

# 基于 DELMIA 的飞机三维装配工艺设计与仿真

## 3D Aircraft Assembly Process Design and Simulation Based on DELMIA

海军驻沈阳地区航空军事代表室 景武  
中航工业沈阳飞机设计研究所 赵所  
中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 刘春晓

**[摘要]** 针对我国航空制造业当前装配工艺规划与设计的现状,开展了基于 DELMIA 进行飞机三维装配工艺设计与仿真方法的研究,对三维装配工艺设计与仿真的关键技术进行了重点分析,包括三维工艺组件划分、装配生产线布局规划、基于知识的装配工艺规划,以及装配仿真中的装配干涉检查、人机工效仿真,并通过某型飞机机翼装配对三维工艺设计与仿真进行了应用验证。

**关键词:** 飞机制造 装配工艺设计 装配仿真  
DELMIA 三维

**[ABSTRACT]** The situation of assembly process design and layout in aircraft manufacturing department of our country are analyzed, proposes the method and workflow for aircraft 3D virtual assembly process design and simulation based on DELMIA are proposed, the relational functions of this software with the contents of 3D virtual assembly are combined, the key technologies are analyzed in detail, including process-oriented component partition and assembly line layout through 3D model, assembly process design based on former knowledge, and the interference check and ergonomics analysis in assembly simulations. Finally the verification of application in some aircraft wing virtual assembly is introduced.

**Keywords:** Aircraft manufacturing Assembly process design Assembly simulation 3D

随着数字化技术在我国航空制造业中的应用不断深入,飞机研制已经从三维数字化设计、数字化预装配向基于模型定义技术(Model Based Definition, MBD)迈进,已基本取消二维图,并且在部分航空企业已经实现了全机三维标注;同时自动化装配生产线、柔性工装、自动钻铆机、装配机器人、激光跟踪仪等先进设备的引入,也使产品制造、装配向数字化方向逐渐完善。

同时,设计和制造并行化程度越来越高,联合产品研发团队模式被广泛采用。在产品阶段,工艺人员

提前介入,进行工艺设计与分析,在很大程度上提高了飞机研发效率,缩短了研制周期<sup>[1]</sup>。但是由于设计部门和制造部门采用不同的数据管理平台,而且设计部门的 CAD 系统与制造部门的 CAPP 系统也通常不能无缝接合,数据需要在不同的数据管理系统和应用系统之间转换、传递,妨碍了并行化进一步提高<sup>[2]</sup>。

就装配工艺设计本身而言,我国大部分航空企业还停留在依靠二维装配图纸和装配工艺规程卡片来进行装配工艺编制的水平,飞机装配实现了部分数字量传递,但仍以模拟量传递为主,上游设计环节所形成的产品三维数字模型没有得到充分利用。

当前迫切需要以产品三维数字样机和 EBOM 为基础,改变现有的工艺协调制造体系,建立工艺数字样机,形成以工艺数字样机为核心的数字化工艺设计体系,实现与产品设计并行的三维工艺设计和工艺仿真,真正实现基于模型(MBD)的数字化设计制造一体化<sup>[3-4]</sup>。

通过三维工艺设计、产品虚拟装配过程的仿真、数字人体装配过程的仿真等先进的三维仿真手段对装配过程进行预演,检验、评价产品的可装配性、工艺性、可维护性,完成装配协调图表、装配顺序图表、装配容差分配方案、工艺指示单等,形成能直接指导现场装配的可视化装配文档,以提高对产品的制造准确度控制能力,避免产品在最后装配时才发现问题。

### 1 三维装配工艺设计与仿真总体规划

基于 MBD 的三维工艺设计,需要一个设计、制造活动能够高度协同的数据管理体系的支撑,同时设计数据能够直接为工艺设计所用, DELMIA 可以实现这一目标。工艺数字化系统是企业管理信息系统的重要组成部分,工艺信息模型是工艺数字化系统的基础,是实现产品信息集成与管理的关键。传统 CAPP 软件解决工艺问题的焦点是放在如何快速生成各种各样的工艺卡片和工艺文件,使工艺人员从繁重的工艺文件编制劳动中得到解放。DELMIA 系统并不是仅仅局限于工艺文件的编制,而是要实现工艺设计全过程的管理、数据分

