

4-16-2019

Process Simulation and Optimization on Giant Block Erection of Longitudinal Staggered Arrangement

Wenmin Zhu

1. Institute of Intelligent Manufacturing and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; ;

Minghua Zhu

2. Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913, China; ;

Xiumin Fan

1. Institute of Intelligent Manufacturing and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; ; 3. Shanghai Key Lab of Advanced Manufacturing Environment, Shanghai 200230, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Process Simulation and Optimization on Giant Block Erection of Longitudinal Staggered Arrangement

Abstract

Abstract: The process of giant block erection of longitudinal staggered arrangement is complicated. If the design of process and tooling are not reasonable, the adjustment work in the construction site, which affects the shipbuilding cycle seriously, will be abundant. To solve these problems, the method of process simulation and optimization on giant block erection were researched. *Simulation models were established for carrying out the process simulation, and the simulation process was detected in real time by establishing collision detection model and virtual human model. Based on the measured data of the ship hull, the automatic calculation method of raising height and the deviation adjustment scheme of side plates were presented to optimize the process.* Prototype system was developed based on the method above, and the effectiveness of this method was proved by an example.

Keywords

giant block, longitudinal staggered arrangement, process simulation, process optimization

Recommended Citation

Zhu Wenmin, Zhu Minghua, Fan Xiumin. Process Simulation and Optimization on Giant Block Erection of Longitudinal Staggered Arrangement[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(1): 110-119.

纵骨交错布置的巨型总段对接工艺仿真与优化

朱文敏¹, 朱明华², 范秀敏^{1,3}(1.上海交通大学智能制造与信息工程研究所, 上海 200240; 2.江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913;
3.上海市网络化制造与企业信息化重点实验室, 上海 200230)

摘要: 纵骨交错布置的巨型总段对接工艺过程复杂、需要考虑的问题较多, 若在施工现场出现工艺不可行、工装设计不合理等问题, 调整工作庞大, 严重影响造船周期, 研究了巨型总段对接工艺仿真与优化方法。建立移位对接工艺仿真模型并进行工艺过程仿真; 建立碰撞检测模型和虚拟人模型对仿真过程进行实时检测; 基于船体实测数据, 提出顶起量自动计算和外板对接偏差调整方法对移位对接工艺进行优化。基于上述方法开发了原型系统, 并通过实例证明了本方法的有效性。

关键词: 巨型总段; 纵骨交错布置; 工艺仿真; 工艺优化

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 01-0110-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0070

Process Simulation and Optimization on Giant Block Erection of Longitudinal Staggered Arrangement

Zhu Wenmin¹, Zhu Minghua², Fan Xiumin^{1,3}(1. Institute of Intelligent Manufacturing and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913, China;
3. Shanghai Key Lab of Advanced Manufacturing Environment, Shanghai 200230, China)

Abstract: The process of giant block erection of longitudinal staggered arrangement is complicated. If the design of process and tooling are not reasonable, the adjustment work in the construction site, which affects the shipbuilding cycle seriously, will be abundant. To solve these problems, the method of process simulation and optimization on giant block erection were researched. *Simulation models were established for carrying out the process simulation, and the simulation process was detected in real time by establishing collision detection model and virtual human model. Based on the measured data of the ship hull, the automatic calculation method of raising height and the deviation adjustment scheme of side plates were presented to optimize the process.* Prototype system was developed based on the method above, and the effectiveness of this method was proved by an example.

Keywords: giant block; longitudinal staggered arrangement; process simulation; process optimization

引言

现代船舶建造按“以中间产品为导向”的原



收稿日期: 2017-01-20 修回日期: 2017-04-07;
基金项目: 国防基础科研重点项目(JCKY2013206 B001);
作者简介: 朱文敏(1992-), 男, 湖北洪湖, 博士, 研究方向为虚拟装配/维修、人机工程仿真; 朱明华(1981-), 男, 江苏常州, 博士, 高工, 研究方向为船舶数字化设计、数字化制造。

则组织生产, 分段造船法是现代船舶建造的常用方法。依照不同生产阶段, 可将中间产品分为钢材、小组立、中组立、大组立、分段, 大型分段等^[1]。巨型总段造船法是在大型分段基础上实现巨型化, 同时扩大预舾装和涂装及可以分段测试的工作, 使总段制造向专业化、社会化方向发展, 从而大幅度缩短船坞内建造周期, 提高船坞

利用率^[2]。总段大合拢时,传统方法是采用吊环吊装和钢梁托架吊装^[3],但随着总段的巨型化和超巨型化趋势,总段重量和高度不断增大,导致其所需的垂直安装空间较大,定位和调整操作也越来越困难。由于无法保证总段的位姿调整精度,总段间的焊缝会存在很大的应力,严重影响船舶的建造质量。此外大型起重设备造价昂贵,维修费用高也提高了船舶制造成本。一些大型船舶企业已经开始改进总段合拢工艺,使用专用的合拢设备与水平移位对接技术,大大缩短了船坞的使用周期,提高了船舶建造的效率和质量^[4-5]。

巨型总段的移位对接工艺过程复杂,占用场地大,需要考虑的问题较多,工人观测易疏忽,如果工装设计不当,很难被及时发现,若在施工现场出现工艺不可行、工装设计不合理等问题,将要进行的调整工作是庞大的。如何在实施对接前,对整个设计方案进行详细的验证,是必须解决的问题。随着造船技术的不断发展,国内外造船企业已广泛使用计算机仿真技术进行工艺方案设计^[6-11],根据仿真结果对建造序列、分段布局、工装设计进行验证与优化。在船体装配阶段,国内外学者在三维大尺度测量处理方面进行了大量研究,通过将三维精密测量技术与计算机仿真技术结合,取得了很多的研究成果^[12-15]。

