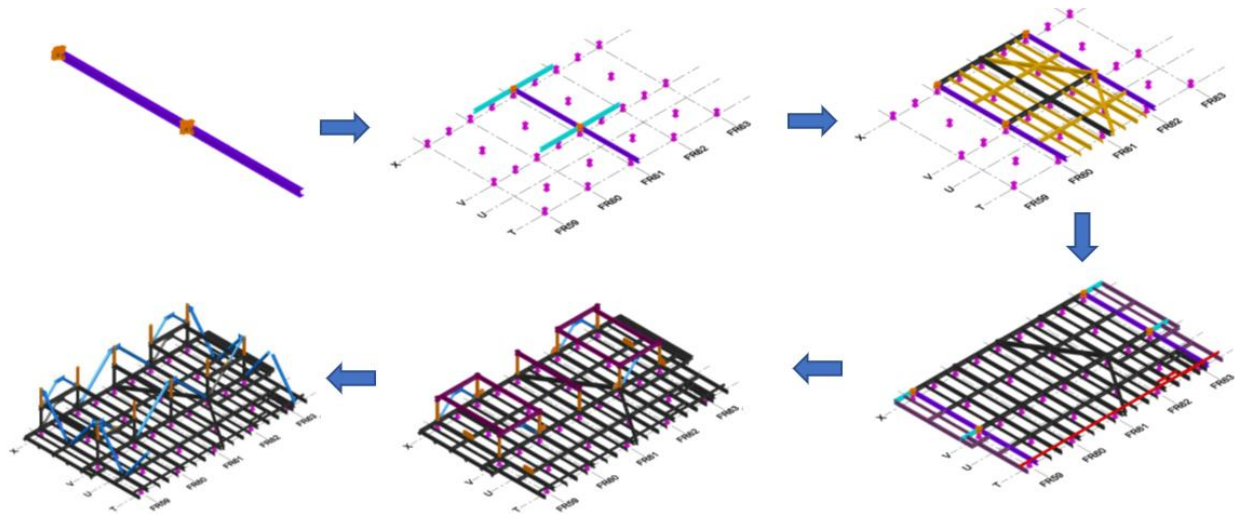


图20 上层甲板片预制流程

Fig.20 superstructure deck prefab. workflow

四、总装、搭载、合拢

甲板片预制结束，涂装完成后，进入到总装环节。也称搭载、合拢，本阶段主要的结构工作是吊装及合拢口的装配焊接，大型设备底座的最终定位、焊接，各类附件的安装。总装

阶段初期要尽快推动结构焊接完成交付其他专业或后道工序。后期附件安装，一切围绕舾装完整性推动。本环节涉及大量的立体交叉作业，多专业配合施工，需要综合考虑施工过程中的污染保护，破坏保护，人员安全隔离工作，并统筹制定科学的施工顺序，尽量避免由于不合理施工顺序导致的返工。

1. 甲板片平面合拢

在甲板片加工设计阶段由于考虑到单层甲板片整体外形尺寸对于工厂施工条件或生产设备来说可能超大，超出工厂硬件的建造能力，如车间大门尺寸限制，运输路线上的道路宽度，起重设备的限制等，会把一根甲板片划分为两个或多个小片。因此在总装阶段，就增加了平面合拢的环节。

① 底层片合拢前，应按布墩图布置好所有垫墩，垫墩形式及受力需要经过计算并审核通过。垫墩上表面水平度检查，并准备好各种厚度的调整垫板。

② 通过自走式模块化运输车（self-propelled modular transporter--SPMT）把其中一个甲板片放置到位，通过预设的基准点检查位置是否正确，通过不同厚度的垫板塞在垫墩与甲板片底面之间调整水平度。测量合拢口的尺寸，勘划余量线并切除余量，另一侧甲板片也通过SPMT运输向已定位的一侧靠拢，微调位置，到位后落墩卸载用千斤顶调整水平。

③ 用码板固定连接合拢口主次构件，调整直线度、错位，修割打磨坡口，进行常规合拢装配焊接作业。

④ 同时上层甲板片也可按顺序再总装区底层片附近摆放钢墩进行平面合拢作业。上层片应格外注意转运顶升等作业过程中，对整体甲板片变形造成的影响，务必保证受力分布均匀，垫墩摆放数量足够。平面合拢结构作业同时，各专业支架等附件也可以安排安装。