析和工艺流程,更重要的是为企业生产提供快速、准确的数据源 MBOM。

通过导入产品设计各阶段产生的 EBOM 或 DMU 产品数据,装配资源数据(工装、卡具、工具等),通过可视化进行三维工艺分离面划分、装配生产线布局、装配协调顺序规划,进行工艺编制或重用已有的工艺,产生工艺图表、工艺细节指令、工艺细节路径等,使工艺与产品、资源建立关联,构建单一 PPR 数据模型,并生成 MBOM,同时还须规划工厂和车间的运营、周转流程以及工时等工艺相关内容,进而实现对工艺方案的评估,在初始装配工艺方案的基础上,结合评价优化基准,确定评价优化模型对装配工艺方案进行评价和优化,建立基于虚拟现实系统的可视化工艺细节规划虚拟环境,并通过仿真对装配过程进行验证,验证过程以飞机产品模型、装配资源模型结合规划好的工艺流程进行<sup>[5]</sup>。基于 DELMIA 进行装配工艺设计与装配仿真的总体流程如图 1 所示。

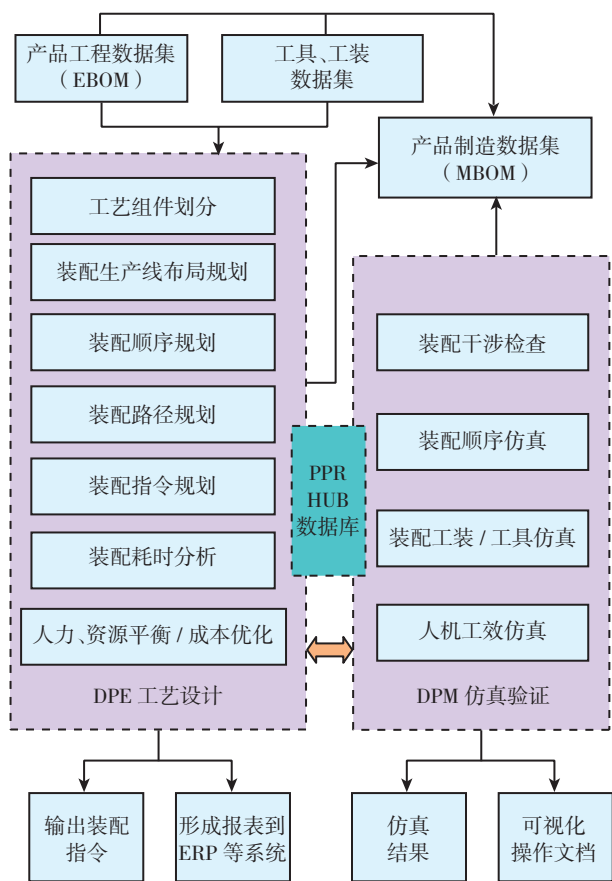


图1 装配工艺设计与仿真总体流程

Fig.1 Work flow of assembly process design and simulation

## 2 三维装配工艺设计过程

### 2.1 三维工艺组件划分

在飞机制造中,由于飞机结构的特点,除了那些形状规则、刚性好的机械加工零件外,大多数的零件,特别是那些形状复杂、尺寸大、刚性小的钣金零件,都必须用体现零件尺寸和形状的专用工艺装备制造,以保证其形状和尺寸的准确度要求。同时对不同尺寸和形状的零件,也要采用专用型架进行装配。而且整个机体的装配要在不同地点、使用不同型架完成。为此,需要对飞机整机进行更细致的划分,在按设计分离面划分的基础上,将大部件进一步划分为多个段件,段件再进一步划分为板件、组件,板件或组件之间一般采用不可拆卸的连接。合理划分工艺分离面,确定装配工艺组件是三维装配工艺设计需解决的首要问题,合理划分工艺组件可以带来如下好处:

(1) 扩大飞机装配工作面,将工作分解、平行进行。

(2) 装配工人施工通路更加开敞,装配劳动环境得到改善,便于机械化作业,提高生产效率和产品质量。

(3) 便于采用更加简单的装配定位方法,简化装配型架等设备的结构。

(4) 使总装架内的装配工作得到有效分解,减少结构复杂的大型总装型架的数量。

基于 DPE 可以实现数字化可视环境下的工艺组件快速划分。如图 2 所示,将产品三维数据导入 DPE,在 DPE 中展开产品结构树,读取产品属性信息,基于可视化窗口,可实时预览划分结果,实现对工艺组件划分的动态调整。需要指出的是,飞机研制厂所积累的正确经验和知识,是进行工艺组件合理划分的重要基础和参考指导,有必要进行相关知识的获取、固化和重用。