分析这些文献可知,三维精密测量和计算机仿真技术主要应用于具有较长平行中体、对接面平整的船体。对于外板纵向线型变化较大的纵骨架式船体,为了避免焊缝处的应力集中,对接的两个分段上的纵骨需要交错布置,而上述方法不能对这种交错布置结构进行工艺仿真,当前主要还是靠工人在现场的反复调整来完成对接,由于缺乏相关指导,因而生产效率还是很低。

针对上述问题,本文研究了纵骨交错布置的巨型总段移位对接原理;在此基础上,构建移位对接工艺仿真模型并进行工艺过程仿真;建立碰撞检测模型和虚拟人模型对仿真过程进行实时检测;基于船体实测数据,提出顶起量自动计算和

外板对接偏差调整方法对工艺过程进行优化,有效沟通工艺设计与实际生产过程,以尽早发现问题、解决问题,最后通过实例证明了本方法的有效性。

1 技术路线

首先针对面临的工程问题进行现场调研,建立总段对接仿真模型并完成模型的转换、轻量化、综合布置;其次,进行工艺过程仿真,建立碰撞检测模型和虚拟人模型对仿真过程进行实时检测;然后,分析潜在问题,提出优化方案;最后,对研究成果进行工程应用,具体技术路线如图 1 所示。

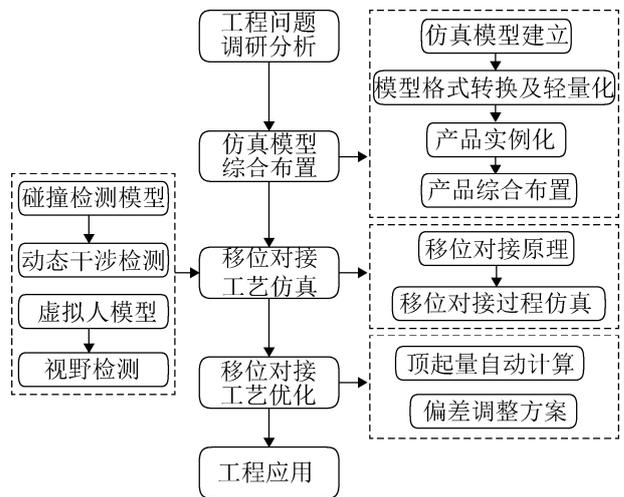


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap

本文主要介绍移位对接工艺仿真和工艺优化两部分,主要包括:对不同方案下的移位对接工艺进行仿真验证,分析工艺可行性、视野范围;进行移位对接动态干涉检查,分析移位对接过程中工装设计可能存在的干涉问题以及工装布置的合理性;对存在干涉或不合理的工艺、工装进行调整、优化。

2 移位对接工艺仿真

针对纵骨交错布置的巨型总段移位对接工艺仿真的特殊性,需要研究其工作原理,有针对性

地制定工艺仿真方案，并使用计算机仿真技术来检验工艺工装设计的正确性。

2.1 移位对接原理

对于具有较长平行中体的船体，从简化工艺和降低成本的角度，纵骨在外板上的布置多采用平行于基线的形式，无论是计算机建模还是骨材加工都没有太大的技术难度。但对于外板纵向线型变化较大的船体，出于强度和重量的综合平衡，纵骨应垂直于外板线型(即外板线型曲率径向)，而且为避免接头处板材和型材的焊接应力集中而降低强度，要求将纵骨及所在板材的焊缝做交错处理。一般地，对接的两个巨型总段中，运动的称为对中总段，静止的称为基准总段，对中总段上纵骨伸出所在板材，基准总段上相对应的纵骨则缩进，以此避免焊缝位于同一平面^[16]，如图 2 所示。

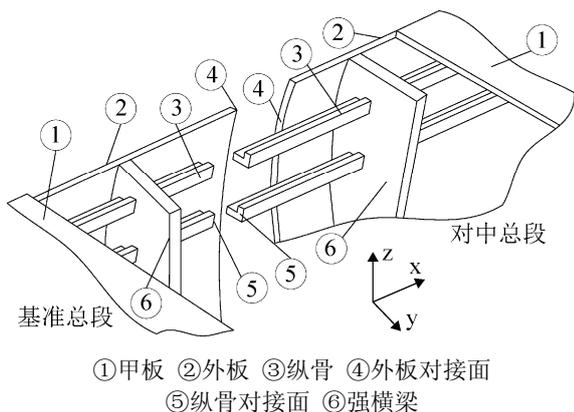


Fig. 2 Structure of longitudinal staggered arrangement

巨型总段建造不同于一般机械制造，船体分段尺寸较大，建造时误差比一般机械制造产品误差要大，且由于生产过程涉及套料、切割、焊接、组装和装配等多道工序，易形成较大的建造误差累积^[15]。由于制造上的误差，两个总段的外板和纵骨上各对应点不能完全重合，在各方向上都存在偏差，若通过直接平移来实现对接，对中总段上伸出的纵骨会与基准总段外板产生干涉碰撞，如图 3 所示。因此必须先将对中总段顶起抬高，使对中总段外板与基准总段外板间产生一定的错位间隙，这样对中总段