2. 模块搭载（垂直合拢）

① 吊装前准备

起吊前需要达到如下状态并准备：上层甲板片地面合拢工作结束，合拢口焊接NDT检验合格；确认下层大型设备已安装就位；上层片四角处下表面焊接导向限位码排(图21)，保证吊装时能顺利就位；下层片立柱伤口高度符合并修割余量，准备坡口，上下层之间以插板形式连接的位置，也应符合连接处的高度值，处理坡口。由于插板与斜拉筋在预制阶段是原位点焊状态，上层片吊装后需对原位点焊的构件进行二次定位，为避免上层甲板片吊装就位后受力不均致使某些支撑点位受力过大造成构件变形或定位焊开裂失效，应在连接插板旁安装支撑工装（图22），高度与连接板一致。

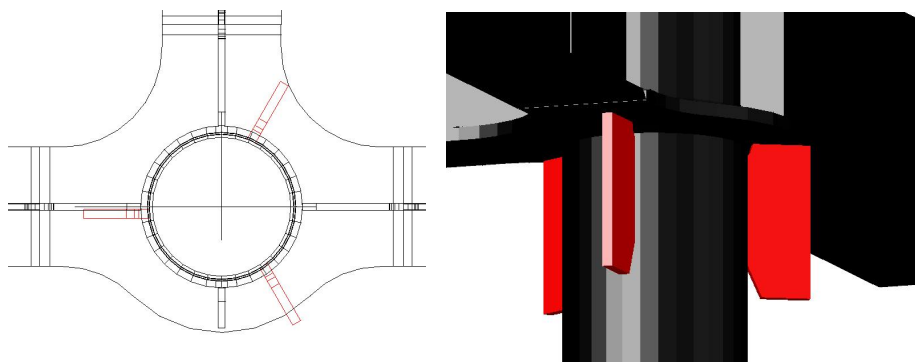


图21 甲板片垂直合拢用导向限位码排示意

Fig.21 guide & stopper for erection

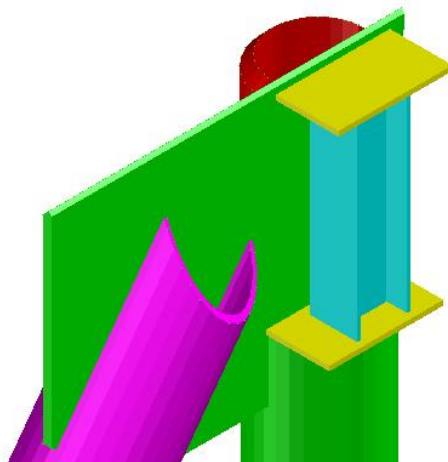


图22 甲板片垂直合拢用支撑工装

Fig.22 support tooling for erection

② 吊装合拢

根据吊装方案，采用一台或多台吊机平吊上层甲板片就位。就位后尺寸测量工作立即同步进行，确保位置度无差，并进行多处定位焊固定后方可摘钩卸载。

③ 焊接

焊接顺序：先焊无连接板的平口立柱，后焊连接插板并NDT合格后，可安装连接板两侧的半圆立柱管，先安装无加强支撑工装的一侧，再拆除另一侧工装，安装半圆管。（注意安装立柱管应仔细复核壁厚，以防错装，装配时检查上下错位量，保证在公差范围内。）同样，合拢口所有构件的焊接工作都应以模块中心为基准对称施焊。

模块总装合拢口是关键焊缝，焊接质量应格外注意，特别是立柱和斜拉筋，只能单面施焊，难度更大，缺陷返修也更难。尤其是打底焊尽量杜绝缺陷，否则返修将会造成“刨穿”或者“焊穿”。焊前准备应注意破口角度，装配间隙，预热要求，严格检查焊工资质，焊接过程中防风，热输入监控等工作必须全程由专职人员跟踪。TKY节点应严格按AWS D1.1相关要求操作、检验。

④ 尺寸控制及设备基座

焊接过程中，全程进行尺寸跟踪测量，包括层高，标高，水平，位置度，立柱垂直等，焊接结束进行最终尺寸检查交验，辅以必要的火工校正工作。

上层甲板上的设备基座安装定位工作可以在焊接立柱过程中同步进行，但其焊前尺寸检验和认可环节必须要放在直立柱以及大部分斜拉筋焊接结束后，这样才能保证测量后的数据不会因为大合拢焊接产生变化。同理，基座焊后尺寸检验也应于所在甲板片合拢焊后尺寸检验之后进行。