### 2.2 装配生产线布局规划

工艺分离面划分形成的工艺组件是针对飞机产品的 EBOM 进行,只是制造数据集 MBOM 的一部分。完整的 MBOM 还包括工装工具等装配资源信息,每个新型号在制造、装配前,生产部门都需要进行生产线的布局设计与规划。在三维环境下,建立厂房架构、车间地面、起吊设备等装配环境模型,同时将已经建立的各装配型架、操作平台、工装夹具等装配资源三维模型放置于装配环境中,从而进行装配生产线的布局与优化。DPE 支持完整的生产线布局规划策略,包括工装夹具等设计优化、厂房布置合理性评价、装配流水线布局评价及优化等,图 3 为飞机装配生产线布局示例。

### 2.3 装配工艺规划

装配工艺组件划分及装配生产线布局完成后,就进入详细装配工艺规划阶段。而飞机作为一种复杂产品,其装配过程是一个经验性很强的活动,装配顺序规划、装配路径规划、装配指令(装配工序、工步)生成等,需要反复迭代。根据经验总结,依托装配现场,分析与装配

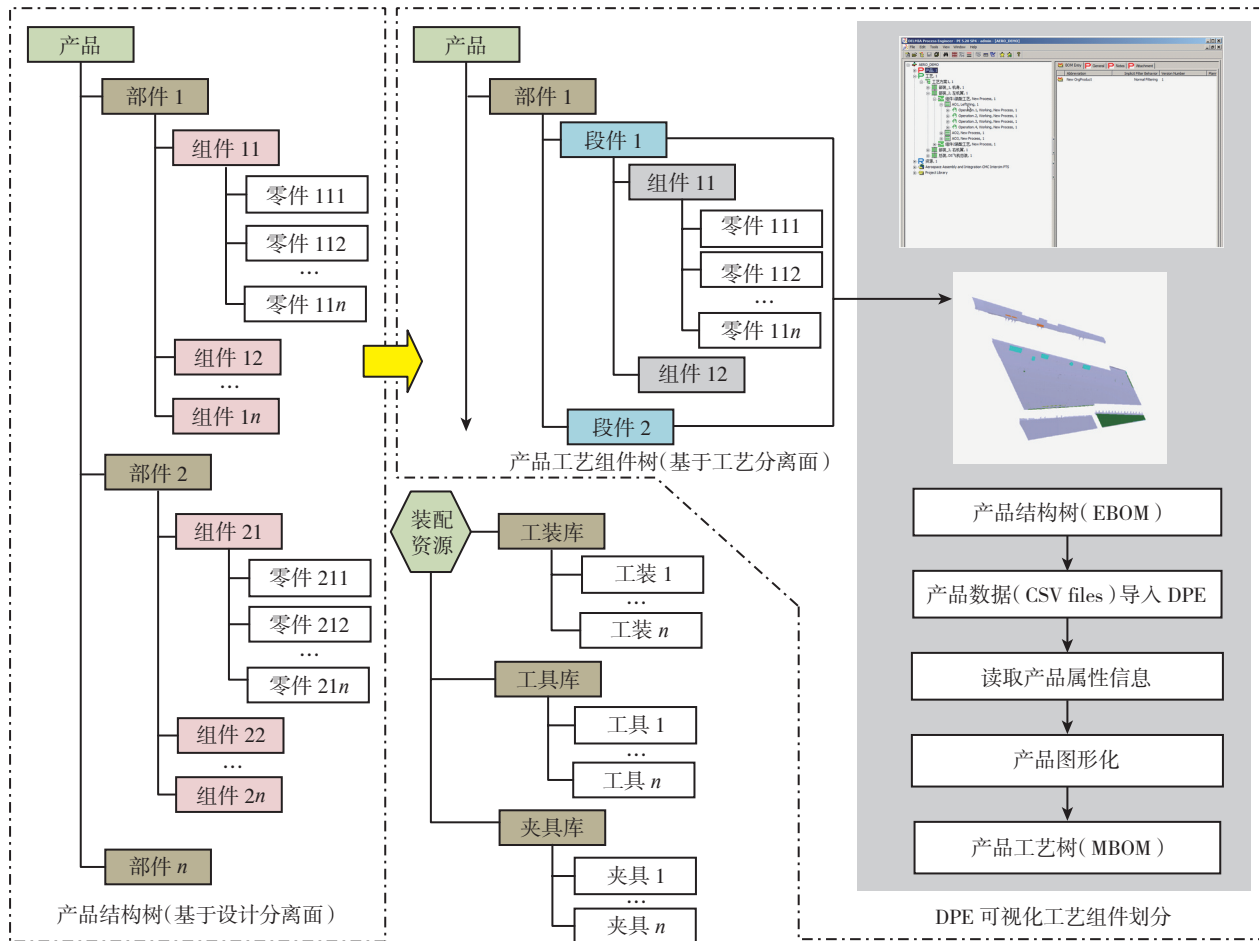


图2 基于DPE的工艺组件划分

Fig.2 Process-oriented component partition based on DPE

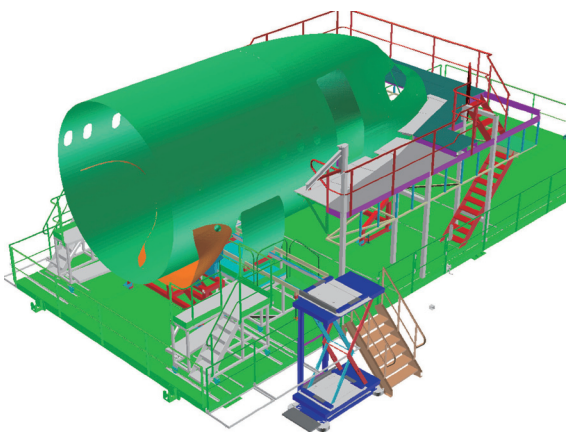


图3 飞机装配生产线布局

Fig.3 Layout of aircraft assembly line

工艺规划有关的影响因素,可参见表1所示的几个方面作为评判依据。

虽然装配工艺规划可以按照表1中的相关评价依据进行,但仍不能保证其最终的合理可行,因为装配工

表1 装配工艺规划评价内容

评判依据	判断细则
基本原则	工装先于基础件装配; 遵从自下而上, 由里向外的装配原则
装配协调路线	装配协调路线体现工件与工装之间的传递关系, 装配协调顺序的路线越短越好
装配并行度	并行度体现装配操作并行执行的能力; 装配顺序的并行度越高, 越容易提高装配设备利用率, 缩短装配时间
