

飞机全三维快速响应试制应用技术

Entire 3D and Quick Response Trial-manufacture Technology for Aircraft

孙聪/中国航空工业集团公司

摘要: 提出了在飞机研制中采用全三维快速响应试制技术,以全三维数字化设计数模为核心,三维设计、三维制造、三维检验的技术体系。这种技术体系设计/工艺高度并行,单一数据源时时共享,并作为唯一依据贯穿飞机研制全生命周期,“边设计、边制造”,制造技术前移。在新型研发平台上建立了以设计与制造一体化为核心的快速试制技术体系,在新技术应用上上了一个台阶,重量控制精准、试制流程简捷、技术体系先进、技术手段实用,实现了“好、快、廉”的设计目标。

Abstract: The entire 3D and quick response trial-manufacture technology is based on the entire 3D digital model design including 3D design, 3D manufacture and 3D checking. The technology features concurrent and collaborative digital design and manufacture, unique real-time data source shared throughout the entire process of aircraft development, realizes design and manufacturing simultaneously, and brings manufacturing forward. The trial-manufacture technology with the core of design/manufacture integration was established on a platform, which turns out to be a precise weight control, an easy and fast trial-manufacture, advanced technology system and a practical technical means. The technology can achieve the design goal of “good performance, rapid manufacturing, low cost”.

关键词: 全三维设计;快速响应;产品数字化定义;生产试制;并行协同;构件库;统一模型关联系统;结构优化;重量控制

Keywords: entire 3D design; quick response; product based on digital definition; trial-production; concurrent and collaborative; component library; uniform model related system; structure optimization; weight control

0 引言

现代飞机武器装备具有品种多、更新快、要求快速研制的特点,对三维设计、三维制造技术的需求越来越迫切。以美国为代表的西方发达国家广泛采用数字化设计和制造技术,从根本上改变了传统飞机研制模式,并取得了显著效益。波音777作为全球第一种全数字化定义出来的飞机,由于设计更改造成的返工减少了50%,研制周期缩短了25%以上,制造精度提高了一个数量级。在波音777飞机产品全数字化定义的基础上,波音737-700飞机实现了研制过程的数字化管理和控制,减少了非增值环节,进一步缩短了研制周期,降低了研制成本^[1-2]。2012年5月,美国

空军公布了最新制造技术远景规划,即“下一代敏捷制造”,最终确定了以下4个战略重点:

- 1) 产品全生命周期数字化;
- 2) 制造技术前移;
- 3) 快速响应、集成的供应链基础(通过网络互联、软件工具等优化供应链);
- 4) 未来车间(实现柔性、自主装配、企业互联);

数字化设计和制造技术能满足先进航空武器装备快速研制的要求,提高新型航空武器装备的研制效率和质量、快速响应国家安全对先进航空武器装备的需求。从目前国内设计制造技术的发展来看,三维模型并未能贯穿于整个

飞机数字化制造过程,二维图纸依然是部分制造过程的依据,数据源分散、关联性差、中间环节多、准确性无法保证等问题已经成为制约飞机设计制造技术发展的瓶颈^[3]。这种现状导致信息传递路线分散,多数据源并存,难以管理,进而导致制造协调困难,出错返工现象严重,影响了飞机研制的进度和质量。因此,新型武器研制需要打破原有二维、三维并存的设计和制造模式,整合数据集,实现面向武器装备快速研制的模型三维化、参数信息化、信息关联化,形成全三维数字化设计模型,以全三维数字化设计模型为核心,集成设计、制造、检验等研制过程的全三维信息,实现武器装备研制过程“好、快、廉”的设

计目标。

1 发展现状

洛克希德·马丁公司臭鼬工作队的F-22、F-35飞机研制模式已经成为飞机快速试制的经典范例。臭鼬工作队所从事的不是简单的重复性劳动,而是一种高投入、高风险的创新,不仅采用最简单、最直接的方法来研制和生产新产品,而且打破了条条框框,摒弃墨守陈规的行为准则,实现了设计、制造的紧密结合,减少了管理环节,通过技术创新实现企业持续发展。

