

# 航天器总装中的数字化工厂技术

## Digital Factory Technology of Spacecraft Final Assembly

中国空间技术研究院卫星环境工程研究所 熊 涛 孙 刚 孟庆义

**[摘要]** 简要介绍了数字化工厂技术的国内外现状,阐述了数字化工厂技术依赖的技术基础,分析了数字化工厂技术在航天器总装中的实施要点,指出了数字化工厂技术对提高航天器研制的批产能力和产业化能力的积极意义。

**关键词:** 航天器 总装 数字化 工厂

**[ABSTRACT]** Domestic and foreign present states of digital factory technology(DFT) are introduced briefly,and the technical base DFT depends are described, also implementary points of DFT in spacecraft final assembly are analyzed. Positive significances on improving batch production capacity and industrialization capacity by DFT are indicated.

**Keywords:** Spacecraft Final assembly Digitization Factory

信息化技术在制造业中的应用改变了制造业的面貌,带动了制造业的飞速发展,也使制造业进入了信息化时代。数字化是信息化的高级表达形式,可以更准确、迅速地实现信息的获取、存储、输送、加工和处理,使信息共享和集成成为可能,因此数字化是信息化的核心,而制造系统数字化是企业数字化和行业数字化的基础。

数字化工厂是数字化制造技术在制造车间集成应用的制造模式。它将制造车间中的工艺设计信息、生产管理信息以及数字化加工制造信息进行集成,从整体上改善生产的组织管理,提高数字化设备的效率,从而提高制造车间对产品品种和批量变化的适应能力。

数字化工厂的提出是传统制造业的革命,它是根据虚拟制造的原理,通过提供虚拟产品开发环境,利用计算机技术和网络技术,实现产品生命周期中的设计、制造、装配、质量控制和检测等各个阶段的功能,达到缩短新产品的上市时间、降低成本、优化设计、提高生产效率和产品的质量的目的。

### 1 数字化工厂技术的国内外现状

当今在全世界范围内制造业的竞争变得越来越残酷。人们对于产品的个性化要求越来越强烈,产品的生

命周期越来越短,基于时间、个性化、质量和价格的竞争成了企业占领市场、击败对手的重要策略。制造企业若不能持续地推出满足消费者需要的产品品种和型号,并且比同行领先一步,就将在激烈的竞争中陷于困境。因此,企业在尽可能短的时间内,高效率低成本地为顾客提供个性化高质量产品的能力,已成为当今企业竞争能力的一个基本标志。

企业的这一竞争能力可以通过综合运用先进制造技术(Advanced Manufacturing Technology,AMT),全面提高企业的柔性自动化水平来增强。AMT是指在当今技术条件下能显著提高企业的设计、加工、检测、物料储运、营销和生产管理等方面能力的设备、计算机软硬件和管理方法。它主要包括:计算机网络、柔性制造系统(FMS)、柔性制造单元(FMC)、机器人、加工中心(MC)、数控机床(NC)、激光加工、自动检测设备、自动化仓库以及其他一些工厂自动化等硬件设施、物料需求计划(MRP)、制造资源计划(MRP II)、准时制生产计划(JIT)、计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、专家系统和管理信息系统(MIS)等软件工具。数字化工厂技术正是先进制造技术软、硬件技术的集成。美国、日本、新加坡、英国、澳大利亚、韩国、新西兰、土耳其和印度等国家都在花大力气引进和实施AMT,构建数字化工厂<sup>[1-3]</sup>。

波音公司通过采用流水生产的概念,组建数字化车间,如图1所示,构建关键部件生产线等一系列措施,取得了超乎想像的效果。原来波音777整流罩金属外壳要费时43天才能制造完成,现在只需要7天;原来每个月完成2架波音737-700型飞机的零部件生产任务都困难,现在在人员精简的情况下每月能完成23架份的生产任务;生产面积也减少了1/2;工种划分从200个减为28个。

在国内,宁夏小巨人机床有限公司建成的智能网络化数字工厂由2部分组成:数字化生产装备和支撑工厂管理的软件。厂房中建有大件加工线、主轴箱加工FMS、精密加工线、装配作业线、全自动立体仓库(如图2)等设备,并建有精密部件的检测系统。同时该公司建有完善的计算机网络,构成了一个庞大的信息神经系