操作聚合性	聚合性是指在装配过程中相同或相似的装配操作应集中完成, 以减少装夹次数和更换装配工具的次数, 节省装配时间
装配稳定性	装配稳定性反映装配体的稳定程度, 它直接影响到装配的可靠性和装配工装的复杂性
装配重定向次数	重定向是指在完成某一装配作业前将装配基准体翻转一定的角度, 装配作业应尽量减少重定向的次数, 以节省装配时间, 同时也可避免复杂的装配工艺装备的设计
装配工作量	装配工作量应降低到最低限度, 减少劳动强度
装配成本	装配成本是指在装配过程中与装配活动有关费用的总和, 降低产品开发成本
装配准确度	装配准确度是在装配可行性的基础上从提高装配性能的角度, 检验装配协调顺序的优劣

艺规划过程中装配协调顺序、AO 的确定很大程度上取决于实际装配生产过程相关的潜在知识,如操作者的技术水平及操作习惯、工厂的环境条件、企业的传统先例和应用习惯以及其他特殊经验知识等。所以知识和经验在装配工艺过程中占据举足轻重的地位,尤其在系列飞机型号研制中,这种特性体现得更明显。所以飞机制造企业需建立相应的装配工艺知识库,并根据实际情况扩充知识库容量,逐步使装配工艺知识库趋近完善。

推理规则和装配相关知识是装配知识库的主要组成部分,装配知识库的维护是知识库不断完善和正常运行的基础。构建装配知识库的关键在于通过知识推理规则将大量的装配相关知识进行组织,然后通过不同的渠道整理和收集通用装配知识,使知识库具备一定规模,满足验证部件装配工艺设计要求。装配知识库的建立和维护如图 4 所示。

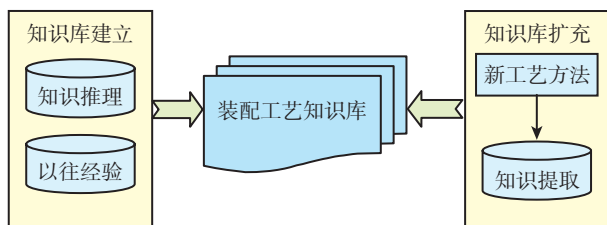


图4 装配知识库的建立

Fig.4 Creation of assembly knowledge library

DPE 支持知识和重用在装配工艺规划中的应用,如图 5 所示,以某一段件工艺规划为例,如果其某个组件的装配工序在其他项目中有相似应用,并且已存入知识库,则可以重用,而不需要在进行重新规划、设计。

