

载人航天器总装过程技术研究

徐晓权 熊 涛 刘宏阳

(中国空间技术研究院总装与环境工程部)

摘 要 阐述航天器总装技术应用的国内外现状,从载人航天器工艺设计、总装及其过程质量控制中采用数字化技术应用等方面,介绍载人航天器数字化总装技术的研究内容。

关键词 载人航天器 总装 数字化技术 应用研究

1 前 言

我国载人航天技术正在迅猛发展,“神舟”系列载人飞船的成功发射标志着我国载人航天工程分三步走的第一步已经圆满完成。随之第二步等后续任务已经深入展开。在载人航天中,长期技术取得巨大进展的同时,作为实现工程技术规划和设计的最终手段的载人航天器总装过程技术研究和应用却相对滞后,传统的总装过程技术正面临着越来越大的挑战。

面对载人航天技术不断发展的需求,国内航天企业在总装、测试和环境试验能力上存在着明显不足,主要表现为总装和测试周期长、总装和环境试验设备能力不能满足载人航天器越来越高的技术要求;装配工艺技术和组织管理模式基本上还处于简单手工装配和传统的管理层面,与发达国家相比存在较大差距,在数字化装配技术应用方面还处于起步阶段。

本文重点涉及的载人航天器总装应用数字化技术,会促进国内航天产品研制发生观念性的改变,将会出现企业管理体制、型号研制过程等一系列变革,并使企业向着开放式的、具有快速应变能力和创新能力的现代化方向发展。

2 国内外载人航天器总装技术现状概述

2.1 国内载人航天器总装技术现状

2.1.1 载人航天器总装过程的特点

载人航天器总装过程是指从各分系统产品交付

总装进行验收开始,至完成全部装配、测试和试验,并将合格产品交付发射为止的全过程,包括航天器的总装、测试、地面大型试验、出厂转运、发射场再总装和测试等。载人航天器总装实施主要具有下列四个特点:

- 涉及专业广泛,综合性强;
- 多型号、小批量生产;
- 总装测试的环境条件严格;
- 高度重视质量和安全,产品要求高可靠性。

2.1.2 载人航天器总装过程技术的现状

载人航天器总装过程是航天器研制生产的关键环节,也是保障航天器整体性能的最终环节。目前在载人航天器总装过程基本上还是沿袭着过去几十年来的手工作业模式,沿用着根据实物样件以模拟量形式传递零部件的形状和尺寸,采用管路取样制作、电缆模装、热控多层取样制作等传统手工装配方法。由于总装阶段是航天器作为产品的系统集成阶段,研制周期长、手工操作多、工作风险性大,因此总装过程的质量直接影响到产品研制进度、在轨正常运行和载人航天飞行高可靠等综合指标。据不完全统计,目前我国航天器产品研制、生产中,装配过程所占工时约为整个航天器研制生产过程总工时的 30%~50%。因此,航天器总装与专业测试引起了广泛的关注。

2.2 国外载人航天器总装技术概述

20 世纪 80 年代后期以来,国外航空领域,随着 CAD/CAM、计算机信息和网络技术的发展,以美国为首的西方发达国家开始研究并首先在 AIT

工艺过程采用数字化装配技术。这项技术以全面采用数字化产品定义、数字化预装配、产品数据管理、并行工程和虚拟制造技术为主要标志,从根本上改变了飞机传统的设计与制造方式,大幅度地提高了飞机设计制造技术水平。洛克希德·马丁公司在研制 JSF 战斗机 X-35 过程中明确提出:要使 JSF 飞机装配制造过程的周期缩短 67%,其中单架周期要从 15 个月缩短到 5 个月;工艺装备由 350 件减少到 19 件,即减少 95%;制造成本降低 50% 等。当零部件汇集到 JSF 方案验证样机总装基地(加利福尼亚州帕姆戴尔)时,已见不到通常陪伴在飞机生产线上的巨大型架,取而代之的是一种通用支架,用它支撑 JSF 的主要部件,利用 4 部德国蔡司(Zeiss)激光跟踪仪对它们进行空间定位和其他装配工作,工作效果十分完好。随着 X-35 装配工作的进展,工人们开始佩带一种挂在腰间的微型计算机,该机能把装配顺序和装配好的部件状态投射到正在装配部件的上方,让工人方便直观地进行装配工作,无需再细读图纸、翻阅工艺文件,使装配周期缩短 50%,同时研制成本降低 30%~40%^[1]。

