

深水半潜式生产平台建造精度控制方法研究与应用

于宝清 吴蓓

(湛江中海石油检测工程有限公司 广东 湛江 524000)

摘要: 半潜式平台建造早期根据精度控制要求制定整体的精度控制方案,重点对上部组块 4 根主立柱精度、浮体下部环段精度、浮体分段搭载精度、立柱顶部分段合拢精度、立柱顶部 POST 点精度持续监控等精度控制重要内容进行细化研究,既满足精度控制要求又满足结构焊接要求,形成了一整套适用于半潜式生产平台建造精度控制的技术方案,有力的保证了深水半潜式生产平台建造精度满足设计要求。

关键词: 桁架式结构;精度控制;总装搭载;收缩量;补偿量;焊接顺序;焊接变形;温度影响

1 精度控制背景

陵水 17-2 深水半潜储油平台是不同于传统的板壳式箱型上船体结构,例如“海洋石油 981”深水半潜式钻井平台基本结构包括两个浮箱、四个垂直立柱,四个立柱共同支撑箱型上船体,立柱之间采用水平撑杆连接。平台建造过程中分、总段精度的确定按照传统船体建造质量标准,由 48 个分段 12 个总段构成,分段余量加放 20 ~ 50mm 不等,箱型上船体是整个平台的操作和控制心脏,不仅要容纳上平台上诸多的大型设备、控制系统和工艺管线,还要承担近 20000T 的上部结构和设备重量,极易造成平台甲板下凹,而陵水半潜式平台的桁架式上部组块相比之下重量更轻,组块结构余量加放少,搭载过程中大量减少了动火切割余量作业。同时,上部组块与下船体合拢时捕捉范围不超过 250mm,这对组块立柱的建造精度提出了很严格的要求,传统的导管架加组块的模式,组块立柱的对角线跨距要求在 $\pm 19\text{mm}$,而陵水平台的组块跨距要求 $\pm 13\text{mm}$ 。

陵水 17-2 深水半潜式生产平台项目由下船体(hull)和上部组块(topside)组成,其中下船体尺寸 $91.5\text{m} \times 91.5\text{m} \times 59\text{m}$,干重 33498t,设计作业水深 1422m,使用寿命 30 年,30 年不进坞。上部组块总重 14546t,外形尺寸 $91.5\text{m} \times 65.3\text{m} \times 11.5\text{m}$,该组块有 22 根立柱,2 根吊机立柱,甲板结构为梁板柱和斜撑构成的空间桁架式结构。其中下船体精度控制尺寸标准较 IACS 船舶建造及修理质量标准更严格苛刻。

更为关键的是,为满足大合拢的精度要求,上部组块与浮体大合拢的精度捕捉范围只允许 250mm,详细设计要求上部组块与船体对接主立柱之间水平距离允许公差为 $\pm 10\text{mm}$,主立柱间对角线距离允许公差为 $\pm 13\text{mm}$ 。下船体各立柱主 post 工作点水平距离和对角线距离允许公差 $\pm 13\text{mm}$,考虑营运时的最坏情况,组块主立柱与船体导向椎体在船体上的最大不对中为 $97.5+13/2+10/2=109\text{mm}$,导向椎体和立柱导向滑块间距 3mm; topside 与 hull 大合拢后对接后立柱错皮量不超过 6mm。综上所述,半潜式生产平台建造精度难度非常大,需要从建造之初即制定一整套精度控制方案,并在建造过程中严格执行。对出现的精度问题,及时进行调整,确保整体精度满足要求。

