三维扫描技术在船舶LNG罐体鞍座精度控制中的应用

郭金翔

招商局金陵船舶（江苏）有限公司　江苏南京　210000

摘要：针对大型鞍座钢结构在船体分段预装过程中的焊接质量控制问题，提出了采用三维模拟技术指导大型船用LNG罐体鞍座焊接精度控制方法，并在7000PCTC车滚船的建造过程中进行实施。结果表明：鞍座焊接成形后，焊接精度可满足后期LNG罐体环氧的浇注要求，使LNG罐体吊装一次到位，并可显著提高船舶生产建造效率、缩短船舶建造周期，改善施工作业环境。研究成果可以应用于类似船舶LNG储罐鞍座的高精度焊接质量控制。

关键词：精度控制；罐体；模拟；鞍座

3D scanning technology in ship LNG storage tank saddle accuracy application in control

GUO Jinxiang

China Merchants Jinling Shipyard（Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China

Abstract: This paper introduces the quality control of large saddle steel structure in the ship hull sectional pre-assembly welding, and puts forward the method of using three-dimensional simulation technology to guide the saddle welding precision quality control of large marine LNG tank, and implements it in the construction process of 7000PCTC car-rolling ship. The implementation results show that after the saddle welding, the precision quality is fully able to meet the late LNG tank epoxy pouring, and the LNG tank hoisting is in place at one time. It can significantly improve the production and construction efficiency of ships, shorten the ship construction cycle, and improve the construction environment. The research results of this paper can be used in the high precision welding quality control of the saddles of LNG storage tanks of similar ships.

Keywords: precision control; tank; simulation; saddle

1　序言

目前在建的7000PCTC系列车滚船中，每条船均有2个2000m³的LNG储罐，每个储罐长45200mm、直径7750mm，两端为半球体封头结构，每个储罐的重量约210t。LNG储罐需要安装在货舱FR59～FR119肋位之间的鞍座结构上。因鞍座需承受罐体重量，结构强度要求较高，因此结构密且焊接节点均为全焊透、深熔焊。同时，由于焊接量很大，极易造成焊接变形，所以如不进行有效控制将直接造成鞍座变形后无法与罐体线型精确贴合[1]。

传统的建造模式是LNG罐体建造成形后，船厂按照LNG罐体承压木实际线型来建造下面的支撑鞍座，然后在合拢阶段进行鞍座组立的组装、定位、成形。鞍座与LNG罐体承压木之间通过环氧

树脂进行填充，由于环氧树脂制造厂家推荐厚度要求较高，精度误差需控制在5mm以内，因此对于长度45200mm的罐体来说，要求鞍座误差必须控制在0.11‰以内。在后续罐体吊装、环氧树脂浇注阶段，如果环氧树脂厚度不能满足要求，就会造成大量的返工和浪费，因此采用此种方式建造周期较长，影响交船节点。

为了既能满足船舶建造周期，又能保证船体鞍座结构线型与LNG罐体承压木线型的贴合度，进而实现LNG罐体一次吊装成功，缩短船坞周期、改善工作环境、提高生产效率，采用三维模拟技术指导大型船用LNG罐体鞍座焊接精度质量控制，确保鞍座建造精度满足要求，环氧树脂浇注一次成形，LNG罐体落罐一次到位[2]。

2　传统LNG罐体鞍座建造精度控制方式

2.1　传统LNG罐体鞍座建造模式

传统LNG大型罐体鞍座的制作安装，需要等到大型储罐建造成形后，根据LNG罐体外围承压木的实际线型建造船体鞍座结构，且每个鞍座组立需要制作专属胎架，在合拢阶段组装成形，在组装过程中要经过定位、装配及焊接等工序。

鞍座结构节点如图1所示，鞍座面板一圈和与船体结构相连的一圈均为全焊透，焊接量比常规焊接呈几何倍数增长，如图2、图3所示。据统计，鞍座本体用钢量达154.4t，鞍座与船体结构采用30～40mm厚钢板全焊透的焊缝长度超过500m，焊丝填充量达31.4t。在施工过程中，由于存在大量焊接，因此若未能精准有效控制变形，则将极易导致鞍