在国外航天领域,尤其是美、俄、欧洲等国航天部门和宇航公司非常重视卫星总体仿真与演示验证,各自建立的总体仿真与演示验证系统在航天器研制中发挥着重要作用。美国国家航空航天局(NASA)所属喷气动力实验室的飞行系统测试平台,朗利研究中心的 SPASIM,俄罗斯能源科学生产联合体的综合仿真测试平台和德国 VEGA 信息技术公司开发的仿真航天器等是 20 世纪 90 年代航天器总装数字化技术发展的综合反映。

NASA 在 1998 年就开始进行智能化综合工程环境(ISE)的研究工作。ISE 是数字样机技术的进一步发展,本质上是 SBD 的理念的外延,它通过把近几年来产生的前端技术如高性能计算机、高速网络、数字化产品、基于知识的设计和基于知识的工程(KBD 与 KBE)技术、人工智能、产品数据管理和人-机交互技术有效的组合在一起,形成一种跨地域的虚拟协同环境,在此平台上进行设计综合和航天产品的设计、试验及样机制造。ISE 是一种全新的设计、制造理念,它的思想比较真实地反映了航天产品研制的实际情况,它的成功将大大提高卫星研

制的快速反应能力,节省卫星研制成本,提高卫星产品质量。据了解,洛克希德·马丁公司 ASSIST 计划(一个类似于 ISE 的智能综合工程先期验证系统)的部分目标是分系统设计的工时减少 50%,研制成本减少 15%,发射准备时间减少 50%,减少地面试验 50%。

2.3 基本结论

通过对国内外装配技术现状的比较,我们可以得出如下结论:

数字化技术的应用不仅从软、硬件的角度出发,更重要的是融合了所有设计、制造的数字化过程,以产品数据集为中心,利用数字化设备和装配仿真技术,使总装过程中的产品在装配过程中真正得到有效控制。利用该技术可以建立起一套有效的产品结构及产品发放过程控制机制,建立相关的工作规范和制度,保证航天器装配所需信息以数字化形式正确传递。

3 载人航天器总装数字化技术研究和应用

载人航天器总装过程技术主要包括:工艺设计过程技术、总装实施过程技术、过程质量控制技术,这三部分相互支持、相互补充,形成了具有自我完善能力的航天器总装数字化总装体系,同时对产品设计工作的工程化能力和产品总装生产线的专业化、自动化能力可以起到可持续的推动作用^[2]。

3.1 工艺设计数字化技术研究

总装工艺作为总装实施的技术源头,是总装过程的关键环节,其工作流程如图 1。从工艺设计流程可以看出,工艺人员面对大量的设计输入,需要认真的消化和理解。工艺设计过程对工艺人员的经验要求很高,工艺的指导性取决于工艺技术人员个体的业务水平,这就造成了工艺设计过程的不稳定。

在工艺设计过程中应用数字化技术,可以实现总装工艺人员作为“数字工人”参加虚拟装配,并“制造”数字样机;通过计算机技术和模拟技术的应用实现使工艺研究由“经验判断”走向“定量分析”的同时,实现与设计系统的无障碍沟通,减少设计的反复和差错率,提高工艺的指导性和准确性,从而提高航天器产品质量,缩短新产品的设计、工艺准备、生产周期,缩短新产品研制周期,降低研制成本。