现代飞机武器装备种类多、更新快,研制周期长。批生产和科研试制混线的国内现行体制无法实现快速试制。传统装配工艺需要大量工装、型架,因此产生了大量模具和工装,制造周期长,成本高,缺乏柔性。这不仅延误了飞机的研制周期,而且减缓了新技术的应用进程。同时,新机试制和批产混线导致资源争夺、相互干扰,无法适应飞机低成本、快速研制的迫切需求。因此,飞机研制必须在设计源头上解决试制成本、周期、性能等诸多问题,必须在设计上建立能够适应飞机快速试制的流程,建立多专业高度并行协同的技术体系,采用基于全三维设计与制造一体化的飞机快速试制技术,采用减少工装型架的数字化柔性装配等新技术,统一数据源,边设计、边制造,将制造技术前移,实现快速响应试制和飞机设计/制造技术创新。

2 全三维技术体系

全三维概念源于国外的基于模型定义(MBD)技术^[4],它将三维制造信息PMI(Product Manufacturing Information)与三维设计信息共同定义到产品的三维数字化模型中,使CAD/CAM(计算机

辅助设计、制造、装配、测量、检验等)实现高度集成。全三维信息模型以三维模型为载体,在统一的产品设计技术规范定义下,集成几何属性、非几何属性、管理属性等信息,作为设计、指导生产制造和装配、检测的单一数据源。

基于全三维信息模型的技术体系确定了产品统一信息包含的内容,梳理了面向产品全生命周期的集成化过程信息,加强了制造工艺信息(如加工、装配、检测等)、构型管理信息及物料信息建模,建立了可以支持产品全生命周期的统一建模方法。这种技术体系采用统一规范术语对过程信息进行规范,保证信息在不同平台和不同业务需求中得到语义一致的数据,实现过程信息的集成、数据源一致和形式统一规范,包含图1的7个方面内容。

