

航空数字化制造技术

齐 鹏 200808125

摘 要

本文从我国航空数字化现状讲起，首先介绍了数字化总体框架研究的概念，设计要求，系统组成，基础环境，工作机制等内容，然后在实际应用层面着重介绍了MAZATROL FUSION 640 系统，并简单介绍了数字化装配过程仿真验证技术以及飞机数字化装配技术。

关键词：数字化 总体框架 智能化 网络化 信息化
数字化装配

一、我国航空数字化现状

我国的航空制造业数字化经过多年的发展，取得了一定的成效，在产品的三维数字化设计、数字样机应用、工装数字化定义、预装配、主要零件的数控加工，产品数字仿真与试验、工艺数值模拟与仿真、产品数据和制造过程管理等方面有了较深入的应用，但是，我们也应

清醒地认识到，产品全生命周期的信息通道尚未打通，数字化工程体系还未形成，数字化技术的巨大效能远未发挥。与发达国家相比我们还存在巨大差距，尽管我们在航空制造业实施了并行工程，但仍然停留在以产品为中心的产品研制理念，而发达国家已经转向以客户为中心的产品研制理念，即产品研制过程中，产品的目标从（可）制造性向服务性转化，采用面向产品全生命周期的管理模式。美国对于高风险的大型武器装备的研制，率先采用一体化产品与过程设计模式，将系统工程方法和新的质量工程方法相结合，并应用一系列决策支持过程，在计算机综合环境中集成，有效控制了产品的质量 and 风险。著名的 JSF 项目（新一代联合攻击战斗机）的研制，完全建立在网络化环境上，采用数字化企业集成技术，联合美国、英国、荷兰、丹麦、挪威、加拿大、意大利、新加坡、土耳其和以色列等几十个航空关联企业，提出“从设计到飞行全面数字化”的产品研制模式，用强势联合体来化解风险。

目前，国家正在大力推进制造业的数字化。制造业企业急需从战略的高度，构造面向产品全生命周期的、支持跨企业联合的数字化工程体系。本文根据相关的研

究和实践，总结多年的应用成果，以航空制造业为背景，提出制造业数字化的总体框架，给制造业数字化应用平台的建设提供参考。

二、航空制造业数字化总体框架研究

（一）总体框架设计要求

面对竞争激烈的市场大环境，制造业的唯一出路是在最短的时间内以最有效的方式生产出最能满足客户需要的产品。制造业企业间既有竞争又有联合，只有发挥各自的技术和资源优势，才能降低成本，分摊风险，共享市场。构建数字化工程体系是达到以上目的最有效的方法和手段。

数字化工程体系的核心是信息共享和过程管理，因此，制造业数字化工程的总体框架必须能实现制造业企业内部和企业间的信息共享和过程控制。

产品数据信息和产品生命周期相关的其他信息在各企业、各部门、各专业之间的顺畅流转，是产品研制顺利进行的重要保障。总体框架的设计要有利于实施全生命周期的产品数据管理，实现单一产品数据源，打通企业间的信息流。

过程管理的内涵是面向产品的管理，而不是面向企业（或组织）的管理。它需要数字化体系能够把设计、试验和制造部门与客户、供应商、协作单位联系起来，采用 IPT 组织的方法，优化产品研制流程，达到控制成本、降低风险、缩短产品研制周期的目标。

针对当今信息化技术的快速发展，要求制造业数字化体系能够支持企业业务变更的需求，支持流程再造和组织重构的要求，满足通用性和专业性的要求。

（二）数字化框架组成

1. 数字样机系统

数字样机是产品的数字化描述，贯穿于产品从概念设计到售后服务的全生命周期，是工程设计、功能分析、试验仿真、加工制造、直至产品售后服务等的信息交换媒介。随着产品研制的不断深入，数字样机由表及里，由粗到细，成熟度不断增长。

数字样机系统生成了数字样机，也提供了对数字样机进行分析、评估、仿真等功能。

2. 产品数据管理系统

产品数据管理系统管理并维护与产品相关的所有工程数据，包括产品的几何模型、说明性文档、技术状态

数据等，产品数据管理同时也管理与维护产品数据间的关联信息，如产品结构、构型、版本等信息。

3. 工程协同系统

工程协同系统是由数字化设计系统、数字化试验系统、数字化制造系统等业务系统所组成的集合，从信息化的意义上来说，业务系统就是使能工具。工程协同系统是工程数据的主要生成源，各个业务系统通过数字样机进行数据交换。该系统包括：

