

# 基于规则推理的自动船体装配工艺生成方法

张志英, 江志斌

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对船体装配以经验为主的现状, 根据船体零部件装配关系的特点, 利用扩展的“赋权有向连接图”和边列表的方法表达船体装配模型和装配序列. 分析了船体零件的形状和装配特征, 归纳常用零件的装配元素和装配零件, 并以规则推理方式实现装配工艺的自动生成, 开发计算机辅助自动船体装配工艺原型系统. 以一个典型船体分段的装配过程为例进行实验表明, 利用该方法可有效提高船体装配效率和质量.

**关键词:** 规则推理; 船体; 装配工艺

**中图分类号:** TP 391; U 671      **文献标识码:** A

## Approach on Automation Method of Hull Assembly Process Based on Rule Reasoning

ZHANG Zhi-ying, JIANG Zhi-bin

(School of Mechanical Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The modeling of hull assembly process and assembly sequence planning was developed. An extended weighted directed liaison graph was proposed to represent the model of hull assembly according to the characteristics of assembly relation of hull. Meanwhile an edge list was used to represent the assembly sequences. Shape and assembly features of hull parts were analyzed to conclude the assembly elements and matched parts of common hull parts. Automation generation of assembly sequences for hull parts was achieved by means of rule reasoning. A prototype system of assembly sequences automation generation was built.

**Key words:** rule reasoning; hull; assembly process

随着造船技术的发展, 在船体建造方面, 船体结构零件的设计、放样及下料已经可以大范围地应用计算机和数控设备代替人的手工作业. 在船体焊接中, 各种先进的焊接手段在生产中得到应用, 但船体分段的装配却仍然处于手工操作阶段. 目前, 中国船厂的船体装配还是由装配工人和吊车司机互相配合吊运、安装零部件. 由于船体零部件的体积和重量

大, 且需要精确定位, 因此, 船舶装配作业很大程度上依赖于操作者个人已有的装配经验. 但这些经验还停留在个人理解和掌握阶段, 没有形成标准的装配作业规范. 随着有经验工人的退休, 新的装配工人还需要不断摸索积累船体装配的经验, 影响装配作业的效率与质量. 而且, 由于装配条件的变化、工人情绪等影响, 即使这些有经验的装配工人在装配生

收稿日期: 2005-11-26

基金项目: 上海外高桥造船有限公司资助

作者简介: 张志英(1971), 男, 内蒙古卓资人, 博士, 讲师, 主要从事制造执行系统、船舶制造等研究. 电话(Tel.): 021-34206579;

E-mail: zhangzy@sjtu.edu.cn.

产过程中,可能也无法保证每次的判断与规划都完全相同.因此,单纯依靠经验的装配作业形式严重影响了船体装配的质量和效率的提高.

对于产品装配方面的研究有很多,如产品装配工艺建模<sup>[1]</sup>,装配序列生成方法<sup>[2,3]</sup>,装配序列表达等.目前,装配序列规划主要采用手工方法完成,装配方案的好坏在很大程度上依赖于装配工程师的知识和经验,从而造成装配成本、装配质量和时间的浪费和不确定.因此,船体装配过程和装配顺序规划是一个需要经验、充满许多不确定性的过程.将有经验的、熟练的装配工程师的装配经验经过归纳、整理,形成一系列装配规则,实现装配顺序规划的自动化对于提高船体装配效率、装配质量和船舶生产效率具有重要的意义.

本文分析船体装配过程,归纳形成一系列装配规则,用推理方式自动产生船体装配序列,并以船体实际装配过程为例验证该方法的有效性和实用性.

## 1 船体装配序列规划

### 1.1 船体装配工艺建模

由于受焊接手段及精度控制技术的制约,目前船体分段建造大多采用正造法、反造法和混合建造法<sup>[4]</sup>.由于零件焊接收缩受到板件的制约,这种建造流程会引起分段的总体变形,而且胎架的使用周期长,装配全部依赖经验和手工操作完成,效率极低、质量无法保证.

船体零件都是由钢板切割成型的板状零件,零部件之间的连接是通过焊接来完成的.船体零部件装配具有以下特点:零部件重量和体积都很大;需要多人互相配合、协作完成;需要利用专门的设备辅助装配过程;多数零件具有有限的装配方向;需要较多的工艺装备保证装配质量;装配具有更多的机械约束.