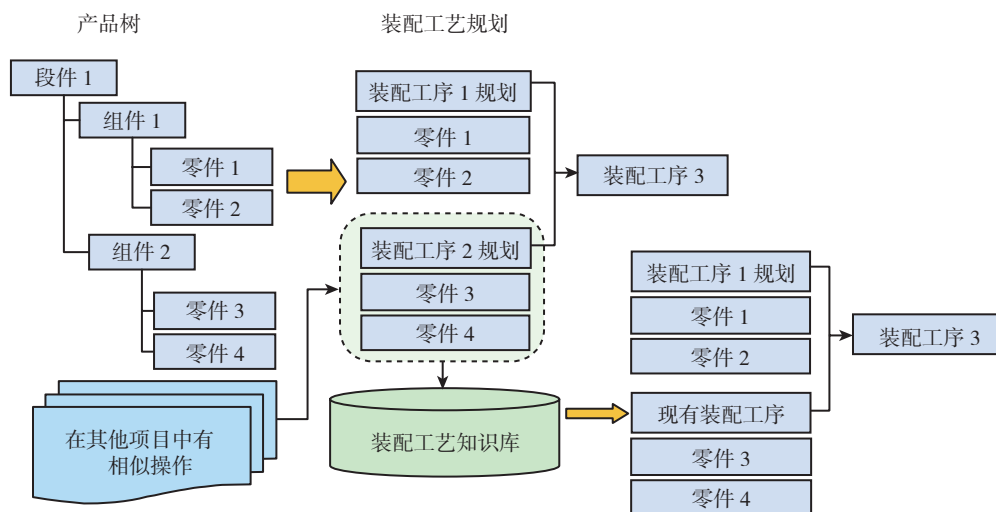


图5 在DPE中基于知识重用的装配工艺规划

Fig.5 Assembly process design based on knowledge reuse in DPE

在飞机装配中,如果从零件级装配到部件级、整机级装配都能充分利用知识、经验,则能极大提高装配效率,节省人才物力。

## 2.4 装配工艺方案的评价与优化

装配工艺方案的评价技术,直接关系到产品装配的工艺性、成本、性能以及质量的好坏,对装配工艺方案的可行性和有效性需要进行评价和优化,在评价和优化过程中,对装配工艺能力、装配设备能力等进行“装配工艺的可行性评价”;对装配协调路线、装配成本、生产准备周期、装配质量等进行“装配工艺的有效性评价”;并建立面向装配协调路线最短、装配成本最低、生产准备周期最短、装配质量最好的装配工艺方案综合优化模型。图 6 为装配工艺方案评价与优化流程。

判断装配工艺方案优劣的一个重要评价依据是装配时间<sup>[6]</sup>。装配时间的精确估计与分析对工艺实现性、成本控制及产品生产周期有重要影响。传统的装配时间评估主要基于工程工艺报告,但是工艺规程报告通常基于工艺计划,而不是实际的工序操作时间。工艺计划基本由人工完成,导致人为因素影响较大。而如果工艺计划规划不合理,将可能导致在进行装配操作时不同人员分工协作不协调、进度不统一等情况的出现。

通过对装配时间定量计算评估,能为工艺规划提供更合理的依据,保证装配能协调同步进行。经典的装配时间计算分析工具软件 MOST 中,将装配过程划分成如图 7 所示的树状结构,通过这种层次结构的划分,可以将装配操作过程细化、分解,并通过分解之后的最底层组元进行操作时间的计算<sup>[7]</sup>。以钻孔为例,可将钻孔过程当作一个“操作”,它包含以下 2 个“子操作”:钻,时间 6s;移动钻头,时间 1.2s。而“钻”这个“子操作”又