上伸出的纵骨才能插入基准总段。而且，在对中总段下降的过程中，由重力产生的挤压有助于两个总段对接的紧密联接。

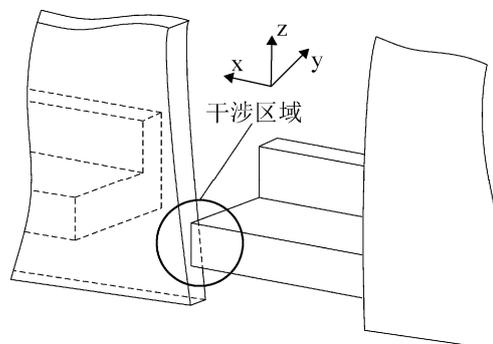


图 3 纵骨与外板干涉
Fig. 3 Interference between longitudinal and side plate

此外，还需调整对中总段的横向位置，使两个总段外板之间的偏差在合适范围内，确保两侧外板都较易焊接。图 4 表示了对接的两个巨型总段的外板对接面截面之间的位置关系，调整前，基准总段和对中总段的对称线重合，如图 4(a)所示，此时左侧偏差大，右侧偏差小，不适合焊接操作，因此需将对中总段向右侧调整一定距离，使两侧偏差在一个适合进行焊接的范围内，如图 4(b)所示。

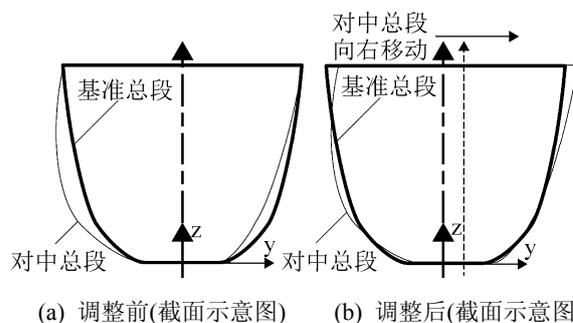


图 4 对中总段横向位置调整
Fig. 4 Adjustment of lateral position

2.2 工艺仿真设计

从上述移位对接原理可知，通过顶起抬高和横向调整对中总段来完成对接操作，其中，移位/对中小车是移位对接操作的动力来源，对中小车主要包括 4 个部分：车体、水平移动装置、前后移动装置、顶轴。移位小车与对中小车结构类似，但只有

两个部分: 车体与顶轴。本研究以对中小车和移位小车为核心, 根据移位小车与对中小车的使用情况, 将巨型总段移位对接工艺仿真过程分为移位工作阶段和对中工作阶段。

(1) 移位工作阶段

根据船体特点铺设轨道与布置工装, 调入移位小车, 移位小车升起顶轴将对中总段抬起, 沿轨道运动靠近基准总段, 当两个总段间距离在设定范围后, 移位小车降下顶轴放下对中总段, 撤离移位小车, 调入对中小车。

(2) 对中工作阶段

对中小车升起顶轴抬起对中总段, 当对中总段和基准总段外板间间隙达到要求后, 控制前后移动装置使对中总段上的纵骨插入基准总段, 控制水平移动装置横向调整对中总段, 确定理想的对接位置后, 缓慢降下对中总段, 完成两个总段的对接。

2.3 仿真过程实时检测

装配或施工中的干涉是工艺设计中需要重点考虑的问题, 干涉一旦出现, 必然会在一定程度上影响实际的施工效率, 提高生产成本。设计阶段, 在虚拟环境下进行巨型总段移位对接动态干涉检查, 能及时发现移位对接过程中工装设计存在的干涉问题。

本文采用基于 AABB 包围盒的碰撞检测方法实现巨型总段移位对接动态干涉检查, 基于 AABB 包围盒二叉树对碰撞模型进行组织, 模型包含的信息主要有描述信息、面片信息(点、法向量)、包围盒二叉树信息, 如图 5 所示。其中, 描述信息用于描述模型的基本信息; 面片信息包含面片的顶点链表、法向量链表以及面片表, 主要用于精确碰撞检测; 包围盒二叉树信息包含包围盒链表以及二叉层次树, 主要用于基于包围盒的碰撞检测。对于虚拟环境中的任意模型, 都必须有一个碰撞检测模型与其对应, 才可以实现该对象交互操作过程中的实时碰撞检测。当包围盒相交时, 对相交包围盒进行细化, 直到部件不能再细

化为止, 这样可有效消除包围盒内非实体空间的影响, 保证碰撞检测的正确性。

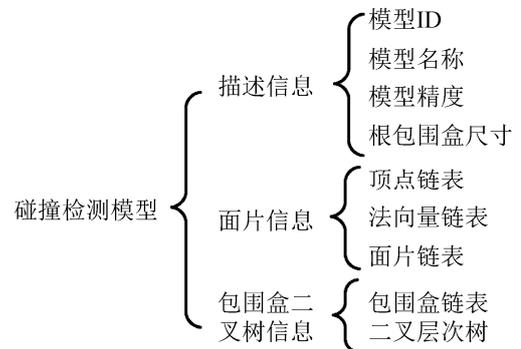


图 5 基于 AABB 包围盒二叉树的碰撞检测模型
Fig. 5 Collision detection model based on AABB

现场施工时, 需要安排工人进行观测, 这样能避免可能出现的干涉碰撞现象, 观测点的布置很重要, 若忽略了某些关键区域, 极有可能造成严重的后果。为了指导施工现场工人观测点的确定, 首先, 建立包含 15 个刚体的虚拟人模型^[17], 然后, 基于正向运动学实现虚拟人运动学建模, 调整虚拟人各关节获得适合的观测姿态, 最后, 通过虚拟环境下的三维坐标投影变换, 获得虚拟场景在视平面投影图像, 进行虚拟人视野显示, 如图 6 所示, 通过总段移位对接过程中视野实时观测的场景来判断该观测点是否有意义。

