

# 面向箭体舱段的三维数字化装配工艺

杨志波<sup>1</sup> 李兰柱<sup>1</sup> 张鹏<sup>1</sup> 张瑞<sup>2</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

**文 摘** 针对火箭舱段传统装配工艺规划和路径规划的方法特点,介绍了一种面向火箭舱段的三维数字化装配工艺方法,给出了三维数字化装配的系统框架和装配工艺规划方案,讨论了数字化装配的结构设计中的各个环节关系,通过虚拟装配平台输出装配动画和视图,建立完善的数据库系统,从而实现了火箭舱段生产现场的三维可视化装配,提高了装配的准确性和装配效率,缩短了装配时间。

**关键词** 数字化,工艺规划,装配工艺仿真,现场可视化

中图分类号:V465

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.04.021

## 3D Digital Assembly Process for Rocket Body Cabin

YANG ZHibo<sup>1</sup> LI Lanzhu<sup>1</sup> ZHANG Peng<sup>1</sup> ZHANG Rui<sup>2</sup>

(1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

**Abstract** According to the characteristics of the traditional method of rocket cabin assembly process planning and path planning, this paper introduces a 3D digital assembly process for rocket cabin, a scheme of the system frame and assembly process for 3D digital assembly. In this paper the relationship of each link in the structure and design of digital assembly is discussed. Through the virtual assembly platform output assembly animation and view, a perfect database system is established, realizing 3D visualization of rocket cabin assembly production, achieving the purpose of improving the accuracy and efficiency of assembly and shortening the assembly time.

**Key words** Digitization, Process planning, Assembly process simulation, Field visualization

### 0 引言

箭体结构的装配是火箭制造的重要环节,箭体结构部段的装配质量、装配效率直接影响着火箭的飞行性能及生产周期。经过多年的发展,数字化设计在航空航天领域已取得显著的成绩。现阶段通过 CATIA、Pro/E 等三维设计软件,在产品之初就通过三维模装检查设计阶段产品的干涉情况,部段接口之间的协调,三维设计在航空航天领域已得到广泛应用。DMU(数字样机)技术的应用是数字化的一个突破,数字样机代替制造时间长、成本高的物理样机给箭体结构设计带来了质的飞跃,但箭体结构的装配工艺却一直处于相对比较落后的阶段<sup>[1]</sup>。目前,在箭体结构部段的装配过程中,仍以二维的纸质图纸、纸质工

艺卡片、质量跟踪卡指导工人操作,工艺的指导性不强,直观性较差,很多工艺方法、装配路径及工装工具的使用均依靠工人的经验,造成了产品质量不稳定、装配精度不高等缺点。由于纸质工艺文件的编写,往往依靠工艺人员的经验制定,不经过计算机仿真优化,而箭体结构复杂舱段装配过程中又以“手工试配法”为主,因此效率较低。

国外的数字化装配工艺已趋近于成熟,在航空领域,以波音、洛·马和空客公司为代表的飞机制造厂商在数字化装配领域取得显著效果,并已有部分应用。波音公司在以 787 为代表的新型客机研制过程中,采用 Model Based Definition (MBD) 全三维的数字化技术取代二维图纸和工艺卡片,实现了从设计、加工到

收稿日期:2016-04-01

作者简介:杨志波,1989 年出生,硕士,工程师,主要从事复合材料机加工与装配研究。E-mail:yangzhibo1990@163.com

装配的制造一体化,装配过程使用全三维动画和MBD技术,取代了装配的“试配”过程,使得整个装配周期缩短了30%<sup>[2]</sup>。洛·马公司在JSF战斗机的装配过程中,采用4部Zeiss激光跟踪仪进行空间定位和其他装配工作,同时利用计算机和其他设备进行光学投射,能把装配顺序和装配好的部件状态投射到正在装配的部件上,使工人更直观的进行装配工作,取代纸质图纸和工艺卡片,大大提高了生产质量和生产效率<sup>[3]</sup>。在航天领域和弹体结构装配方面由于军工保密的要求,相关报道较少。

