面向航空复杂产品的装配工艺优化设计技术

撰文 | 航空工业信息技术中心（金航数码） 张晓梅

本文面向航空复杂产品，进行装配全过程技术研究，从装配的前端设计、装配过程监控、装配事后优化三个方面，论述了复杂航空产品的装配技术，包括基于MBD的面向装配的产品设计技术、基于数字孪生的装配仿真和优化设计技术、基于AR技术的智能装配技术、基于大数据的装配分析仿真和优化设计技术等。通过航空复杂产品装配全过程关键技术研究，实现航空复杂产品工艺设计模式和设计方法创新，为提高航空复杂产品研制质量提供技术保障。

一、引言

航空产品在设计上具有结构复杂、标准化程度低和零部件数量大等特点；在制造上具有工艺专业门类众多、加工工艺难度大、制造流程长、零部件配套关系复杂和机电一体化等特点。随着航空行业市场需求的日益加大和市场竞争的日益加剧，航空产品制造在不断缩短研制周期和提高产品研制质量的同时，更加趋向于设计、工艺与制造过程的紧密协同。随着新型MBD技术、数字孪生技术、AR技术、VR技术、物联网技术、大数据技术和人工智能技术等不断诞生并广泛应用，我们迫切需要将这些新型技术应用于航空产品研制过程中，以满足航空产品设计和制造中的特殊性要求，并不断提升航空产品研制能力，以面对市场挑战的要求。因此，我们需要借鉴国内外发达航空制造企业的成功案例和经验，将先进的技术应用于航空产品研制过程中，开展适合于我国航空产品的数字化装配工艺技术研究，以提升我国航空产品的研制能力。

二、面向航空复杂产品的装配工艺优化设计（图1）综述

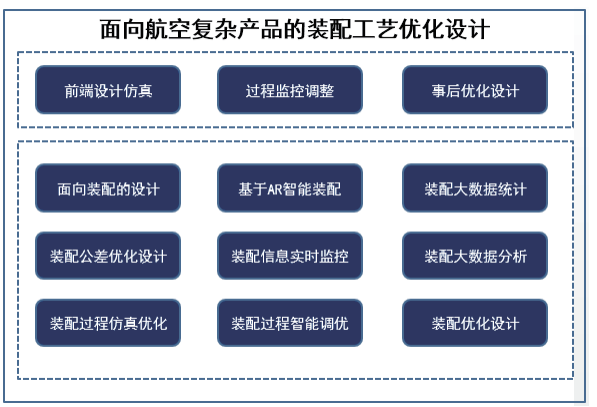


图1 面向航空复杂产品的装配工艺优化设计技术

研究航空复杂产品装配全过程，包括装配的前端设计：面向装配的设计、装配公差优化设计和装配过程仿真优化；装配过程监控：基于AR技术的智能装配、装配信息实时监控和装配过程智能调优；装配事后优化：装配大数据统计、装配大数据分析和装配优化设计。

1、装配的前端设计

将MBD技术应用于产品设计和装配工艺设计过程中，

实现面向装配的产品设计，让产品设计更加满足工艺性和制造性要求。同时将后续工艺、制造和检验信息，标注在三维模型上，实现单一数据源下的设计、工艺、制造和检验关联设计和管理。

工程师可以直接在设计的三维模型上进行公差设计，按照 ASME Y14.5M-1994 和 ISO1101 的要求，计算当前产品公差下产品的合格率。通过关键公差值的灵敏度分析和多目标条件下的公差分析，求解出满足产品多目标要求的公差值，实现公差的优化设计。

基于数字孪生技术，将实际装配条件加载到数字化样机上，实现装配过程模拟仿真，实现装配过程干涉检查和间隙检查，基于检查结果优化装配设计。

2、装配过程监控和智能调整

基于物联网技术和数字化显示技术，实时获得装配过程信息，对装配的过程信息进行实时展示。基于装配知识库数据，对装配工艺参数进行实时调整，以满足智能装配的要求。

基于 AR 技术和 VR 技术，在数字化环境和真实环境下进行产品实时装配，随着装配环境的变化智能调整装配路径，指导现场操作人员进行快速装配，并达到装配质量的要求。

3、装配事后优化设计

获得产品装配过程中产生的各种数据，基于人工智能技术和大数据技术，建立装配几何模型、装配过程的仿真模型和智能装配的决策模型，基于航空复杂产品装配知识库，通过数据分析、数据挖掘和机器学习，智能监测和调整装配过程，实现智能装配。