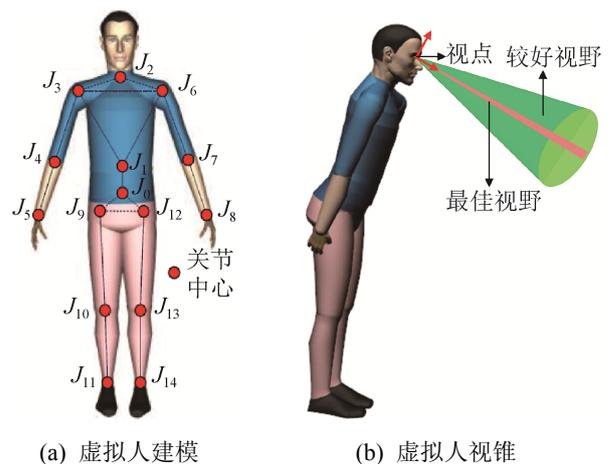


图 6 虚拟人视野检测
Fig. 6 Vision detection of virtual human

3 移位对接工艺优化

在船舶分段对接仿真方面, 现有研究主要针对具有较长平行中体的总段, 一般基于实测数据完成总段的三维重构, 然后利用重构模型进行仿真以确定调整量^[12-15]。而纵骨交错布置的巨型总段尺寸巨大, 结构复杂, 现场测量和三维重构会消耗很多时间。本节提出的方法只需测量对中总段上的若干测量点, 并结合巨型总段的 CAD 设计模型来完成顶起量的自动计算及外板对接偏差调整。

3.1 顶起量自动计算

对中工作阶段的现场施工中, 有时直接将中对中总段顶起到较高高度, 这样能得到较大的相对间隙, 但会超过实际需要的顶起量, 不符合制造经济性要求。

另一种方法是, 逐步顶起对中总段并测量中对中总段与基准总段外板的相对间隙, 这需要工人反复进行顶起和测量操作, 效率较低。本小节基于实测数据完成顶起量的自动计算, 能有效解决上述方法存在的问题。

实测数据由全站仪测得, 在船舶建造全过程中, 采用全站仪进行测量的阶段主要是分段建造阶段和船坞装配阶段。在进行测量之前, 需要先在巨型总段的 CAD 模型上确定测量点, 测量人员参考测量点位置在现场完成测量^[15]。如图 7 所示, 测量点设置在对中总段伸出的纵骨和外板的接合处, 对中总段的每个纵骨都对应着一个测量点。

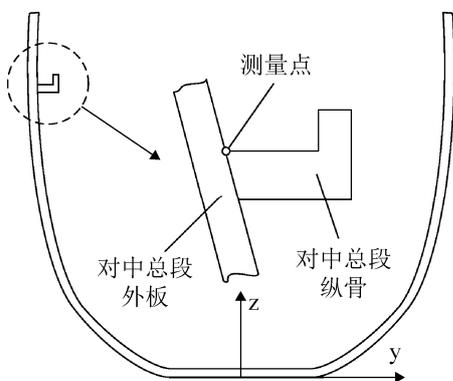


图 7 测量点设定示意图
Fig. 7 Diagram of measurement points

首先, 基于实际测量数据, 确定间隙阈值 T 。通过全站仪测量各测量点的实际坐标值, 得到测量结果集合 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$, N 为测量点的数量, $m_i = (x_{mi}, y_{mi}, z_{mi}, \Delta x_{mi}, \Delta y_{mi}, \Delta z_{mi})$ 为其中一个测量点的结果, (x_{mi}, y_{mi}, z_{mi}) 代表该测量点的理论位置坐标值, $(\Delta x_{mi}, \Delta y_{mi}, \Delta z_{mi})$ 为测量点实测值与理论值的偏差。偏差是导致对中总段的纵骨与基准总段干涉碰撞的原因, 特别是偏差 $\Delta y_{mi} (i=1, 2, \dots, N)$, 以 Δy_{mi} 中的最大正值为间隙阈值 T (见 3.2 节)。

然后, 基于总段的 CAD 设计模型, 计算顶起量为 H 时, 对中总段上各测量点与外板间的间隙值。如图 8(a) 所示, 当顶起量为 0 时, 对中总段和基准总段的外板对接面截面完全重合, 当对中总段顶起量为 H 时, 由于外板线型的原因, 对中总段上的测量点与同一高度基准总段外板间会出现间隙 t_i , 如图 8(b) 所示。当满足 $t_i > T (i=1, 2, \dots, N)$, 即所有测量点对应的间隙值都大于间隙阈值 T 时, 对中总段靠近基准总段时将不会再出现干涉现象, 因为产生的间隙能够容纳下偏差, 各纵骨都将顺利插入到基准总段中, H 即为所求的顶起量, 即纵骨顺利插入时所需的最小顶起量。

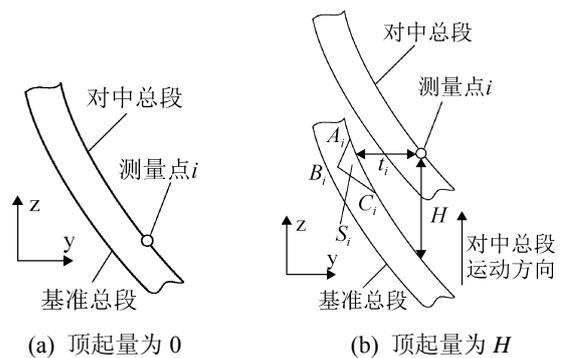


图 8 相对间隙示意图
Fig. 8 Diagram of relative clearance

船体外板线型较复杂, 数学表达式不适合用来进行间隙值的计算, 而巨型总段的 CAD 设计模型经过轻量化处理后, 可以提取出模型中包含的所有三角面片, 这些三角面片包含着几何信息。因此, 巨型总段可认为由三角面片集