本文根据箭体复杂舱段装配需求,介绍了一种适用于箭体舱段装配的三维数字化装配系统。在车间装配现场建立三维可视化的人机交互系统,利用大尺寸液晶

屏或触摸屏把产品设计信息、装配工艺信息及其他相关信息通过数字化的表达方式发布到生产现场,使操作者能够更清晰直观地了解舱段的装配工艺信息,取代传统的纸质工艺文件、质量跟踪卡和检验签字盖章的模式,以期使产品生产的可追溯性更强、效率更高。

### 1 数字化装配的系统框架

箭体结构舱段具有以下装配特点:零部件数量众多,零部件之间约束、零件几何形状、装配关系复杂,操作空间狭小。此外舱段多为薄壁回转体结构,装配过程以手工操作“试配法”为主,通常需要利用物理原型样机进行模装,大量使用专用工装工具,对于复合材料舱段还要考虑制孔、连接的特殊工艺和辅助工具,产品装配过程见图1。

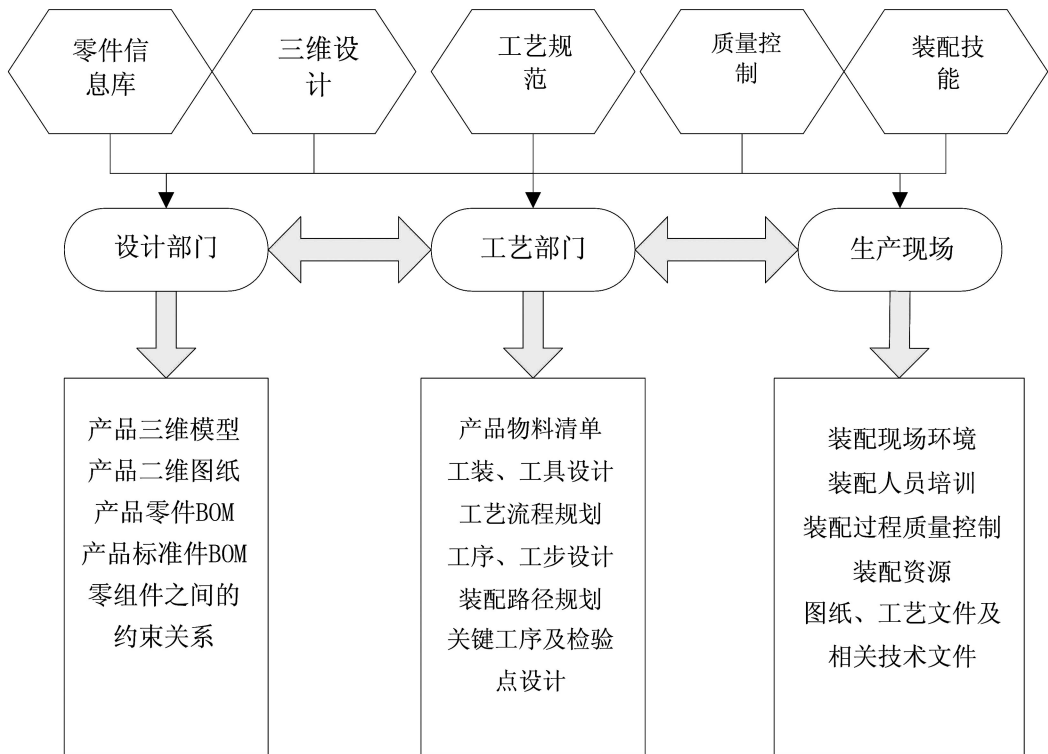


图1 产品装配过程

Fig.1 Product assembly process diagram

根据箭体结构舱段的特点,系统框架应包括装配工艺建模、装配工艺仿真和装配现场环境等几部分。装配建模与设计阶段的三维数模不同,这里指的是主要装配工艺模型的建立,不同的产品所需的装配工艺模型略有区别,但均应包括产品的零部件信息、装配约束信息、装配层次信息、工装工具信息、操作空间信息、物料信息及与产品装配工艺相关的各种BOM表<sup>[4]</sup>。