对于装配关系的描述,许多研究都是将零件作为装配的基本元素,并利用图论的方法描述零件之间的装配关系.它们用结点表示零件,边表示装配关系,零件间的装配关系通过有向关联图  $D = \{P, C\}$  表示,其中:  $P = \{p^1, p^2, \dots, p^n\}$ , 为零件集合;  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ , 为零件之间联系的集合,零件之间的联系主要指零件间的接触关系和装配先后次序要求<sup>[5]</sup>.这种表示方式对于简单装配关系的表达是非常有用的,对于船体装配这种复杂的装配关系就无法有效应用.主要原因是:船体零件形状复杂,2个零件间可能存在多种可行的装配位置,利用结点表示零件的方法显然是不合适的,太过粗糙;船体装配关系复杂,需要描述的信息多,如装配类型、

焊接类型、装配长度、焊接长度等,仅用一个权值无法表述完全.

船体装配关系中零件和零件、零件和组立以及组立和组立之间的装配顺序关系主要是由其结构形式及其在这一产品中所起的作用决定的.船体装配顺序关系可以利用图论中赋权有向联接图  $G = (V, E)$  表示,节点  $V$  表示装配关系的起点和终点,边  $E$  表示一个与之对应的装配关系.

在船体装配关系中,将零件作为装配关系描述中的起点和终点是不够的,还须描述参与装配零件的具体装配部位.研究发现,不同形状的零件其可能用来装配的部位是不同的.比如方形  $K$  板,其可能用来装配的部位有 6 个:4 条边和上下表面,而平直  $L$  型钢,其可能的装配部位只有 1 个,即长边边缘.这种参与装配的零件部位称为装配元素.一个装配关系对应 2 个装配元素,1 个是起点元素,另 1 个是终点元素.

针对复杂的船体装配关系,本文采用扩展的赋权有向连接图来描述船体装配工艺模型,它是指在赋权有向连接图的基础上增加有关装配元素、装配长度、焊接长度等信息,以适合船体装配工艺建模的要求.

扩展赋权有向连接图可表示为  $EG = (V', E')$ , 其中:  $V'$  表示扩展节点;  $E'$  表示扩展边.在扩展的赋权有向连接图中,扩展节点代表零件及其属性,扩展边代表零件之间的联接关系及其属性.零件属性包括代号、名称、类型、形状、尺寸、位置、方向、材料、重量、误差、功能;联接关系属性包括第 1 个零件的装配元素、第 2 个零件的装配元素、联接关系类型、装配长度和焊接长度.其中,联接关系类型包括零件对接、零件插接、零件角接和零件面对面贴接,如图 1 所示.

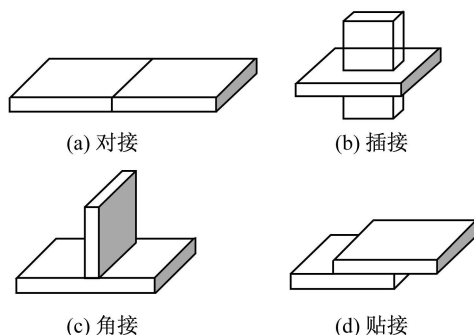


图 1 船体零件联接类型

Fig. 1 The joint type of hull block part

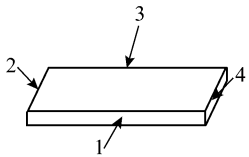
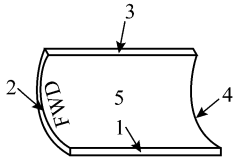
### 1.2 船体零件类型和主要装配元素

中国某造船厂常用的零件类型主要有 14 种,按

照其在船体分段中的功能不同, 分别表示为 A、B、C、D、E、F、K、L、M、P、S、W、X 和 Y。不同的零件类型表示不同形状和功能的零件。具体功能描述如下: A 为未连接基板, B 为肘板, C 为补板, D 为垫板, F 为肋板, K 为单独处理的主板及可连接的基板, L 为纵桁板, M 为甲板, P 为一般的板材, S 为舭龙骨, W 为腹板, X 为纵梁, Y 为普通件, E 为其他零件。在实际应用中, 常用的是 A、B、C、K、L、P、S、W 共 8 种零件类型。其中 C 类补板主要是填补船体装配后形成的间隙(如纵梁 L 和 P 板装配后的间隙), 由于 C 板的装配关系简单, 而且装配量和焊接量在整个船体的装配关系中所占比重很小, 因此在装配关系描述时, 不予考虑。本文主要研究实际装配过程中使用的 7 种主要零件类型, 分别为: A、B、K、L、P、S、W。