$S=\{s_1, s_2 \cdots s_{n-1}, s_n\}$ 组成, n 为三角面片的数量。遍历三角面片集 S , 根据三角面片与测量点的位置关系搜索出离测量点最近的三角面片 s_i , 三角面片 $s_i=(A_i, B_i, C_i)$ 包括 3 个顶点 A_i, B_i, C_i , 结合 3 个顶点的坐标, 求出测量点与 s_i 的 y 向距离 t_i , 该距离值就是所求的相对间隙值, 如图 8(b)所示。

特别地, 使用计算得到的顶起量还是可能导致对中总段与基准总段发生干涉, 但此时的干涉不是由于对中总段的纵骨与基准总段的外板碰撞产生, 而是纵骨与基准总段内的其他构件的干涉, 所以在计算过程中需要给顶起量设置一个范围 $[0, H_{\max}]$, H_{\max} 为对中总段可以被顶起的最高高度。显然在限定顶起量的范围后, 会存在无法满足所有测量点的间隙值都大于间隙阈值 T 的情况, 此时, 优先保证一定比例的测量点能达到要求即可, 那些无法保证间隙大于间隙阈值 T 的测量点, 需要人工对纵骨进行相应的切割、修整工作。顶起量计算的整个流程如图 9 所示。

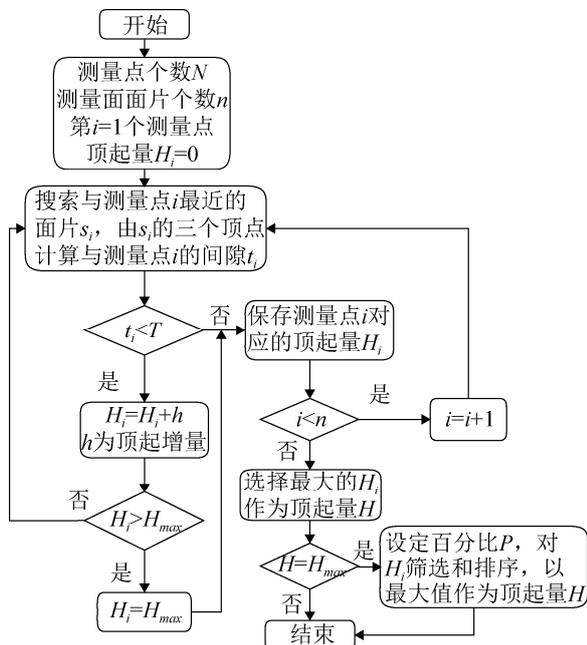


图 9 顶起量计算流程图

Fig. 9 Calculation flow chart of raising height

3.2 外板对接偏差调整

巨型总段移位对接过程的完成是以两个总段

间对应点的重合为基准的^[18], 即对中总段上的测量点要与基准总段上的对应点重合。由于各种误差的存在, 不可能使所有的对应点都同时重合, 理想的对接结果是调整对中总段的位置后, 对应点之间的偏差能被控制在一定的误差范围内, 这样才能为总段外板的连接提供较好的焊接条件。

3 个方向的偏差中, Δx 只影响对中总段与基准总段对应点的间距, 可通过切割余量排除, Δz 为对应点在垂直方向的偏差, 对焊接无影响, 所以移位对接中影响最大的是偏差 Δy , 对接偏差调整主要针对偏差 Δy 进行, 不考虑 Δx 和 Δz 的影响。

当 $\Delta y_{mi} (i=1, 2, \dots, N)$ 都为 0 时, 对中总段和基准总段 CAD 设计模型的外板对接面截面完全重合, 如图 10(a)所示; 当 $\Delta y_{mi} (i=1, 2, \dots, N)$ 都为正时, 对接总段外板对接面截面在基准总段外板对接面截面之外, 如图 10(b)所示; 当 $\Delta y_{mi} (i=1, 2, \dots, N)$ 都为负时, 对接总段外板对接面截面在基准总段外板对接面截面之内, 如图 10(c)所示; 当 $\Delta y_{mi} (i=1, 2, \dots, N)$ 都在外板上一侧为正另一侧为负时, 对接总段外板对接面截面与基准总段外板对接面截面相交, 如图 10(d)所示。

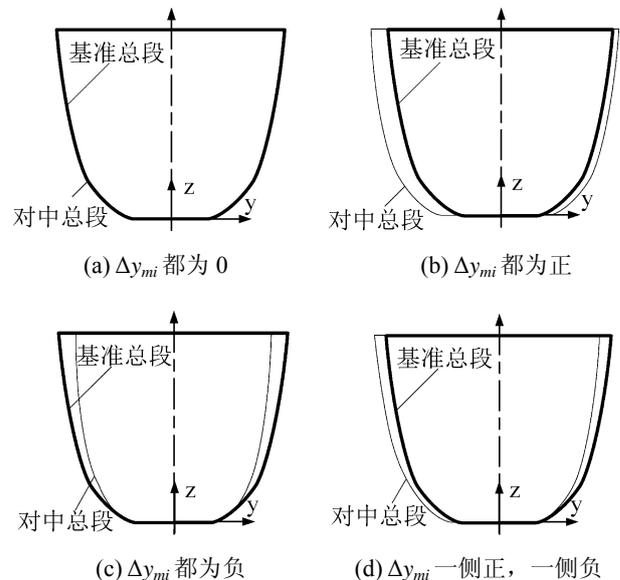


图 10 基准总段和对中总段相对位置

Fig. 10 Relative position between giant blocks

图 10 中, 对中总段的同一侧外板上偏差的符

号一致，因此当调整对中总段位置时，同一侧外板上偏差变化趋势相同，例如对中总段沿 Y 轴正向调整一个很小的距离，图 10(b)中偏差都为正的左侧外板偏差都变小，偏差都为正的右侧外板偏差都变大；图 10(c)中偏差都为负的左侧外板偏差都变大，偏差都为负的右侧外板偏差都变小；图 10(d)中偏差都为正的左侧外板偏差都变小，偏差都为负的右侧外板偏差也都变小。这种情况下，通过简单的计算即可求得对中总段位置的最佳调整量。