整个模块上的单轨梁，双轨梁等，在尺寸控制方面的考虑与设备基座也是大同小异。关键思路都是以最终状态下尺寸合格为导向，时刻考虑其所在甲板片及整体模块的尺寸变化对其产生的影响。因此大体方针均是：在甲板片预制阶段，轨道梁支撑等附件可以先行安装焊接，但最终需预留可调整尺寸的接头带整个模块尺寸稳定后安装。测量、焊接、尺寸控制公差应参考设备供应商的指导方针，充分根据设备使用，小车行走状态等来确定，对关键部位严格要求精

度。

五、附件（舾装件）预制安装

在满足规范和按图施工的基础上，附件的预制和安装过程要本着安全、实用为第一原则。在设计考虑不周全或者现场出现疑难点的时候，在保证以上原则的前提下，可以做一些灵活的修改。为巴西国油服役的FPSO应特别注意满足NR12对各类通道上附件的要求。

1. 栏杆

栏杆预制是应重点满足高度、各横档间距要求，高度方向的尺寸在规范、标准中多有硬性规定，需要完全满足要求。特别应注意考虑安装焊接面与站立面的高度差需要补偿，如栏杆焊接在结构梁上表面，而栏杆旁的站立面有格栅、防火涂料层，从而使栏杆的实际使用高度小于预制高度。栏杆预制过程中焊接接头需按要求准备坡口，保证焊透，否则由于外表焊缝余高需要打磨得很平滑保证手感而导致焊接强度不足造成使用寿命降低。预制过程中的变形应在焊后调整，横平竖直。热浸镀锌前开设流锌孔，孔位布置应科学合理，在设计层面应确定开设和封堵方案，并与镀锌工厂确认。考虑涂装便捷及降低尤其破损率，栏杆应单独涂装，在总装阶段安装，而栏杆下的加强筋板或侧装栏杆的连接板应在甲板预制阶段装焊，同时涂装。

栏杆安装应注意：

① 提前规划总装施工阶段的临时通道，通道布置位置需要安装栏杆的，应预留出通道位置，栏杆暂不安装。

② 固定式栏杆、可拆卸栏杆，顶装、侧装等形式应区分开以避免错用，错装。

③ 两片相邻栏杆立柱间距最大值（防坠目的）以及栏杆顶部横杆（手扶位置）与外侧任何构件之间的最小距离（防夹手目的）的要求必须特别关注并专门检查。

④ 栏杆安装时出现设计未考虑到的干涉或由于其他构件，如管支架，电仪支架、等未严格按设计尺寸布置安装造成的干涉时，可以对栏杆作灵活修改，修改原则是保证满足规范，安全要求，以兼顾美观。

2. 梯道（直梯，斜梯）

直梯预制安装时，需要注意的地方有：

① 各横档之间的距离严格按图施工（一般为250mm-300mm）。

② 连接板（梯腿）的位置尺寸应测量准确，避免安装不上。

③ 区分可拆卸和非可拆卸直梯，可拆卸直接的螺栓孔开设位置需测量准确，有必要的话，预制阶段不开孔，安装现场配钻。

④ 带护笼的直梯，护笼形式，大小尺寸，和安装位置应注意，特别是护笼下缘距离底面的距离应复核。

⑤ 模块总装阶段，直梯安装应尽早，特别是长直梯，避免后期因各类结构太密集导致装不进去需要切断直梯的情况发生。

斜梯预制安装时应注意：

① 预制时，斜梯的倾斜角度应准确测量，以及复核在使用状态下，踏步是否水平。

② 踏步板的有效踩踏长度要求必须满足。

③ 踏步板的上表面防滑形式，应满足技术要求，以及确认是否有边缘防滑条的要求。

3. 格栅安装

格栅安装一般在总装后期开始，理想状态应该是所有安装面油漆及防火图层（PFP）完工检验结束，并且各类支架安装基本完成。而实际操作中，往往模块整体完工前会做一次油漆翻新，需要掀起已安装的格栅，再复原，并且在格栅安装时会出现大量的与支架干涉的情况，因此格栅的施工过程中，会出现大量的现场修改及返工，造成施工周期拉长。所以，在上表面PFP工作基本完工后就可以考虑开始格栅安装了。思路就是具备条件尽快铺装，尽早发现干涉修改的问题，尽早修改，并作好需要二次安装的心理准备。