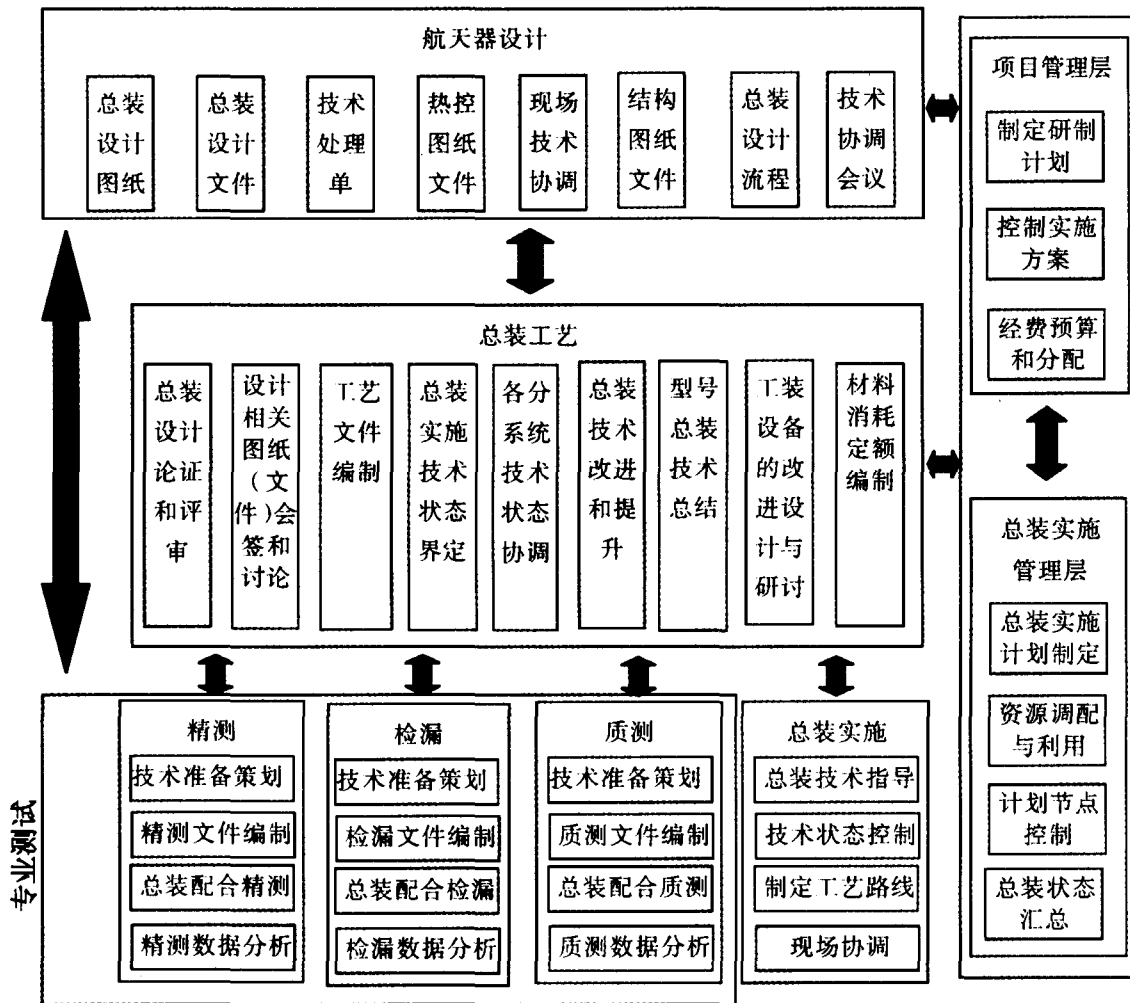


图 1 航天器总装工艺工作流程

3.1.1 工艺设计与总体设计数据的集成

基于对航天器总装技术现状的认识, 可以尝试在航天器研制中推行并行工程(CE),即在航天器设计时引入工艺环节,考虑产品总装实施的技术状态,这样对航天器的研制起到了很好的推动作用;同时还可以借用工艺驱动设计的方法(PDD),从航天器总装实际的角度,自下而上推动设计的可实施性;通过梳理航天器总装数据信息,分析、评估航天器产品的可实施性,反向提出产品的总装实施性建议和方案,从而促进设计和工艺间产品信息的双向流动,防止设计中的工艺实施性问题流向总装现场。