但实际上，对中总段同一侧外板上测量点的偏差是正负都有的，因此调整对中总段时，同一侧外板上各测量点的偏差变化趋势各异。如图 11 所示，当对中总段沿 Y 轴正向调整，即调整量为正时，左侧外板上，偏差为正的测量点偏差绝对值变小，偏差为负的测量点偏差绝对值变大；右侧外板上，偏差为正的测量点偏差绝对值变大，偏差为负的测量点偏差绝对值变小。

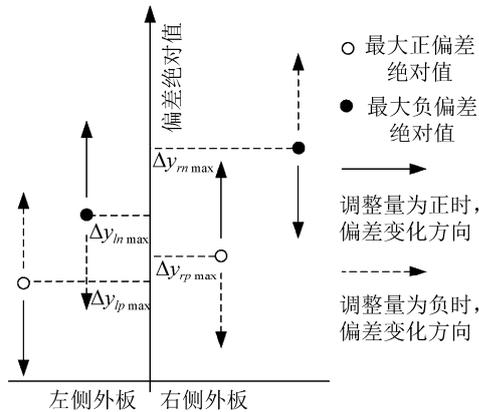


图 11 对中总段外板偏差变化趋势
Fig. 11 Trends of deviation in different side plates

对中总段的横向调整可以看成对中总段与基准总段外板曲线的匹配过程，即通过调整对中总段的 Y 向位置，使对中总段外板曲线与基准总段外板曲线的偏差最小，这类似于曲线拟合问题，因此可用最小二乘法求解，这种方法以综合偏差值最小为调整目标，对于偏差值较集中的情况，可快速求出最佳调整量，但对于存在若干测量点偏差较大的情况，求出的调整量可能并不适合，如图 12 中的曲线 1，并不能使对应点间偏差能被

控制在一定的误差范围内(曲线 2)。

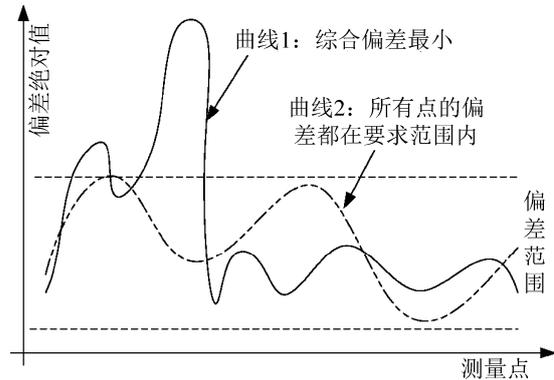


图 12 不同调整目标结果
Fig. 12 Results of different targets

本节根据要求的误差范围 E ，逐步排除那些不能通过改变对中总段位置进行偏差调整的测量点，确定最佳调整量使测量点的偏差都在误差范围内，被排除的测量点需要工人在焊接前进行线型处理，具体计算过程如下：

步骤 1：获得左、右侧外板的最大正偏差和最大负偏差绝对值 $\Delta y_{lp\max}$ ， $\Delta y_{ln\max}$ ， $\Delta y_{rp\max}$ ， $\Delta y_{rm\max}$ ，由调整对中总段时，偏差变化趋势是否相同，将其分成两组 $K_1\{\Delta y_{ln\max}, \Delta y_{rp\max}\}$ 和 $K_2\{\Delta y_{lp\max}, \Delta y_{rm\max}\}$ ；

步骤 2：提取 K_1 中的较大值 k_1 和 K_2 中的较大值 k_2 ，在图 11 中， k_1 为 $\Delta y_{ln\max}$ ， k_2 为 $\Delta y_{rm\max}$ ，而且满足 $k_1 < k_2$ ，此时使对中总段沿 Y 轴正向调整 $(\Delta y_{rm\max} - \Delta y_{ln\max})/2$ 的距离，可使所有测量点的偏差都在 $(\Delta y_{rm\max} + \Delta y_{ln\max})/2$ 之内。其他情况见表 1。

表 1 调整方案

| Tab. 1 Adjustment scheme | | | |
|--------------------------|---------------------|-------------|--|
| k_1 | k_2 | 关系 | 调整量 |
| $\Delta y_{rp\max}$ | $\Delta y_{lp\max}$ | $k_1 > k_2$ | $-(\Delta y_{rp\max} - \Delta y_{lp\max})/2$ |
| | | $k_1 < k_2$ | $(\Delta y_{rp\max} + \Delta y_{lp\max})/2$ |
| $\Delta y_{rp\max}$ | $\Delta y_{rm\max}$ | $k_1 > k_2$ | $-(\Delta y_{rp\max} - \Delta y_{rm\max})/2$ |
| | | $k_1 < k_2$ | $(\Delta y_{rp\max} + \Delta y_{rm\max})/2$ |
| $\Delta y_{ln\max}$ | $\Delta y_{lp\max}$ | $k_1 > k_2$ | $-(\Delta y_{ln\max} - \Delta y_{lp\max})/2$ |
| | | $k_1 < k_2$ | $(\Delta y_{ln\max} + \Delta y_{lp\max})/2$ |
| $\Delta y_{ln\max}$ | $\Delta y_{rm\max}$ | $k_1 > k_2$ | $-(\Delta y_{ln\max} - \Delta y_{rm\max})/2$ |
| | | $k_1 < k_2$ | $(\Delta y_{rm\max} - \Delta y_{ln\max})/2$ |