2 精度控制方法研究

2.1 项目精度策划与控制方案

2.1.1 船体基准线布置方案

基准线又称对合线,是用于校核小组、中组、大组、总组、搭载各阶段装配定位的精控辅助线。按先行、后行应用阶段可分为两大类:部件装配对合线、分段总组及合拢搭载对合线。该基准线贯穿于整个项目,建立成网络所以也称作基准网络线。基准线作用为船体制造各阶段提供装配和定位的基准。陵水 17-2 船体项目建立以“回字形”船体中心,浮筒节点区域以典型肋位,高度 4500mm 为准,立柱分段各层以高度 14600mm、23600mm、33000mm、42000mm、53200mm 建立网络状基准线。采用基准线来用于控制搭载定位分段精度。在分段施工时完成对合线的设置,不但能确保分段结构装配的良好品质,更能有效减少船体建造的返工率。钢板切割阶段使用等离子切割机喷粉或手工划出 100MK 板边基准线,拼板阶段以此为基准。拼板完工后先进行基准线的划线,然后利用勾股定理做出长宽方向的辅助基准线,确认尺寸便能精确得出拼板的扭曲程度,进而完成切割后者长肉等修复工作。同时,在此阶段确认各类船体中心线,100mm 检查线及正反划线;重要结构、设备及底座等安装线,结构 100mm 检查线;合拢口 100mm 检查线;余量切割线,所有划线误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内,检验合格后进行样冲和贴胶带保护,并且出具精度报告。通过上述工作,切实避免累计误差的出现,为大合拢提供必要条件,保障船体建造的精度。

2.1.2 精控测量硬软件及船体坐标系建立

工欲善其事必先利其器,全站仪是一种集角度测量(水平角、垂直角)与距离测量(斜距、平距、高差)为一体的测量仪器,其特点是测量范围大,智能程度高,可在复杂现场施工环境中自由选择设站位置,进行坐标采集工作,目前全站仪已广泛应用于船舶与海洋工程建造的精度测量工作中,陵水半潜平台项目精控测量工作主要由海油工程海洋技术服务分公司负责,拥有多台国际品牌的全站仪、水准仪、GPS 等先进的测绘设备,测绘设备的精度处于国内领先水平。拥有 4 套 DACS 尺寸与精度控制系列软件,专业测量软件配合全站仪,在现场只需按照工艺要求采集精度测量数据,

其余操作都在软件上完成,数据采集回来后,可以将数据导入计算机进行分段模拟搭载、检查分段 CUT/WELD 值,严格控制各分段的精度,与设计数据进行准确直观的对比,并按要求输出报表提供给施工方现场修正不合格结构。使用模拟搭载系统对采集到的各分段焊后数据进行模拟搭载,生成模拟搭载残差图计算余量并事先切割,确保能够一次定位,避免吊装时间过长以及避免二次定位,降低吊装成本。

2.1.3 焊接及变形控制

中小组立阶段使用磁力压码,避免使用焊码,装配间隙要求 $\leq 2\text{mm}$ 。焊接前对焊工进行培训,允许达到项目要求的焊工上岗,不随意更换焊接人员,随身携带焊脚卡尺测量焊脚大小,合理调节焊接工艺参数,严格按照焊接规格表控制焊脚尺寸。纵横骨材等采用 CO_2 自动小车焊接,选择较小的电流、电压值,控制好热输入,由中间向两端施焊,从中间骨材向两侧骨材逐条施焊,采用自动二氧小车焊接。骨材与 T 型桁交错时,先立焊再平焊。分段大组阶段严格控制舱壁构件装配间隙和垂直度,间隙要求 $\leq 2\text{mm}$,垂直度 $\leq 0.1\%h$ (h 为舱壁高度),且小于 10mm 。按照由内到外、双数焊工对称施焊的原则,分段的焊接顺序采用由中间向四周扩散,长焊缝采用由中间向两边的分中焊。合拢搭载阶段外板、内外围舱壁的非结构面,不允许焊接各种马板及临时支撑和加强。严格控制装配间隙,对接合拢缝的装配间隙控制在 6mm 以内,角接合拢缝装配间隙控制在 2mm 以内。合拢缝严格参照《焊接工艺》焊接。选择较小的电流、电压值,控制好热输入。

2.1.4 分段建造精度控制

分段(中)大组立精度控制将零件、部件、组件组合装焊形成分段单元的分段建造,是陵水船体建造的重要节点,是检验上几道工序的精度管理成果,同时也是下一道工序(总组/搭载)精度制约的基础。分段精度是显示精度管理水平的重要体现。分段建造过程中要消化掉下料、加工、拼装时的精度误差,严格制约胎架制作强度、精度,零部件装配定位间隙及尺寸,装焊策略及流程,工装加强。确定合理完整的基准定位和公差控制标准,在最佳时期进行分段数据收集。