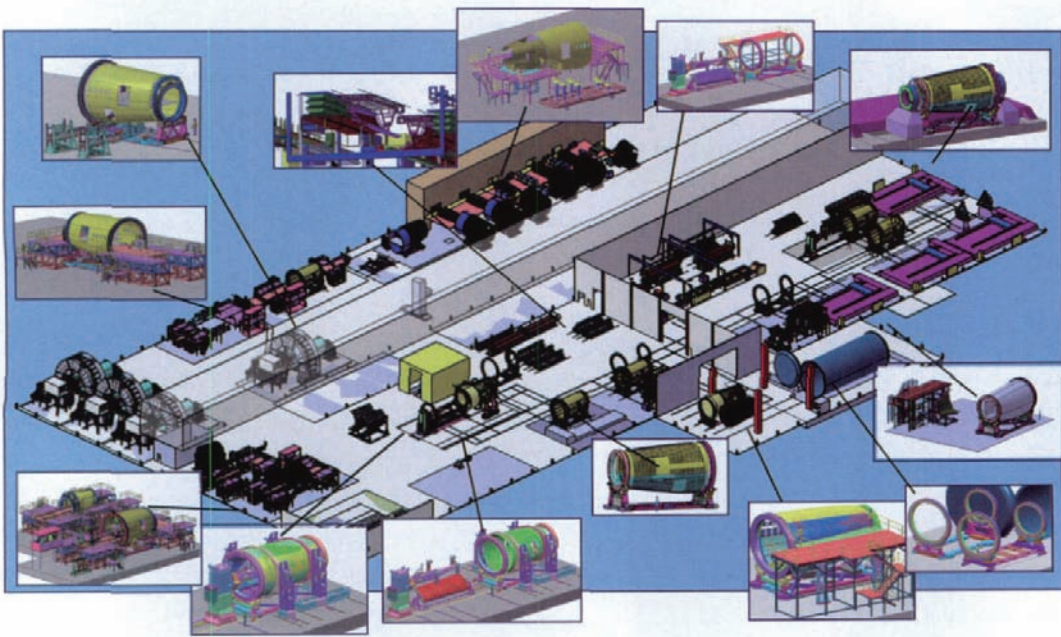


图1 波音公司数字化制造车间  
Fig.1 Digital manufacturing shop of Boeing

统,为各种指令的迅速下达、各种信息的及时反馈提供了可靠、有效的手段。通过整合数控支撑设备和软件系统,小巨人实现了每台机床24h连续工作,16h无人运转;实现了数据通畅化、决策准确化、管理简便化、周期缩短化、信息共享化和系统柔性化<sup>[4]</sup>。

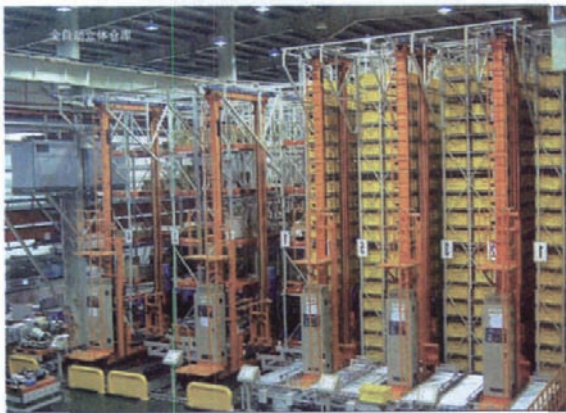


图2 小巨人数字化立体仓库  
Fig.2 Digital three-dimension warehouse of Little Giant Machine Tool Co. Ltd.

## 2 数字化工厂技术依赖的技术基础

数字化工厂系统的关键技术包括:系统总体集成技术、CAD/CAM/CAPP集成技术、异构网络的互联技术、数字化制造过程建模仿真技术、数字化生产管理技术、数字化的检测监控技术、数字化的物流系统控制技术、数字化的加工装备技术和数字化系统维护和可靠性技

术。  
2.1 数字化制造过程建模仿真系统

制造过程的建模与仿真通常基于制造工艺本身的物理化学知识在计算机上用解析或数值的方法进行表达,并为试验所验证。今天,建模与仿真已成为推进制造过程设计、优化和控制的有效手段,并已有一些成功运用的例子,如喷气引擎部件的“高温锻制”、航空叶片零件的加工前仿真。建模和仿真最

重要的工作是优化工艺参数,确保用最高的质量价格比制造符合设计要求的零件。

### 2.2 生产线数字化制造环境

生产线制造过程的数字化制造环境是以系统建模和仿真为基础,利用数字化信息的形式在计算机上全面实现生产线的制造过程,是进行新的生产线规划设计和已有生产线系统运行控制的有效辅助工具,在功能上既能对生产线数控设备的实际运行过程进行模拟仿真和工作过程分析,又能对生产线布局、工艺规程规划和生产线性能分析进行研究,因而具有综合的制造过程分析优化功能,实现了制造过程建模仿真生产线规划设计、工作分析和生产线性能分析等多个方面的集成<sup>[5]</sup>。