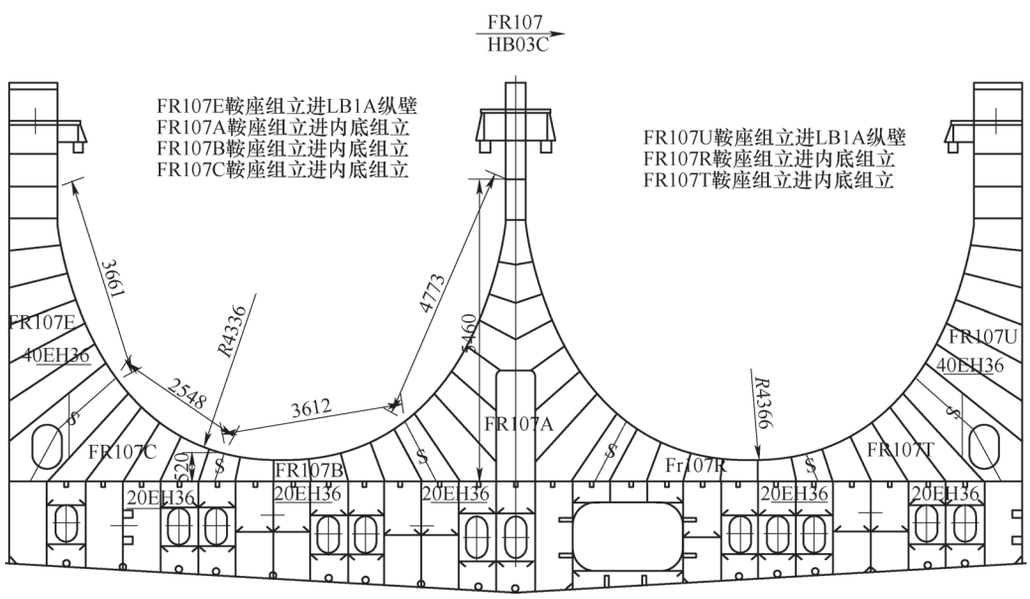


图1　鞍座结构节点

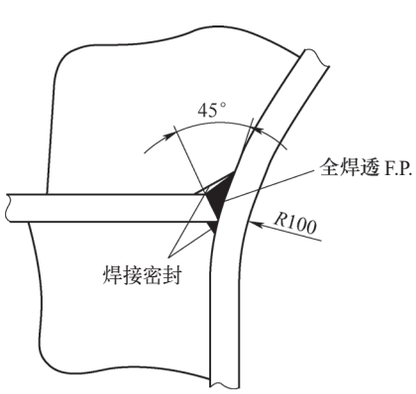


图2　局部焊接节点一

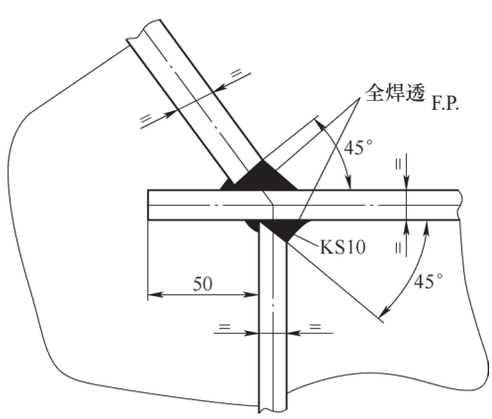


图3　局部焊接节点二

座线型存在偏差，环氧树脂厚度会超出厂家标准范围，进而直接影响LNG罐体的吊装。

2.2 传统LNG罐体鞍座建造存在的问题

传统LNG大型罐体鞍座的制作安装，需要制作专属胎架，且不能重复利用，制作周期长，甚至会因鞍座线型与LNG罐体线型不匹配而影响LNG罐体的吊装。如若吊装后，发现LNG罐体与鞍座线型超出了环氧树脂浇注范围，则会造成后续二次环氧树脂浇注，导致人员、环氧树脂材料浪费。另外，船体鞍座结构修正，且空间位置狭小，施工环境恶劣，影响生产进度与船坞合拢周期。

该种模式生产节奏缓慢、鞍座线型精度难以控制，不便于系列船舶鞍座结构的建造，影响船舶建造周期。

3 优化改进后的控制方式

鞍座结构按照生产计划正常建造，组装阶段按照LNG罐体承压木线型进行定位控制。为了确保建造成形的LNG罐体压制板能够精准落入鞍座卡槽中，保证LNG罐体线型与鞍座线型相匹配，将LNG罐体线型基准、尺寸链分解到鞍座组立定位过程中，并通过焊接过程监控、管理，指导现场施工，最终确保LNG罐体压制板线型与鞍座线型匹配良好，LNG罐体吊装一次到位[3]。