格栅安装应注意考虑以下几方面：

① 安装前应先考虑好结构梁上表面由于PFP厚度造成的不平如何补偿，应先行制定补偿方案并施工。

② 安全管理，格栅安装是高危险系数的施工。必须提前做好工作风险分析（JSA），施工前人员安全教育，重点在防止人员坠落，物体坠落打击等隐患，作业区隔离和进入人员的安全保障措施必须专门检查。



图23 格栅施工区域硬隔离

Fig.22 barricaded area for grating work

③ 安装人员对施工流程、技术要求应提前熟悉，每组两人，新手需要有经验的工人与之搭档并且做好技术交底。

④ 安装时注意格栅受力方向需与格栅设计支撑方向一致，下方支撑梁之间最大间距要求，格栅开孔边缘的支撑、补强等要求，预铺设后对格栅最终就位时，应及时发现不满足要求的，按标准增加必要的承托梁。

⑤ 格栅预铺设完成一片区域后应及时用可靠的绑扎方式进行固定，并提交安全检查方可解除此区域的隔离，交付使用。

⑥ 最终就位调整作业过程中，会发现大量需要修改的格栅，尽量在施工过程中把必要的修改工作一次做完善。修改工作主要针对以下几个方面：

a. 缺少必要支撑。

b. 格栅间隙活格栅边缘与其他构件间隙超标，需把格栅移位调整或外形尺寸延伸。

c. 格栅与其他结构干涉，需修剪格栅并封边。

d. 现场新开贯穿孔或填补多余贯穿孔，同时应兼顾开孔一周的围板。

在格栅调整就位时，除了满足各种强制要求外，还需兼顾各方向上格栅边缘横平竖直，接缝相对等影响美观的因素。

⑦ 完成调整就位后用设计选用的方法进行最终固定，不论是蘑菇钉还是卡子固定的型式，都要保证固定点位的数量和牢固程度。

六、集成用散件

上部模块的陆地建造仅是FPSO整体建造的一个环节，完成陆地建造的模块还需要在FPSO船体上进行集成。把多个模块之间以及与船体之间连接整合在一起，并进行后续的功能调试工作。把整个FPSO打成一个具有完整功能的综合性海上生产储卸油工厂。

上部模块在FPSO上进行集成时会涉及许多模块之间连接的构件，以及在模块周边影响吊装的构件，这些构件在模块预制阶段不能安装，需要预制好活以原材料散件的形式交付给集成环节。

项目建造师及设计工程师应与集成作业团队协作提前识别出这些散件，并形成清单，最终体现在加工设计图中，避免遗漏或多装造成吊装前还需临时拆除的多余工作。

针对需要预制的散件，应充分考虑集成安装时所需的余量，留足调整空间。

散件的打包固定与交接：

所有需要移交的散件应检验合格并现场固定打包。原则上应就近放置，特别是大型构件，人力无法移动的更应就近放置，减少集成阶段的转运工作。所有固定都必须保证牢固安全。完成固定打包后，应按清单逐项核对检查，做好标识，拍照留底方便交接。对于无法在模块上就近放置的小件，如螺栓垫片等紧固件，应装箱交付。

结语

作为开发海洋石油的关键设备，FPSO的建造难度和施工要求都是高于一般重工装备的。其在设计、建造与安装技术上也能一定程度反映出一个国家的工业水平，也能相当程度的体现一个国家的海洋工程综合实力。我国FPSO产业起步较晚，需要承认与先进国家之间的差距，特别是在EPC总包管理方面的经验。但随着造船与海洋装备制造业的突飞猛进，我国已成为全球高端海上装备的重要制造基地，拥有多个全球知名的能承接FPSO上层模块及全船建造实力的工厂，也为业内同行提供了大量就业机会。

笔者从业期间在华北两大著名海工制造工厂参与了FPSO上层模块的建造工作，从这他们专业的施工、质量管理团队中优秀的同行身上学习到大量宝贵的经验，谨以本文作为记录和总结，文中也引用了部分工厂编制的技术文件中的插图，特此说明。如前言所述，本文旨在供本人后续工作中参考，如能有幸为业内同行提供一些帮助，幸甚至哉。但由于经验浅薄及专业的限制，文中难免有不足或错误，望读者不吝指正。