装配工艺仿真是根据产品的三维数字模型和装配工艺模型提供的信息,运用几何推理、操作经验及相关的工艺规范相结合的方法进行装配顺序仿真优化,并得到可行的产品装配顺序。对多条装配顺序均

能满足产品性能和质量要求时,以最短时间、最大操作空间或其他条件作为输入,得到最优的装配工艺方案,包括装配顺序、装配路径、工艺路线、装配工序及工步,确定每道工序的检查项目及检查内容,并同时输出。将装配关键工序、关键路径和其他关键环节输出。

装配现场环境是根据车间装配现场的环境,在每个装配工位上布置大屏幕液晶显示器或触摸屏等数字化终端,将制作好的三维工艺经审核批准后发布到装配现场,在装配现场按照每个工位及操作者的权限从服务器中读取相应的三维工艺文件,并在数字化终端上以三维数字化的形式显示出来,用于指导工人操作。对于装配过程的每一个工序,每一个工步,零件

安装的过程,安装路径,所需的标准件和其他相关信息都通过三维动画的形式展示出来。现场可视化制造系统生动直观地展示产品的装配过程,可对于关键工序、关键尺寸和工装的使用等特殊要求进行反复浏览和加亮提示,并融合工艺规范、多媒体记录及以往质量问题,起到装配现场示教作用。现场可视化制造系统配有专门的质量控制系统,通过不同的授权,经检验人员确认后,方可进行后续工序的浏览。产品装

配完成后,能够输出登录人员的登录时间、浏览内容、检验检查确认情况等内容,并将此类信息存储在数据库中,便于日后对产品的追溯。对于操作者认为表达不清晰,或有装配问题的工序、工步可通过专门的问题反馈界面进行问题反馈,使工艺人员第一时间了解到装配过程中的问题,便于工艺人员将三维工艺文件内容优化完善,数字化装配系统框架见图2。