1) 数字化设计技术

该技术体系以产品全三维数字化设计模型为载体,研究产品尺寸、公差、材料、热处理、技术要求、标准件等设计制造信息在三维模型中的全新定义和

表示方法,制定相关的设计技术规范和基础数据库。在此基础上,该体系开发参数化建模、三维快速标注、标准件快速装配等设计辅助工具,实现飞机快速数字化设计。

2) 构型管理技术

针对飞机研制过程,该体系建立了基于全三维设计的产品数据管理与集成系统,主要包括产品数据一致性维护、构型管理以及协同设计流程管理,搭建数据管理集成应用平台。

3) 工艺设计技术

在全三维模型的基础上,该体系能够进行全三维零件制造工艺设计和飞机装配工艺设计。

4) 装配协调与容差分配技术

在数字化环境下,该体系能够进行三维协调路线规划、数字化容差分析优化与精度控制。

5) 工装设计技术

该体系面向三维零件设计模型,同步进行零件工艺信息的获取和表示,实现三维环境下的工装快速设计和校验,



图1 全三维信息模型图

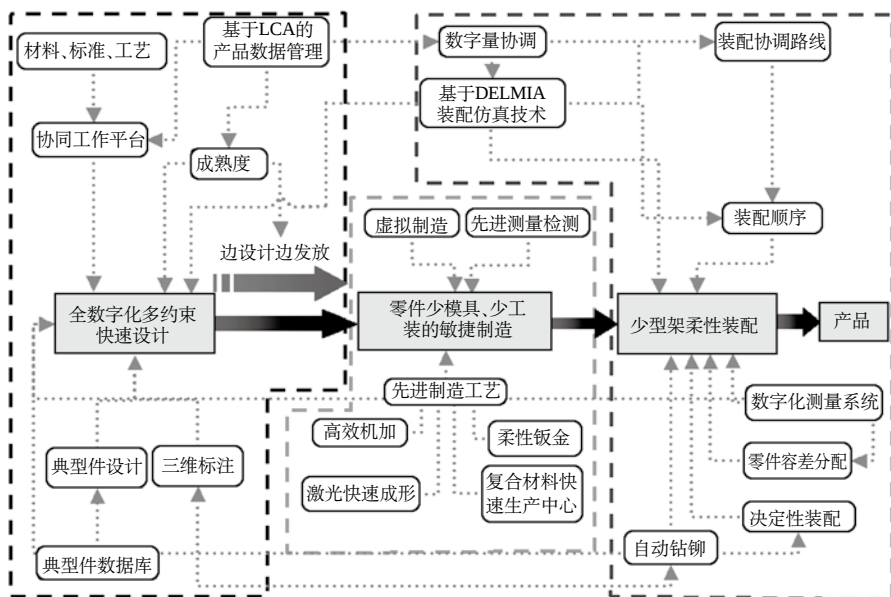


图2 核心技术框图

解决传统上工装设计和工艺设计相互脱节的问题。

(6) 装配仿真与生产执行技术

在全三维信息模型基础上,该体系定义了装配作业现场的产品、工艺资源等信息,建立了装配作业过程信息模型,针对装配人机功效和装配过程进行仿真,能够提前准确地发现装配现场潜在问题。

(7) 质量检验技术

该体系能够对飞机钣金、复合材料、机加零件及钣金模具的典型制造过程和飞机装配过程进行数字化检测,建

立全三维数字化设计模型的数字化检测系统,实现检验依据由二维向三维的转变。

3 飞机快速试制技术

飞机快速试制需要从技术平台、设计流程及设计思想上进行创新,在设计源头上解决飞机试制成本、周期、性能等设计和制造一体化的问题^[5]。

1) 构建全三维设计/制造一体化技术平台

新机快速研制需要搭建厂、所统一协调平台,产品的数学建模要求按成熟

度管理,做到单一数据源时时共享,边设计,边制造。在设计阶段,材料、标准、工艺等各专业通过产品数据库管理系统搭建的协同平台参与设计,通过全三维设计模式,按成熟度进行控制,边设计/边制造,缩短设计周期,减少后期协调返工,其核心技术框架如图2所示。

全三维设计与制造一体化技术的基础是三维标注技术的应用,其核心是集设计、制造和装配信息于一体的数字化产品定义数据集,三维模型可以替代二维图纸作为技术交流和信息传递的主要方式。三维标注的形式如图3所示。

通过进一步开发如图4的CATIA设计环境,在新机研制过程中已经完善了标准,建立了三维标注文件体系,开发了具有自主知识产权的三维标注插件与数据库相结合的CATIA设计环境,完成了插件和基础数据库的开发,规范、快速地在三维模型中表达全部工程信息,大大地提高了设计质量和效率。

2) 创新的设计流程

设计初期,在统一原则下,由结构、强度、载荷等多专业共同建立全机有限元模型,通过构件库、统一模型关联系统实现方案阶段快速评估;通过全机结构优化进行布局及参数优化,实现快速精准设计。在设备安装协调、工艺等并行协同下开展全三维详细初步设计实

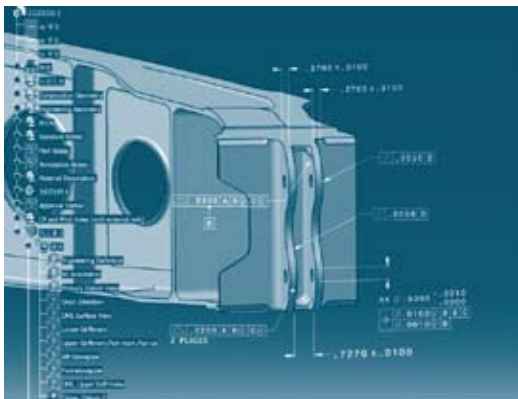


图3 三维标注定义



图4 CATIA设计环境二次开发

现结构基本构型设计,将主传力结构构型、细节设计参数列表供全三维详细设计;在设计的同时,工艺人员协同介入,进行工艺方案制定,并视设计情况适时逐步发放三维模型,先期启动制造进程,制造技术前移。