步骤 3: 计算调整后各测量点处的偏差值 $\Delta y_{mi}' (i=1 \cdots N)$, 如果满足 $\Delta y_{mi}' < E (i=1 \cdots N)$, 则执行步骤 5, 否则执行步骤 4;

步骤 4: 删除 k_1 和 k_2 中的较大值, 即排除偏差绝对值最大的测量点, 跳到步骤 1;

步骤 5: 输出调整量, 结束计算过程。

4 应用实例

基于上述研究, 开发了巨型总段移位对接仿真验证系统 JN-ESVS-GBLOCK (Erection Simulation and Verification System for Giant Block, Jiangnan), 该系统面向船舶工艺设计人员, 主要用于巨型总段移位对接的工艺仿真与对接方案规划。

以某型船舶的巨型总段移位对接为例, 本节对上述方法进行验证。该船舶模型由 4 个巨型总段组成。为了提高工艺仿真的效率, 首先对模型进行转化和轻量化处理, 根据工艺工装要求在 JN-ESVS-GBLOCK 上实现仿真模型的综合布置, 如图 13 所示。

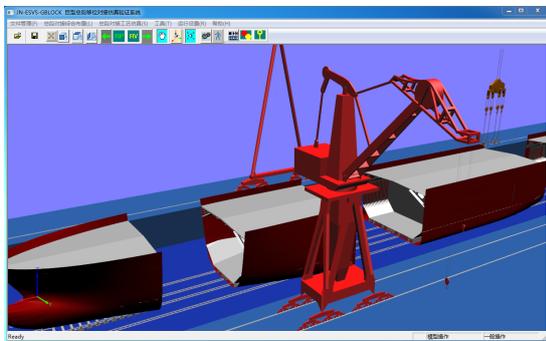


图 13 仿真场景的综合布局
Fig. 13 Layout of simulation scene

建立碰撞模型对移位对接过程进行动态干涉检查, 系统使发生干涉的对象高亮显示(红色/黄色), 如图 14 所示, 当两个总段发生干涉碰撞时(纵骨与外板碰撞), 基准总段高亮为红色, 对中总段高亮为黄色, 这就向设计人员表示当前对接工艺不符合要求, 需要进行调整。

建立虚拟人模型并将其布置在一些关键位置, 调整虚拟人各关节以获取合适的观测姿态,

通过虚拟人的视野情况来判断观测位置选择的合理性, 如图 15 所示, 对于出现干涉碰撞但未布置观测点的位置, 需要工艺人员对工艺工装进行修改或在此处增加观测点, 虚拟人观测点的位置将用于确定施工现场操作工人实际观测位置。

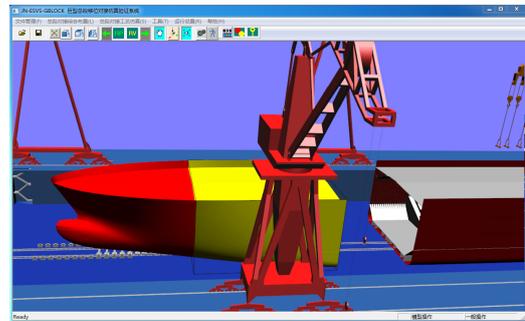


图 14 动态干涉检查
Fig. 14 Dynamic interference checking



图 15 虚拟人视野检测
Fig. 15 Vision detection of virtual human

在测量点设定模块可以在外板上完成测量点的设定, 并将实测数据的导入, 以建立起基于 CAD 设计模型和实测数据的计算模型, 如图 16 所示。

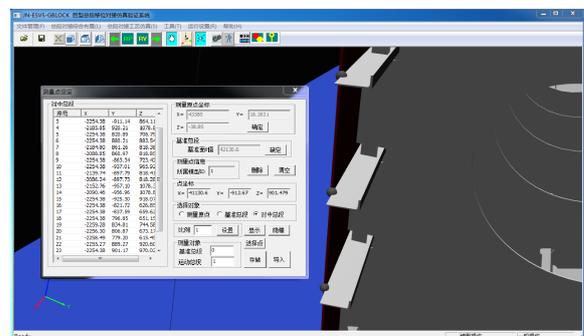


图 16 测量点设定
Fig. 16 Setting of measurement points

图 17~18 是利用顶起量自动计算功能实现工艺可行性验证与对接方案优化的实例，根据实际测量数据，设定间隙阈值为 6 mm，选择 100%(所有测量点都参与计算)，最大顶起量为 200 mm。如图 17 所示，系统将自动计算出顶起量为 56 mm，最小与最大相对间隙为 6.073 mm 和 16.444 mm，满足所有相对间隙值都大于间隙阈值的要求，此时对中总段可顺利插入基准总段。



图 17 间隙阈值 6 mm, 100%

Fig. 17 Threshold 6 mm and percentage 100%



图 18 间隙阈值 14 mm, 85%

Fig. 18 Threshold 14 mm and percentage 85%

如果总段建造误差较大，所需要创造的相对间隙也会较大，若以间隙阈值为 14 mm，其余参数保持不变进行计算，此时得到顶起量为 200 mm，此时无法时所有测量点与基准总段外板间的间隙值都符合要求，因而只能优先保证一部分测量点符合要求，图 18 中选择 85%，即只需保证 85%的测