3.1 建立鞍座尺寸链控制方案

从小组立建造开始，到鞍座组立拼接，进行全过程系统尺寸链控制，通过焊接过程数据指导现场焊接顺序，确保鞍座预装精度。

（1）鞍座建造过程尺寸控制　鞍座面板曲面加工阶段通过冷压，实现样板线型控制。面板区域连接的肘板、T型材腹板在鞍座面板上进行安装、焊接时，分别对鞍座组立肘板、腹板、面板线型精度进行尺寸精度检测与确认，满足精度定位误差在1mm内。焊接完工后，根据制定的检测方案，对控制点进行数据检测，确保精度数据与理论数据误差在3mm内。

（2）鞍座搭载线型模拟定位　采用三维扫描仪对已成形的LNG罐体外缘承压木线型进行数据扫描（见图4），并对扫描后的承压木线型进行数据分析，用数据反映出承压木外形尺寸精度情况。

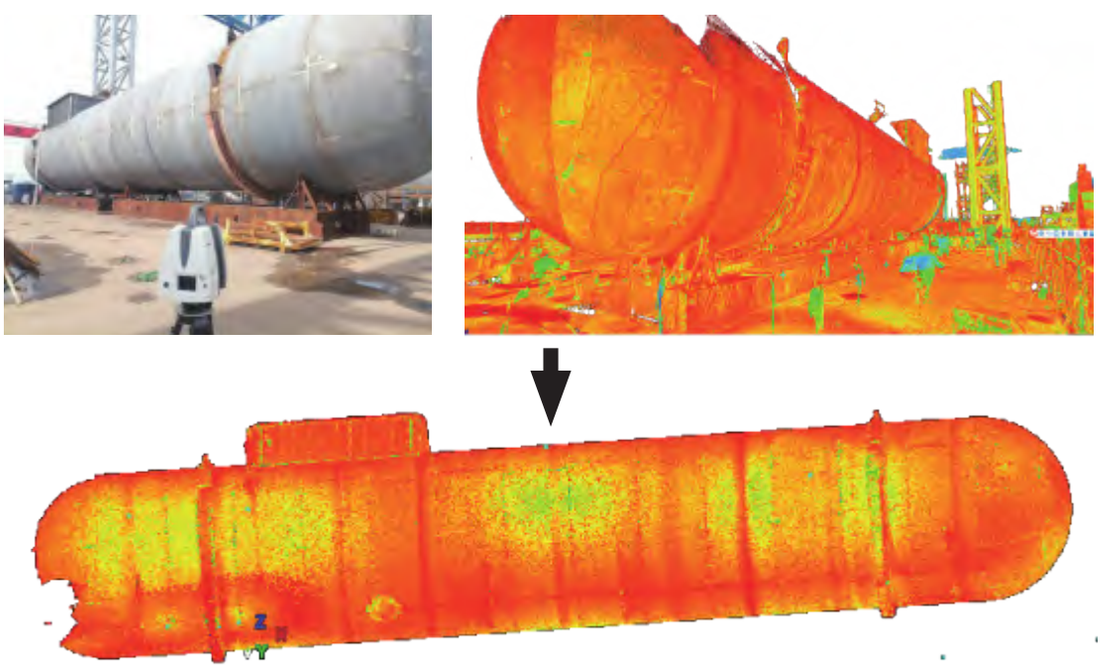


图4　三维扫描仪对承压木线型进行数据扫描

对扫描成形的LNG罐体进行数据处理，分析固定支座位置承压木外缘线型数据、滑动支座承压木外缘线型数据，并形成线型、间距精度数据，得到LNG罐体两个支撑座承压木外形曲度线型。

3.2 鞍座组装定位

固定鞍座7个组立组装成固定环形鞍座，滑动鞍座7个小组立组装成环形鞍座，在组装过程，借助三维扫描仪、采用正确的焊接工艺方法对鞍座定位过

程进行尺寸精度控制。

（1）前后方向的定位　鞍座前后方向的定位如图5所示。根据扫描分析得到的LNG罐体固定支撑座、滑动支撑座承压木之间的距离数据，对船体对应的鞍座横向基准进行尺寸定位控制，同时加放船体结构焊接收缩，通过焊接过程尺寸数据监控，保证前后尺寸精度[3]。