所有分段(pontoon、node、column 分段)在安装过程中必须严格按照分段结构图装配顺序装配,上一工序精度合格后才能进行下一工序的安装。水平、垂直、尺寸全过程跟踪管理。分段精度检测在划线合格后,施工单位确认部件与装配线重合偏差 $\leq 2\text{mm}$ 后方可申报;精度管理人员使用二维表进行抽检,施工单位未进行自检是,精度管理人员取消检查;检测时所有结构必须处于点焊状态,尤其对影响分段焊接变形的立缝位置禁止焊接;分段检验合格后,相应关键部位进行固定后进行焊接;焊前精度阶段对结构端差进行自检标记并进行切割,下次检测时复查。

2.1.5 总装搭载精度控制

传统的坞内合拢方式,即在船坞内自下而上按顺序逐一完成分段的合拢,这是传统造船的合拢模式。韩国大宇船

厂建造的半潜式生产平台 Thunder Horse 和上海外高桥船厂建造的半潜钻井平台“海洋石油 981”均是采用传统的坞内搭载法。陵水 17-2 船体利用青岛海工场地已有水泥滑道利用履带吊和浮吊强大的吊装能力将分(总)段像搭积木一样合拢起来,完成后整体下水拖拉至烟台来福士利用 2 万吨“泰山吊”完成上部组块与下船体的大合拢。

传统的合拢定位现场采用大型吊机将总段移动到预定位置的办法,造成各段之间的连接定位不准和大型吊机的长时间占用,陵水项目浮筒总段合拢利用三维调整机(专为船体分段合拢工艺设计,可使分段在三个维度,六个方向进行精确调整),SPMT 运输车以及重载轨道车定位,提高合拢的效率和精度,降低劳动强度。所有分段合拢面搭载基准线划线杨冲标记,为方便快速搭载,使用分段合拢专用导向工装,导向板预先安装在已合拢的分段上,而且在纵横舱壁上的朝向相同,方便后续合拢调整到位。同时精度测量合格,修正结束后方马板封焊。由于是自下而上合拢,浮筒总段合拢利用的重型平移设备已不再适用。采用履带吊+浮吊的吊装方式定位,如码头里侧两立柱总段使用 2 台 1600 吨履带吊联合吊装,码头外侧两立柱总段使用德浮 3600T 浮吊吊装。整个立柱合拢精度是船体精度控制的关键点,利用高精度全站仪实时测量指导调整,保证合拢口同面度及整体定位分段姿态。

2.1.6 温度对精度测量的影响及对策

船体立柱总装搭载正是青岛春夏交接之际,昼夜温差大,白天日晒强度高,船体受晒局部温度升高将加剧钢材表面不均匀的程度,船体受晒的一面较未受晒的一面温度可能高出 30°C 以上,其热变形引起的几何量的变化对船体搭载定位会产生显著影响。

工件形体热变形的影响因素及其复杂,其变形量 Δ 不仅与尺寸 L 、材料的线膨胀系数 C 、环境温度 T 有关,而且与形体结构因子 k [取决于几何参数,即 $k=f(X_1, X_2, \dots, X_N)$]有关,其数学模型为: $\Delta=f(L, C, T, k)$

常用的温度变化引起的工件热变形计算公式: $\Delta L=L \times C \times (T_1-T_0)$,

式中: ΔL ——热变形量, L ——实物长度, C ——热膨胀系数, T_1 ——升高后温度, T_0 ——原始温度。

船体分段结构复杂而且种类繁多,其热变形不仅受相邻结构件的约束,而且由于船体分段本身遮蔽作用的影响,其处在一个不均匀而且时刻变化的温度场里,因此,上述公式仅能作为参考使用。基于以上准则,通过观测船体结构封顶后到焊接完成后气温变化较大的样本对主副 POST 工作点尺寸变化进行统计发现。

温度越高,变形量越大,变形不仅仅体现在长度方向上,还设计宽度、水平度以及垂直度,属于立体变形。

①温度越高,变形量越大。

②阳光直射的区域最大变形基本在 5mm 左右,变形量大于按理论公式的计算量。

(下转第 64 页)

2.7 树立可持续发展理念

企业的转型升级是必然趋势,企业管理者要树立可持续发展理念,制定企业发展的长远战略目标,抓住时代机遇,利用政策的支持,响应政府绿色环保的发展理念,进行机械设备技术改造和创新,淘汰产能落后的机械设备,提高企业的生产力和产品质量,促进企业的转型升级和长远发展。在互联网+背景下,企业间应该加强沟通与合作,机械设备的改造不仅关系着企业自身的发展,还关系着国家的发展,因此政府部门应该发挥引领作用,利用互联网平台,促进企业间经验的交流与分享,使企业间可以集思广益,形成合力,促进国内机械设备技术的不断发展。

