

## 船舶曲面分段制造关键技术\*

## Key Manufacturing Technology of Ship Curved Section

江南造船(集团)有限责任公司 陈 勇

**[摘要]** 曲面分段制造是船体建造过程中的一个非常重要的环节,主要包括零部件配送、胎架制造、曲面分段快速成组及精度控制等多个工序。突破船舶曲面分段制造关键技术,是实现曲面分段制造模式升级换代,推动船舶曲面分段的建造效率和能力进一步提升的关键所在。

**关键词:** 船舶 曲面分段 柔性生产

**[ABSTRACT]** Curved section manufacturing is an important part of the process of hull construction, including spare parts distribution, curved plate jig manufacturing, curved section fast group and precision control and other process. The breakthrough of key manufacturing technologies for ship curved section, is the key to realize curved section of manufacturing upgrading, promote construction efficiency and ability of ship curved section.

**Keywords:** Ship Curved section Flexible production

分段是现代造船最经典、最重要的中间产品。按其外形特征可以分为平面分段(Flat Section)和曲面分段(Curved Section)两种。平面分段是由平直列板与相应的骨材装配结合而成的船体分段;曲面分段是由曲面列板与相应管架所组成的船体分段<sup>[1]</sup>。

现代船舶船体线型曲率变化大、要求高,给船体快速制造带来了较大困难。一般船舶曲面分段总数约占全船分段总数的80%,船体分段的建造总工时占全船总工时的30%,要确保曲面分段的顺利完工,需要耗费大量的人力和物力,曲面分段的建造效率直接影响着船舶的建造周期与效率。

面对国家海洋战略转型的发展需求,传统的船舶建造技术已不能满足当前生产需求。因此,曲面分段快速建造显得尤为重要,开展船舶曲面分段制造关键技术的研究,为曲面分段快速制造提供技术支撑,建立适应现代造船模式的曲面分段生产方式,从而推动船舶曲面分段的建造效率和能力进一步提升,是我国船舶建造模式升级换代的必由之路。

## 1 国内外现状分析

20世纪90年代,日本、韩国、美国和欧洲诸国比较先进的造船企业较早地进行以柔性制造为基础的曲面分段流水线的研究和应用。

日本石川岛播磨重工业公司(IHI)建成了高度自动化的曲面分段制造车间。日本三菱重工(MHI)神户造船所采用自适应控制系统实现船体甲板、内底板及舷侧板等关键零部件的快速生产和加工,并以柔性生产线模式组织生产,全程计算机集中控制,自动化程度达到90%。韩国的造船工艺自动化技术也已经深入到众多大船厂,尤其是船体板材加工自动化车间,已实现了设计制造信息一体化,如图1所示,整个流水线由几个连续的工位组成,完成由拼板、构架安装、构架电焊到形成曲面分段的过程,各工位节拍相近,形成了流水化作业

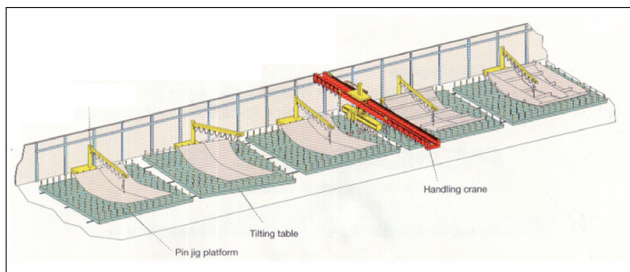


图1 国外曲面分段流水线示意图

Fig.1 Diagram of foreign curved section line

方式,极大地提高了曲面分段的制造效率。

我国船舶曲面分段制造大多采用在固定工位上完成分段制造的方式组织生产,其生产流程比较单一,不符合分道分流的先进建造理念,主要存在以下问题:零件配送无专用托盘管理,状态较差;各工种作业相互干涉,作业自动化程度低;精度控制水平不高,造成大量无效作业;生产周期长、效率低等。

我国部分大中型造船企业通过“十五”、“十一五”期间重大专项的支持,在工艺和装备技术方面发展迅速,已在曲面分段制造方面形成了相对固定的流程,初步形成分道制造,已经积累了一些精度控制方面的技术,并引进和自行研制了部分机械化的设备。但是,对国外先进船厂,我国在曲面分段建造技术上还存在较