在航天器研制过程中应用工艺驱动设计方法(如图 2 所示),关键环节是对航天器装配环节的梳理和分析,航天器装配过程中涉及结构、热控、天线、控制、总体、有效载荷等分系统,是一个十分繁复的工作,按照航天器型号总装情况,进行归类,提取出

典型工艺,将工艺 BOM 与总装 PDM 进行集成,以达到提高总装效率和质量的目的。

3.1.2 虚拟装配规划技术

产品的虚拟装配过程工艺设计分为:装配顺序的生成和优化,装配路径规划和优化,容差分析与综合;装配过程仿真模拟。首先利用装配过程模拟软件对产品的部件进行装配过程定义,确定部件所属各零组件的装配顺序;其次模拟工厂现有装配条件和工段工作安排,进行装配路径的调整和优化;最后在数字化装配仿真系统中进行装配过程仿真,即利用仿真软件的人机工程等虚拟现实技术,确定装配过程的可操作性和合理性,解决数字化产品模型装配过程中所遇到的干涉问题。

装配过程优化设计、航天器数字化预装配是在数字化产品定义的基础上利用计算机模拟装配的过程。它主要用于在研制过程中及时进行静(动)态

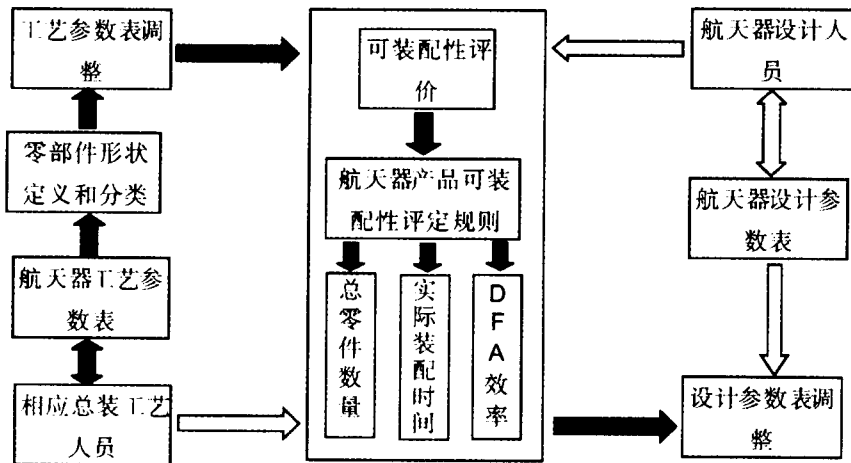


图 2 工艺驱动流程图

界面设计和干涉检查、工艺性检查、可拆卸性检查和可维护性检查。采用数字化装配技术可以有效地评价产品的可装配性,减少因设计原因造成的更改或返工,缩短研制周期,降低产品成本,提高产品竞争能力^[1]。

目前在航天器上已开展虚拟装配规划的研究,其体系结构如图 3 所示。在航天器型号研制中已开始进行的关键工序装配仿真,发现了一些产品设计的工艺性、可操作性问题,表明了对航天器产品总装实施过程指导意义。