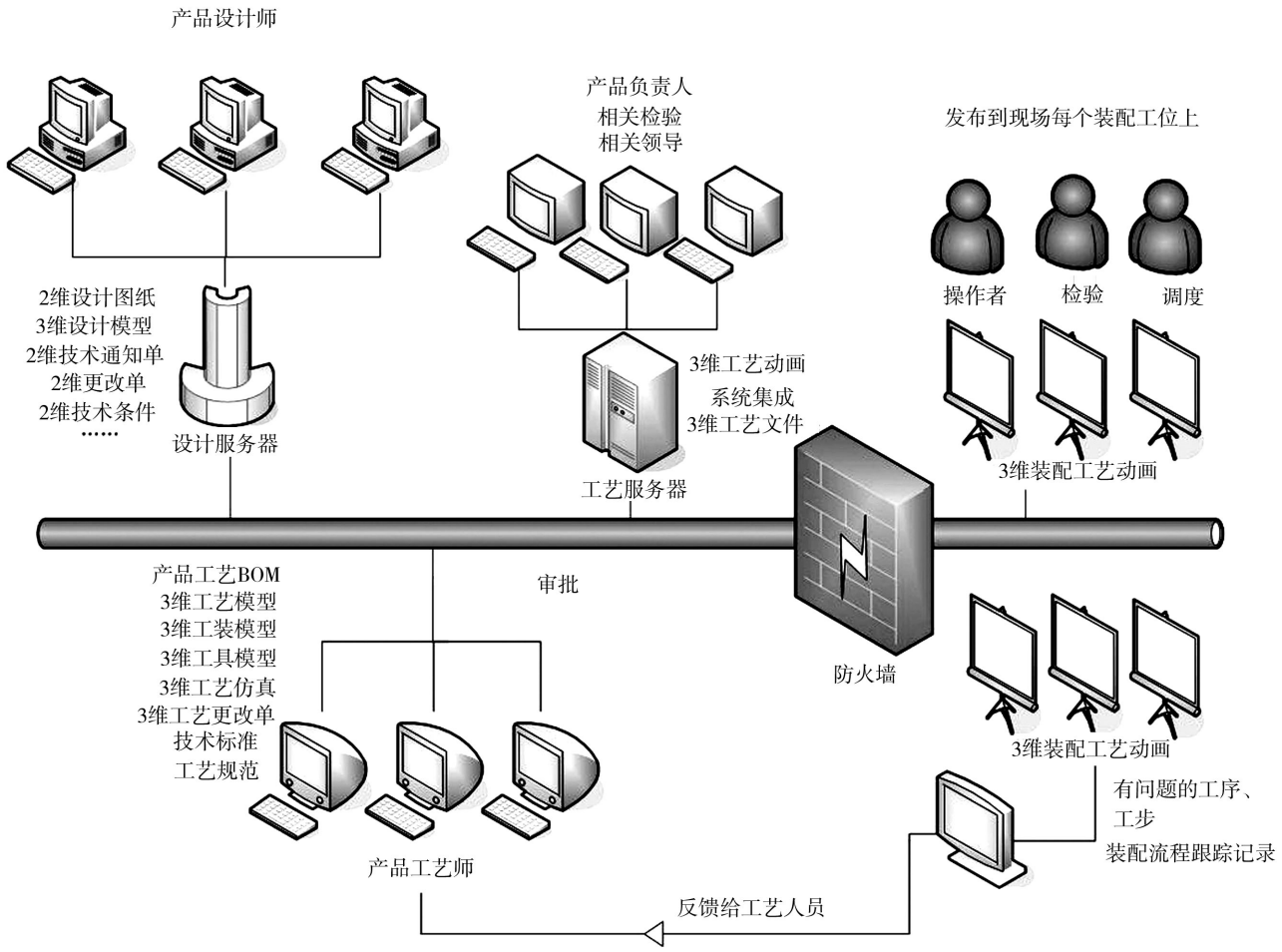


图2 数字化装配系统框架

Fig.2 Digital assembly system framework diagram

## 2 数字化装配的结构设计

在对数字化装配信息和系统框架充分分析的基础上,实现箭体结构复杂舱段的装配。根据箭体结构装配过程,面向不同的对象需进行数字化装配的结构设计,如图3所示。主要包括以下4方面内容:(1)装配现场操作层;(2)应用管理层;(3)工艺设计层;(4)基础资源层。

### 2.1 基础资源层

数字化装配的基础资源是装配工艺规划,编制工艺文件所需的基本数据和参考资料。包括设计部门的三维产品模型、设计图纸、设计技术资料;这项内容构成了

产品零件信息、装配约束信息及最终产品装配尺寸信息等,是工艺设计的基础输入条件。装配经验数据库,是将多年的箭体结构装配技能、装配方法、多媒体记录、出现的问题、解决方式和其他历史产品信息等建立数据库,方便后续同类产品进行查找、调用和借鉴。火箭舱段的装配与一般产品的装配不同,由于零件的结构复杂,安装精度高和壳体大都为薄壁回转体结构,因此制定了许多为保证产品质量的工艺规范,例如胶接工艺规范、螺接工艺规范、铆接工艺规范、支架定位工艺规范、大型工装使用规范等等。这些工艺规范都是经过多年经验积累得到的为防止箭体结构出现变形,提高复杂舱

段装配精度的工艺规范。建立这样的数据库能够充分地指导工艺技术人员编制三维数字化工艺文件,同时在编制文件时可提示引用了哪些工艺规范。工装、工具、

辅助材料等相关资源数据库主要是由库房人员录入,即时更新,使工艺人员能够第一时间了解到产品生产准备阶段的信息,了解短板,并及时补充。



图3 数字化装配结构设计图

Fig.3 Digital assembly structure design diagram

## 2.2 工艺设计层

工艺设计层由工艺技术人员将所需的基础资源进行整理、融合、提炼,并生成三维数字化CAPP所进行的一系列的装配工艺规划。主要包括装配工艺模型的建立,装配工序、工步设计,数字化工装、工具设计,数字化装配仿真,构建完善的三维CAPP。

### 2.2.1 装配工艺建模

装配工艺模型与设计模型不同,装配工艺信息模型是以设计模型为基础集成装配相关的非几何信息,即以产品的设计模型为载体,在模型中添加非几何信息,如几何属性信息、资源属性信息、管理属性信息以及工艺属性信息等。

