

基于有向图的飞机数字化装配生产线全局建模

Global Modeling of Digital Aircraft Assembly Line Based on Directed Graph

西北工业大学机电学院 赵利民

[摘要] 根据飞机装配生产线中产品的构成及装配方式等特点,涵盖装配信息引入和装配信息退出的概念,实现飞机装配关系建模的有向图表示。结合层次模型和关系模型特点,将装配过程信息引入装配模型中,并追加数字化装配系统信息,采用邻接矩阵表示法来存储分层模型中的各类信息,建立基于分层有向图的飞机装配生产线模型。

关键词: 飞机装配 分层有向图 邻接矩阵 生产线

[ABSTRACT] Taking the product structure and assembly modes of digital aircraft assembly line into consideration, a aircraft assembly relationship model is presented by directed graph. This model contains the assembly information coming in and coming out from the environment. The assembly process information is imported to the assembly model by layered directed graph, moreover, the assembly system is supplemented to the model. The expression method of adjacency matrix is utilized to store kinds of information of the layered directed graph model, and the global modeling of digital aircraft assembly line is established.

Keywords: Aircraft assembly Layered directed graph Adjacency matrix Assembly line

飞机装配是飞机研制的一个重要环节。装配过程是将大量飞机零件按照设计和技术要求进行组合、连接,逐步装配成组件、部件,最后将各部件对接成整架飞机的过程,而飞机的装配方式也是一个逐步变化的过程。随着CAD/CAM技术、计算机信息技术、自动化技术和网络技术的发展,数字化装配技术逐步取代传统手工装配操作,并逐步形成柔性化、自动化的装配生产线。现代飞机装配的典型特征之一是数字化装配生产线的应用。由于工艺、工装、装配质量等因素的影响,生产线上各装配单元之间存在着紧密的关联和联系,任何一个装配环节的进度和质量都会影响全局生产线的装配效率和精度。因此,为了实现飞机数字化装配生产线的生产能力均衡与动态调度,提高装配效率和装配质量,进行数字化装配生产线全局模型构建成为必要的基础工作。

从装配关系和装配方式的角度来看,数字化装配生产线包括产品和系统2个重要元素。飞机产品外形结构复杂、零件数量巨大、协调关系繁多,一条数字化装配生产线可以看作是由若干个装配操作单元对象构成,如机翼可以划分为左外翼、右外翼以及中央翼,外翼又可以进一步划分为前缘、襟翼、副翼、翼盒等,且每一子部件都是独立的装配单元。数字化装配系统是指实现组件装配、部件装配、部件对接等各层级装配任务的系统集合,主要包括数字化定位系统、自动钻铆系统、机器人制孔系统、数字化测量系统、集成控制系统等。飞机产品由零件按顺序装配依次形成组件、部件到最终的产品,按照装配技术标准和系统模块实时工作状态选择具体系统进行操作,而如何表达这些复杂的关系正是数字化装配生产线全局模型构建的关键。

对于不考虑装配系统的装配过程建模,目前国内有不少研究成果。美国新泽西技术研究所的研究人员^[1]利用面向对象可视化建模工具(Rational Rose)和统一建模语言(UML)技术,建立了一种面向数字化装配线的模型驱动方法,实现了数字化装配生产线的过程建模。美国堪萨斯大学工业工程系的学者^[2]将基于知识的模糊Petri网应用于装配系统的建模过程,实现了装配系统的建模、规划和运行等方面在一定程度上的智能化。美国密歇根大学机械工程学院的研究人员^[3]研究了混合型装配生产线的建模问题,建立了评估单一装配站位和整个装配生产线的复杂性模型,并通过系统设计和决策实现了装配线复杂性的最小化。美国南佛罗里达大学工业工程系的学者^[4]研究了一种用于实现柔性制造系统实时控制的框架模型,该框架模型重点考虑了控制逻辑和制造资源等各种因素,能够指导自动化装配系统的设计。Rivera-Rangel等^[5]研究了离散式制造系统的简化Petri网模型建立方法,简化了系统过程分析,降低了系统模型运算的复杂程度。西北工业大学^[6]基于分层有向图理论,研究了复杂产品装配的分层有向图建模方法,该方法提出利用装配单元划分的思想对装配对象进行分层,并在每层中用嵌套式的有向图表示装配定位关系信息,实现分层有向图模型的建立。张开富等^[7]提出了一种集成装配过程信息的装配建模方法,基于有向图和无向图的连接图模型建立了集成装配过程