\* 国防基础科研重大项目(A0720131002)资助。

表1 国内外技术与装备差距对比

差异要素	国外现状	国内现状
生产模式	流水线生产	固定胎位生产
零部件配送	托盘管理	人工管理
快速成组	分道制造,节拍生产	初步形成分道制造
精度控制	采用精度预测技术,以补偿量替代余量;采用计算机分析、模拟和工艺优化采用与计算机连接的实时测量装置;制订精度控制工件及曲面分段安装的精度控制标准;有完备的精度管理体系	依据经验做法,普遍留有余量;较少研发精度控制工件;经验型管理,体系不完备
划线机设备	采用自动划线写字功能	手写
钢板切割设备	实现自动带切口切割机	较少使用带切口切割方式
钢材冷加工设备	多柱弯板机设备	定制模具、手工操作
钢板热加工设备	自动化高频感应热设备	传统水火弯板
型材切割设备	自动下料并切割	手工下料切割
型材加工设备	自动加工	手工加工
曲板测量设备	三维成像曲板检测设备	样板及样箱
数字化胎架	多维度液压顶升装置等	固定模板胎架
焊接方式	自动化焊接机器人	手工加半自动
矫正工艺	自动化中频感应热矫平设备	水火矫正

表2 国内外TQC差距对比

差异要素	国外现状	国内现状
建造质(Q)	专业化生产、较高的精度水平以及保证了建造质量	精度控制水平低,建造质量保证能力不足
建造周(T)	无统计数据	一般曲面分段建造 80 天
建造成(C)	无统计数据	因精度控制与管理水平不高,无效作业、不增值作业、修改返工环节多;钢材利用率较低

大差距,如表 1、2 所示。

## 2 关键技术

根据国内外曲面分段制造充分的对比分析,重点研究零部件托盘精细化配送技术、数控胎架与船体结构的数字化拟合技术、曲面分段快速成组技术、曲面分段精度控制技术等多个方面内容,攻克曲面分段制造各环节中的难点,建立具有中国技术特征的曲面分段制造技术体系,探索出新一代国内曲面分段快速制造模式。

### 2.1 零部件托盘精细化配送技术

零部件托盘是曲面分段组织生产管理的关键。将

各类船舶零部件按照相应的特点进行流程划分、分类整理存放、按时按需配送,充分满足流程、流向、工位、工序的要求,并进行全过程的信息跟踪,满足生产情况变化与反馈的要求,使船舶的建造过程达到有序、均衡、可控

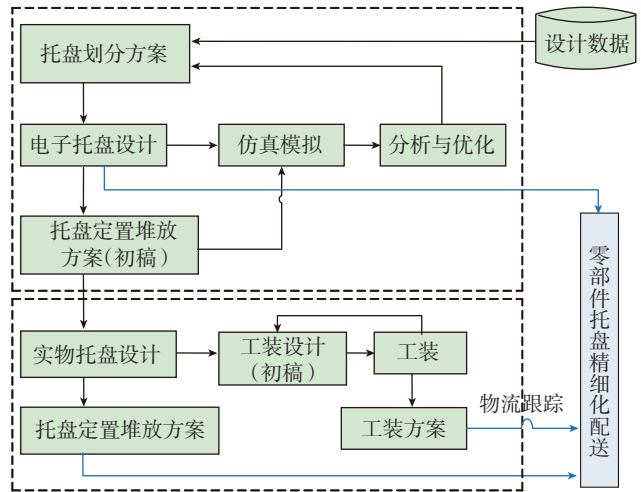


图2 零部件托盘精细化配送技术方案

Fig.2 Fine distribution scheme of parts tray

的状态,实施节拍生产<sup>[2]</sup>。其技术方案如图 2 所示。

### 2.2 数控胎架与船体结构的数字化拟合技术

胎架是船体结构装配和焊接必须的工艺装备,它的工作面应与船体结构的外形相贴合,使曲面分段的装配焊接工作具有良好的条件。目前,曲面分段的胎架的制作周期长、精度要求高,模板胎架的装配制作已经成为制约曲面分段制造周期的重要因素。