（2）左右方向的定位　以船体中心线为基准画

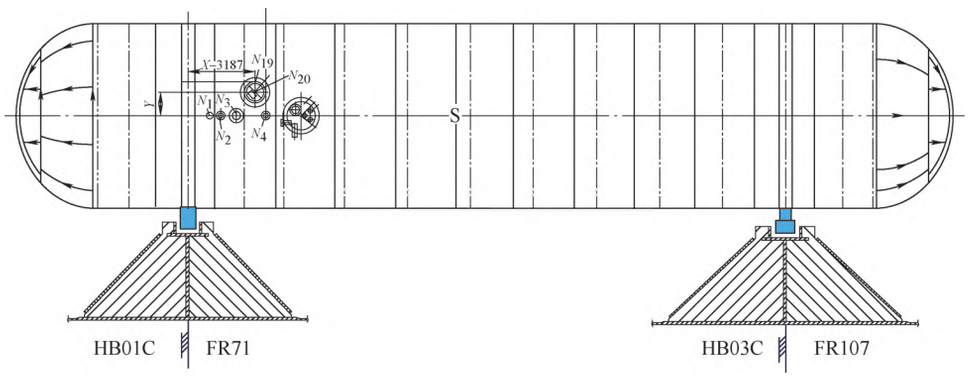


图5　鞍座前后方向的定位

出两个鞍座中心线，以鞍座中心为基准，利用三维扫描仪对鞍座组立进行线型扫描。根据扫描LNG罐体得到的固定支撑座承压木外缘曲度线型，将7个组立鞍座组装成形的环形鞍座，按照已取得的LNG罐承压木木块线型进行模拟分析、定位，保证定位阶段鞍座高度方向、宽度方向的线型与LNG罐体线型相匹配。

3.3　焊接过程管控

鞍座结构复杂，其存在密集型的肘板结构，需要与船体相连接，板材厚度达到30～40mm，前后两组共14块组立鞍座通过焊接组装在一起，为了确保其焊接后鞍座线型精度与LNG罐体线型一致，需要对焊接过程数据进行扫描数据全程监控，如图6所示。另外，通过焊接顺序、焊接方式的调整控制，确保鞍座线型精度满足控制要求。

（1）焊接过程反变形加放控制　根据扫描

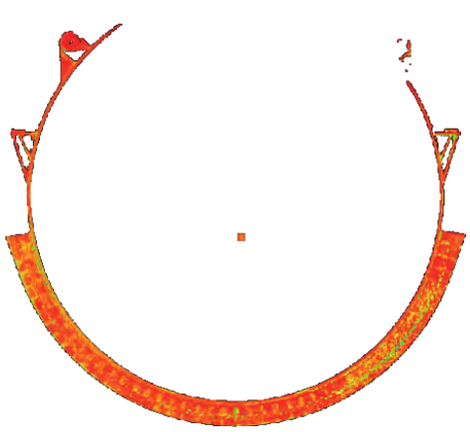


图6　扫描3D模型

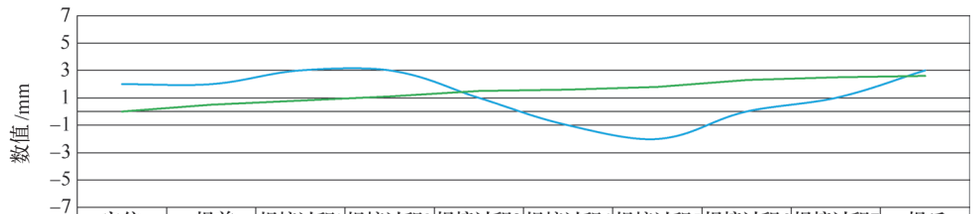
LNG罐体得到的两个支撑座承压木外缘曲度线型，对船体组立鞍座定位进行数据指导，并在宽度方向单边加放焊接反变形8～10mm，同时增加保型支撑，保证定位拼接后的鞍座线型精度与LNG罐体承压木线型精度误差在可控范围。

（2）焊接顺序控制　焊接过程需要严格按照焊接顺序进行控制，并从中间向两侧对称施焊，再通过鞍座三维扫描数据监测实时进行精调。单个鞍座制作过程焊接顺序为：鞍座面板对接焊→鞍座面板与腹板焊接→鞍座肘板与腹板立角焊→鞍座肘板与腹板平角焊→档条与鞍座面板立角焊。