### 2.3 数字化的检测和试验技术

基于数字量协调的数字化/柔性装配技术离不开数字化的检测和试验。国外目前在激光超声检测技术、几何量柔性测量技术、数字化密封试验和检漏技术等方面有长足的进步。

在JSF项目的竞争中,洛克希德·马丁公司的数字化检测技术就是其战胜波音而获胜的关键技术之一。洛克希德·马丁公司利用其先进的专利激光超声检测技术,能够对复杂型面的复合材料零件进行100%的自动检测。在几何量柔性测量技术方面,激光跟踪数字定位技术在国外已得到普遍应用。另外,密封试验和检漏技术是飞机密封结构装配制造中不可缺少的一环,在这方面国外已普遍采用氦质谱检漏仪等自动化的检测设备。目前,美国正在进行一种数字化的非接触式激光检漏方

法的研究和应用,其检漏过程和检漏结果可以与产品数模相集成。

## 2.4 数字化的加工装备技术

数字化的加工装备技术依据生产特点和规模可以分为成组制造单元、柔性制造单元(FMC)、柔性自动线(FTL)、人机协同的柔性制造系统。人机协同的柔性制造系统是在计算机系统的控制下,由多台数控加工设备和半自动物流设备组成,控制管理上实行由人机共同决策,检测控制中实行人机联合感知,而物流系统中实行由人机协同工作<sup>[6-7]</sup>。

## 2.5 数字化物流技术

数字物流是指在虚拟现实仿真、计算智能、计算机网络、数据库、多媒体等支撑技术的支持下,应用数字技术对物流所涉及的对象和活动进行表达、处理和控制在,具有信息化、网络化、智能化、集成化和可视化等特征的技术系统<sup>[8]</sup>。

可口可乐公司建成了集存储、控制和配送功能为一体的物流中心。通过物料流通作业的集中化与自动化,重组物流系统,从而有效地降低了可口可乐的制造成本。

国内小巨人公司的机床装配采用了先进的分部装配工艺。部件按验收技术要求验收合格后进入全自动立体仓库,按需要再从立体库转入总装配作业线进行整机装配,总装配采用“配餐”式流水作业。

## 2.6 数字化工厂软件

美国 Tecnomatix 技术公司长期致力于虚拟制造的研究,开发出满足虚拟制造要求的数字化工厂软件 Tecnomatix Digital Factory,它从 4 个不同的层次即工厂、生产线、加工单元和工步操作实现虚拟制造,并通过生产工具、质量控制、创成式工艺计划、动态设计验证、工厂及生产线管理工具 5 个模块实现数字产品从设计到测试的过程。

# 3 数字化工厂技术在航天器总装中的实施要点分析

数字化工厂技术是建立在网络协同工作环境下,共享设计模型,建立针对卫星总装各组成部分的三维基本零部件模型,研究卫星各组成部分模型的装配约束关系,利用数字化虚拟仿真装配技术完成数字工艺样机的装配,并以此为基础开展数字化总装模式下的工艺技术研究 and 虚拟测试技术研究。

## 3.1 建立卫星数字化装配协调体系

数字化装配是卫星数字化协调体系的有机组成部分。建立数字化装配协调体系,需要从以下几个方面考虑。

### 3.1.1 建立基于企业网的协同工作环境

建立企业内部的网络化协同工作环境,其范围要涵盖设计部门、工装设计制造部门、零部件制造部门、装配部门等主要产品模型的使用单位,以便装配部门能够及时有效地与上述部门进行沟通和协同。

### 3.1.2 卫星产品结构管理与控制技术

由于一种基本平台型号的卫星有众多改型,为了解决重用性的问题,需要进行产品的构型管理,实现按照颗次管理的要求。

### 3.1.3 建立企业各部门通过网络进行协调的管理规范

必须建立一整套的规范来约束企业各部门之间的工作,包括数字签名审核制度、工作流控制制度等内容,使卫星装配可以通过工作流来驱动工程设计与制造事件,实现数字化装配过程的自动化。

## 3.2 面向装配的并行数字化定义技术

数字化装配应从数字化预装配开始,其基础是并行数字化定义环境,在面向装配的设计和分析环境中,需要包含的主要功能为:产品定义系统、早期计划、总装工作流程模拟、基于文本/3D 模型的工艺计划、装配分析、人机工程模型、数字化质量保证、3D 工作指令向 MES 系统传递和执行。

在进行并行的产品数字化定义结束前,需要完成产品结构件的建模、产品结构的工艺分析、数字样机装配仿真、数字化装配过程设计以及数字化工艺装备定义等工作。而装配仿真、装配过程设计和工装设计直接影响到产品的可装配性,因此,实现并行产品数字化定义将能有效地减少因设计错误或返工引起的更改,从而提高装配件生产质量,缩短装配周期,降低生产成本。