开展数控胎架与船体结构的数字化拟合技术研究,研究曲面分段胎架的设计要求,形成胎架设计规范,保证曲面分段有正确的外形和尺寸;用数控胎架取代传统模板胎架(或支柱式胎架),使胎架通用性和适用性更强,缩短胎位周期,实现曲面分段柔性生产<sup>[3]</sup>。其技术方案如图 3 所示。

### 2.3 曲面分段快速成组技术

结合典型船曲面分段结构的特点,采用快速成组技术的流程分解法,把复杂的生产流程按小组立、中组立分解为分道生产流程,把需要相同加工设备,具有相似工艺过程的零件集合成组;扩大中组立,把大曲度分段分解成尺寸、结构形式、组装工艺基本相同的小曲度部件或平面部件成组建造,通过对中小组立等中间产品作为中间产品组织专业化生产,建立互不干扰的分道生产流程,不同工位、工序同步作业、提高曲面分段建造效率<sup>[4]</sup>。

#### 2.3.1 曲面分段中间产品划分技术

曲面分段中间产品划分技术包括曲面分段分类和曲面分段结构分解。曲面分段分类是根据分段划分图

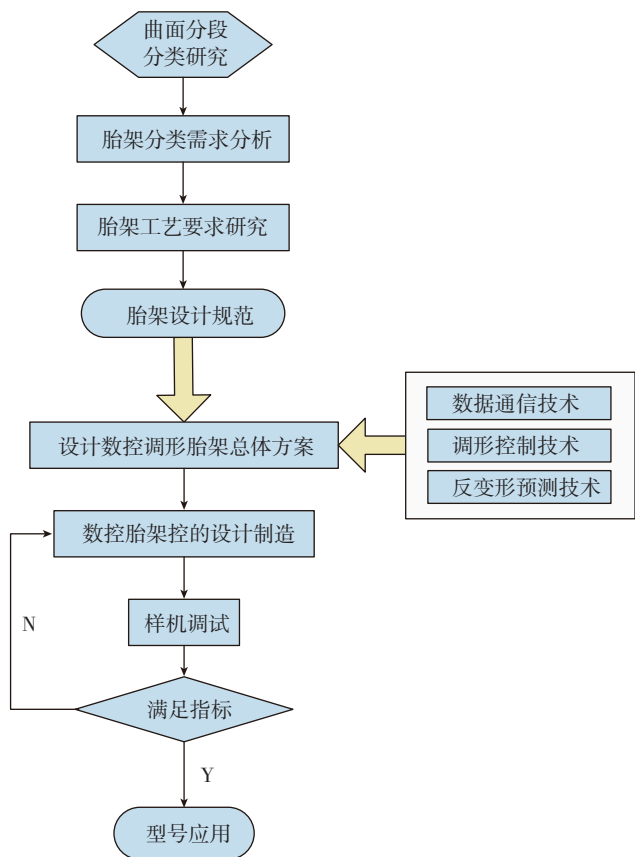


图3 数控胎架与船体结构的数字化拟合技术方案  
Fig.3 Digital fitting technology scheme of CNC jig and hull structure

和分段结构形式,对曲面分段进行分类,主要包括:底部分段、艏部分段、艙部分段、舷侧分段和甲板分段等。

围绕分段部件化同步建造,工序和工种专业化合拢的要求,按照不同类型曲面分段的结构特点,将曲面分段结构进行分解,制定曲面分段装配时中间产品划分方案,进行中小组立等中间产品划分,如图4所示,形成结构相对完整的中间产品同步装配,实现节拍化的曲面分段制造生产模式<sup>[5]</sup>。