两组共14个鞍座组装对接时的焊接顺序为：鞍座面板的对接焊接→鞍座腹板与内底板的角接焊接→腹板肘板与内底板的角接焊接→鞍座与纵壁结构的焊接→档条与鞍座面板的焊接。在每个焊接区域中，均采用人工左右对称焊接，以及从中间向两边交替焊接，进而减少焊接应力变形产生。

（3）焊接过程数据控制　采用扫描仪对鞍座结构的焊接过程状态数据进行三维数据采集，并将扫描成形的鞍座线型与LNG罐体承压木的线型进行匹配，通过扫描获取的三维坐标差值分析出鞍座宽度方向、高度方向的线型偏差值和间隙情况，每隔4h对鞍座状态进行一次检测，结果如图7所示。若匹配精度误差超过规定范围，则通过调整鞍座对接焊缝的焊接顺序对线型误差进行调整，控制匹配度间隙误差在5mm以内。

（4）鞍座线型与LNG罐体承压木模拟匹



	定位	焊前	焊接过程1	焊接过程2	焊接过程2	焊接过程4	焊接过程5	焊接过程6	焊接过程7	焊后
宽度	2	2	3	3	1	−1	−2	0	1	3
高度	0	0.5	0.8	1.1	1.5	1.6	1.8	2.3	2.5	2.6

图7　鞍座焊接数据跟踪对比

配　组立鞍座拼接完工、焊接成形后，采用扫描仪对环形鞍座整体线型数据进行三维数据采集，并与LNG罐体承压木整体线型进行匹配度分析，模拟LNG罐体与鞍座线型匹配的误差最小范围，明确LNG罐体承压木摆放在船体鞍座的具体位置，并做好标记。

焊接完工后，通过多站对船体鞍座进行扫描数据采集，并形成三维数据模型。将已扫描取得的船体鞍座三维模型与LNG罐体整体模型导入分析软件中，通过对LNG罐体4个止浮块调平，同时将LNG罐体中心与船体鞍座中心重合，进行线型比对分析，如图7所示。

利用模拟试箱的撞箱原理，计算出鞍座与LNG罐体承压木间隙匹配度情况，同时利用中心线公差、止浮块水平公差，微调LNG罐体状态，控制二者的匹配度间隙误差在标准范围内，并将中心线偏差值、止浮块水平偏差值以及间隙数据记录生成报告。同时，在罐体和鞍座上做好标记，指导后续LNG罐体落位精准调整。

3.4　LNG大型罐体吊装验证

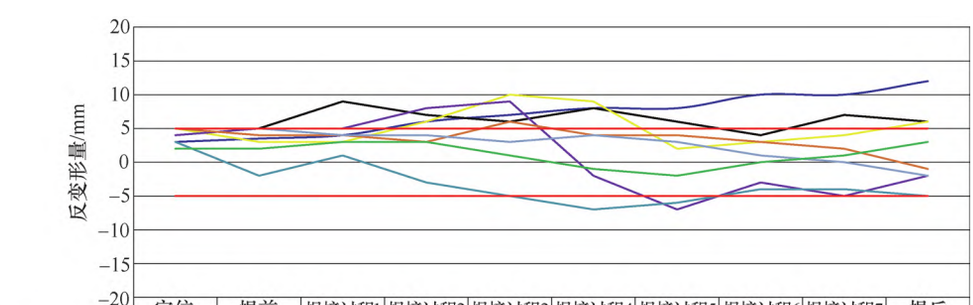
在4个LNG罐体止浮面板上提前预贴靶片，用于罐体吊装过程罐体状态检测。在LNG罐体吊装过程中，将LNG罐体状态参照模拟定位状态进行调整，保证LNG罐体以正确状态进行落位。最终，确保了LNG罐体吊装一次顺利落位，环氧树脂间隙控制在标准范围[4]。

