航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 2014 Vol. 25 No.05 57-62

面向航空产品的装配工艺规划技术研究

徐庆泽[1,*]，王征[2]，蔡晋[3]

1．中航工业沈阳发动机设计研究所 综合计划部，辽宁 沈阳 110015

2．沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司 军代表室，辽宁 沈阳 110043

3．沈阳航空航天大学 航空航天工程学部(院)，辽宁 沈阳 110136

摘 要：装配工艺规划是影响航空产品装配质量和成本的重要因素。本文以航空产品装配中存在零件、工装多、装配工序复杂、精度要求高等问题为背景，研究数字化装配工艺规划中的装配信息建模；工艺组件划分与定义，包含工装、夹具、专用工具的装配顺序规划；基于VMap的装配路径规划；面向可达可拆卸的装配路径生成等关键技术。开发数字化装配工艺规划系统，并以某型飞机部件为实例进行验证。

关键词：装配工艺规划；装配建模；装配路径；工艺组件；飞机装配

中图分类号：V262.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-5453（2014）05-0057-06

航空产品的装配过程占用了航空企业中大约40%~50%的生产费用和产品生产制造总工时，占用了大量的制造时间和制造资源[1,2]。较早的传统装配规划采用人工方式，工艺人员根据设计图纸和技术文档，通过分析产品装配图中零件的几何形状和位置关系，必要时和设计人员进行讨论，进一步明确设计者的真正意图，利用自己的经验和知识规划出产品的装配方案。这种方法工作量大、效率低，且难于保证装配方案的经济性。近些年，北京理工大学刘检华、宁汝新等人针对生产现场的需求和虚拟装配技术的发展，阐述了虚拟装配技术在装配工艺规划、装配精度预分析、管路与线缆装配及装配现场管理等研究，提出一个实用的集成化虚拟装配工艺规划系统[3-5]。上海交通大学朱洪敏等人开展基于语义关联模型的虚拟装配工艺规划支撑技术研究[6]，西北工业大学李原等人开展在DELMIA下实现配工艺微规划等技术研究[7,8]。装配序列规划算法的本质是求解几何和物理约束的组合优化问题[9]；在此基础上，提出面向装配的设计(Design for assembly，DFA)，协同装配工艺规划系统[10]；在面对多样和复杂产品的装配生产线涉及到众多的工作站，装配业务和资源，提出基于Agent的协同工艺设计系统[11]。随着计算机集成制造技术、先进信息技术、并行工程等技术的发展和应用，装配相关的设计技术要求提高产品开发过程中各环节的集成化程度。

1 数字化装配工艺规划流程

产品的装配工艺规划通常要考虑到零件设计中几何及功能兼容性的约束、装配工艺中各种各样的限制、总体经济可行性等，装配工艺规划还必须包含装配顺序、装配模型表示方式以及旨在提高产品制造效率的零件与子装配体的夹紧方式等。

装配工艺规划包括装配信息建模、工艺组件划分、装配序列规划、装配路径规划等内容。工艺组件划分是装配工艺规划的基础，是提高装配工艺规划效率、快速响应市场的重要前提。目前，装配工艺设计还是以手工为主、凭经验设计，工艺设计人员在工艺设计阶段无法或很少考虑实际装配环节中的各种因素，使设计出来的产品在装配时常常发生各种装配问题。若在工艺规划前进行工艺组件划分，将很大程度上减轻后续装配序列生成与评价的难度。装配序列规划是装配工艺规划过程中的重要环节，它是在装配建模的基础上，对零部件的装配序列进行推理，为下一步实现产品装配过程仿真提供基础。装配序列规划是基于装配建模的装配工艺顺序的自动生成。

收稿日期：2014-03-22； 录用日期：2014-05-05

*通讯作者．Tel.：024-89723894 E-mail：xuqingze@126.com

引用格式：XU Qingze，WANG Zheng，CAI Jin. Assembly process planning technology for aviation products[J]. Aeronautical Science & Technology，2014,25(05):57-62. 徐庆泽,王征,蔡晋. 面向航空产品的装配工艺规划技术研究[J]. 航空科学技术，2014,25(05):57-62.