量点与基准总段外板间的间隙值符合要求，此时计算得到的顶起量为 107 mm。对于其余测量点，工人需要对该测量点对应的纵骨进行切割、修整后，才能将对中总段插入基准总段。

点击“偏差优化”可以得到对中总段沿 Y 向的最佳调整量，如图 18 所示，得到调整量为 1.24 mm。即对中总段沿 Y 轴正向移动 1.24 mm 时，可使大部分测量点与对应点之间的偏差被控制在 5 mm 内，少数测量点(如测量点 1、测量点 4、测量点 14 等)调整后，偏差较大，需要工人进行额外的修整工作。

5 结论

(1) 系统分析和研究了总段移位对接原理，提出了总段移位对接工艺仿真方法，建立了以移位小车与对中小车为核心的工艺仿真模型，设计了工装、总段等与小车间的运动逻辑关系，减少了设计人员的工作量，提高了仿真效率；

(2) 结合总段的实测数据与理论模型，建立移位对接测量模型，完成了移位对接现场向仿真场景的映射，根据设计人员确定的间隙阈值，该模型实时计算各纵骨与对应外板间的间隙，实现顶起量的自动计算与外板对接偏差调整，为设计人员提供重要参考；

(3) 将本方法应用于移位对接工艺设计中的工装布置、工艺仿真、动态干涉检测、工人视野显示，工艺可行性验证等方面，有效沟通工艺方案设计与实际生产过程，提高了企业的生产加工效率。

参考文献:

[1] 张光发, 刘玉君, 纪卓尚. 船舶分段建造计划仿真与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2644-2651.
ZHANG Guangfa, LIU Yujun, JI Zhuoshang. Simulation and optimization of ship block-building planning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2644-2651.
[2] 丁伟康. 浅谈巨型总段造船法[J]. 船舶与海洋工程, 2009(2): 42-47.

- DING Weikang. Mega block shipbuilding method[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2009(2): 42-47.
- [3] 王东涛. 船舶环形总段吊带吊装设计 and 应用研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(4): 65-69.
- WANG Dongtao. Condole Belt Lifting Design and Application Research of Ship Ring Total Period [J]. Ship Engineering, 2015, 37(4): 65-69.
- [4] Zhang B L, Boo S H, Kim J G. A new block assembly method for shipbuilding at sea[J]. Structural Engineering and Mechanics (S1225-4568), 2015, 54(5): 999-1016.
- [5] 陈宇. 船体总段自动合拢小车控制模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- CHEN Yu. Research on the kinetic Model of Automatic Attitude Adjustment for Ship Block[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [6] Kim H, Lee S S, Park J H, et al. A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing (S0951-192X), 2005, 18(6): 427-441.
- [7] Rose C D, Coenen J M G. Automatic generation of a section building planning for constructing complex ships in European shipyards[J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 2016, 54(22): 6848-6859.
- [8] Park K P, Ham S H, Lee C Y. Application and validation of production planning simulation in shipbuilding[J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2016, 114: 154-167.
- [9] Lee D K, Kim Y, Hwang I H, et al. Study on a process-centric modeling methodology for virtual manufacturing of ships and offshore structures in shipyards[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2014, 71(1): 621-633.
- [10] 王津剑, 杜吉旺, 范秀敏, 等. 复杂形状船舶分段建造空间调度优化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 2945-2954.
- WANG Jinjian, DU Jiawang, FAN Xiumin, et al. Complex shape shipbuilding block spatial scheduling algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11): 2945-2954.
- [11] 伍朝晖, 杨云飞, 蔡乾亚, 等. 船舶分段装焊工艺建模及狭小操作区域搜索方法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10): 2638-2645.
- WU Zhaohui, YANG Yunfei, CAI Qianya, et al. Research on Welding Process Modeling and Narrow Operating Area Searching for Shipbuilding Block[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2638-2645.
- [12] Takechi S, Aoyama K, Nomoto T. Studies on the block positioning metrics system for the hull erection stage[J]. Journal of Marine Science and Technology (S0948-4280), 2002, 6(3): 158-167.
- [13] Takechi S, Aoyama K, Nomoto T. Studies on the block positioning metrics system for the hull erection stage[J]. Journal of Marine Science and Technology (S0948-4280), 2002, 6(3): 158-167.
- [14] 陈文豪. 基于测量数据的大部件对接装配仿真技术研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- CHEN Wenhao. Research on the Technology of Large Parts Assembly Simulation Based on Measurement Data and Its Application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [15] 任刚. 船体分段三维测量及对齐系统控制策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- REN Gang. Research on 3D Measurement and Position Control Method for Hull Block Construction[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [16] 江南. 纵骨的故事[J]. 现代舰船, 2012 (7): 3.
- JIANG Nan. The Story of Longitudinal[J]. Modern Ships, 2012 (7): 3.
- [17] 邱世广, 范秀敏, 武殿梁, 等. 虚拟操作仿真环境中基于运动捕获的虚拟人实时控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 523-528.
- QIU Shiguang, FAN Xiumin, WU Dianliang, et al. Virtual Human Real-time Control Technology Based on Motion Capture in Virtual Simulation Environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(3): 523-528.
- [18] 魏大韩. 船舶巨型总段建造法关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- WEI Dahan. The Research of Key Technology on the Shipbuilding Method using Grand Block[D]. Harbin Engineering University, 2012.