

# 数字化工厂技术及其在航空产品研发中的应用

Digital Factory Technology and Application in Aeronautical Product R&D

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 李山 杨挺 陈冰  
西安航空发动机(集团)有限公司 马建宁 杨海



李山

西北工业大学机电学院讲师, 博士, 西安航空发动机(集团)有限公司博士后工作站站博士后, 主要从事航空行业信息系统规划、企业级信息系统体系构架、快速响应制造技术、数字工厂与生产线运行仿真研究。

传统的产品设计完成后, 主要凭借制造工程师的经验进行工艺编制和计划制订, 然后直接进入制造系统。数字化工厂技术的引入就是要通过生产过程运行仿真、制造资源可视化管理与优化配置等一系列数字

数字化工厂平台作为航空制造企业的数字化基础能力, 其建设和应用对于缩短航空产品研制周期、减少研发成本和风险、开展面向制造的产品设计、优化生产线配置和布局、增加设备生产能力和利用率、提高产品质量、改善工人的工作环境具有突出作用。

化技术的应用, 在虚拟环境中模拟工厂、车间、生产线的运行过程, 反映产品从设计到制造的转化, 检验和优化生产制造过程, 降低设计到制造执行之间的不确定性, 从而提高真实生产过程的成功率和可靠性, 缩短从设计到生产的转化时间。

目前我国航空工业正处于战略转型期, 随着一批重大型号任务的逐个立项以及技改资金的大量投入, 各个制造企业面临着产品结构优化、快速型号产品研发、生产线布局优化调整、制造装备产能提升、制造知识获取与重用、大规模信息化建设等重大任务, 对于面向航空产品研发的数字化工厂技术研究和条件建设提出了迫切需求。数字化工厂平台作为航空制造企业的数字化基础能力, 其建设和应用对于缩短航空产品研制周

期、减少研发成本和风险、开展面向制造的产品设计、优化生产线配置和布局、增加设备生产能力和利用率、提高产品质量、改善工人的工作环境具有突出作用。

## 面向航空产品研制的 数字化工厂技术体系架构

### 1 数字化工厂的定义与内涵

从广义角度而言, 数字化工厂是以制造产品和提供服务的企业为核心, 由核心企业以及一切相关的成员构成的, 是一切信息数字化的动态组织方式。从狭义角度而言, 数字化工厂是以资源、操作和产品为核心, 将产品制造要素、知识及其过程进行数字化表述, 在模拟实际制造系统的虚拟环境中, 对生产过程进行仿真和优化的虚拟制造方式, 简言之, 狭义的

数字化工厂主要解决“如何组织生产”即工艺规划的问题。数字化工厂技术以 CAD 产品数据、计划排产信息和加工设备的性能参数为基础,以虚拟制造原理为依据,从宏观角度

功能层为数字化工厂平台提供各种功能服务,通过各个应用系统来实现,主要功能包括:

- 生产仿真。在生产线实际运行之前,利用布局模型和零部件的工

提高工人工作效率,降低疲劳程度,消除危险操作的目的,促进操作标准化与人机和谐。

- 工艺规划——在已构建的虚拟生产线平台上,对产品加工工艺进行定义。建立产品、资源和工艺之间的关联关系,同时在数字化环境中快速建立生产线工艺模型,并进行粗略估计和分析。

### (3) 集成层。

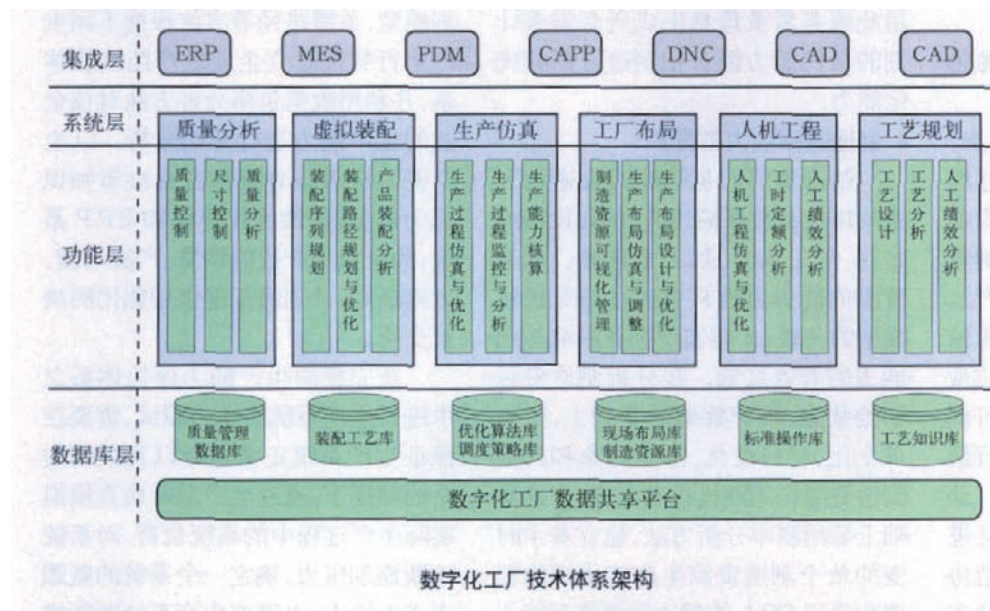
数字化工厂一方面可以作为一个独立的应用系统,满足用户功能层提供的各项功能和应用,另一方面数字化工厂系统可以运行于企业级信息集成环境下,与企业级应用系统 ERP、PDM、CAPP 等保持数据共享和交互调用,同时拓展各类企业级应用系统的应用范围。