虽然常用零件类型只有 7 种, 但对于不同功能类型的零件, 其零件形状也是多种多样。以 K 板为例, 其零件形状就有 10 种以上, 而且不同形状的零件装配关系都有差异, 这给装配关系的描述、装配序列的表达与生成带来很大困难。为分析每种功能类型的零件的形状个数及主要使用的零件形状, 对每一类型零件的形状进行抽样统计。分析结果发现, 对于每一类零件, 在车间生产中经常使用的零件形状还是比较少的。如 K 类常用的零件形状只有 3 种, A、B、L、P、W 常用的零件只有 2 种, S 常用的零件只有 1 种。对这些最常用的零件进行分析, 得到了不同零件形状的所有可能的装配元素。由于篇幅关系, 只列出其中 2 种零件的装配元素(见表 1)。

表 1 主要零件形状及其装配元素

Tab. 1 The assembly element and main part shape				
类型	代号	形状	功能描述	装配元素
A	A1		板条, T 形材的腹板	1~ 4: 零件的 4 条边, 主要与其他零件焊接
			外板, 上层建筑围壁转角板等	5: 零件的内表面, 是其他构件的基板

分析船体装配过程, 发现由不同类型零件构成的装配关系, 装配元素之间存在优先装配顺序, 而且, 不是所有的装配元素都必须与其他装配元素有装配关系。常用零件类型的优先装配元素见表 2。

表 2 常用零件类型的优先装配元素

Tab. 2 The preferential assembly elements of usual parts				
零件类型		优先元素		备注
起点	终点	起点	终点	
A1	W1	1	1	T 型材
L1、S1	A2、K1	1	5	加强材
K1	K1	1、2、3、4	1、2、3、4	拼板作业
P1、P2	A2	1	5	

1.3 船体零件装配的优先级关系

根据船体建造经验, 船体分段划分时, 一般要具有稳定的结构, 即构成船体分段的零部件由基板、纵桁板、肘板和其他加强材等组成。船体是由零部件组成, 部件由下层次部件和零件组成, 船体与零部件之间及部件与零件、子部件之间是层次关系, 这种层次关系隐含着一定的装配先后关系, 即先装配下层零件, 后装配上层零件。其次, 同层零部件之间也存在一定的关联关系, 这种关联关系并非平等的装配关系, 而是存在等级关系的, 这种有等级的关联关系表明同层零部件之间也存在装配先后顺序<sup>[6]</sup>。

(1) 层次关系。船体装配体是由具有层次关系的零部件组成的, 在装配顺序上表现为由零件组装成部件, 由部件和零件再组装成上层装配体。

(2) 关联关系。通过对船体结构进行研究, 装配零部件之间的关联关系分为 4 类, 即基础件关系: 所谓基础件, 是其他零件装配的基础, 与其他零件关联最多的零件。在关联关系中基础件关系处于最高级别, 优于其他零件装配。支撑关系: 在基础件装配后, 需要装配起支撑作用的零部件, 即为支撑关系。支撑关系仅次于基础件关系, 但高于加强关系和包络关系。加强关系: 主要描述起加强作用的零部件在装配中的关联关系。加强关系次于支撑关系和基础关系, 但高于包络关系。包络关系: 将已经装配好的零部件包络起来形成的关系, 称为包络关系。

根据上述关联等级关系, 得船体零件的装配优先级, 如表 3 所示。表 3 显示了同一层次零件装配时

表 3 船体零件装配等级关联关系表

Tab. 3 The hierarchy correlative relationship of hull block parts				
功 能				
零件类型	基板	肋板	加强材	外盖板
	A1、A2、K1、K3	B1、B2、L1、L2、P1、P2	S1、L1	K2、W1、W2
等级关系	基础件	支撑	加强	包络

的优先级顺序,对于由部件和零件装配形成新的部件的装配优先级也同样适用。

### 1.4 装配序列表达

本文采用扩展的赋权有向联接图表达船体装配模型,为了便于计算机存储、运算和装配序列的表达,采用边列表对联接图进行描述。

边列表是对关联矩阵进行压缩的结果。它由两个  $m$  维向量  $A$ 、 $B$  组成,当对联接图  $G$  的结点和边分别编号后,若边  $e_k = (v_i, v_j)$ , 则  $A(k) = i$ ,  $B(k) = j$ , 即  $A(k)$  存放第  $k$  条边始点  $v_i$  编号,  $B(k)$  存放第  $k$  条边终点  $v_j$  编号。增加一个  $m$  维向量  $Z$  表示权值,若  $e_k$  的权为  $w_k$ , 则令  $Z(k) = w_k$ 。本文用一个 8 维行向量表示一个装配关系中的起点零件、起点零件的装配元素、终点零件、终点零件的装配元素和装配属性(装配顺序、装配类型、焊接类型和焊接长度),从而完整表达一个装配序列的基本内容。