## 3.3 数字化装配仿真、协调与数字化

装配过程优化设计、卫星数字化预装配是在数字化产品定义的基础上利用计算机进行模拟装配的过程。它主要用于在研制过程中及时进行静态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。

产品的数字化装配过程设计分为:装配顺序的生成和优化;装配路径的规划和优化;容差的分析与综合;装配过程的仿真模拟。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;而后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。

目前,在卫星数字化装配技术上,总装与环境工程部已依托二代导航卫星开展了虚拟装配技术的研究,利用计算机完成了卫星装配过程的模拟。

### 3.4 适合数字化装配生产线的工装设计制造技术

在数字化设计和装配生产条件下,工装的设计需要适应卫星产品新的装配方法和装配过程,以达到与数字化装配过程的相互协调。目前,五院已在开展柔性卫星舱段垂直装配对接系统和空间站大型舱段水平自动对接技术的研究,在这一研究中引入了并联机构作为姿态调整的执行机构,引入了 IGOPS 作为精度测量系统,实现了精度测量数据向执行机构的传递,实现了数字化装配过程的相互协调和自动调整。

### 3.5 装配现场的数字化应用技术

为解决目前装配生产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。

装配现场的数字化应用技术主要包括以下 3 个方面。

#### (1) 数字化精度测试技术。

利用 Indoor-GPS 等先进测试设备,对总装厂房进行精度覆盖,完成卫星部件的直接安装、卫星的最终总装配以及卫星的全星测量等工作,从而提高卫星装配的整体质量。

#### (2) 数字化多层制作技术。

多层制作仍是卫星装配过程中的瓶颈。为提高多层制作质量和速度,需要引进自动裁剪设备,实现多层专业化、数字化制作。此外,由于 CAD 模型与数控裁剪设备模型的表达不同,因此还需要实现 CAD 模型到数控加工模型的自动转换,以保证数控多层制作技术的应用效率。

#### (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、装配产品结构等信息)传递到操作者手中,并且使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浏览系统,需要解决的问题是现场工人的移动通信技术和操作可视化技术,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。

### 3.6 数字化质量控制技术

以条形码技术、数字样机跟产技术、电缆自动化导通系统等先进数字化技术的应用,实现总装过程质量检验控制的数字化,建立全数字化的质量信息档案。实现型号产品总装质量的精确控制。

## 4 结束语

中国空间技术研究院是我国卫星研制的主力军,承担着我国绝大多数卫星和飞船的研制任务。近几年我院研制任务不断增加,而总装作业基本上仍沿用传统模式下的方式,无法适应众多型号生产的要求,因此寻找一些更科学、更高效的工作方法迫在眉睫,其中重要的一种方法是采用计算机技术实现全数字化产品开发和数字化制造。

数字化工厂技术就是建立在数字化总装和数字工艺样机基础上的快速总装和专业测试系统。通过推行数字化工厂技术,构建卫星总装工作新模式,建成数字总装工厂,可以实现卫星总装全过程的数字化。在工艺方式上,实现从传统方式到基于仿真和虚拟装配的工艺模式的转变的同时,提高卫星总装的整体水平和核心竞争力,缩短卫星总装时间,减低总装成本。按照数字化总装的要求,结合卫星总装的具体特点,以最低的总装成本和最短的总装周期为目标,通过对卫星总装过程的分析,对现有的总装流程进行优化和重组,对总装过程、系统资源整体进行优化配置,推动生产力的巨大跃升,提高卫星研制的批生产能力和产业化能力。

## 参考文献

- [1] Sohal A, Samson D, Weill P.A survey of planning for AMT. Computer-Integrated Manufacturing Systems. Manufacturing and Technology Strategy, 1991, 4(2): 71-79.
- [2] Mohanty R P, Deshmukh S G. Advanced manufacturing technology selection: a strategic model for learning and evaluation. Int. J. Production Economics, 1998(55): 295-307.
- [3] Zhao H, Co H C. Adoption and implementation of advanced manufacturing technology in Singapore. Int. J. Production Economics, 1997(48): 7-19.
- [4] 王学军. 小巨人智能网络化数字工厂的建设之路. 航空制造技术, 2005(4): 58-61.
- [5] 袁锋, 谢里阳, 隋天中, 等. 数字化生产线制造过程建模仿真系统研究. 计算机工程与应用, 2004(32): 18-21.
- [6] 黄雪梅, 赵明扬. 基于集成的机器人生产线数字化制造环境. 计算机工程, 2003, 29(13): 39-41.
- [7] 王国庆, 胡新平. 首都航天机械公司集成制造系统顶层设计. 航天制造技术, 2005(5): 8-12.
- [8] 李洪海, 程文明. GPS、GIS 技术与数字物流. 物流技术, 2002(8): 24-25.

(责编 泰山)