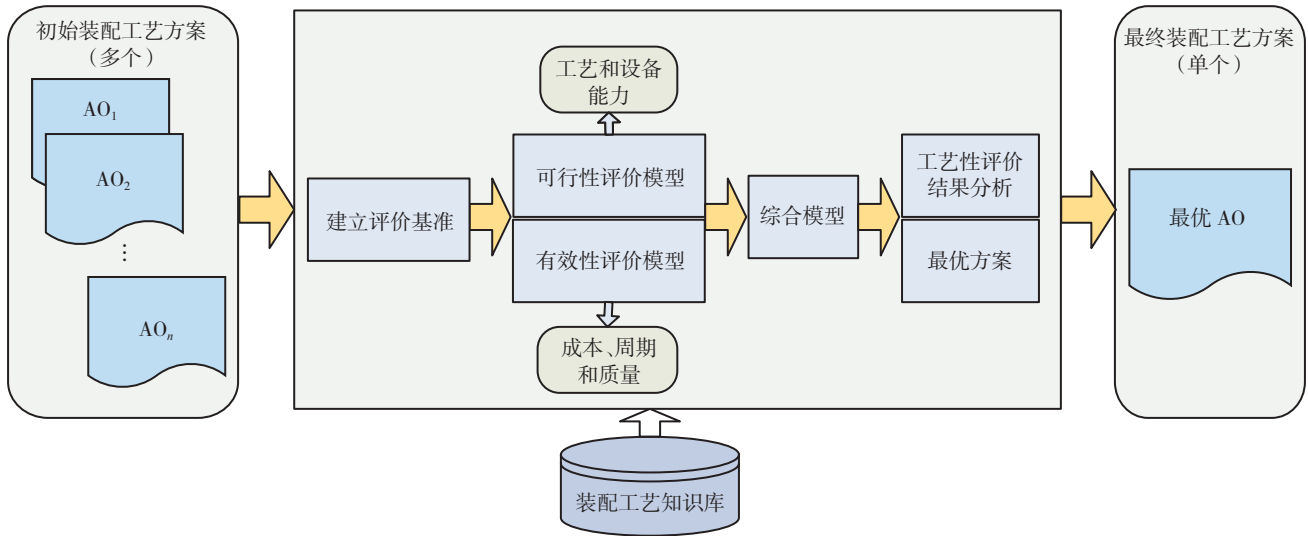


图6 装配工艺方案评价与优化

Fig.6 Evaluation and optimization for assembly process plan

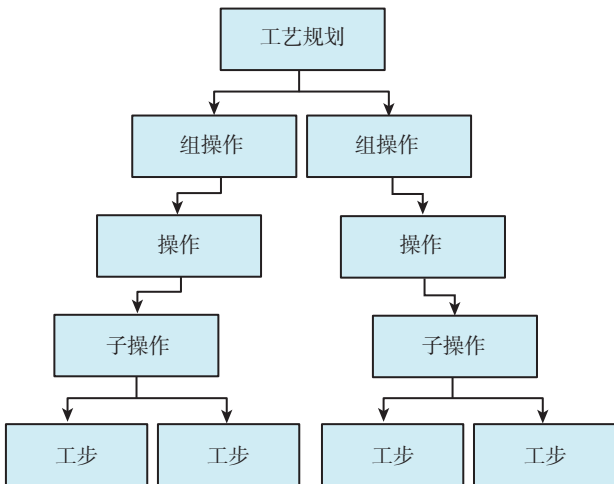


图7 用于时间分析的装配工艺层次划分

Fig.7 Architecture of assembly process hierarchical structure utilized in time analysis

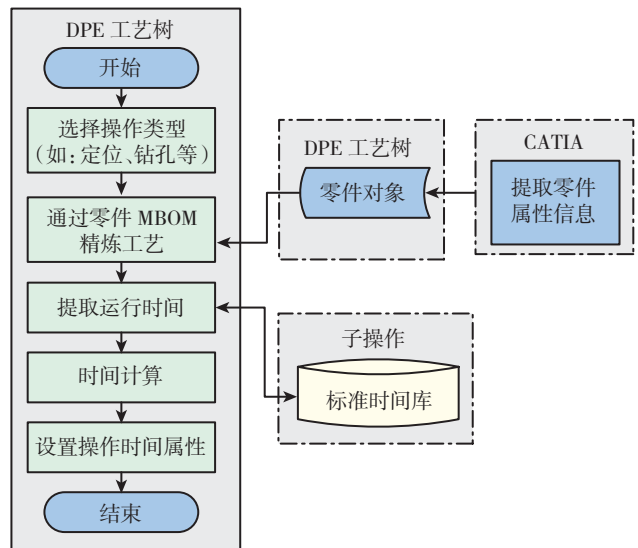


图8 对每一个“操作”进行时间计算与分析

Fig.8 Time generation and analysis for each operation

可以分解成若干个“工步”,通过计算每个“工步”的时间,可得到每个“子操作”的时间,将“子操作”进行分类,并给予其固定的ID编号,并通过经验和实际操作的积累,分类识别出所有“子操作”,并赋予每个“子操作”固定时间,作为标准存入数据库。

应用DPE完全可以将MOST的时间计算方法移植过来,即使用DPE脚本程序开发专家系统,并通过运行该专家系统对每一个“操作”进行时间计算。如图8所示,通过提取产品树上零件的属性信息,包括零件尺寸、材料、重量等,将属性信息映射到DPE的工艺树上,通过对比将初步选定的操作类型(如定位、钻孔等)进行完善,即生成与数据库中相对应的“子操作”,每个“子操