将箭体结构的理论装配工艺信息模型定义如下:

$$APIM = Part + \{GPI, MPI, TPI, CPI, RPI, PPI\} \quad (1)$$

式中,APIM为箭体的装配工艺信息模型;Part为箭体的设计模型;GPI、MPI、TPI、CPI、RPI和PPI分别为箭体的几何属性信息、管理属性信息、拓扑属性信息、约束属性信息、资源属性信息和工艺属性信息。

现阶段大部分箭体结构部段都采用了三维Pro/

Engineer设计,通过合适的算法及Pro/Engineer提供的可编程接口(API)及函数提取所需的装配信息,并将这些信息作为基础与基础资源层结合建立装配工艺模型,其建立装配工艺信息模型流程如图4所示。

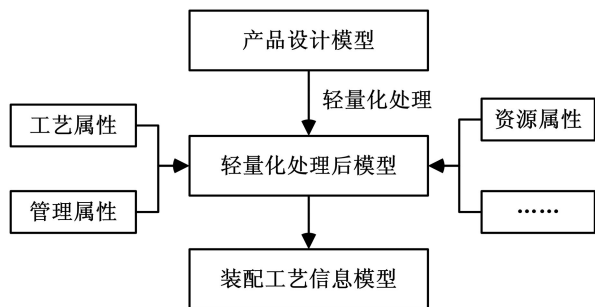


图4 装配工艺信息模型建立流程

Fig.4 Assembly process information model

产品设计模型是一种精确的边界描述(B-rep)模型或体素模型(CSG),此类模型具有大量的几何信息、数据结构复杂、存储数据量大、渲染慢等缺点。在现有的计算机软硬件水平下,不能使用设计模型直接建立大型复杂装配产品,并对其进行装配工艺仿真。因此

产品数字化模型需经轻量化处理,轻量化后的模型能够做到仿真模型的快速交互、渲染。轻量化后的模型被压缩小,减少了存储空间,利于数据的交换传输。在模型轻量化处理过程中,采用法国法索公司(Dassault Systemes)的3DVIA Sync。3DVIA Sync在保证模型的几何属性前提下对模型进行轻量化处理,将精确的(B-rep)模型处理为三角形面片模型,并且通过调节三角形面片的数量控制轻量化的程度。此外,通过设置3DVIA Sync中的过滤元素选项可以过滤模型中的元素,如纹理、曲面、坐标系和图形数据等。

### 2.2.2 装配工序、工步设计

装配工序、工步设计是工艺技术人员的重要工作,也是后续生成三维CAPP的基础。包括了装配顺序和装配路径规划技术。

现阶段,箭体结构部段的装配工序往往通过几何推理和装配经验相结合的交互式规划方法。建立产品工艺模型后,对于给定的由多个零件组成的舱段,根据产品零件的几何信息和零部件之间的约束关系以最短装配时间、最少使用人员或其他边界条件对零部件的装配序列进行推理,得出众多合理可行的装配顺序,装配路径,从中选出最优的装配顺序和路径,作为后续生产三维数字化CAPP的基础。

装配序列和路径规划是在不同边界条件下的组合优化问题,目前国内外装配序列规划主要包括交互式输入的推理方法、基于知识库的推理方法、基于计算机软件的推理方法等,这些方法大都是基于几何推理和知识推理基础上演变而来。对于复杂程度较高、空间开敞性差的箭体舱段,采用基于软件计算,且配合装配经验相结合的方式是最有效的装配序列规划方法。目前最为有效的工序设计方法即利用DELMI A对产品的装配工序进行划分:工艺设计人员直接根据产品数字化模型进行装配单元的划分,并根据划分的装配单元建立产品的EBOM。随后根据装配现场的装配工艺水平,并综合考虑产品的工艺性和经济性,将产品的EBOM转换成PBOM。最终利用生成的PBOM划分产品的工序和工步,其流程如图5所示。利用此方法进行工序划分,从而避免了几何推理随着零件数量的增多,陷入组合爆炸的困境。