产品中零件之间的几何关系、物理结构以及功能特性等决定了零件装配的先后顺序，所有零件的装配序列形成产品的装配序列规划。装配路径是指装配过程中零部件连接起点位置及位形和终点位置及位形的序列点或曲线。构成装配路径和寻找最佳运动轨迹的策略就是装配路径规划，装配路径规划一般以避障、满足作业需要、提高运行精度和减少装配时间等内容为主要目的。装配工艺规划整体流程如图1所示。

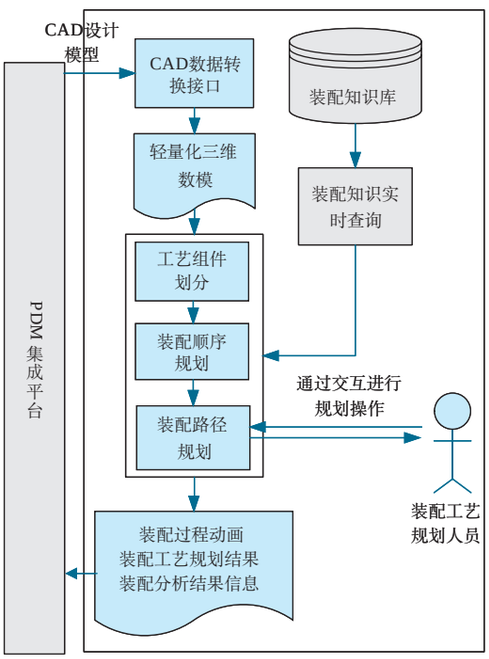

图1 数字化装配工艺规划流程

Fig.1 Digital Assembly Process Planning Process

2 装配信息建模

装配工艺规划是针对产品结构，结合特定的装配资源规划出一系列装配操作的工艺过程。装配模型的组织形式主要有层次模型、关系模型和层次关系模型。层次关系模型结合了层次模型和关系模型的优点，既能清楚地表达产品的层次关系，又能够将产品同一层次之间的联系有效地表示出来。以产品的层次结构为基础，对于产品同一层次各个零部件，结合它们之间的装配关系、装配过程以及装配资源等，形成一个信息完整而又结构合理的装配信息模型，有效地支持装配工艺规划过程。集成了产品结构、装配过程、装配资源信息的一体化装配信息模型及其建立过程如下图2所示。