3) 创新的设计思想

飞机快速试制要求在技术应用上要勇于创新,建立以设计制造一体化为核心的快速试制技术体系;在结构构型、选材、制造工艺选择等方面,采用先进的结构构型,改善结构完整性,减少装配环节,提高装配效率;选择成熟度高的材料与制造工艺,选用大厚度铝合金预拉伸厚板,钛合金、超高强度激光成形与电子束成形增材制造技术,数字化柔性装配等技术,实现快速响应试制,降低研制成本,缩短研制周期。在制造上,针对新一代飞机高隐身、长寿命、低成本等要求,在现有数字化设计制造设备及技术基础上,建立设计、工装、制造、装配、在线检测全面配套的飞机机体高精度(可达0.1mm)控制技术方法和体系,大幅度提升飞机机体制造装配精度和质量控制能力,减少工艺超重、降低表面电磁缺陷导致的次级散射水平,为新一代高隐身飞机机体高精度制造提供理论基础。建立以数据驱动飞机机体设计制造质量控制体系,通过对飞机机体制造装配过程建模分析来识别飞机机体制造尺寸偏差源,保证机体制造和装配工艺的稳定性。

4 工程应用

在创新的技术平台、设计流程及设计思想的基础上,设计人员以全三维数字化设计数模为核心,进行三维设计、三维制造、三维检验。在方案设计阶段,通过构件库、统一模型关联系统实现了方案阶段快速评估;在详细初步设计阶

段,通过全机结构优化确定主结构初步参数,全三维详细初步设计实现了结构基本构型设计;在详细设计阶段,按照设计、工艺高度并行协同原则,开展全三维数字化设计建模、工艺设计、工装设计、装配设计等,视情开展同步制造。

1) 方案设计阶段

在飞机产品数字化设计过程中,使用由构件库、伴随知识库和工程常用算法和构件模型简化模块所形成的构件库系统,进行产品的并行数字化定义,对构件的实例化结果进行简化,完成功能、性能属性数据的定义,从而使飞机产品数字化定义过程规范化,为飞机设计各辅流程的仿真分析和优化提供功能、性能模型数据基础,保证几何样机、功能样机/性能样机间数据的协调一致,最终实现提高飞机的设计质量、缩短研制周期的目的。

利用通过构件库建立的数字样机,在基础前后处理平台上开发统一模型数据库和统一模型关联系统,建立飞机数字化工程中连接主辅流程的桥梁;利用产品单一数据源中的信息自动建立基本功能、性能仿真分析模型,使得主、辅流程之间的数据流导通;建立系列的、仿真分析数据的完整定义和输出模板,根据不同仿真分析任务的要求,

定义和输出模型数据;利用功能、性能仿真分析和优化结果对设计参数进行自动更新,保证几何样机、功能样机/性能样机间数据的协调一致,实现数据在主、辅流程间双向流动;通过几何和非几何属性的定义,在形成数字样机的同时,建立起CAD-CAE数据交换的基础,快速完成各系统方案评估。

2) 详细初步设计阶段

经方案快速评估及选型后,设计人员开展全三维详细初步设计,体现在全部采取数字样机进行协调,最后以数字协调样机为依据,使得协调周期大为缩短,各专业并行设计的效率也大为提高,确定了结构、系统、设备等主要零部件的初步数字化产品定义、安装定位协调等,并组建三维协调样机。在产品结构和工装结构环境中,设计人员按照工艺流程进行装配工人可视性、可达性、可操作性、舒适性以及安全性的仿真,将标准人体的三维模型放入虚拟装配环境中,针对零件的装配,设备安装与维护进行分析,见图5。

该阶段采用全三维协调的方法,取消原有的二维纸质协调单,以三维协调模型代替,提高了协调的效率和质量,并使协调内容具有较好的可追溯性,将时间缩短了60%。同时对结构主要参数