作”的时间可以直接从数据库中提取,再根据分解、完善的“子操作”数量,即可运算得到整个“操作”的操作时间。

### 3 装配仿真

装配工艺方案的可实施性需要采用装配过程仿真进行分析,主要仿真装配协调、装配工序和装配工步。对仿真中发现的装配干涉、空间开敞性、人机工效、装配超差等问题进行反馈迭代分析,最终对装配工艺方案进行验证,保证其可以实施;同时通过可视化仿真提高装配成功率,改善装配质量<sup>[8]</sup>。在装配仿真中,装配干涉

检查能直接判断装配路径、顺序等的合理性,人机工效分析直接分析装配工作的实施者,即人为因素对装配过程的影响与反影响,下文将对这两方面作重点讨论。

### 3.1 装配干涉检查

从装配的角度考虑,产品装配过程中产生干涉的原因包括:设计错误导致零件形状、尺寸不合理,出现装配干涉;装配路径规划不合理导致装配干涉;装配顺序的协调规划不合理导致装配干涉。基于装配路径规划、装配顺序规划和干涉检查之间的密切关系,使装配干涉检查成为判断路径规划是否合理、零件能否按照预定路径顺利到达的最重要的考查和判断依据,只有确认零件在装配路径上的任意位置处均不与其他任何零组件以及工装夹具等装配资源发生干涉,才能确认该路径可以确保零件装配安全可达。

在 DELMIA 中,进行装配干涉分析可以通过运动机构仿真进行动态干涉检测实现,图 9 为动态碰撞传感器设置,打开动态传感器开关,即可进行运动部件动态干涉检查。



图9 DELMIA运动部件动态碰撞检测传感器  
Fig.9 Interference check sensor for moving component in DPE

### 3.2 人机工效分析

在虚拟装配中,利用人机工程技术,根据虚拟装配仿真环境,通过对虚拟人体模型的控制,模拟生产现场装配人员在装配时的各种实际操作,并基于此进行测试和分析,实现对已设计的虚拟装配方案进行人机工效评

估,以便及时发现产品在装配中可能遇到的问题<sup>[9]</sup>。在 DELMIA 中有专门进行人机工效仿真和分析的模块,可实现以下人机工效分析<sup>[10-12]</sup>。(1)可达性、可视性分析:通过对产品各个零部件装配顺序的仿真、装配路径对人体操作可达性的影响,利用对人体各种极限姿态的模拟,检查零部件是否处于极限姿势下的操作范围之内,哪些零部件处于操作范围之外;(2)作业空间开敞性分析与评估:检查装配操作空间是否能满足人体作业需要,相关设备布局是否合理,装配操作是否符合舒适性要求;(3)装配作业姿态分析:作业姿态分析主要是判断装配人员是否能够处于最舒适的作业姿势,运用最佳作业动作进行装配,并判断各种作业方式是否会引起装配人员工作效率下降和产生疲劳。图 10 为利用 DELMIA 进行虚拟装配操作的人机工效仿真。

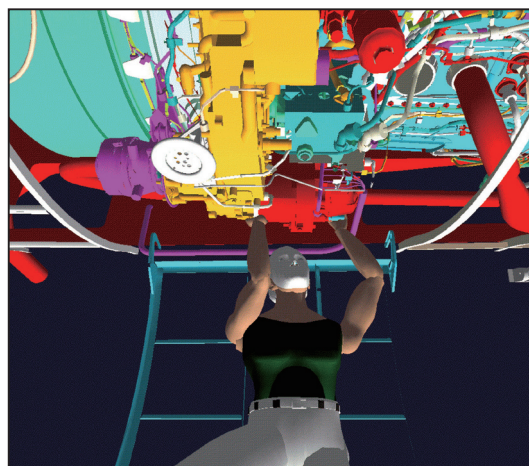


图10 DPM中人机工效仿真  
Fig.10 Ergonomics simulation in DPM

## 4 工程验证

以某飞机机翼部件装配为对象,在 DELMIA 集成平台上,依据工艺组件划分结果,将虚拟装配过程中的工装、夹具等相关装配资源加入仿真环境,并依据规划好的装配工艺指令,分层、分步的对装配工艺规划过程中的操作进行可视化操作与演示,交互式地实现对每一步装配操作的全面可视化分析,对整个装配协调过程中的可达性、可拆卸性和可维护性进行全面的分析,检验装配工艺方案的可行性。最终,依据仿真结果输出电子装配工艺文件指导装配现场,使得装配过程更加直观,显著提高了工艺规划和现场执行效率。图 11 为机翼装配仿真验证示例,图 12 为创建的装配资源库。