3.5　数据跟踪情况

通过对8条船的定位、焊前、焊接过程及焊后数据的跟踪，鞍座数据精度得到逐步改善，得到鞍座焊接过程反变形的数据控制值（见图8），为后续船舶定位提供了参考数值范围。

4　实施效果

通过采用三维扫描模拟方案的实施，以及鞍座



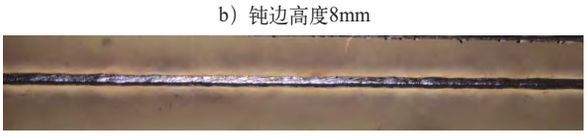
	定位	焊前	焊接过程1	焊接过程2	焊接过程2	焊接过程4	焊接过程5	焊接过程6	焊接过程7	焊后
N-1	3	4	4	6	7	8	8	10	10	12
N-2	4	5	9	7	6	8	6	4	7	6
N-3	5	3	3	6	10	9	2	3	4	6
N-4	4	5	5	8	9	−2	−7	−3	−5	−2
E-1	3	−2	1	−3	−5	−7	−6	−4	−4	−5
E-2	5	4	4	3	6	4	4	3	2	−1
E-3	5	5	4	4	3	4	3	1	0	−2
E-4	2	2	3	3	1	−1	−2	0	1	3
偏差标准上限	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
偏差标准下限	−5	−5	−5	−5	−5	−5	−5	−5	−5	−5

图8　鞍座焊接数据跟踪（宽度变化）

（下转第68页）

a）钝边高度12mm

b）钝边高度8mm

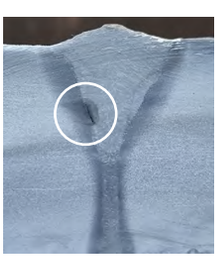


c）钝边高度4mm

图8　不同钝边高度下激光-电弧复合焊焊缝反面成形

综上可知，一定程度上降低钝边高度，利于激光-电弧复合焊焊缝反面的成形。

a）钝边高度12mm



b）钝边高度8mm

图9　不同钝边高度下焊缝截面宏观形貌

4　结束语

1）采用Y形、带钝边的U形、带钝边的复合坡口3种形式进行激光-电弧复合焊，均可得到较好的焊缝成形。

2）考虑坡口形式对坡口制备难易度、焊接层数的影响，得出Y形坡口最优。

3）当钝边高度相同时，一定程度上增大坡口角度，利于激光-电弧复合焊焊缝正面的成形。当坡口角度相同时，一定程度上降低钝边高度，利于激光-电弧复合焊焊缝反面的成形。

参考文献：

[1] 罗高翔，李超，喻军，等. 船用薄板激光-电弧复合焊工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2023（4）：14-17.

[2] 朱晓明，蔡艳，吴毅雄. 大厚度船用高强钢激光-电弧复合焊技术研究[J]. 热加工工艺，2009，38（21）：122-125.

[3] 解赞华，杨海锋，王旭友，等. 坡口尺寸对激光电弧复合焊接头特性影响[J]. 机械制造文摘（焊接分册），2019（5）：29-32，43.

MW 20240602

（上接第63页）

组立建造、组装过程焊接反变形和数据的监控，有效确保了罐体线型与鞍座结构线型一次匹配到位，如图9所示。同时，有效提高了各个环节施工效率，确保LNG罐体一次安装到位，无返工，减少了罐体的二次起吊和压膜工作，工作效率大幅度提升。

图9　罐体线型与鞍座结构线型一次匹配到位

5　结束语

针对大型鞍座钢结构预装精度的控制，以系列船的数据跟踪统计作为指导，为今后类似船型鞍座的预装控制提供了技术支撑，积累了宝贵的数据经验，同时也推动了大型鞍座钢结构的安装阶段工序前移，为缩短船舶建造周期、提高生产效率、改善施工环境奠定了技术基础。

参考文献：

[1] 庄科挺，赵寅，刘文华. C型LNG液罐与船体的连接结构研究[J]. 船舶设计通讯，2015（S2）：20-25.

[2] 张乐佑，王兰，刘志淇，等. 气体运输船液货罐鞍座分段预装精度控制工艺：“2022年度船舶先进制造工艺技术学术交流会”论文集[C]. 北京：中国造船工程学会，2022：124-129.

[3] 郭景浩，刘志淇，王兰. LNG货罐与C型鞍座安装匹配精度控制：“2021年船舶先进制造工艺技术学术交流会”论文集[C]. 北京：中国造船工程学会，2021：342-347.

[4] 张林线，龚容，杨维. LPG船液罐鞍座分段定位精度控制分析和应用[J]. 造船技术，2015（3）：35-38.

MW 20240409