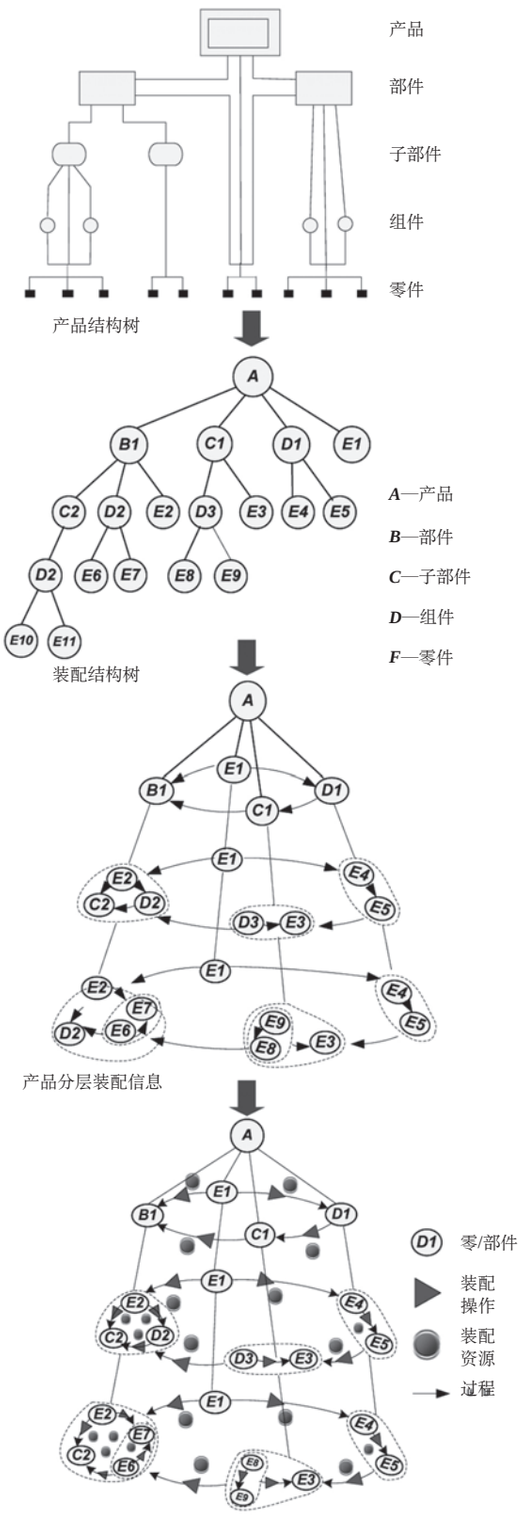

图2 装配工艺信息模型及其建模过程

Fig.2 Assembly process information model and the modeling process

3 工艺组件的分类

3.1 工艺组件划分

在数字化设计阶段，设计需要与工艺、制造共同确定产品的分解方案。设计阶段产生的飞机分解结果是工程物料清单(EBOM)。这种“自顶向下”反映部件、组件直至零件的层次列表称为产品分解结构。但EBOM按功能、结构要求分解而成，很难体现“自底向上”的产品装配过程。在制造准备阶段，工艺需要对EBOM进行重构，形成面向工艺和制造的物料清单(MBOM)。重构过程以装配层次树为基础进行，划分的主要依据是装配连接关系，按照装配工作中相对独立的工作内容、一定的工作量以及装配过程进行划分，该过程被称为工艺组件划分。进行工艺组件划分的流程为：首先建立结构件装配的类型层次树，通过对象类型匹配建立工艺组件划分的主体结构；然后利用基于知识的方法，形成工艺组件划分初步方案，再利用模糊聚类方法，计算剩余工艺组件与邻接工艺组件之间的隶属程度，采用刚度、装配操作难易程度以及装配对象空间邻近性等指标对工艺组件进行评判，最终决定工艺组件划分方案。图3是工艺组件划分的基本流程。

3.2 工艺组件分类与层次树

设集合S* = {S_1,S_2,S_3……}，S* ∈ S ，S为装配体所有零件的集合，S_1,S_2,S_3分别为装配体的核，则集合S*确定了集合S划分的结构 ，S的划分问题可以细化为求集合S上的一种覆盖P，P={P_1,P_2,P_3……}。根据飞机装配按照部位划分部件和按照几何形状划分组件的特点，可以首先选择具有气动外形的对象作为工艺组件的核，然后再利用对象之间的连接关系处理其他装配对象，通过装配体类型匹配与核的选择，可以初步确定工艺组件划分的主体结构以及装配的主体结构。

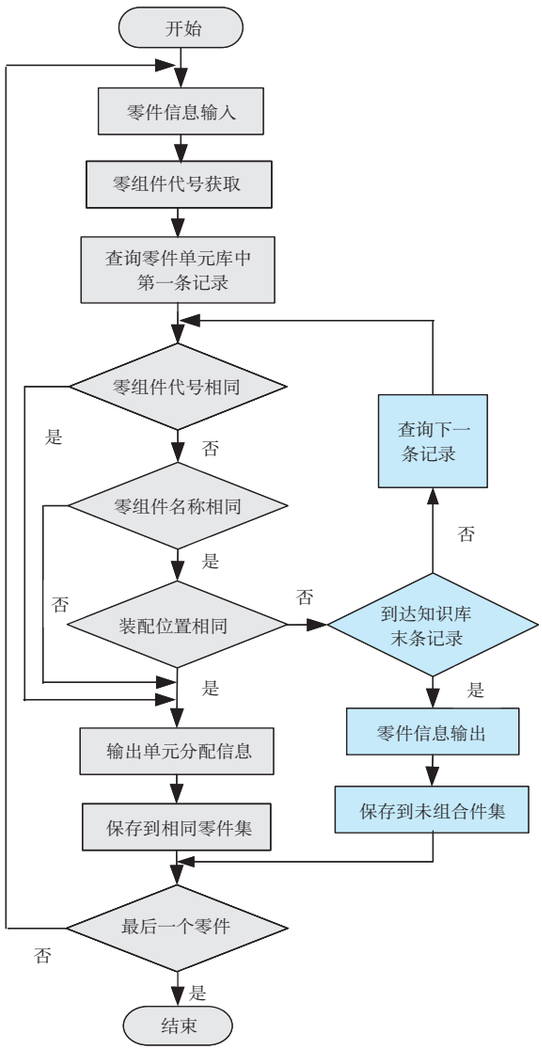

图3 工艺组件划分的基本流程

Fig.3 Process components into the basic process

4 装配顺序规划

4.1 装配顺序规划流程

装配顺序规划的流程如图4所示，首先，建立产品的装配模型，该模型须含有生成装配顺序所需的有关数据(信息)，装配建模恰当与否，直接影响后续的推理效率。其次，是装配顺序的生成，主要是指如何根据装配模型推理出无碰撞(包括局部的和全局的)装配方向，进而推理出几何和物理可行的装配顺序。相对于非几何信息而言，几何信息易于建模，因此几何装配顺序规划一直是装配顺序规划的主要潮流。最后是装配顺序的表示；当装配顺序的推理方法确定后，需要表示生成的各种装配顺序。在选择装配顺序的表示方法时，主要考虑的问题如下：表示方法所需的存储空间；从装配模型