箭体结构舱段的装配序列规划还需遵循以下四点基本边界原则。

(1) 优先约束原则:为满足装配操作的几何可行性、机械可行性和技术可行性,某些零件必须在其他零件之前装配。

(2) 可达性原则:对于以手工装配为主的箭体结

构舱段,主要是考察产品各个零部件装配序列、装配路径对人体可达性的影响,检查零部件是否处于装配操作的范围之内,哪些零部件处于装配作业域之外。

(3) 可见性原则:在装配序列规划时,还需考虑安装的零件在人眼的视力范围内,主要防止产品零部件是否因装配次序不同,装配路径不同而导致装配时待装零件位置不可见。

(4) 装配序列不干涉原则:众多可能都会导致装配过程中的干涉,比如设计图纸错误导致的组件之间本身发生干涉;工装设计不合理导致工装、工具和零件之间的干涉等;但有一类干涉是由于装配顺序和路径的不合理造成的。装配序列不干涉原则就是为了防止由装配顺序或路径不合理而制定的边界原则。

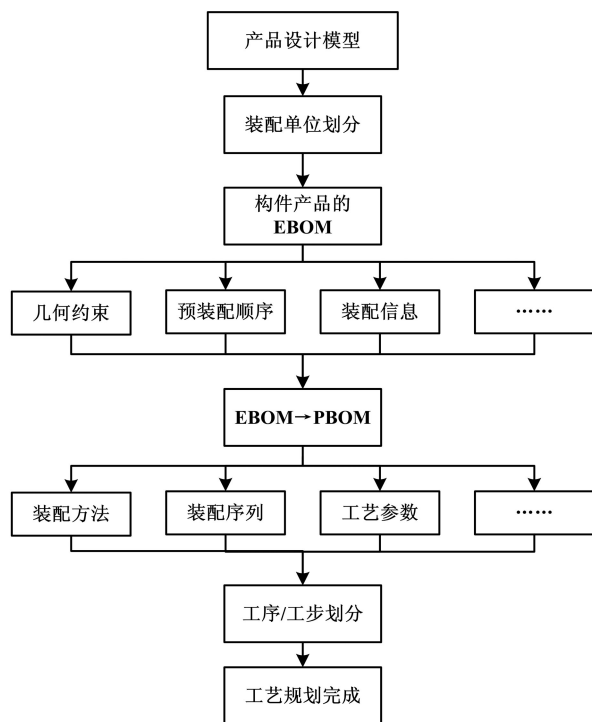


图5 产品装配工序规划流程

Fig.5 Planning process of product assembly process

### 2.2.3 工装、工具设计

目前,箭体结构的装配仍以专用的非柔性工装为主,且由于装配精度的高要求和操作的复杂性,对于复杂的箭体结构舱段往往需要使用大量的装配工装、特制的装配工具和整体装配型架。在本系统中,需将工装、工具进行三维数字化设计,采用Pro/Engineer软件进行建模。为后续将工装、工具一起导入到Delmia软件中,进行装配过程仿真提供必要的装配资源。