三、面向航空复杂产品的装配工艺优化设计的关键技术

1、基于 MBD 技术的面向装配的产品设计

（1）面向装配的产品设计

面向装配的产品设计在考虑产品外观、功能和可靠性等前提下，通过提高产品的可装配性，提高产品整体性能。可装配性是指产品设计为满足装配要求，针对装配工艺对产品设计要求进行产品设计，确保装配效率高、装配不良率低、装配成本低和装配质量高等。

通过面向装配的产品设计，设计人员能够基于装配规则进行装配设计，并在产品设计时对产品的装配性进行先期的检验，通过分析影响产品装配性的各种因素，对产品的可装配性进行评价，在此基础上给出优化装配设计建议，以精简产品结构，改进装配性能，提高产品可装配性。

（2）基于 MBD 技术的面向装配的产品设计（图 2）

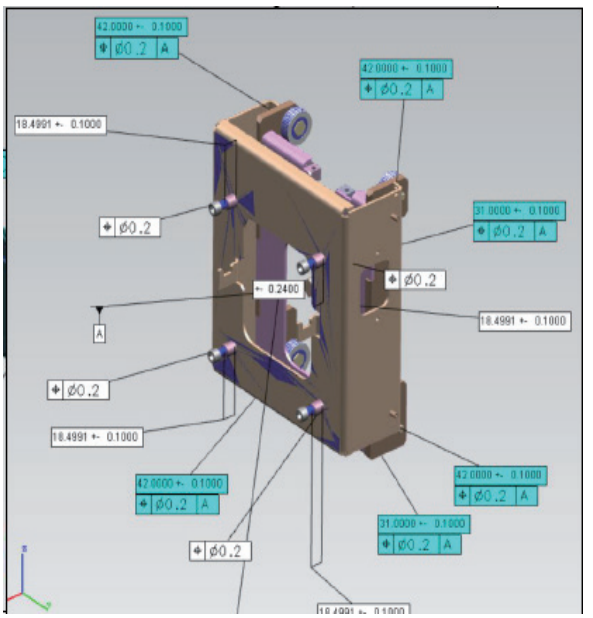


图 2 基于 MBD 技术的面向装配的产品设计

为了提高产品装配的效率，实现工艺数据及时、准确地表达和装配信息的数字化管理，将 MBD 技术可以深入应用于装配工艺设计。采用 MBD 技术，设计工程师将产品研制的各种数据都标注在产品模型上，包括设计信息、工艺信息、生产制造信息和检验信息等，形成完整的数字化样机。工艺部门基于设计模型开展数字化工艺设计、数字化工装设计、数控编程设计、数控检验编程设计和数字化工艺分析。MBD 技术的应用，为设计、工艺、加工和检验数据的一致性和关联性提供技术支撑，为设计制造一体化提供技术保障。

2、基于装配模型的装配工艺优化设计

建立装配过程的数字化模型，包括：产品模型、物料模型、装配设备模型、检测设备模型和操作人员模型等，对装配过程进行模拟仿真，在数字化环境中发现不合理的装配，尽早改进装配设计，优化装配过程。