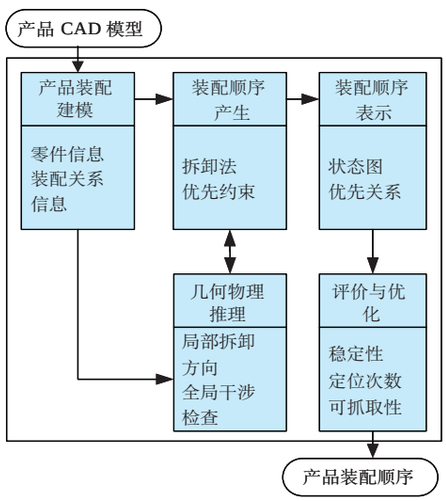

图4 装配顺序规划的流程示意

Fig.4 Assembly sequence planning process

直接推导出装配顺序表示的难易程度和是否可自动化；转化为其它表示方法的难易；是否可以表示装配任务间的时间依赖性或不相关性；用隐性表示时的正确性和完备性。

4.2 面向可达可拆卸的装配路径生成

零组件装配路径规划的要求如下：

(1) 定义每一个零组件的装配路径；

(2) 确定零组件在装配路径中的位置和在装配空间中的姿态；

(3) 分析零组件在装配路径上的局部碰撞问题；

(4) 对零组件的装配路径进行几何可行性检查；

(5) 对零组件的装配路径进行物理可行性检查。

VMap 法(Visible Map，可视图法) 是从SMap 法(球面图法，Spherical Map) 中总结出的一种空间方位求解方法。基于VMap 的装配路径规划，其算法流程图如图5所示。

把三维空间中的工件投影到单位球上来确定可视性。首先通过前置处理取得装配序列和包括装配体中固定及自由零件的完整模型S_i和F_i，零件的配合关系及相关的齐次全局变换矩阵T_i，然后再通过将零件从装配体上依次拆去得到装配路径。如流程图所示，拆卸过程的第一步是将零件从装配体中分离出来。根据装配体假设(零件在初始位置处任意旋转而不与已装配体发生干涉碰撞)，可得零件与装配体分离的条件为：零件沿某个方向做无限平移而不与装配体发生干涉。为实现这样一种有效分离，移动距离的确定必须以保证S_i和F_i的凸包不相交为前提。将当前的变换矩阵T_i应用于该零件，完成第一步分离。然后，将处于当前位置的零件与装配体进行干涉检验，以确定零件是否可以由当前位置直接变换到目标位置(即为实际装配中的初始位置)。当检测到干涉