3 结语

企业的发展总是伴随着生产技术的革新与机械设备的更新换代,从而促进整个行业,乃至国家的发展进步。随着

生产技术的不断进步与人口红利的消退,未来的制造业必然向着机械化和智能化方向发展,机械设备技术改造势在必行,机械设备技术创新也将不断涌现。

参考文献:

- [1] 丁同梅. 机械设备技术的改造和创新路径 [J]. 设备管理与维修, 2019, 0(12).
- [2] 叶学贤. 关于企业的机械设备技术改造与创新 [J]. 世界有色金属, 2019, 0(9).
- [3] 陈喜宏. 浅谈企业的机械设备技术改造与创新 [J]. 工程建设与设计, 2019, 0(8).
- [4] 郭清静, 周飞. 机械设备技术改造与创新 [J]. 中国设备工程, 2018, 0(14).
- [5] 尚贵臣. 论企业机械设备技术改造与创新 [J]. 科学与信息化, 2018, 0(9).

(上接第 61 页)

③ 船体分段受阳光照射发生的变形, 不仅受阳光照射强度的影响, 而且与船体分段本省的结构和钢板厚度密切相关, 钢板越厚, 结构件越多, 其变形越小。

温度变化导致船体变形的研究和预测是提高精度控制的发展要求, 通过对实测数据的研究对测量提出以下建议。

① 测量工作应选相同的时间段或相近的温度场进行 (包括焊前精度、焊后精度), 尽量选择在接近标准温度 20 度左右是测量, 减少因温度差异而导致的变形差异, 从而引起测量误差。

② 合拢定位检测应在温差变化较小的时间进行, 夏季 (6 月 ~ 9 月) 因日照量发生的变化很大, 变形一般在 11 点到 15 点达到临界值, 出现突变。所以应尽可能在此时间段避免测量作业, 晴天一般应选择日出前后进行定位, 阴天则限制不大。

③ 模拟搭载基准分段和搭载分段测量时间尽量统一, 避免因变形差异而导致的模拟差异。

3 结语

陵水 17-2 深水半潜式生产平台 2018 年 12 月 8 日正式启动, 2020 年 6 月 29 日, C35 总段吊装合拢精就位完成, 船体总段搭载吊装合拢圆满完成。7 月 28 日, 顶部五层 12 个总段合拢口焊接全部完成。船体各项尺寸数据均满足精度设计要求, 为下一步平台上部组块与下部浮体大合拢的顺利完成奠定了基础。

参考文献:

- [1] 柯于舫. 论船舶的精度控制与建造质量 [J]. 沪东中华技术情报, 2002, (1): 14-15.
- [2] 武卓威, 刘俊, 寇雨丰. 半潜式平台局部切割模拟及施工支撑方案改进 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(1): 171-178.
- [3] 国际船级社协会. 船舶建造及修理质量标准 IACSRec.47(47 号建议案).
- [4] 费业泰, 陈晓怀. 论精密测试中温度误差的现代研究分析 [J]. 仪器仪表学报, 1993, 14(4): 369-374.
- [5] 张宜群, 宋友良. 半潜式钻井平台总装合拢技术方案研究 [C]. 第四届全国船舶与海洋工程学术会议论文集, 2009. 18-22.
- [6] 罗勇, 高巍. 新型深水干树半潜平台选型及总体性能分析研究 [J]. 中国造船, 2013, (7): 30-40.
- [7] 侯金林, 于春洁, 沈晓鹏. 深水导管架结构设计与安装技术研究——以荔湾 3-1 气田中心平台导管架为例 [J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 93-97.
- [8] 李磊, 戴凯云, 任帅. 面向精度控制的船体焊接工艺规划技术研究 [J]. 江苏科技大学, 2015, 18(20): 153-156.

作者简介: 于宝清 (1982-) 男, 汉族, 山东青岛人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 船舶与海洋工程建造精度尺寸控制; 吴蓓 (1987-) 女, 汉族, 山东青岛人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 船舶与海洋工程建造精度尺寸控制。