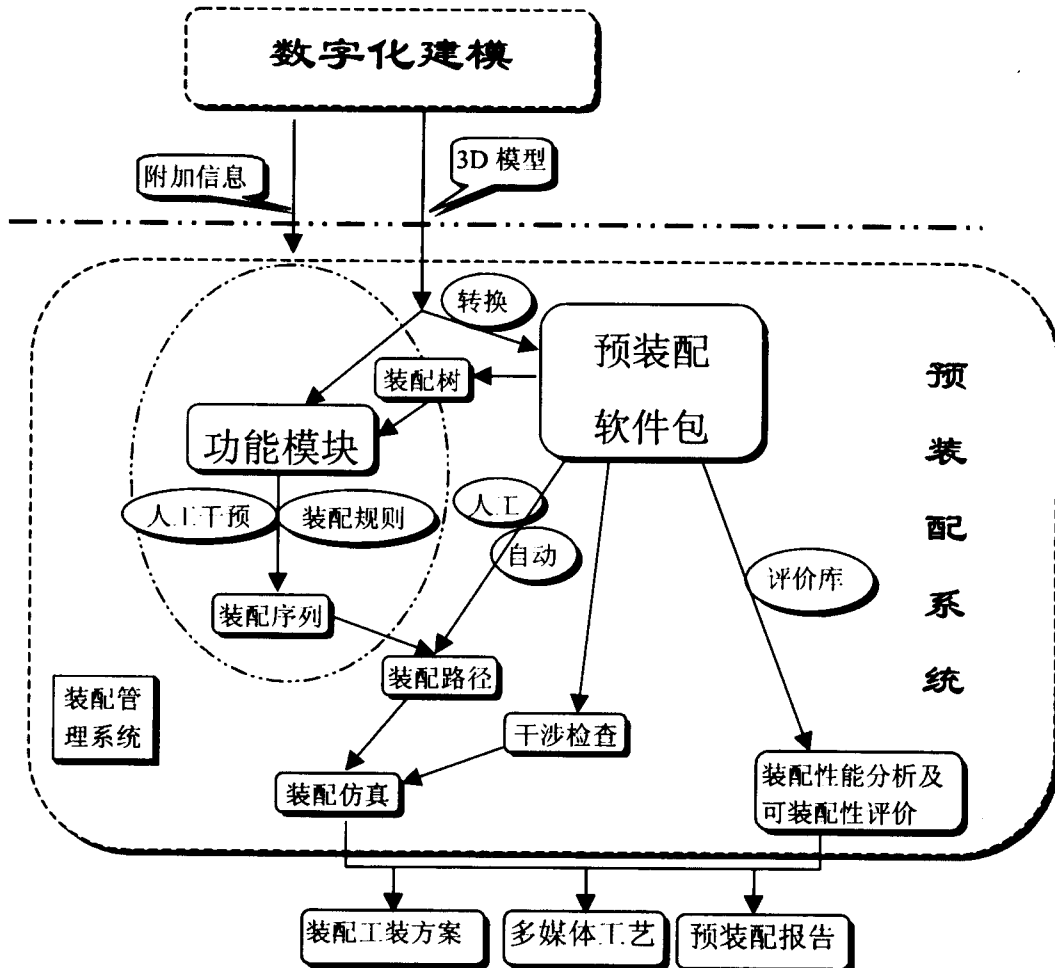


图 3 航天器虚拟装配系统结构

3.2 总装实施数字化技术研究

为解决航天器总装实施过程中数字化不连续和数字化率不高的问题, 需要从网络环境改造和现场计算机应用着手, 建立从企业数据服务中心到车间现场的网络环境, 将装配过程指令、产品结构表、装配检验模型等信息内容直接传递到操作现场, 最大限度地提高工作效率^[4]。同时, 还要考虑在总装实施现场应用数字化技术, 解决航天器装配过程中手工操作过多, 造成生产周期长、质量不稳定的问题。

装配现场的数字化应用技术主要包括以下 3 个方面:

3.2.1 激光跟踪测量系统的应用

目前, 使用经纬仪测量系统对航天器角度量和长度量项目测量时, 流程安排必须逐项进行, 系统操作需要一组测量人员, 一般为三人。激光跟踪测量系统的应用, 在不增加测量人员的前提下, 同时操作经纬仪和激光跟踪测量系统, 可使角度量和长度量的测量项目并行, 相同的工作量将缩短一半的时间。对于小批量航天器(运输飞船)上相同项目的重复性测量, 激光跟踪测量系统软件包将快速处理数据和比对, 并可直观显示测量状况, 便于及时发现问题和处理问题, 使对整个生产周期的影响降到最低。