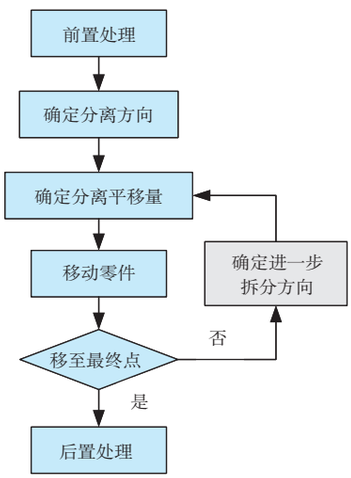

图5 基于VMap 的装配路径规划流程

Fig.5 The assembly path planning process based on VMap

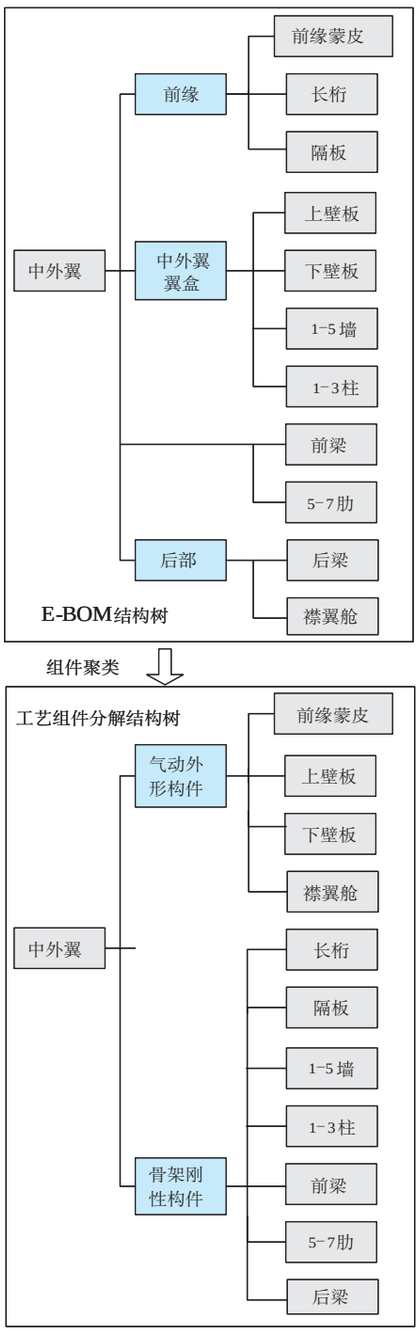

图6 基于模糊聚类的进行工艺组件划分

Fig.6 Divided based on fuzzy clustering for process components

时，必须将平移运动进一步细化，重新计算以得到新的变换矩阵(分解方向)。

重复上述过程，直到自由零件可以无干涉地变换到装配初始位置。此时表明，该零件可以按分解序列依次由装配体上拆下至初始位置。最后，将拆卸序列逆转，即得到该零件的装配路径序列。值得说明的是，该序列的第一个变换矩

图7 装配顺序规划功能模块界面

Fig.7 Assembly sequence planning function module interface

阵是一个纯粹的旋转变换矩阵，它改变$\boldsymbol{F}_i$相对于$\boldsymbol{S}_i$的方向以保证后继装配动作可通过简单的平移变换实现。

5 装配工艺规划系统开发及应用验证

通过上述装配信息建模，工艺组件划分与定义，包含工装、夹具、专用工具的装配顺序规划，面向可达可拆卸的装配路径生成等关键技术研究，开发基于DELMIA和CAA开发一套数字化装配工艺规划系统。下面是以某新研制机型为背景，在飞机装配中运用工艺组件划分与定义的方法及系统中装配顺序规划功能模块的应用情况见图6~图8。图6介绍了采用基于模糊聚类的进行工艺组件划分与定义划分方法，图7和图8中介绍了系统中装配顺序的功能模块及运用情况。

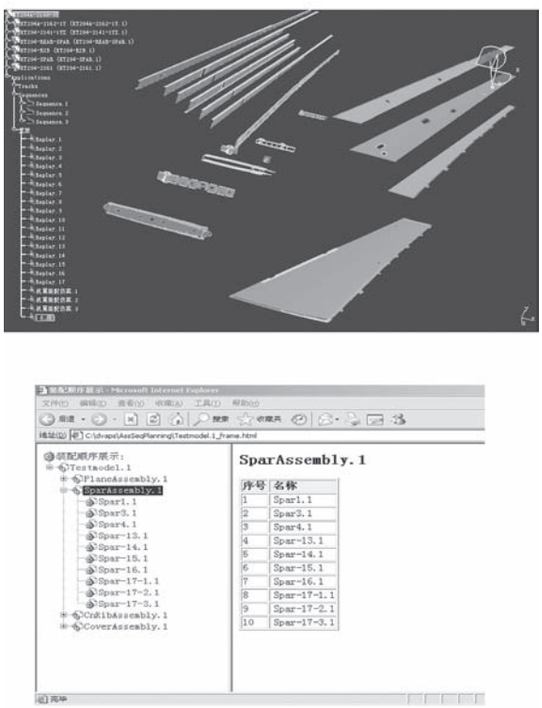

图8 装配顺序规划系统实例应用及结果显示

Fig.8 Examples of application assembly sequence planning system and results

6 结论

本文在现有的数字化装配工艺规划技术研究的基础上，结合实验室在与航空企业项目合作研究中得到的一些实际经验，对现有装配工艺规划中关键技术进行了一些研究及改进，主要包括装配信息建模，工艺组件划分与定义，包含工装、夹具、专用工具的装配顺序规划，面向可达可拆卸的装配路径生成等几大方面的改进，基于DELMIA和CAA技术开发一套数字化装配工艺规划系统，并在多个航空型号中应用。

AST

参考文献

[1] Mikell P Groover. Introduction to Manufacturing Processes[M]. Wiley,Inc. 2011.