### 2.3.2 曲面分段中间产品快速成组工艺技术

通过编制曲面分段的建造流程图,细化各级中间产

品的从属关系和装配顺序,制定关键点的施工工艺和精度控制措施,编制各曲面分段施工工艺文件。

改进部件合拢组成完整曲面分段的装配流程,尽量减少非中间产品零件,减少无效作业环节,满足曲面分段制造节拍要求,实现曲面分段快速装配。

### 2.4 曲面分段精度控制技术

结合曲面分段制造工艺特点及对曲面分段完工精度要求,研究曲面分段制作过程中的变形规律,制定曲面分段的精度控制技术,有效的预防和控制曲面分段的变形,在曲面分段的无余量建造上取得突破,为提高船舶建造质量和效率提供技术支撑,实现曲面分段的高精度建造<sup>[6]</sup>。主要解决途径如图5所示,具体如下:

- (1) 根据曲面分段变形发生的诱因及阶段,对分段变形进行分类分析;
- (2) 根据变形类型的分析,研究影响变形的关键因素;
- (3) 在精度测量积累数据的基础上,采用理论计算与现场试验相结合的方式,量化补偿量和反变形;
- (4) 针对变形因素的影响趋势以及量化的数据,制定相应的预防变形或反变形措施。

## 3 结束语

目前,日本、韩国的现代化船厂均采用了流水线的方式组织曲面分段的生产,其自动化程度较高,适用范围广(具有足够的柔性)。通过开展船舶曲面分段制造关键技术的研究,借鉴国外先进曲面分段流水线式生产技术,结合我国曲面分段制造经验以及现有的技术和设备条件,梳理曲面分段生产各工序,攻克其相关关键技术,建立具有我国船舶建造技术特征的曲面分段制造技术体系,实现船舶曲面分段柔性生产,为船舶工业的绿色化、智能化、数字化和可持续发展提供强有力的技术支撑。

### 参考文献

[1] 应长春. 船舶工艺技术. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.

(下转第92页)

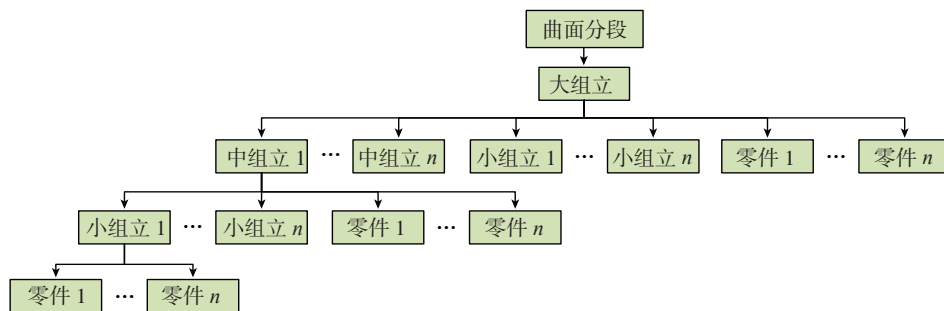


图4 曲面分段结构分解  
Fig.4 Structure decomposition of curved section

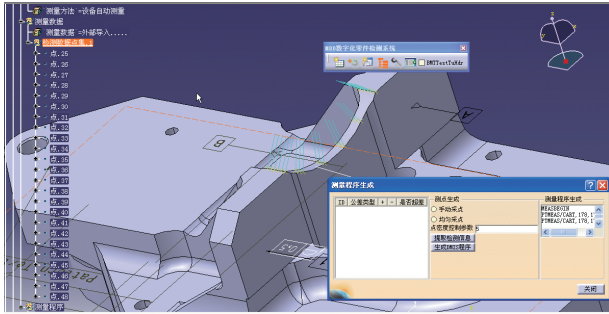


图5 测量程序的生成

Fig.5 Measurement program generated

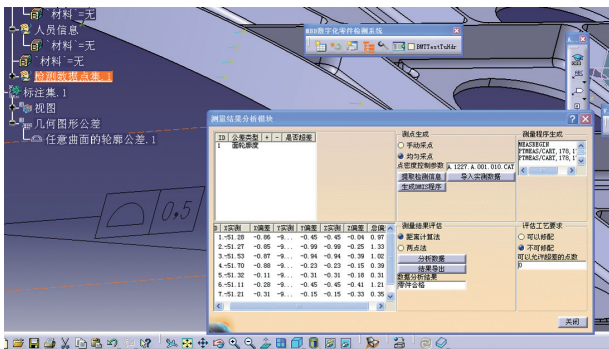


图6 检测结果评价

Fig.6 Inspection results evaluation

据交换的格式。针对不同的功能实现,系统按照 DMIS 格式设定了相应的关键词和变量以及语句字符串的输出格式,用户只需要在相应的界面上执行相关的操作和数据输入而无需了解 DMIS 语句如何编写,系统将自动根据得到的各种数据信息自动生成不同的 DMIS 语句。