第  $i$  个装配序列的表达形式如下: ((PRI), (STA), (END), (ATT))。其中: PRI 为装配关系优先级; STA 为装配起点元素,包括起点零件和起点装配元素; END 为装配终点元素,包括终点零件和终点装配元素; ATT 为装配属性,包括装配类型、装配长度、焊接长度。

如零件形状 K1、K2 装配在一起的装配序列可以表示为: (1, (K1, 1), (K2, 3), (T,  $L_a$ ,  $L_w$ )) 其中: T 为联接类型,此处是对接,  $L_a$  为装配长度,根据零件几何尺寸获得;  $L_w$  为焊接长度,根据零件几何尺寸获得。

### 1.5 船体装配规则

根据船体装配工艺模型、装配序列表达方法、装配专家知识和经验,建立一系列装配规则。

(1) 装配优先级规则。根据船体零件编号和表 3,得同一层次零件的装配优先级规则:

If PartID= A1 or A2 or K1 or K3 Then PRI OF ASS= 1;

If PartID= B1 or B2 or L1 or L2 or P1 or P2 Then PRI OF ASS= 2;

If PartID= S1 or L1 Then PRI OF ASS= 3;

If PartID= K2 or W1 or W2 Then PRI OF ASS= 4;

对于不同层次的船体零部件的装配优先级,则根据低层优先装配的原则确定。

(2) 零件装配元素匹配规则。根据表 2,得零件装配元素匹配原则:

If PartID 1 = A and PartID2= W Then ASS ELE1= 1 and ASS ELE2= 1;

If PartID 1 = (L1 or S1) and PartID2= (A2 or K1) Then ASS ELE1= 1 and ASS ELE2= 5;

If PartID 1 = K and PartID2= K Then ASS ELE1= (1 or 2 or 3 or 4) and ASS ELE2= (1 or 2 or 3 or 4);

If PartID 1 = (P1 or P2) and PartID2= A2 Then ASS ELE1= 1 and ASS ELE2= 5;

(3) 装配类型规则。

If PartID = A1 or A2 or K1 or K3 Then Type of ASS= “对接”;

If PartID = B1 or B2 or L1 or L2 or P1 or P2 Then Type of ASS = “角接”;

If PartID = S1 or L1 Then Type of ASS = “角接” or “插接”;

If PartID = K2 or W1 or W2 Then Type of ASS = “角接” or “插接”;

(4) 装配属性规则。装配属性包括装配长度、焊接长度。装配长度就是两个零件接触面的长度,即需要焊接的长度。根据零件编号,可以确定零件属性以及装配元素,从而确定装配长度。

## 2 原型系统和实例验证

### 2.1 原型系统

为了提高船体装配序列生成效率,本文利用 VB.net 开发了基于规则推理的船体装配序列自动生成原型系统。系统实现流程如图 2 所示。该系统主要功能有:

(1) 船体装配工艺建模。根据船体结构 BOM 和船体零件信息,形成船体装配工艺模型。

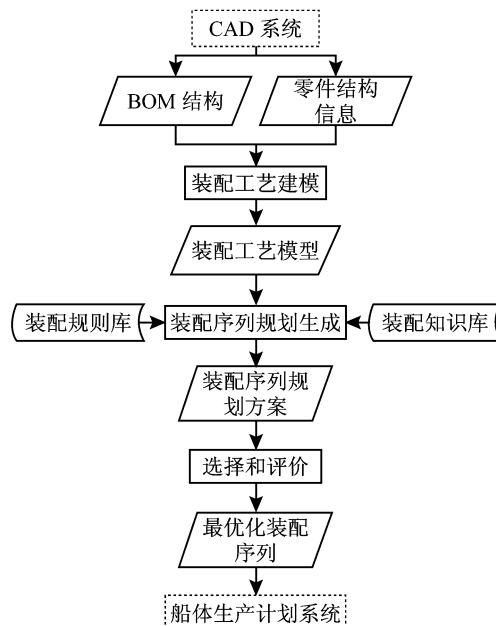


图 2 船体装配序列自动生成实现流程图

Fig.2 The flowchart of the assembly sequences automated generation

(2) 船体装配序列生成. 根据船体装配工艺模型、装配规则和装配知识库, 自动产生船体装配序列方案.