[2] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术[J]. 航空制造技术, 2005(09): 28-32.
GUO Enming. Foreign aircraft flexible assembly technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2005(09):28- 32. (in Chinese)

[3] 刘检华,宁汝新,阎艳. 集成化虚拟装配工艺规划系统研究[J]. 中国机械工程,2006,17(23) :2486-2491.
LIU Jianhua,NING Ruxin ,YAN Yan. Study on an Integrated Virtual Assembly Process Planning System[J]. China Mechanical Engineering,2007,13(1):67-73. (in Chinese)

[4] 刘检华,宁汝新,万毕乐. 面向生产现场的虚拟装配工艺规划技术[J].计算机集成制造系统,2007,13(1):67-73.
LIU Jianhua, NING Ruxin, WAN Bile. Virtual assembly process planning technology oriented to production field[J]. Computer

Integrated Manufacturing Systems,2007,13(1):67-73. (in Chinese)

[5] 郑轶,宁汝新,刘检华,王莉娟. 面向虚拟装配的计算机辅助装配工艺规划系统体系结构研究[J].北京理工大学学报,2005,25(5):390-393.
ZHENG Yi, NING Ruxin, LIU Jianhua. Study on the Architecture of Computer Aided Assembly Process Plann ing System for Virtual Assembly[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2005,25(5):390-393. (in Chinese)

[6] 朱洪敏. 基于语义关联模型的虚拟装配工艺规划支撑技术研究[D].上海:上海交通大学,2012.
ZHU Hongmin. Research on key technologies of virtual assembly process planning based on semantic associated models[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2012. (in Chinese)

[7] 蔡晋.面向动态资源的飞机制造过程快速重构技术研究[D].西安:西北工业大学,2012.
CAI Jin. Rapid reconstruction technology of aircraft manufacturing process for dynamic resource [D].Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2012. (in Chinese)

[8] 徐志佳,李原,余剑峰等. 复杂产品三维装配工艺微规划层进对象模型[J].计算机集成制造系统,2011,17(4) :701-710.
XU Zhijia, LI Yuan, YU Jianfeng,etc. Hierarchical progressive object model of 3D assembly process micro-planning for complex product [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2011,17(4) :701-710. (in Chinese)

[9] Q Guan, J H Liu & Y F Zhong.A concurrent hierarchical evolution approach to assembly process planning[J]. International Journal of Production Research,2002,40(14):3357-3374.

[10] Lihui Wang, Shadi Keshavarzmanesh, Hsi-Yung Feng. Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009,41(12):132-144.

[11] Omid F. Valilaia,Mahmoud Houshmanda. INFELT STEP: An integrated and interoperable platform for collaborative CAD/CAPP/CAM/CNC machining systems based on STEP standard[J]. International Journal of Computer Integrated Manuf acturing,2010,23(12):1095-1117.

作者简介

徐庆泽(1978—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机产品规划、复合制造。

Tel: 024-89723894

E-mail: xuqingze@126.com

Assembly Process Planning Technology for Aviation Products

XU Qingze[1,*], WANG Zheng[2], CAI Jin[3]

1. Co-ordination Planning Dept. AVIC Shenyang Engine Design & Research Institute, Shenyang 110015, China

2. Customer Representaitive in SLEMC, Shenyang 110043, China

3. Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

Abstract: Assembly process planning is an important factor affecting the aviation product assembly quality and cost. Assembly process planning technology is characterized by Multiple parts, tooling, more complex assembly process, and higher accuracy requirements. This article focuses on assembly process planning in flexible assembly information modeling; Process Components division and definition, including tooling, fixtures, special tools for assembly sequence planning; Based on the assembly path planning VMap; facing up to removable assembly path key technology generation. Development of digital assembly process planning system And to a certain type of aircraft parts as an example to validate.

Key Words: assembly process planning; assembly information modeling; process-oriented component; assembly path; aircraft assembly

Received: 2014-03-22; **Accepted:** 2014-05-05

***Corresponding author. Tel. :** 024-89723894 **E-mail:** xuqingze@126.com