### 2.3 检测结果自动评价

将三坐标测量机实测数据读回软件系统,评估所有的点位数据,从而对要检测的特征做出判断,得到零件是否符合质量要求的结论。软件运行的界面如图 5、6 所示。

## 3 结论

通过 MBD 的设计思想,提高了零件检测的效率,简化了零件检测的工艺流程,论文结合三坐标测量机对典型飞机结构件的轮廓度进行了检测,相比传统的零件检测方法具有一定的优势。

论文提出的 MBD 检测模型和开发的软件框架具有理论和实际应用意义。

### 参考文献

[1] ASME Y14.41-2003 (R2003), Digital Product Definition Data Practices.  
 [2] 王世刚. 基于 CMM 测量路径优化算法的研究. 机械科学与技术, 2005(5):1-2.

(责编 小城)

(上接第 77 页)

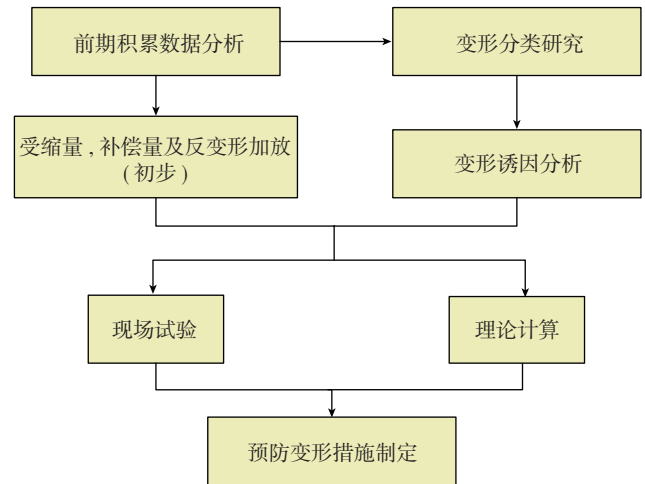


图5 曲面分段精度控制技术解决途径

Fig.5 Accuracy controlling solution for curved section

[2] 缪顾贤, 李冰雄. 造船企业基于托盘管理的舾装件集配管理体系研究. 商业现代化, 2009(3):136.

[3] 余建国, 顾永风. 基于中心制造船的柔性胎架分析与设计. 舰船科学技术, 2008, 30(1):120-123.

[4] 翁德伟, 徐学光, 陆伟东. 造船成组技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.

[5] 张明华. 精益造船模式研究. 北京: 中国经济出版社, 2005.

[6] 高介祐. 船体建造精度管理. 北京: 中国船舶工业总公司船体建造精度管理指导组, 1988:115.

(责编 深蓝)

(上接第 88 页)

的设计和公差的分析计算,对反馈数据进行处理等工作。

可以看出,喷管转角标定是通过测量系统采集数据传递给数据处理中心,发出控制指令,最后通过数字化跟踪执行器调整确定实测部位的准确位置。

## 5 方案实施效果

首先,实现了我国首台新型喷管的虚拟装配,并确定了装配工艺优化方案,以可视化工艺模式指导现场装配,其指导性及可操作性明显增强,避免了由于装配方案不正确和装配干涉导致返工而造成的浪费,缩短了装配周期,提升了装配质量,加快了研制进度。

其次,应用数字化激光测量技术测得的喷管空间转角值与给定值误差不大于  $\pm 1^\circ$  (见表 1),满足技术条件要求,实现了喷管空间转角的准确标定。

### 参考文献

[1] 范玉青. 飞机数字化装配技术综述. 航空制造技术, 2006(10):42-48.  
 [2] 孟飙. 基于激光跟踪的数字化装配系统研究. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 26(5): 1-6.

(责编 谷雨)