再有, 空间实验室将对精度测量提出更高的精度要求。航天器测量系统的不确定度因素基本可分为: 硬件、软件和人为因素。随着激光跟踪测量系统硬件的技术指标提高, 直接使精度测量达到了一个新的水平。同时, 优化的软件包可减少数据处理本身带来的计算误差, 从而避免由于数据多次转换造成误差叠加。激光跟踪测量系统只需要稳定和最少数的专业测量人员, 减少由于人员客观条件差异带来的直接误差, 使测量数据的重复性更好。

激光跟踪测量系统可以应用于航天器的动态项目测量中, 如空间试验室的舱段对接操作等。

3.2.2 数字化多层制作技术

目前, 载人航天器的热控材料制作一般是以热控设计人员的设计图纸为参考, 制作出展开样板(或打孔样板)。当针对复杂空间型面热控材料时, 二维热控设计图纸无法精确给定符合飞行产品实物表面的空间尺寸, 导致只能手工取样, 现场反复进行对比, 费时费力。

国外应用于航空、航天领域的非金属材料加工

中, 已广泛采用了电脑自动化裁剪系统。

数字化多层制作技术是以总体设计提供的数字几何模型, 建立热控材料展开计算模型, 完成热控材料展开图的自动生成, 将数据送入电脑自动裁剪设备系统, 完成热控材料从单层铺料—珩缝—自动裁剪—缝纫—包边整个制作过程的自动化、数字化。

3.2.3 现场工人的可视化装配技术

要实现数字化装配, 必须建立有效的数字量传递机制, 将产品几何信息和非几何属性信息(如装配顺序说明或动画、装配产品结构等)传递到操作者手中, 让操作者能够采用某种可视化技术读取这些信息。这就要求建立生产现场工人通信系统和可视化阅览系统, 需要解决现场工人的移动通信技术、操作可视化技术应用及设备, 使工人能够准确、迅速地查阅装配过程中需要的信息, 提高装配的准确性和装配效率, 缩短装配时间, 降低装配成本^[5]。

3.3 总装过程质量控制技术研究

为解决总装过程质量控制中数字化程度不高的问题, 需要开展数字样机技术、反向工程技术等相关数字化技术研究与应用, 同时结合条形码识别、电缆自动化导通系统等技术手段实现总装过程质量控制的数字化, 建立全数字化的总装质量信息档案, 实现型号产品总装质量趋势分析与主导控制。

3.3.1 数字样机跟产技术应用

传统总装过程质量记录, 是基于模拟量的传递, 依托于检验原始文字记录; 实施过程复杂多变的技术状态也是依赖于设计、工艺、检验、操作者群体的责任心和记忆力水平。为了准确地记录实际总装过程中各个阶段的技术状态和验证装配工艺的准确性, 需要与实际装配过程同步地进行虚拟数字样机装配, 同时对模型注入如产品批号、主份件、备份件、工艺件、产品质量记录、验收记录、拆装记录等相关质量和管理信息形成装配管理模型。与实际装配过程同步的虚拟数字样机可以真实地记录总装过程中任意时刻的设备状态、插头状态、保护件状态、仪器开关状态等, 并能用表格输出。此外, 在出厂前综合测试或发射场的排故工作中, 可以根据与实物状态相同的数字样机, 制定和预演排故方案, 从而准确、安全、快速完成排故工作。因此, 与产品实物同步的数字样机能够反映航天器产品的真实状态, 并可汇