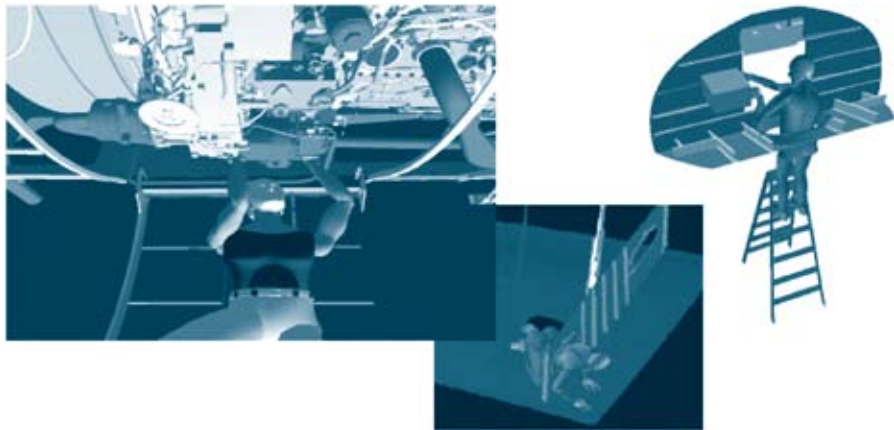


图5 协调仿真

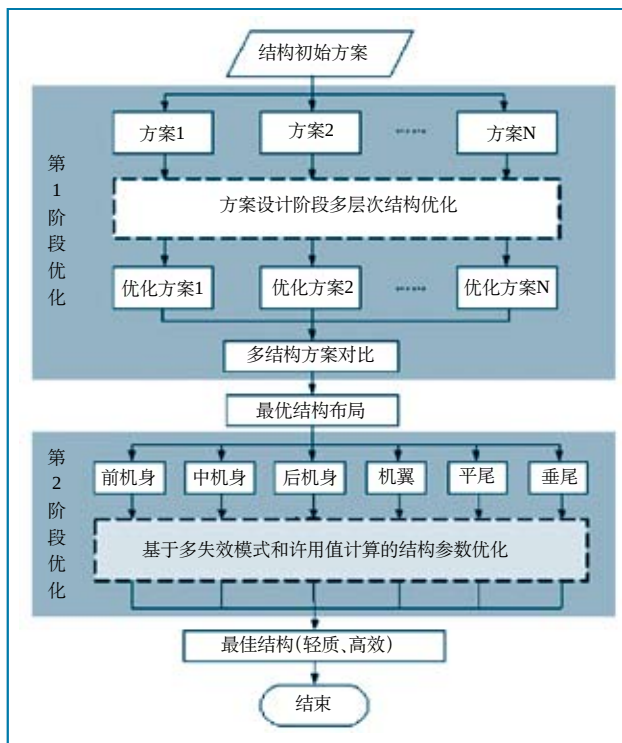


图6 优化技术流程

需要进行优化与确定。

轻质、高效一直是军用飞机结构设计所追求的目标。随着现代战机性能要求的不断提升,机载航电武器系统、任务系统所占体积比重越来越大,飞机结构空间越来越小;而飞机的机动性、敏捷性、隐身性和作战半径等要求不断提高,人们对机体结构的重量提出了更加

苛刻的要求。因此,如何设计出合理的结构,既能满足强度、刚度、寿命等要求,又能使结构重量最轻,即实现全机的结构设计优化,成为设计人员追求的目标^[6-7]。为了解决这一难题,设计人员采用一种先进优化设计方法,首先开展承力构件布置优化和多方案比对,确定结构布局方案;然后进行基于多失效模式和许用值计算的结构参数优化,在不改变结构布局的前提下,