## 数字化工厂在企业信息化建设中的定位

数字化工厂在企业信息化建设中属于数字化制造基础能力建设的范畴,一方面为各种数字化系统的应用提供基础数据支持环境。另一方面为生产系统的运行提供仿真验证环境。

数字化基础能力特别是基础数据库与生产系统仿真运行环境的缺失与薄弱是制约目前信息化效益发挥的主要因素。目前在产品设计和制造等专业数字化技术中应用程度较高,而将产品转化为制造所涉及的生产线规划、工艺编制、质量监控等方面的数字化手段相对薄弱。在实际生产中,产品设计和工艺规划之后,缺乏一个科学的检验平台。

以上问题与需求促使企业高度重视数字化基础能力建设,大力推进数字化工厂技术,并对整个生产过程进行仿真、优化和评估,在数字化虚拟空间中将生产制造过程压缩和提



对整个生产线及其生产运行过程进行仿真,从而达到合理规划和调度优化的目的。同时,数字化工厂技术提供一个制造知识表达、提炼和重用的基础运行平台,为制造系统的不断优化提供数据支持。

本文探讨的数字化工厂技术属于狭义数字化工厂定义的范畴,并以航空制造企业和典型的航空产品研发应用为背景。

## 2 数字化工厂技术体系组成及其功能

面向航空产品研发的数字化工厂技术体系由数据库层、功能层、系统层和集成层 4 个层次组成。

### (1) 数据库层。

包括了支持各个应用系统运行的数据库,如质量、装配、调度策略、制造资源、标准操作、工艺知识库等,在各类企业级应用系统(如 ERP、PDM)中运行,具有良好的开放性、集成性,并且易于维护,能够被各类系统应用、共享。

### (2) 功能层与系统层。

艺规范,在虚拟环境下对车间生产过程进行仿真分析,从而实现验证工艺方案的可行性,核算生产能力,消除瓶颈,平衡节拍,制造物流模拟优化。

- 工厂布局。在二维/三维环境下对工厂进行浏览和布局规划不但形象直观,而且能够充分描述和利用信息,优化设施布局,以获得更高的生产性能和物流绩效。

- 质量分析。在实际生产之前,模拟制造过程验证零部件配合公差,进行公差链优化,并通过多元分析工具预测制造流程中出现制造偏差的范围和原因,从而减少偏差给质量、成本和时间带来的负面影响。

- 虚拟装配。主要解决航空产品装配生产线的工艺规划、物流优化和按订单排产等制造问题。在虚拟可视化环境中进行规划三维装配工艺,并通过仿真验证进行干涉分析和碰撞检查。

- 人机工程。能够在虚拟环境中进行人体操作的设计与优化,并进行人体工效和数据分析。最终实现

前,使设计规划到生产制造之间的不确定性降低,从而提高生产系统的成功率和可靠性。

### 航空制造企业数字化工厂关键技术

#### 1 制造资源的可视化管理与优化配置技术

制造资源包括设备、刀具、厂房、工装夹具等所有支持产品生产过程的物质,是生产活动稳态运行的基础。通过可视化技术可以反映制造资源的状态,实现制造资源在生产过程中的透明化和显性化。制造资源的数字化管理需要进行多维多粒度制造资源描述,建立面向服务的可视化制造资源模型,对各种数据进行聚类、统计、分析等复杂增值处理。动态获取制造资源的实时状态信息进行分布式自治维护,实现设计制造协同空间的制造资源对生产现场状态的快速可视化描述。

制造过程中的制造资源服役状态分析是实现制造资源优化配置的关键,因此把制造资源模型作为服务节点,通过可靠性、可提供性、正确

性、完整性作为评价指标建立服务质量模型,采用一种基于序贯博弈的优化制造时间的制造资源分配策略,通过寻求各个阶段博弈的纳什均衡解来预测制造资源服务质量。然后利用此服务质量信息生成所有需求计划的最优能力组合和制造资源的优化能力。

#### 2 制造基础能力数据库

制造资源的基础能力是通过大量的属性参数来描述的,例如设备的转速、加工尺寸、加工重量等。制造资源的能力属性只有通过可视化模型的关联,才能实现企业制造基础能力的有效度量。在分析制造资源初始状态、维护数据的基础上,将需求变化、材料变化、加工对象和其他制造资源作为随机扰动因素,在此基础上采用概率分析方法,建立基于时变的单个制造资源生产能力评价模型和基于 SOA 的制造资源基础能力数据库,采用贝叶斯预测理论对生产能力进行预测,并建立针对单个制造资源生产能力的度量指标和评估方法,通过上述研究,形成基于时序逻辑的制造资源生产能力评价体系。

#### 3 数字化生产能力核算体系

根据现代制造企业柔性生产的特点,可以运用系统动力模型、生产能力的测定方法以单台设备的生产能力为基础,综合排队模型、线性规划模型、关键路径等方法根据不同生产运行状况建立企业级产能核算体系,并利用数据包络分析方法对该企业的生产能力进行量化分析。以生产能力核算与分析和企业决策知识库为依据,借助优化算法和 ERP 系统,为企业生产线的调整、产能均衡、方案规划、计划修正提供智能化的决策支持。

在完整的生产能力评估体系之中进行生产系统的压力测试,需要在保证生产系统正常运行以及数据安全的前提下,通过生产运行仿真模拟实际生产过程中的系统负荷,对系统不断施加压力,确定一个系统的瓶颈点或崩溃点,来研究生产系统所能提供的最大产能。

#### 4 面向服务的数字化工厂集成应用环境

建立面向服务架构的企业级数字化工厂集成框架,按照结构化模