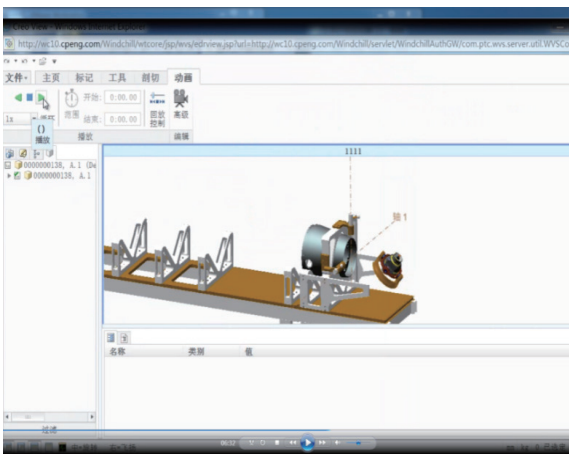
（1）装配拆卸过程仿真优化设计（图 3）

拆装过程干涉检查：通过对产品拆装过程仿真，验证装配顺序是否能无阻碍的装配下去，以确认装配设计的合理性。针对具体 AO/AAO，进行产品与产品之间、产品与工

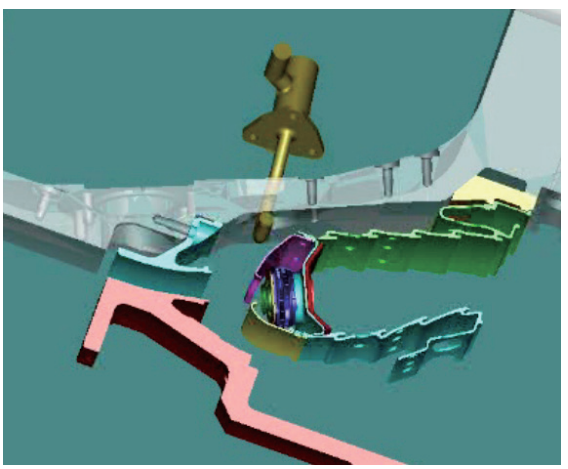
投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

装之间的干涉检查。当发现干涉情况时报警，高亮显示出干涉区域和干涉量，以帮助工艺设计人员及早发现问题，查找和分析干涉原因，基于干涉检查结果实现装配工艺的优化设计。

拆装路线自动生成：动画模拟零部件的拆装过程，分析零部件拆装过程中是否与周围零部件发生冲突，评估零部件是否可拆装，并为部件寻找到一个无干涉的拆装路径。通过捕捉一个部件沿一条给定路线运动所产生的空间体积，形成一个扫掠体，以表示设计回避区，设计在这个回避区外进行产品设计，可避免部件拆装过程中引发的干涉。



（a）

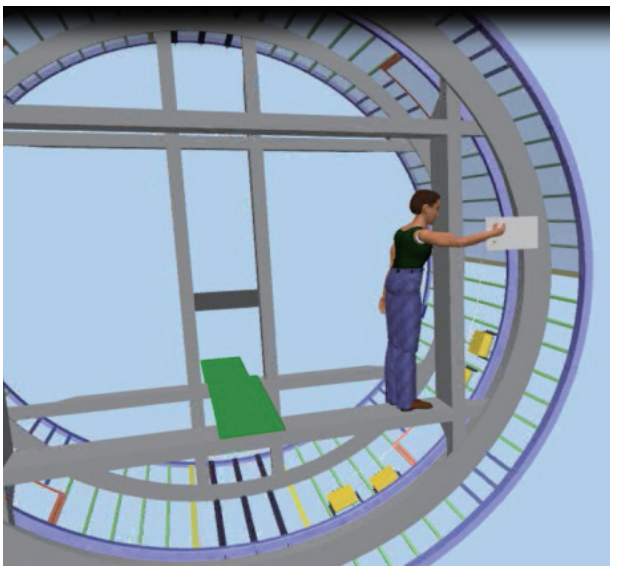


（b）

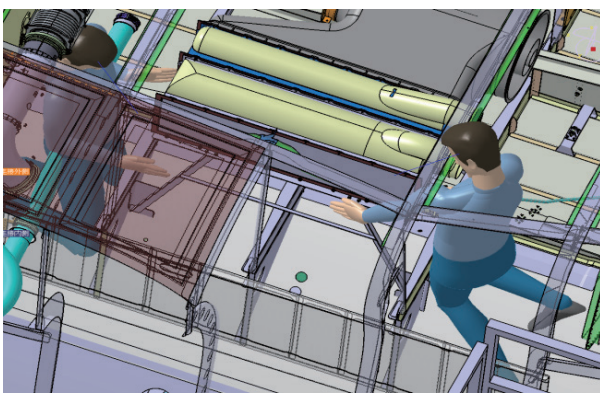
图 3 拆装模拟仿真和干涉检查

（2）装配过程中人因分析仿真和优化设计（图 4）

利用人机工程学理论和技术，对于开场性、可视性、可达到性和可操作性较差的部位，可以将标准人体的三维模型放入虚拟装配环境中进行人机工程仿真，并模拟操作者的操作过程以发现操作空间大小是否满足拆装需要、操作者身体能否达到拆装位置及拆装对象是否可见等问题。将人因仿真报告提交相关部门，实现产品、工艺和工装的优化设计。



（a）



（b）

图 4 装配过程人因分析仿真

（3）装配工艺参数的分析仿真和优化设计

装配工艺参数灵敏度分析是研究与分析装配工艺参数的变化对飞机装配综合指标随周围条件变化的敏感程度的方法。在优化装配工艺设计中，利用灵敏度分析来研究装配工艺参数不准确或发生变化时装配工艺最优解的稳定性。通过灵敏度分析可以决定哪些工艺参数对装配系统有较大的影响，并获得这些装配关键因素的最佳取值范围。通过装配多目标的计算分析和迭代，实现装配工艺优化设计。