### 2.2.4 数字化装配仿真

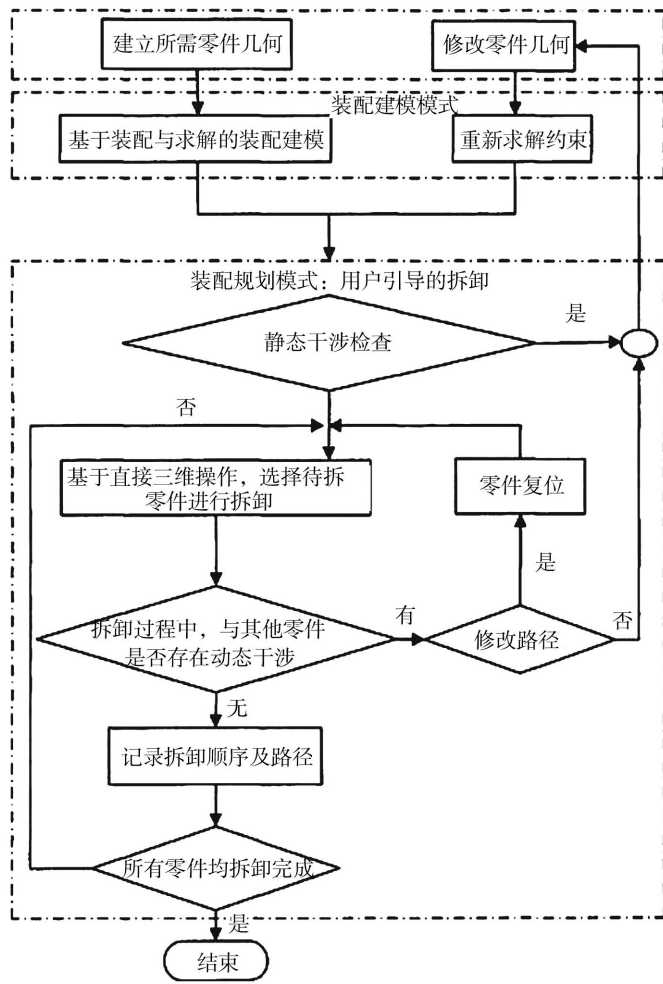
采用达索DELMIA仿真软件,将产品工艺模型通过专用的数据格式转换成.3dxml导入到该软件中,并

建立虚拟工厂、装配环境、人体模型;在计算机上构建与真实环境相似的三维空间。包括现场环境布局、人员、物料资源、工位、工装工具等,得到可视性、可达性、可装配性、可维护性等方面的数据。建立一个开放式的产品、工艺和资源组合模型(PPR),如图6所示。虚拟装配环境的建立是装配仿真技术准备的核心模块,由此进行虚拟装配环境的设置及装配路径初始化、设置装配路径、零部件的姿态和位置、装配过程中零部件的角度姿态的调整方式、装配路径的优先级等,另外还需要进行装配路径上的干涉性检验。

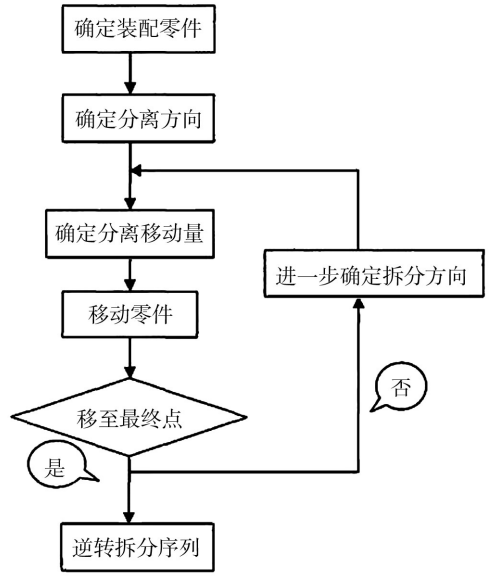
建立产品工艺模型树后,运用 DELMIA 仿真环境建立装配过程的工序、工步内容。仿真装配顺序和装配路径,以动画步进的方式显示零部件的装配顺序、路线等,验证装配仿真过程;仿真的主要内容是进行基于装配拆卸运动的科学表示与变换实现运动的正确模拟,得到的装配序列,通过对关键点间细化的干涉检查及关键点方位的动态调整,确保装配顺序和装配路径的合理性<sup>[5]</sup>,仿真流程如图7所示。



图6 工艺模型树  
Fig.6 Process model tree



(a) 零件装配顺序仿真流程



(b) 零件装配路径仿真流程

图7 装配路径及装配顺序仿真流程

Fig.7 Assembly path and assembly sequence simulation flow

### 2.2.5 构建三维 CAPP

在完成装配序列和装配路径仿真后,将装配工艺模型和数字化工装工具导入到达索公司的 3DVIA 软件中,制作装配过程的三维动画,得到 .smg 格式的轻量化装配动画文件,将文字描述的装配工艺以三维数字化的形式展现出来,如图 8 所示。同时创建必要的工艺视图,将这些信息、尺寸信息、历史多媒体照片、需检验检测的尺寸信息通通汇总并录入到航天材料及工艺研究所开发的数字化装配系统中,便于操作者浏览三维工艺文件,并通过不同人员的授权,控制浏览权限,如图 9 所示。