(1) 数字化设计系统：针对航空制造业业务需求，集成所需的专业业务软件，包含产品设计的各种专业软件和工具，专业仿真软件工具，设计评估工具等。

(2) 数字化试验系统：针对航空制造业业务需求，集成所需的专业试验系统包括：数字化强度试验、飞控试验、系统试验、电气试验、航电武器试验、地面联合试验等试验业务系统。

(3) 数字化制造系统：针对航空制造业业务需求，集成所需的专业制造系统，包括：数控加工系统、数字化复合材料生产线、数字化钣金生产线、数字化切削生产线、数字化工装生产线、数字化焊接生产线、数字化电缆管线生产线等制造业务系统。

(4) 数据转换接口：业务系统之间的数据格式转换接口。

4. 工程过程控制系统

工程过程控制系统包括基于数字样机的并行过程控制系统和项目管理系统。

并行过程控制系统实现了设计、试验、制造等业务系统的过程集成。并行过程控制系统确定了一个任务应涉及哪些业务系统，并通过控制数字样机的成熟度，确定业务系统是否启用，是否能够访问数字样机，同时并行过程控制系统也监视业务系统的状态，从而使之围绕特定任务协调有序地运行。

项目管理系统完成项目任务的计划、资源调配、IPT组织管理、进度和质量监控等管理控制过程。

5. 工程支持系统

工程支持系统主要向工程协同系统提供工程过程中所需的支持信息，包括质量、五性（可靠性、可维修性、可测性、保障性和安全性）、标准、适航、情报资料、研制知识等信息，这些信息可以是模板、文件以及其他对象等形式。该系统同时也提供了质量、五性、标准和适航等方面的控制和评估功能。

（三）基础环境

基础环境包括计算机系统、网络系统和数据库系统等，是企业内部和企业间信息交换的基础。

（四）总体框架工作机制

产品研制业务关系表现在业务数据关系和业务流程关系两个方面，从信息化的角度来看，总体框架应实现信息的集成和过程的集成。因此，制造业数字化的总体框架由纵向的工程过程控制、横向的工程工作面和作为支撑的基础环境所构成，其中工程过程控制实现过程的集成，工程工作面实现信息的集成。

工程工作面是产品研制过程的时间断面。在工程工作面中，工程协同系统是工程研制中数字化设计、试验和生产等方面业务系统的集合；数字样机系统对产品数据进行映射生成了数字样机；产品数据管理系统负责管理产品相关的所有数据；工程支持系统提供工程支持信息的共享。

工程协同系统中的业务系统之间的数据交换是通过数字样机来进行的；数字样机系统根据业务系统的不同要求，对产品数据管理系统所管理的 product 数据进行过滤，生成相应的数字样机；工程协同系统可以从工程支持系

统中得到质量、标准等信息。工程工作面实现了信息的集成。

工程过程控制分为两条主线：一条主线是基于数字样机的并行过程，所控制的对象是工程协同系统中的各个业务系统，并行过程采用成熟度控制的机制；另一条主线是项目管理过程，采用任务节点控制的机制。

项目管理过程控制的是点，而并行过程控制的是线，并行过程由项目管理过程触发，工程过程控制实现了过程的集成。

项目管理过程可以理解为对工程过程的任务节点（里程碑）的控制过程，任务节点主要描述了任务的进度、资源需求和任务间的关系等。在一个任务开始前，需要配置相应的资源（包括人员和物料、设备等），由 IPT 小组执行此项任务。通常，一个任务是否完成，是由并行过程控制系统返回的状态来确定的，对里程碑（阶段评审）来说，需要阶段评审的结论来支持。阶段评审的内容可以包括：质量、标准、五性和用户意见等方面。

当一个任务结束后，为之所配置的资源将被释放，随着一个新任务的启动，新的资源配置也将完成。因此，项目管理过程同时也包含了 IPT 组织的动态变化过程。

按照过程定义，并行过程确定哪些业务系统参与任务的执行。业务系统之间的协同是以数字样机为共同的信息基础，并行过程通过控制数字样机的成熟度，来限制各个业务系统访问数字样机。并行过程监控各业务系统的运行状态，并根据数字样机的成熟度、过程定义实现对各个业务系统的协同控制。