基本冻结结构的名义尺寸,为详细设计提供结构件的剖面形状、尺寸和构件载荷。优化技术流程如图6所示。

结构参数优化结果见图7,包含构件的剖面形状、尺寸和载荷等,供详细设计阶段快速设计。

3) 详细设计阶段

依据协调电子样机和结构参数优

化结果,按照“集中设计、联合建模”的原则,在基于CATIA建模要求下,规范各类零件数字化建模过程,细节考虑连接与装配,由多单位联合进行模型数字化定义,飞机结构重量控制精准;同步开展工艺设计,通过飞机柔性装配流程、数字化装配技术、装配工装设计、装配工艺优化、自动定位与控制技术、测量、精密钻孔、伺服控制、夹持等实现飞机零部件快速精确的定位和装配,可减少装配工装的种类和数量,提高装配效率和准确度,提高快速响应能力,缩短飞机装配周期。

a. 规范零件数字化建模过程

根据各种零件的工艺特点,规范了每种零件的数字化建模过程,使得三维模型简约、易操作、易审查、易维护。在通过全机优化给定了结构设计参数之后,每位建模人员不必考虑零件建模过程,只需按固定的规范操作,大大提高了三维建模的效率和准确性。

b. 模型质量自动检查

模型质量自动检查系统可以通过CATIA端(设计员对单个或多个数模进行检测)和LCA端(管理员对批量数模定时定量检查)对CATIA模型的质量进行检测。该系统可以对CATIA模型进行“特征检查、三维标注”等10多类200余项的分类逐项检测,并生成“检测信息”报表,同时提供错误修复功能,见图8。

c. 装配干涉仿真

在虚拟环境中,系统依据设计好的装配工艺流程,通过对每个零件、成品和组件的移动、定位、夹紧和装配过程等进行产品与产品、产品与工装的干涉检查,当系统发现存在干涉情况时报警,并给出干涉区域和干涉量,以帮助工艺设计人员查找和分析干涉原因。该项检查是零件沿着模拟装配的路径,在移动过程中零件的几何要素是否与周

名称	编号	厚度/mm	材料	最小安全裕度、系数等				质量数据		
				安全裕度	载荷工况	限制/限制系数	失效准则	$R_x(N)$	$R_y(N)$	$R_{xy}(N/mm)$
面板	1967	1.5	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1981	1.5	TC1-D1	2.51	CASE19	梁端载荷	2	8.096	-18.85	29.23
面板	1982	1.5	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1983	1.5	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1988	1	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1989	6	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1990	16	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1993	10	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1991	6	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1995	1	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1996	1	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1997	2	TC1-D1	5.18	CASE05	恒压载荷	1	-11.32	-11.56	-73.12
面板	1998	1.5	TC1-D1	0.32	CASE18	恒压载荷	1	123.5	65.73	366.9
面板	1999	1.5	TC1-D1	0.56	CASE18	恒压载荷	1	93.2	-111.8	302.7