(3) 船体装配序列评价与选择. 对生成的装配序列方案进行评价.

(4) 与船体 CAD 系统和船舶生产计划系统集成.

2.2 实例验证

以上海某造船厂船体加工车间的一个典型船体装配过程为例, 进行验证. 该船体 SS1A 由 2 个外板 (K1、K2)、2 个纵向防挠材 (L1、L2) 和 2 个组件 (FR1、FR2) 构成. 该船体的 CAD 模型如图 3 所示.

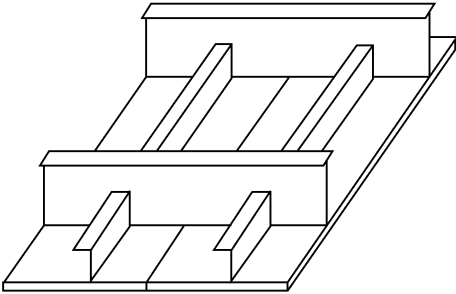


图 3 船体 SS1A 的 CAD 模型

Fig.3 The CAD model of SS1A

针对船体 SS1A, 本文利用船体装配序列自动生成系统生成装配序列, 并利用人机交互功能进行适当的调整, 最终装配序列如表 4 所示.

表 4 船体 SS1A 装配序列

Tab.4 The assembly sequences of SS1A

装配 顺序	起点		终点		装配 类型	$L_a$ /cm	$L_w$ /cm
	零件	元素	零件	元素			
1	K1	1	K2	3	对接	260	260
2	L1	1	K1& K2	5	角接	260	260
3	L2	1	K1& K2	5	角接	260	260
4	FR1	1	K1& K2	5	角接	140	140
5	FR1		L1、L2		插接		
6	FR2	1	K1& K2	5	角接	140	140
7	FR2		L1、L2		插接		

对于 FR1 和 FR2 与 L1、L2 之间的联接, 通过点焊连接, 所以没有对应的装配元素和装配长度.

由于装配序列完整明确地表达船体装配关系的信息, 装配工人根据生成的装配序列进行船体装配作业, 不再需要凭借个人的经验判断和选择, 相对于手工装配作业, 能够快速获得装配序列, 提高船体装配效率.

3 结 语

本文针对目前船体装配主要依赖手工和经验操作, 装配效率不高的现状, 提出了利用扩展的赋权有向联接图建立船体装配工艺模型, 用边列表表达装配序列的方法. 同时研究了常用零件的装配特征和属性, 建立一系列装配推理规则, 开发了自动原型系统, 实例验证表明, 该方法可以有效提高船体装配效率, 为船舶装配自动化和数字化造船提供基础.

参考文献:

[1] LAI H sir Yi, HUANG Chir Tzw u. A systematic approach for automatic assembly sequence plan generation [J]. **International Journal Advanced Manufacture Technology**, 2004, 24(9): 752- 763.

[2] ZHAO L C, ZHU D Q, ZHAO B. Study on intelligent reasoning of product assembly sequences and simulation [J]. **Journal of Materials Processing Technology**. 2003, 139: 476- 480.

[3] 牛新文, 丁 汉, 熊有伦. 计算机辅助装配顺序规划研究综述[J]. **中国机械工程**, 2001, 12(12): 1440- 1443.

NIU Xir wen, DING Han, XIONG Your lun. Research on computer aided assembly sequence planning [J]. **China Mechanical Engineering**, 2001, 12(12): 1440- 1443.

[4] 欧阳北京, 李维嘉. 船体平面分段自动装配线研究[J]. **广船科技**, 2001(3): 28- 30.

OUYANG Bei jing, LI We r jia. Research on automatic assembly line for hull block [J]. **Science Technology of Guangdong Shipbuilding**, 2001(3): 28- 30.

[5] 付宜利, 田立中, 董正卫, 等. 装配关系的有向图表达方法研究[J]. **计算机集成制造系统—CIMS**, 2003, 9(2): 149- 153.

FU Yi li, TIAN Li zhong, DONG Zheng wei, et al. Representation of assembly relations by directional assembly connection graph [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2003, 9(2): 149- 153.

[6] 朱大群, 赵良才, 张 俊. 基于层次等级关联关系模型的装配序列规划[J]. **华东船舶工业学院学报**, 2000, 14(1): 71- 75.

ZHU Da qun, ZHAO Liang cai, ZHANG Jun. A model of generating assembly plan based on level hierarchy connection relation model [J]. **Journal of East China Shipbuilding Institite**, 2000, 14(1): 71- 75.