工程工作面、工程过程控制和基础环境，三个部分构成了以数字样机为中心、以产品数据管理为手段、以工程过程控制为主线的制造业数字化总体框架。

三、数字化制造助力航空制造业发展

随着电子计算机软硬件技术和网络技术的发展，在产品的设计开发、虚拟制造、工厂的管理软件和电子商务方面，都有大量比较成熟的硬件平台和软件供使用，然而，产品最重要的一个环节——生产制造方面，目前来讲还是一个瓶颈，制约了数字化的应用和发展。

在这种大的环境和背景下，对生产制造关键环节的信息化要求就越来越迫切。数控机床虽然经历了几十年的发展，无论从功能还是从精度来讲都已经发展到了一

一个新的高度，但是长久以来，数控机床网络化的应用更多的还是停留在由计算机向机床传输程序、机床参数和加工参数等原始的应用内容方面，而机床的工作状态如何我们无法知晓。很显然，这样的数控机床很难跟上这个时代的步伐，无法适应当今智能化，网络化和信息化方面的需要。为了适应发展的需要，MAZATROL FUSION 640 系统应用而生：

（一）MAZATROL FUSION 640 系统简介

MAZATROL FUSION 640 系统是 MAZAK 公司开发的新一代数控系统。该系统将 CNC 和 PC 紧密地融合起来，兼具传统 CNC 和现代 PC 双方面的优势，使很多智能化和网络化的功能得以实现。

采用人机对话式编程方式的 MAZATROL 640 系统对编程操作人员的要求大大地降低，同时也提高了编程的准确性和效率。操作者只需要输入被加工零件的材质、使用的刀具材质、加工部位的最终要求、被加工工件的形状数据和工件的安装位置，数控系统就会通过内置的专家系统自动决定零件的加工参数（比如主轴转速、进给速度等）以及自动计算并确定刀具路径，避免了绝大部分的编程错误。系统还有三维实体模拟加工功能，可以立即

对编程的结果加以验证；系统的加工向导预测功能可以根据切削条件计算出主轴的功率负荷和加工时间，据此，编程操作人员可以对程序进行进一步的优化，以平衡主轴输出负荷，提高加工效率。

系统的语音提示和导航功能可以在开机后用语音问候操作者，提示操作者机床的状态并做安全确认，防止出现误操作；震动抑制功能可以将机床加减速引起的机械震动消除，从而提高零件的加工质量和刀具的使用寿命；同时，可以进行虚拟加工，在机床、工件、刀具和夹具的3D模型下实现加工程序与实际加工环境一样的模拟加工，从而在实际加工前就可以检查加工中可能出现的干涉，还有智能安全保护功能，在手动操作时可以进行干涉确认，在干涉发生前停止机床，不用担心发生撞车；虚拟加工、自动加工过程中的干涉检查，使得编程更加放心、快捷、简单。

另外，刀具的寿命管理功能、机床维护保养提示和在线服务等智能化的功能也为机床的使用和维护提供了很好的手段。

（二）智能生产中心 CPC (Cyber Production Center) 管理软件

随着企业的不断发展和生产规模的不断扩大，企业需要更多的生产设备来满足生产的需要，但是随着生产设备的增多，生产管理的工作量也越来越大，因此，MAZAK公司在单机的智能化网络化基础上，开发了智能生产中心 CPC 管理软件，一套软件可以管理多达 250 台的数控机床。该软件包含 4 个独立的模块：加工程序自动编制 (CAMWARE)、智能化日程管理 (Cyber Scheduler), 智能刀具管理 (Cyber Tool Manager) 和智能监控 (Cyber Monitor)。

加工程序自动编制是一种易学易用的人机对话式零件加工自动编程系统，该系统使用通用的 DXE 或者 IGES 格式从 CAD 图纸中获取零件的形状信息，根据每台加工设备的设备信息和工厂内的刀具数据库刀具信息，通过简单的操作针对现有的设备和刀具配置生成零件的加工程序以及刀具需求、加工时间等数据，并通过网络将这些数据直接传送到相应的加工单元和管理系统软件。这些数据就可以自动生成工时成本，进行刀具准备，实现了加工工艺编制、加工程序编制、工艺路线安排和刀具资源配置的并行作业。而且该软件还有加工程序管理方面的功能，方便客户对大量的程序资源进行准确、高效

的管理。

智能化日程管理软件能够根据营业单要求的数量、交货期以及 CAM WARE 提供的加工时间数据和工时成本信息，迅速自动编制出对顾客的交货周期和报价。另外根据合同要求的交货周期以及生产现场的每个单元、工位的现状做出零件、部件的作业计划和整机的装配和出货计划，对临时出现的紧急情况也可以方便快速地对计划做出调整，并通过网络自动将精确的日工作计划发送到每个现场终端和每台机床的控制器上。通过智能化日程管理，工厂的每个加工单元、加工工位都实现了实时精确的作业调度，最大限度地减少了机器的空闲时间，给顾客报出的交货周期和价格更具准确性和竞争力。