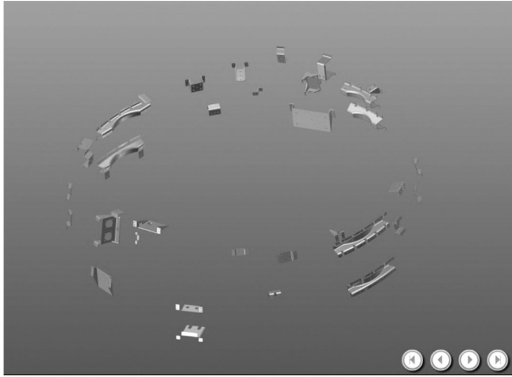


图 8 三维装配动画

Fig.8 3D assembly animation



图 9 工艺可视化系统客户端

Fig.9 Process visualization system client

### 2.3 应用管理层

应用管理层主要是对由工艺人员编制的完善的三维 CAPP 进行分类管理,并存储在服务器中,便于日后查询。对三维数字化 CAPP 进行充分的审核确认,检查无误后,对三维 CAPP 中物料清单、产品零件、工装清单、辅助材料、相关人员和和其他不足条件进行补充,补充充足后下达生产任务指令。并将服务器的内容传送到生产现场的客户端。

### 2.4 装配现场操作层

装配现场操作层主要是为了现场工人能够方便直观的了解到产品的装配工艺状态,阅读审批后的三

维数字化工艺文件;检验人员能够清晰合理的进行产品检查确认,并存储产品的测量数据和多媒体记录;调度人员能够及时的周转产品并按照产品物料清单及时提供必要的装配物料所开发的面向生产现场的三维可视化输出层。

根据每个人人员职能的不同,ID 的不同浏览信息也不一样。操作者登录后,能够浏览三维工艺规程,包括工序、工步内容和工艺描述。对于有问题或描述不清楚的三维工艺文件有专门的反馈界面,使工艺人员第一时间了解到三维工艺文件的不足并进行更改。检验人员登录后,能够浏览检验内容,检验信息和关键尺寸等。调度人员登录后能够浏览物料信息、零件信息、工装工具和其他生产准备信息。

### 3 结论

三维数字化装配工艺是一个集工艺规划、生产过程和数据管理的综合平台,对复杂箭体结构舱段的装配能够帮助工艺技术人员做好工艺规划,设计完善的工装和专用工具,防止装配过程出现干涉等现象。通过网络对制造任务的快速下发,及时更改使工人清晰直观地熟悉装配过程,防止零件位置装错,提高装配精度。帮助调度协调部门提前做好装配准备工作并及时补充短板。帮助检验部门对产品的关键尺寸、重要尺寸进行检验记录并存储在数据库中,便于以后的查询和调用。

三维数字化装配工艺在集成了生产工艺、人员、设备、工装工具等信息后,使工人完全依靠三维 CAPP 进行生产。准确快速的查阅装配过程中需要的信息。使信息的表达方法更加直观生动,提高了装配的准确性和装配效率,缩短装配时间,避免了手工“试配法”易出现公差累计和零件干涉等问题。同时也是未来装配发展的新方向。

### 参考文献

- [1] 史耀亮.飞机的数字化装配工艺设计与仿真[J].计算机光盘软件与应用,2012(7):24-25
- [2] SCHARM H, BREINING R. Assembly planning in virtual environments-scenarios and potentials[J]. Fraunhofer-Gesellschaft IAO,1996,10(2):30-42
- [3] JUNG B. Knowledge-based Assembly Simulation for Virtual Prototype Modeling[C]. Proceedings of the 24<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 1998
- [4] 喻世民.面向火箭发动机的数字化装配工艺系统研究与开发[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008
- [5] 夏平均,姚英学,李建广,等.三维数字化装配工艺系统的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005(1):36-39