经过仿真验证涉及零组件装配 3000 余个,工装零件 3020 余个,装配仿真时间 1 万余秒。仿真过程验证了折叠翼部件和其配套工装的工艺可行性,分析了装配

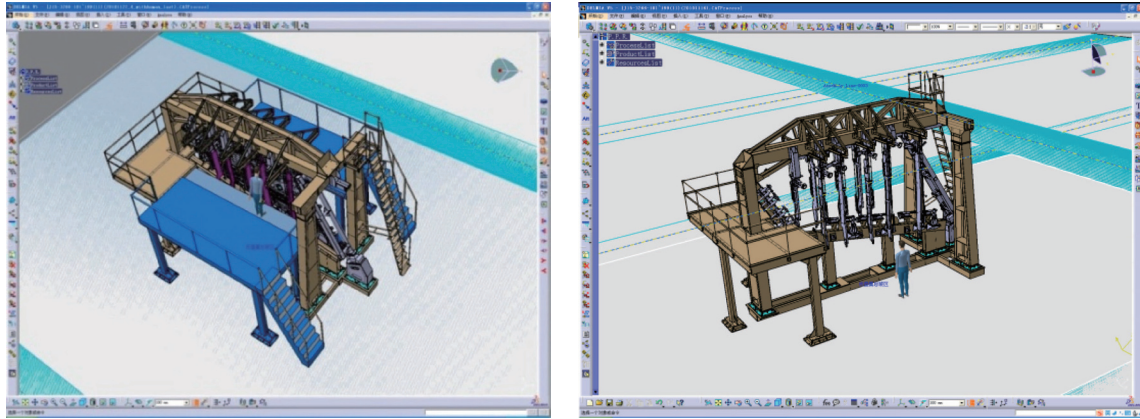


图11 某飞机机翼装配工艺仿真验证

Fig.11 Simulation verification of some aircraft wing assembly process



图12 装配仿真工具资源库

Fig.12 Tool resources library for assembly simulation

过程中的工具可达性,操作空间的开敞性,以及人机操作过程的工效性。

## 5 结束语

本文针对基于 DELMIA 的三维装配工艺设计与仿真相关技术进行了综合论述。研究复杂产品三维装配工艺与装配仿真技术,实现三维装配工艺规划、装配工艺过程的三维仿真和装配过程的可视化,实现装配信息从装配设计向装配工艺有效传递与共享,是提高装配工艺设计效率、减少装配工艺设计返工、提高装配质量和效率的关键,是提高复杂产品开发数字化水平的必要途径。

本文对基于三维模型的飞机装配容差分配与优化技术没有进行相关讨论,但其将是今后三维工艺设计的一个重要研究方向。目前的装配容差分配不是基于飞机数字样机来完成的,而是凭工艺人员的相关知识和经验,借助已有机型的经验数据确定容差设计中容差项与

容差值,导致容差设计的随意性和试凑性;其优劣在很大程度上取决于从事容差设计工艺人员的技术水平和实际经验,为了提高零件的可装配性,容差的合理选择、分配与优化相当关键;可以提高飞机的一次装配成功率,实现飞机装配容差的快速分析、分配与优化。

## 参考文献

- [1] 郭洪杰. 装配仿真技术在飞机并行设计阶段的应用. 航空制造技术, 2009(24):65-71.
- [2] 张魁, 范玉清, 卢鹤, 等. 基于 MBD 制造体系的装配工艺数据集成. 机械工程师, 2009(1):55-58.
- [3] 邹晓明, 许建新, 耿俊浩. 基于三维模型的装配工艺规划技术研究. 工艺与装备, 2008(7):97-100.
- [4] 冯廷廷, 金霞, 王珉, 等. 基于 MBD 的飞机装配工艺模型设计. 航空制造技术 2010(24):95-98.
- [5] 贾朝定. 基于 DELMIA 的虚拟装配技术. 2007 国防科技工业虚拟制造技术高层论坛论文集, 2007, 97-101.
- [6] Jin Y, Current R, Butterfield J, et al. Automated assembly time analysis using a digital knowledge based approach. The 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, 2008, 14-19.
- [7] McEwan W, Butterfield J, Price M, et al. Development of a digital methodology for composite process & manufacture in aerospace assemblies. 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, 2010, 13-15.
- [8] 许旭东, 毕利文, 姚定. 虚拟装配技术改变飞机制造流程. 航空制造技术, 2009(11):45-47.
- [9] Mavrikios D, Karabatsou V, Alexopoulos K, et al. A virtual reality based paradigm for human-oriented design for maintainability in aircraft development. 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 2007, 18-20.
- [10] 范玉清. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [11] 郑午. 人因工程设计. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [12] 李景新, 郑国磊. DELMIA 系统在飞机装配模拟中的应用研究. 航空制造技术, 2008(11):90-93.

(责编 深蓝)