图7 优化结果

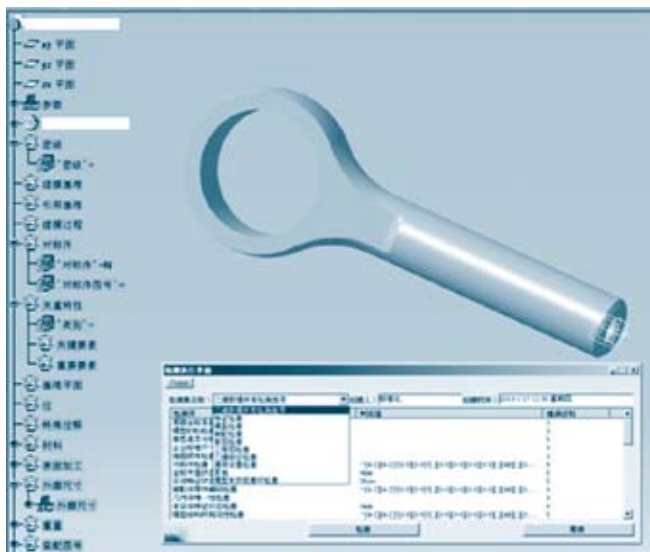


图8 模型质量自动检查报告

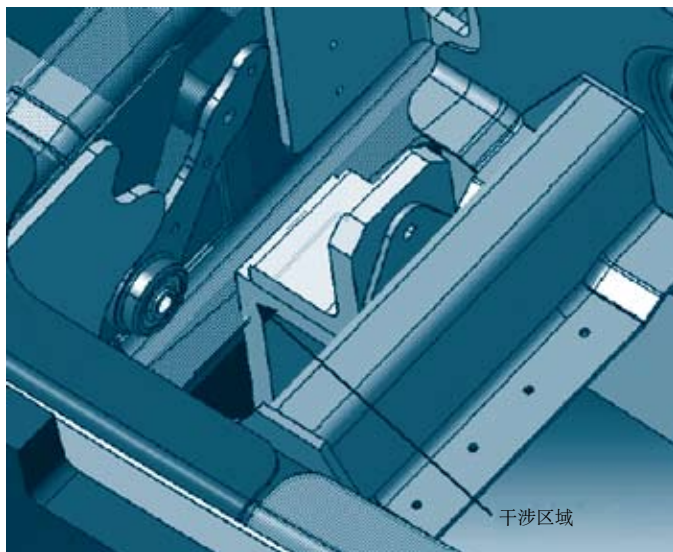


图9 装配干涉仿真

边环境有碰撞。在三维环境中,检查过程非常直观,见图9。

d. 装配顺序仿真

在虚拟环境中,设计人员依据设计好的装配工艺流程,对产品装配过程和拆卸过程进行三维动态仿真,验证每个零件是否能无阻碍地按设计工艺的顺序装配上去,以发现工艺设计过程中装配顺序设计的错误。

e. 装配现场三维工艺布局仿真

在数字化环境下,设计人员建立厂房、地面、起吊设备等三维制造资源模型,将已经建立的各装配工艺模型和装配型架、工作平台、夹具等制造资源三维模型放入厂房中,按照确定的装配流程进行全面的工艺布局设计。三维工艺布局比传统的二维工艺布局更直观,充分体现了三维空间的状况,并且在数字环境下可以仿真生产流程。

4) 生产试制阶段

新机研制以全三维数字化设计数学模型为核心,按成熟度管理,“边设计、边制造”,设计/工艺高度并行,全面开展三维制造、三维检验的飞机试制工作。在试制过程中,大部件及全机采用

柔性装配技术确保工装通用,缩短周期、降低成本;在设计和制造过程中,探索性地贯彻“0.1毫米工程”的理念,逐步向“无余量、无变形、无偏差”制造与装配的目标迈进,打造飞机精品。

5 结束语

采用基于全三维设计与制造一体化的飞机快速试制技术,建立了以设计制造一体化为核心的快速试制技术体系,在新技术应用上上了一个台阶。取得了详细初步设计周期缩短40%,详细设计周期缩短40%,生产准备周期缩短50%,零件加工数量减少40%,工装数量减少70%以及整个飞机研制周期缩短40%的效果。研制结果表明,本文提出的飞机快速试制体系模式正确、流程简单、技术先进、手段实用,能够实现“好、快、廉”的设计目标。

AST

参考文献

- [1] 田承根,朱天文,刘新宇.全三维技术在飞机设计中的应用[J].航空制造技术,2011,(22):66-69.
- [2] 樊海东,许平.飞机协调三维数

字化研究[C].第五届中国航空学会青年科技论坛文集,2012:116-119.

[3] 袁立.现代飞机数字化柔性装配生产线[J].航空科学技术,2011,(5):1-4.

[4] 梅中义.基于MBD的飞机数字化装配技术[J].航空制造技术,2010,(18):42-45.

[5] 张传超.创新提升了中航工业沈飞的生产能力[J].国际航空,2013,(3):46-49.

[6] 航空结构优化方法.沈阳飞机设计研究所,内部资料.

[7] 孙聪,王向明.现代战斗机机体结构特征分析[M].北京:航空工业出版社,2007.

作者简介

孙聪,研究员,中国航空工业集团公司副总工程师,首席技术专家,国家多个重点型号总设计师,曾获全国五一劳动奖章、国家科技进步特等奖、航空报国金奖等多项重大奖项。