信息的装配模型,并采用邻接矩阵表示法对装配模型进行了表示。张杰等^[8]提出了一种基于关系对象 Petri 网的装配系统模型快速构建方法,该方法依据现场组织模式分析了装配作业单元的分解结构,完成了装配系统关系对象 Petri 网的模型定义,建立了作业单元对象和关系的表示方法,阐述了装配单元和逻辑对象模型的构建步骤与规则。上海交通大学的研究人员^[9]在 EOHPN 模型中融入了面向对象的抽象机制,提出了一种扩展的面向对象混合 Petri 网的建模方法,实现了混合系统的建模。华中科技大学的学者^[10]运用 Petri 网方法建立了装配生产线模型,并提出了一种面向装配生产线调度控制系统的优化算法。同济大学的学者^[11]研究了可重构制造系统的重组配置问题,分析了不同配置结构对性能的影响,并根据可重构制造系统的特征,提出了基于权重有向图的配置决策建模方法。

根据飞机装配生产线中产品的构成及装配方式等特点,本文选择更适合飞机装配关系建模的有向图表示,结合层次模型和关系模型特点,将装配过程信息引入到装配模型中,并追加数字化装配系统信息,建立基于分层有向图的飞机装配生产线模型。

1 装配生产线建模元素的有向图定义

从装配过程来看,装配生产线的飞机零件在装配系统及其附属工装夹具的支持下,采用特定的装配操作驱动装配工具将装配单元按照装配功能要求组合成一个整体。装配即“装”与“配”的结合:“装”是合并,是零件数量的增多和产品层级的上升;“配”则是合并的条件,即约束,是子级产品相互位置关系的确定。

装配过程可以分为两个阶段:一是将装配单元和装配过程信息引入到装配环境中,以实现产品装配;二是当完成产品装配后,装配过程信息必须退出装配环境。为了有效地进行装配,装配单元和装配过程信息引入和退出装配环境必须按照一定的优先顺序进行。

装配单元、装配过程信息参与装配的优先关系可以定义为 $L(A, B) = \{LI, LQ\}$,如图 1 所示。实线的 LI 表示引入装配中 A 优先于 B ,虚线的 LQ 表示退出装配中 B 优先于 A 。该关系中附加的装配信息表示为 $R_{LI(A, B)} = \{AC, AS, FR, FX, TL, AO\}$,其中 AC 表示装配单元, AS 表示装配系统, FR 表示装配工装, FX 表示装配夹具, TL 表示装配工具, AO 表示装配指令。

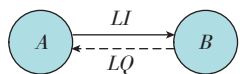


图1 装配关系的有向图表示

Fig.1 Directed graph of aircraft assembly relationship

在表示装配关系的有向图中,图的边附带相关数值属性,称为权值,例如 $Q_{LI(A, B)} = \{AT, AR, AA, AW\}$ 表示从零件 A 到零件 B 的装配成本, AT 、 AR 、 AA 分别是对装配时间、资源、人工等各方面消耗作出的综合评价, AW 表示子级产品装配稳定性。装配稳定性通过装配连接方式和装配支撑关系两个指标来衡量,其中连接方式包括螺纹紧固、物理紧固、铆接、螺栓连接、胶接、焊接等。

2 飞机数字化装配生产线层次关系表达

一个由 N 个零件组成的产品 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ 中,存在若干由 m ($1 \leq m \leq N-1$) 个零件形成的装配单元 $S_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}\}$,且 m 个零件的联接使 S_i 成为一个稳定结构。 S_i 中零件装配完毕后,不影响原装配体 P 中其余零件装配,称 S_i 为一个装配单元或子装配体。

飞机数字化装配生产线的工作过程是将零部件安置到装配位置并连接成组件、段件、部件的生产劳动过程。在设计与制造工艺准备阶段,通过各设计分离面和工艺分离面,一架飞机被逐步分解为多个层次的零部件组合结构。利用这种结构关系,工艺人员可将飞机机体划分为若干个独立的装配单元,不同单元之间包含一定的装配逻辑关系。一般飞机装配过程可分为从低向高的零件装配层、组件装配层、部件装配层、产品层,所有装配作业操作都严格依据这种逻辑关系展开,见图 2。

以 A 表示飞机, P 表示部件, CP 表示分部件, CPC 表示分部件组合件, PC 表示部件用组合件, AC 表示飞机用组合件, S 表示零件^[6],则飞机结构的从属关系可以表达为

$$A \supseteq \{S, P, AC\}, P \supseteq \{S, PC, CP\}, CP \supseteq \{S, CPC\}, CPC \supseteq S.$$

划分层次时,以飞机主体结构设计分离面为基本原则,首先分解到部件级,然后随着设计的进行,由各个部件再逐级分解。在设计分离面不能满足需要时,可以依据工艺分离面进一步细化,以此来表达飞机装配生产线分层有向图的层次关系。

3 飞机数字化装配生产线全局模型构建

飞机装配在“大流程”基础上采用分散装配原则,以提高作业并行度和机械化程度。上述装配区的划分仅对应于部件级装配的组织结构,部件内部的装配作业十分复杂,需要进一步划分。针对不同装配生产线设备、人员、工艺特性和工作量,作业单元划分将会产生不同结果,并包含分层次特性。作业单元内部作业之间都存在物理上的某种连接关系,使它不会成为自发散开的整体。目前,国内飞机制造企业的装配作业单元划分模式不尽相同,图 3 展示了一种典型划分结果。

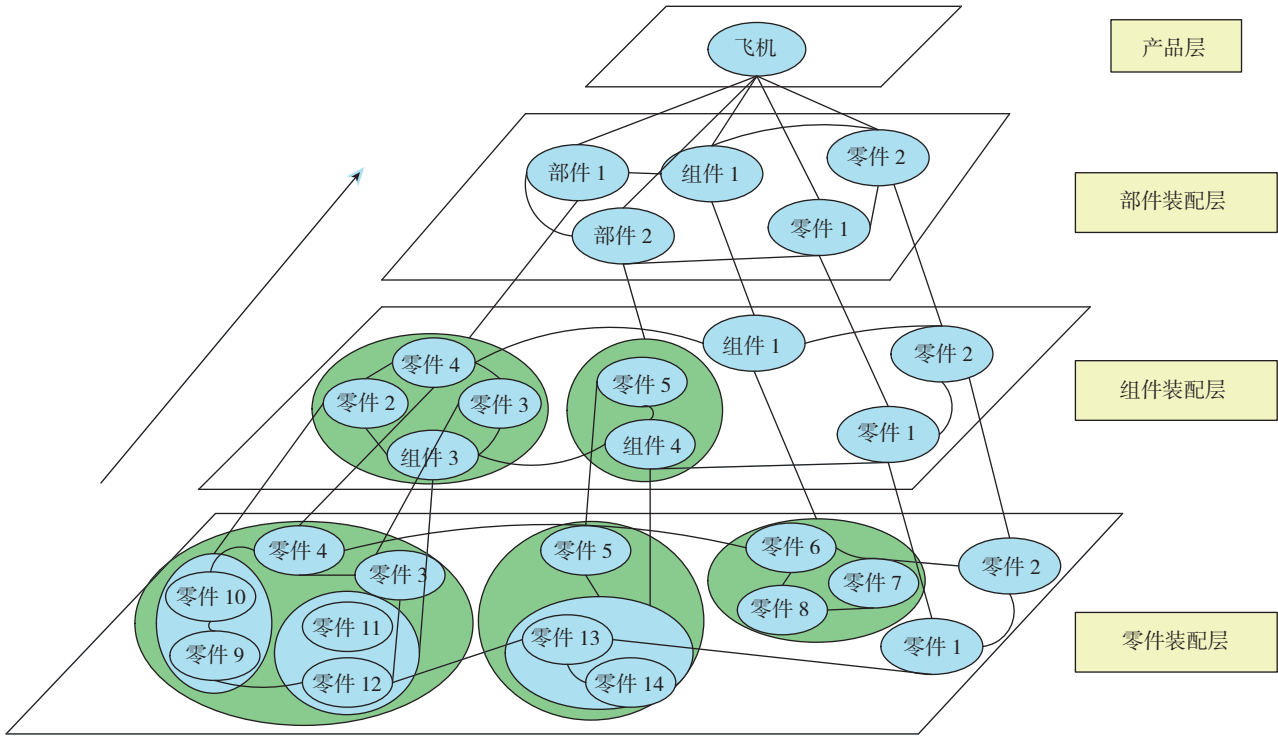


图2 飞机结构装配层次关系

Fig.2 Hierarchy of aircraft structural assembly

对于如图 4 所示的装配生产线模型示例,定义一个 5 元素的集合 $\{P, H, L, F, Q\}$ 进行描述(为了使图示简明,没有在图上标注权值)。P 记录分层有向图中的所有装配单元,在图中认为由虚线包围的区域或零件都可以作为一个装配单元;H 记录层次信息, $H=\{H_1, H_2, \dots, H_n\}$, n 为自然数, H_i 表示第 i 层,其中记录了每层包含的装配单元, $i=1, 2, \dots, n$; L 表示模型中有向边的集合,用来表示装配引入和退出的优先关系; F 是记录装配单元父子关系的集合; Q 表示有向边的权值矩阵,包含装配成本信息和装配稳定性信息。

飞机零部件众多,如果在模型中如实反映出每一个零件,则模型的规模十分巨大,而且装配体中某些零件

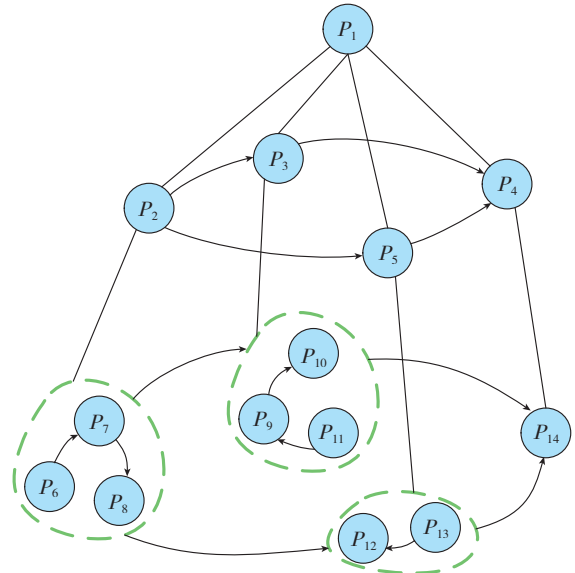


图4 飞机数字化装配生产线示例模型

Fig.4 Model of digital aircraft assembly line

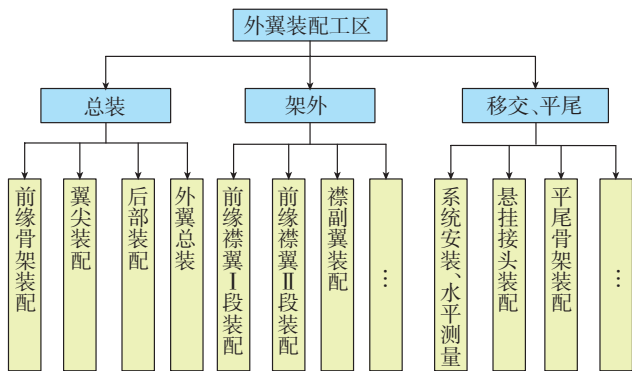


图3 典型飞机装配作业单元划分

Fig.3 Unit division of typical aircraft assembly operations

的局部装配顺序是固定的,如螺钉连接的装配顺序是垫圈、螺钉,螺栓连接的装配顺序为垫圈、螺栓、螺母。因此,在建立装配模型时,不需完全如实地规划每个零件的装配,只需对主要零部件描述出它们的装配关系。

装配生产线分层有向图模型实现了把复杂装配体分解成零部件,部件分解成下级子零部件,同树模型相仿,这种层次关系用连线的形式表示;在同一层次中,用

多个有向图表示装配单元之间的装配定位关系。从图4可以看出,同层的多个虚线围成的装配单元之间是独立、不相互干涉的。

本文采用邻接矩阵表示法来存储分层模型中的各类信息。本邻接矩阵使用2个数组:一个是一维数组,用来存储装配模型中装配单元组成的结点及其顺序;另一个是上三角矩阵,用来存储装配模型中结点之间的连接关系。如果结点之间的连接关系为层级关系,则对应数组元素之值为2;如果结点之间的连接关系为有向定位关系,则对应数组元素之值为 ± 1 ;如果结点之间不存在任何连接关系,则对应数组元素之值为0。

一维数组 $A[n]$ 的构建方法:按照从上到下、同父结点优先的原则,将引入阶段装配模型的结点作为一维数组 $A[n]$ 元素, n 表示结点数。以图4为例,结点名称、结点在数组 $A[14]$ 中的编号、结点对应的数组元素见表1。

表1 一维数组元素对照表

装配单元信息	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
对应元素	$A[0]$	$A[1]$	$A[2]$	$A[3]$	$A[4]$	$A[5]$	$A[6]$
节点编号	0	1	2	3	4	5	6
装配单元信息	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
对应元素	$A[7]$	$A[8]$	$A[9]$	$A[10]$	$A[11]$	$A[12]$	$A[13]$
节点编号	7	8	9	10	11	12	13

二维数组 $B_1[n][n]$ 的构造方法是:

$$B_1[n][n] = \begin{cases} \pm 2 & \text{当}(A_1[i], A_1[j])\text{之间有向连接} \\ & \text{关系时,正向取2,反向取}-2; \\ 1 & \text{当}(A_1[i], A_1[j])\text{或}(A_1[j], A_1[i])\text{之间} \\ & \text{为无向连接关系时;} \\ 0 & \text{当}(A_1[i], A_1[j])\text{或}(A_1[j], A_1[i])\text{之间} \\ & \text{不存在连接关系时。} \end{cases}$$

4 结论

本文基于有向图建立了飞机数字化装配生产线全局模型,所建立的模型具有如下特点:(1)在复杂飞机产品零部件装配关系的表达上采用了分层装配信息表述方法,使得每次装配顺序规划只对少量零部件进行,避免了因零部件过多而造成的割集数量呈爆炸式增长,给以后的模型提取降低工作难度;(2)分层的原则采用设计分离面和工艺分离面信息,从而使得分层有向图模型体现了航空产品的结构特点和功能特点,使得模型具备更强的工程性;(3)在传统有向图的基础上增加了装配引入和退出关系的信息表示方法,可以将装配工艺经验映射为装配单元与装配过程信息引入和退出装配环境的优先关系;(4)优先关系、约束关系可以分别转换为有向图和无向图来表示,有利于计算机表达。

参考文献

- [1] Ranky P G. Digital, internet-enabled assembly line and factory modeling. *Assembly Automation*, 2004, 24(3):247-253.
- [2] Arieh D B, Kumar R R, Tiwari M K. Analysis of assembly operations' difficulty using enhanced expert high-level colored fuzzy Petri net model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2004(20):385-403.
- [3] Zhu X W, Hu S J. Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(5):1-9.
- [4] Yalcina A, Namball R K. An object-oriented simulation framework for real-time control of automated flexible manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2005(48):111-127.
- [5] Rangel I R. Building reduced petri net models of discrete manufacturing systems. *Mathematical and Computer Modeling*, 2005(41):923-937.
- [6] 刘平,李原,张开富.复杂产品装配的分层有向图建模方法. *机械设计*, 2007, 24(4):30-32.
- [7] 张开富,李原,邵毅,等.一种集成装配过程信息的装配建模方法. *西北工业大学学报*, 2005, 23(2):222-226.
- [8] 张杰,李原,张开富,等.基于关系对象 Petri 网的飞机装配系统模型快速构建方法. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(6):1195-1201.
- [9] 周炳海,王世进,陶丽华.基于扩展 Petri 网的混合系统建模方法. *东南大学学报*, 2005, 21(3):304-309.
- [10] 高峰,王明哲.装配生产线 Petri 网模型优化算法研究. *机械与电子*, 2004(5):13-15.
- [11] 吕超,李爱平,徐立云.基于权重有向图的可重构制造系统配置决策模型研究. *中国机械工程*, 2008, 19(15):1821-1826.

(责编 谷雨)

(上接第93页)

从而提高对超薄材料成形的操作技能和技术水平,使零件的加工质量得到可靠保证。

在培训和训练的过程中,可先针对高级技能以上操作人员进行,当以上变形缺陷的修正达到一定程度或符合要求后,再将培训和训练的范围扩大到全体操作人员。在此期间,还可以举行2~3次的同工种业务技能竞赛或技术比武活动,一方面可以增强和提高技术工人学习技术的积极性,另一方面还可以对培训和训练的学习情况进行检查。对钣金工程技术人员的培训,应重点放在成形模具的选用和设计技术条件的编制方面,以保证模具有良好的适用性和工件变形缺陷最小。

4 结论

在某系列无人机飞机超薄材料成形过程中,通过对钣金设备更新、热处理变形的控制、材料的预拉伸处理、建立转动中的搬运箱系统、技术工人进行的操作技能培训等措施,确保超薄材料飞机零件的成形,完成了型号研制任务,为该系列飞机的批量生产打下良好基础。

(责编 谷雨)