智能刀具管理软件能够根据智能编程软件提供的刀具信息和智能化日程管理软件提供的工作任务信息，对每台设备的刀具数据进行分析，结合控制系统的刀具寿命管理功能将刀库内现有的刀具清单和需要的刀具清单进行对照分析；再针对每个加工任务提出刀具需求和状态，比如加工工件需要而刀具库中没有的刀具清单、刀具库中多余的刀具清单、刀具库中虽然有但是加工过程中将要达到寿命的刀具清单；然后通过网络将这些信息

发送到每个相应的加工单元和刀具室。有了这些信息，操作者和刀具管理人员就可以对刀具进行快捷、高效的管理。

智能监控软件将现场每台机床以及每个工位的加工状态通过网络实时反馈到管理者和相关部门的电脑上，使管理者以及相关部门在任何有网络的地方都可以实时地了解加工现场的工作情况和计划的执行情况，随时监督机床的运转状态、参数设定是否合适、加工完成情况而无需人工汇报；同时，能够做出准确的判断，必要时及时下达相应指令。另外，MAZATROL FUSION 640 数控系统的双向通信功能可以让管理软件直接调用其工况记录数据库，使得工场工作量的统计完全由计算机自动进行。智能监控的应用使管理者无论身在何处，都能够清楚地了解工厂的生产状况，从而对瞬息万变的市场做出及时准确的反应。

（三）智能生产中心结合 MAZATROL 640 系统的优势功能

智能生产中心软件结合 MKP, PDM 和 ERP 等等管理软件，可以实现从订单输入、产品设计、库存管理、生产制造订单发行、生产购买订单发行、生产管理、半成品

和成品管理全过程控制，实现了作业日程安排、工艺管理以及数控机床运行状态的监控，使生产全过程控制由车间级细化到每台数控机床，保证了生产进度和生产成本控制，使机床开动率大幅提高。使用一般的生产管理模式和 CNC 机床时，有 75%的时间是用来进行准备的(设计、工艺、编程、刀夹量具准备、调度、工时或成本核算等)，只有 25%的时间是用来加工的。用智能生产中心后，准备时间由 75%降为 50%，加工时间由 25%上升至 50%，使工厂的生产和管理过程实现了并行化、网络化，大幅度降低了生产过程中的辅助时间，从而有效提高了生产效率。

对于工厂的管理者来讲，最想知道的是昂贵的数控设备在生产现场是如何运转从而创造利润的，以及如何合理地安排这些资源以满足客户对质量和交货周期的要求。智能化、网络化的 MAZATROL 640 系统加上智能生产中心软件可以帮助管理者随时随地了解这些信息。

比如管理者想知道每台机床每天的工作时间、工作状况、生产了多少零件、机床的开动率等信息，智能化的 MAZATROL 640 系统会自动记录机床的工作状态，管理者可以很方便地了解每台机床每天的运行记录：机床什

么时候开机，什么时候停机，开机时什么时候处于自动运行状态，什么时候处于调整状态，什么时候发生机床报警，都加工了什么工件，加工了多少工件，机床的主轴转速及负荷是多少等等，方便管理者及时把握现场的机床运转状况，并根据现场的情况及时作出调整计划。

另外，系统还可以对记录的这些工作状况进行运算处理，并用图形把它直观地表达出来，如以时间为坐标，用条形图显示出机床每天每一时段的状态，还可以用饼图表示一段时间内各种工作状态所占的比率，这样可以很方便地统计出机床的开动率，工厂的管理者和计划人员可以依据这些信息进行管理和计划。

MAZATROL 640 系统将 PC 和 CNC 融合在一起，具有非常强大的网络化功能，可以方便地接入任何类型的计算机网络环境，这些功能都可以通过软件和网络来实现。无论在办公室、家里还是出差，只要有网络存在，我们都可以通过计算机网络对机床进行全方位的监控，实现了机械加工的信息化，完全满足了现代化、信息化管理的需要，给传统的制造业经营管理模式带来巨大的变革。因此，它为用户带来的不仅仅是一种工具，而是公司管理方式的一种变革，这种变革可以对市场的变化作出快

速的反应，从而提高了企业的生产效率和综合竞争能力。

基于网络的制造已经成为 21 世纪的主要制造模式，各个行业无不在互联网这个平台上进行着产品的开发设计、制造、销售和服务。互联网贯穿了整个产品的生命周期，成为各个企业快速响应市场需求、不断推出新产品、赢得市场竞争力和自身不断发展的主要手段。具有智能化、网络化的 MA7ATROL FUSION 640 系统和智能生产中心软件使机械加工这个瓶颈环节迅速地融入到现代信息社会中，为航空企业的发展提供了有力的工具，使航空企业走在时代的前列。

四、数字化装配过程仿真验证技术

三维数字化装配过程仿真验证技术是在软件虚拟装配环境中，调入产品三维数模、资源三维数模和设计的装配工艺过程，通过软件模拟完成零件、组件、成品等数模上架、定位、装夹、装配(连接)、下架等工序的虚拟操作，实现产品装配过程和拆卸过程的三维动态仿真，验证工艺设计的准确度，以发现装配过程工艺设计中的错误。仿真是一个反复迭代的过程，不断地调整工艺设计，不断地仿真，直到得到一个最优的方案。

（一）装配干涉的仿真

在虚拟环境中，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，并示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边环境有碰撞。在三维环境中，检查过程非常直观。

（二）装配顺序的仿真

在虚拟环境中，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，验证每个零件按设计的工艺顺序是否能无阻碍的装配上去，以发现工艺设计过程中装配顺序设计的错误。虽然装配顺序设计是按先里后外的原则设计的，但实际装配时候就发现有零件装不上去，无奈只有拆除别的零件，先装这个零件。

（三）人机工程的仿真

产品装配的过程，少不了人的参与，产品移动的过程也就是人动作的过程。在产品结构和工装结构环境中，

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，对工人以下工作特性进行分析。

（四）装配现场三维工艺布局仿真

在数字化环境下，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。

（五）可视化装配

经过仿真验证的三维数字化装配过程仿真文件，可在不同的工位节点或 A O 节点通过程序打包传递到车间，也就是将产品的三维数模和工艺信息（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。操作者能够采用终端电脑或手持电脑读取这些信息，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。在生产现场指导工人对飞机进行装配，帮助工人直观了

解装配全过程，实现可视化装配。也可用于维护人员的上岗前培训。

五、飞机数字化装配技术

飞机数字化装配技术是数字化装配技术实际应用的一个方面，下面简单介绍该技术的应用过程：

1. 利用设计部门发放的产品三维数模和 EBOM，在三维可视环境下进行产品的装配工艺规划及工艺设计。将三维数模数据(属性)导入产品节点，并将三维数模数图形的路径关联到每个零件上，在编制工艺的任何时候都可预览零件和组件的三维图形，直观地反映装配状态。

2. 在产品工艺分离面划分的基础上，对每个工艺大部件进行初步装配流程设计，划分装配工位，确定在每个工位上装配的零组件项目，在三维数字化设计环境下构建各装配工位的段件装配工艺模型，并制定出产品各工位之间关系的装配流程图，形成装配 PBOM。

3. 在装配工位划分的基础上，对每个工位依据段件装配工艺模型在三维数字化环境下进一步进行各工位内的装配过程设计，确定每个工位内的段件装配工艺模型零组件的装配顺序，并且将相关的资源(设备、工装、工

具、人)关联到工位上。确定该工位需要由多少个装配过程实现，并定义装配过程对应的 A0 号。

4. 在装配 A0 划分基础上，对每本 A0 依据段件装配工艺模型进行详细的装配工艺过程设计，定义该工艺过程所需要的零组件、标准件、工装等，在三维数字化环境下确定该装配过程零组件、标准件、成品等装配顺序，明确装配工艺方法、装配步骤，并选定该装配过程所需要的工装、夹具、工具、辅助材料等资源，形成用于指导生产的 A0 和 MBOM

六、结束语

综上所述，先进的数字化技术已经广泛应用于航空制造业的各个方面，而且近几年发展迅速并对各国的先进制造行业产生了深远的影响。但是数字化技术的普及还有待深入、提高，尤其是我国的航空数字化制造技术与欧美一些国家、日本相比还有很大差距。应当大力开展航空数字化制造技术的研究开发，使数字化制造技术普遍应用于航空制造业，并不断改进完善传统的制造业。这是我国制造业发展的大势所趋，国家、企业和从业于制造业的各类人员都应给予高度重视。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/198142016103006142>