总总装过程中的各类质量信息，形成航天器质量信息数字化档案。

3.1.2 反向工程技术应用

反向工程技术是通过一个采集航天器产品实际生产数据,修正虚拟样机的模型,从而指导设备和人员工作的精益制造系统。反向工程的基本思想是:分

析已有的产品或设计方案,确定产品的各个组成部分并作适当的分解,确定产品不同部件之间的内在联系,包括功能联系、组装联系等,再在更高的、更加抽象的设计层次上获取产品模型的表示方法,最后从功能、原理、布局等不同的需求角度对产品模型进行修改和再设计,其系统模型如图 4。

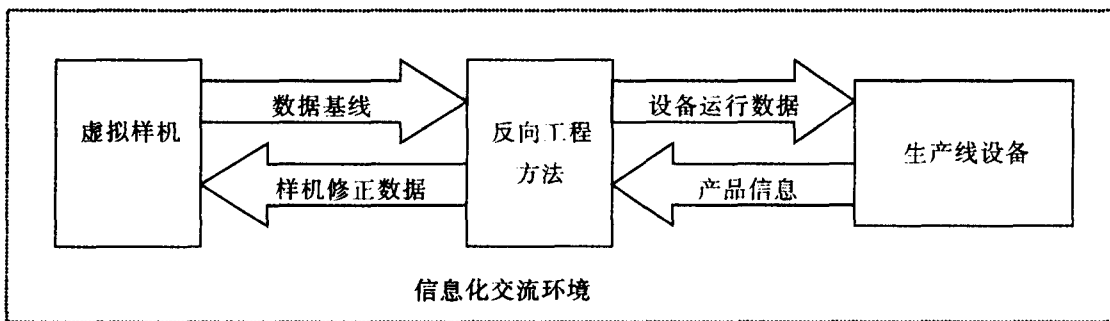


图 4 航天器总装反向工程系统模型

在航天器产品生产的专业化、自动化能力方面,反向工程的理念具有很强的现实意义。专业化和自动化必须基于准确的生产数据,而这些数据仅仅来自设计模型是远远不够的,必须采集实际产品的制造数据对设计数据进行修正,并应用修正后的数据指导生产。而反向工程方法和工具则是这个闭环系统的重要组成部分。反向工程形成的结果也是航天器产品外形结构的数字化检验记录,其形成的数字模型是数字化样机跟产技术的模型基础。

4 结论

载人航天器数字化技术的应用,已使航天器集成技术水平在不断提高。随着数字化技术的不断深入,必将使我国航天器 AIT 过程技术实现重大突破,使我国航天产品的开发发生观念性的改变,促进企业管理体制、型号研制过程的一系列变革,并向着开放式的、具有快速应变能力和创新能力的现代型企业方向发展。航天器的装配周期预计可缩短 50%;通过数字化预装配和装配过程仿真与优化技术替代零部件装配试验,预计可降低开发成本 30% 以上;有效地减少装配缺陷和产品的故障率;减少装配过

程反复,减少人为差错;减少因装配干涉等问题而进行的重新设计和工程更改;提高信息和资源的共享,减少资源的浪费;将强化各部门的协调能力,实施并行工程,减少技术决策风险,降低技术协调成本;可提高企业在产品开发研制方面的快速应变能力;提高产品的技术创新能力,缩小我国载人航天器研制能力与国际先进水平的差距,提高国际竞争能力和在国际合作项目中的参与地位;为载人航天后续任务的研制建设奠定坚实的技术基础。◇

参考文献

- [1]张伯鹏.数字化制造是先进制造技术的核心技术[J].制造技术与机床,2000,22(2): 1~5
- [2]刘宏阳等.反向工程技术在星(船)总装过程中的应用方法探讨,《航天环境工程》2005 年第 4 期;
- [3]沈斌等.虚拟制造及其体系结构[J].《成组技术与生产现代化》,1994 年第 4 期:24~31
- [4]张袁编著,李君改编,Internet Server 安装与 Home page 设计[M].1997.3
- [5]刘艳琴.现代制造技术-数字化工厂[J].《机械设计与制造》,2004, No.5:115