3、基于数字孪生技术的装配仿真和优化设计

数字孪生（Digital Twin），是充分利用物理模型、传

感器更新及运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度和多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。

数字孪生是对建造系统的集成仿真，具有多物理、多分辨率和概率性的特征，由数字线索使能，使用最佳的可用模型、感知信息以及输入数据，用以映射和预测相对应的“物理孪生”生命周期的活动和性能。

基于数字孪生技术将物理空间的数据反馈到虚拟的产品开发之中，将数字化装配模型和实物模型进行持续的分析比对、分析评估、连续验证和预测优化，加强定量分析和确认，有效支持关键决策，大幅降低飞机复杂产品装配开发时间和成本。

4、基于 AR 技术的装配现场模拟和智能装配（图 5）

增强现实技术是在虚拟现实技术的基础上发展起来的，通过计算机系统提供的信息增加用户对现实世界感知的技术。增强现实仿真系统是虚拟制造仿真系统进一步深入的拓展研究，增强现实是一种实时地计算摄影机影像的位置及角度并加上相应的技术，这种技术的目标是在屏幕上把虚拟世界套在现实世界并进行互动。

目前的大多数增强现实都是通过将已知信息叠加到物理世界上来实现的，由于现代化生产的需要，虚拟制造也成为现实。AR 技术应用于实现产品可视化展示、工艺指令指导和操作入门培训等。AR 技术可以将虚拟操作说明再现成现场操作手册，服务维护时可以及时地将数字化信息投射到现实世界中，从而根据具体环境指导正在执行的工艺操作任务，提高现场操作的效能。

图 5 基于 AR 技术实现产品装配

5、基于大数据技术的装配分析仿真和优化设计

在航空复杂产品的装配过程中，基于传感器、物联网和 CPS 等技术，实现装配过程中质量、检测、物流、设备和能耗等数据的实时采集，通过对装配过程中产生的这些大数据进行统计分析，获得影响装配质量、进度和成本的关键因素。通过研究这些关键因素的变化趋势，找出装配过程中有问题的地方和解决问题的具体措施，实现面向航空复杂产品的装配工艺优化设计。

工时优化设计：对生产的每架次飞机记录每道工序的开始时间、完工移交时间和计划完工移交时间；同时统计出工序的实际工时和延误时间，判断出工序是否按时完工。对这些大数据进行统计分析计算，分别统计出各道工序的完工率、交检率和质量检验时间，从工序方法、工序规划、工序质检以及操作人员类别等方面对工艺指令进行优化设计。

装配预紧力优化设计：获取每次装配过程中装卡设备用力和产品的受力情况，通过大数据统计分析计算，分析装卡设备的拧紧力和产品的压力 / 压装 / 装配力矩等之间的关系，获得装卡设备用力和产品的受力变化关系和变化趋势，得到装卡设备最佳用力，实现装配预紧力优化设计。

装配间隙和阶差优化设计：获得多部件结合处的装配间隙和阶差、运动部件活动面之间的最大和最小间隙等数据，从每次装配的装配工艺参数变化过程中，分析判断装配工艺参数和装配间隙及阶差之间的变化趋势，从而优化装配工艺参数，获得满足装配间隙和阶差的最佳工艺参数值。

物料配送优化设计：分析各种物料配送的时间，分析各种物料配送对装配影响程度，分析不同供应商的物料配送准时率。面向整个装配过程，按照各种物料配送的准确率统筹进行物料配送，确保重要紧急的装配配备有可靠的供应商物料，最大化保证装配物料正常供给，确保正常装配。

操作人员合理优化分配：针对各种工艺，统计不同资质的操作人员完成工艺的时间和质量，对操作人员进行分类定义，按照装配工艺的轻重缓急，分配不同级别的操作人员，最大化利用人力资源，保障装配进度和质量。

四、结语

本文面向航空复杂产品，通过航空复杂产品装配全过程关键技术研究，实现航空复杂产品工艺设计模式和设计方法创新，为提高航空复杂产品研制质量提供技术保障。随着航空产品功能性能不断提高，航空产品及其制造工艺变得越来越复杂，迫切需要将更多的新型技术应用于航空复杂产品的设计制造中。因此，面向复杂航空产品的装配工艺优化设计还需要加大研究方向，形成更多的研究成果应用于航空产品研制，以提高我们航空产品研制能力。

投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn