



数字化工厂技术的应用现状 与趋势

Digital Factory: Its Application Situation and Trend

华中科技大学机械科学与工程学院 张国军 黄刚



张国军

教授、博士生导师，教育部新世纪优秀人才获得者，南粤百杰人才。现任华中科技大学机械学院副院长、东莞华中科技大学制造工程研究院常务副院长、制造装备数字化国家工程研究中心副主任、中加合资艾普华公司董事长等。长期从事“数字化工艺与制造过程优化”方面的研究工作，牵头国家 863 计划重点项目离散制造执行系统（MES），参与制定 MES 国家军用标准，开发的汽车行业 MES 在我国自主品牌汽车企业广泛应用，获国家科技进步二等奖一项，省部级科技进步一等奖多项。发表 SCI/EI 论文 40 余篇，获得专利 10 余项。

在我国，面对传统产业转型升级、工业与信息化融合的战略发展要求，大力开展对于数字化车间技术系统的研究、开发与应用，有利于推动实现制造过程的自动化和智能化，并可望有效带动整体智能装备水平的提升。

现代工业经历了机械化、电气化革命，未来的第三次工业革命必然是以机、电、信息相结合的智能化制造革命。《经济学人》2012 年 4 月发表的《第三次工业革命：制造业与创新》专题报道中阐述了目前由技术创新引发的制造业深刻变化，其中，数字化与智能化的制造技术是“第三次工业革命”的核心技术^[1]。

作为数字化与智能化制造的关键技术之一，数字化工厂是现代工业化与信息化融合的应用体现，也是实现智能化制造的必经之路。数字化工厂借助于信息化和数字化技术，通过集成、仿真、分析、控制等手段，可为制造工厂的生产全过程提供全面

管控的一种整体解决方案^[2]。早在 2000 年前后，上汽、海尔、华为和成飞等制造企业均已开始着手建立自己的数字化工厂。近年来，随着国际竞争的不断加剧和我国制造业劳动力成本的不断上升，对设备效率、制造成本、产品质量等环节的要求不断提高，离散制造业中以汽车、工程机械、航空航天、造船为代表的大型企业已越来越重视数字化工厂的建设。

数字化工厂的若干关注点

根据在范围、阶段、视角上的关注点存在差异，对于数字化工厂也有不同提法，比如可视化工厂（Visual Factory）、智慧工厂（Smart Factory）、

智能工厂(Intelligence Factory)、数字化制造(Digital Manufacturing)、虚拟工厂(Virtual Factory)等。各个概念在关注点上也存在不同程度的交集,如智能工厂和数字化制造的交集就是以智能装备为核心的制造工艺过程智能化,特别是对制造装备本身的智能化。而上述各种提法之间除明显的交集之外也各有侧重,比如可视化工厂侧重于数字化工厂实现前期的数据采集和透明化,而智能工厂更侧重于后阶段的数据分析与决策。

上述提法中比较典型的有3类:基于三维模型的数字化协同研制,基于虚拟仿真技术的数字化模拟工厂和基于制造过程管控与优化的数字化制造车间。从制造管理的层次和从设计到制造的过程2个维度来看,它们涉及的业务范围大致如图1所示。

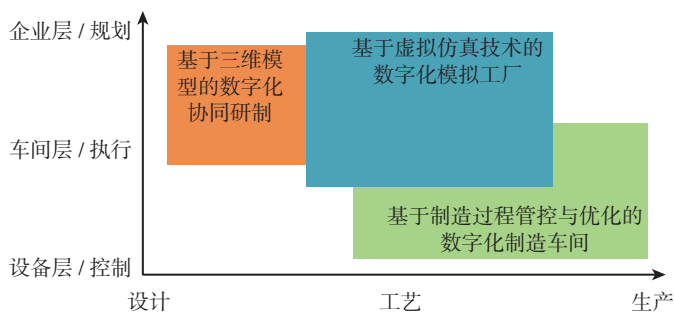


图1 典型数字化工厂提法的主要业务范围

基于三维模型的数字化协同研制

在设计部分,三维CAD系统的应用已相当普及。1997年,美国机械工程师协会ASME就开始了全三维设计相关标准的研究制定工作,并于2003年颁布了“Y14.41(Digital Product Definition Data Practices)”标准,把三维模型和尺寸公差及制造要求统一在一个模型中表达。在生产部分,各类数控设备在加工精度和智能控制水平上近年来都得到飞速发展。基于三维模型的单一数据源和数控设备的广泛应用使得从设计端到制造端的一体化成为可能。

基于三维模型的数字化协同研制应用的尝试始于航空航天制造领域。由于在产品设计、材料成本、成型技术和制造精度方面具有相对更苛刻的要求,航空航天领域在加工和装配制造工艺上整体领先于其他行业,这为基于三维模型的数字化协同研制奠定了基础。

当前,世界先进的飞机制造商已逐步利用数字化技术实现了飞机的“无纸化”设计和生产,美国波音公司在波音777和洛克希德·马丁公司在F35的研制过程中,基于三维模型的数字化协同研制和虚拟制造技术,缩短了2/3的研制周期,降低研制成本50%^[3]。波音公司在研制X-32飞机时也是如此,借助于统一模型,辅助装配系统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,无需再细读图纸和翻阅工艺文件,使装配周期缩短50%,成本降低30%~40%^[4]。在飞机总装线上,在机身与机

身还是机翼与机身都实现了高度自动化的校准和对接,波音和空客两大航空制造公司生产的波音737/787、A320/A380系列飞机无一例外地采用全数字化样机进行协调和辅助装配^[5],如空客A380采用4台Leica激光跟踪仪可完成数字化装配^[6]。数字化产品的数据从研制工作的上游畅通地向下游传递,还有助于大幅减少飞机装配所需的标准工装和生产工装。借助于飞机的数字化模型,法国达索公司在装配小型公务机Falcon时,其传统的工装已减到零,对降低新机研制成本,缩短研制周期起到了难以估量的作用。该技术还能够大幅度提高产品的装配质量,

如波音747机翼装配精度由原来的10.16mm提高到0.25mm^[7]。

在国内,中航工业第一飞机设计研究院2000年在“飞豹”飞机研制中已全面采用了数字化设计、制造和管理技术。航天科技211厂通过普及基于单一数据源的三维模型,制定了“三维到工艺”、“三维到现场”、“三维到设备”的步骤发展策略,重点解决了基于三维模型的设计工艺协同工作模式和三维设计文件的信息传递、生产现场无纸化和航天产品的加工、装配、检测等装备的数控化问题。新支线飞机ARJ21的研制100%采用三维数字化定义、数字化预装配和数字化样机^[8]。上海商飞公司利用数字化设计、分析、仿真等技术手段,实现了设计、零件制造以及装配一次成功。上述应用目前已开始推广至工程机械、造船等其他领域。

基于虚拟仿真技术的数字化模拟工厂

数字化模拟工厂是数字化工厂技术在制造规划层的一个独特视角。基于虚拟仿真技术的数字化模拟工厂是以产品全生命周期的相关数据为基础,采用虚拟仿真技术对制造环节从工厂规划、建设到运行等不同环节进行模拟、分析、评估、验证和优化,指导工厂的规划和现场改善。

由于仿真技术可以处理利用数学模型无法处理的复杂系统,能够准确地描述现实情况,确定影响系统行为的关键因素,因此该技术在生产系统规划、设计和验证阶段有着重要的作用。正因为如此,数字化模拟工厂在现代制造企业中得到了广泛的应用,典型应用包括:

(1)加工仿真,如加工路径规划和验证、工艺规划分析、切削余量验证等。

(2)装配仿真,如人因工程校核、装配节拍设计、空间干涉验证、装配过程运动学分析等。

(3) 物流仿真, 如物流效率分析、物流设施容量、生产区物流路径规划等。

(4) 工厂布局仿真, 如新建厂房规划、生产线规划、仓储物流设施规划和分析等。

通过基于仿真模型的“预演”, 可以及早发现设计中的问题, 减少建造过程中设计方案的更改。韩国三星重工利用 DELMIA 软件建立了完整的数字化造船系统, 建立了虚拟船厂, 可在虚拟环境下模拟整个造船过程。这套系统预计每年为企业减少 730 万美元的开支^[9]。通过模拟仿真技术能够迅速发现在持续运行的过程中出现的问题, 而如果想要在现实的系统中发现这些问题, 需要长期测试, 花费高昂的成本。南车青岛四方机车采用虚拟仿真技术对高速列车生产环境进行了建模, 并实现了建模装配仿真及物流仿真, 减少了因零件返工配送不足造成的停工现象, 减少了因工艺欠佳导致的装配干涉产品返工的问题。三一重工开发了 OSG 技术的三维工厂布局规划平台 (VR Layout)^[10], 在集团内部首次应用于其宁乡产业园的工厂布局规划, 缩短了工厂建设周期, 并节省了因设计缺陷产生的成本, 如图 2 所示。2011 年, 国内各工程设计院已逐步开始采用数字化工程设计及规划技术来辅助规划和建设新工厂, 降低工程设计与规划风险。

在仿真工具方面, 工厂仿真领域的相关技术基本被国外产品垄断, 如达索公司的 Delmia/Simulia、Siemens 公司的 Technomatix 和 PTC 公司的 Ployplan 等^[11]。这些产品的特点在于与其同公司 CAD/PLM 系列产品的紧密集成。用于制造领域的仿真软件还有很多, 如用于装配仿真的 EM Assembly、DMU, 用于公差分析的 3DCS、eM-TolMate 等, 用于车间物流仿真的 Plant Simulation、Quest、Flexsim、Witness、Automod 等。目前

相关产品都在向三维模型方向发展, 使得这些仿真工具展现方式更加灵活, 分析功能更加强大^[12]。

基于制造过程管控与优化的数字化车间

在制造企业, 车间是将设计意图转化为产品的关键环节。车间制造过程的数字化涵盖了生产领域中车间、生产线、单元等不同层次上设备、过程的自动化、数字化和智能化。其发展趋势也分别体现在底层制造装备智能化、中间层的制造过程优化和顶层的制造绩效可视化 3 个层次。

在底层制造装备方面, 数字化工厂主要解决制造能力自治的问题。设备制造商不仅持续在提升设备本身高速、高精、高可靠等性能方面不断取得进展, 同时也越来越重视设备的感知、分析、决策、控制功能, 比如各种自适应加工控制、智能化加工编程、自动化加工检测和实时化状态监控及自诊断/自恢复系统等技术, 在生产线工作中心及车间加工单元中得到普遍运用。如日本 Moriseiki 的最新机床产品上安装的操作系统 MAPPS, 该系统内置了森精机的操作编程维修软件, 具有很高的开放性, 具有对话式编程, 三维切削模拟和维修指导画面, 提供远程监控功能方便维修服务, 并且可以直接进行切削仿真。制造装备的另一个趋势是把机床设备和相关辅助装置(如机械

手)进行集成, 共同构成柔性加工系统或柔性制造单元。也有不少厂商支持将多台数控机床连成生产线, 既可一人多机操纵, 又可进行网络化管理。上文提到的 MAPPS 系统就可以通过使用 CAPS-NET 网络软件建立基于以太网的网络, 从而可以对作业状况和生产计划进行一元化管理。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, 一套软件便可管理多达 250 台的数控机床, 使得生产的过程控制由车间级细化到每台数控机床, 为客户的工厂实施数字化制造提供了前提。

在制造过程管理层次, 随着精细化生产的需求越来越突出, 近年来 MES/MOM 逐渐被制造企业所接受。MES/MOM 可分为车间生产计划与管理及现场制造采集与控制两部分。车间生产计划与管理主要完成车间作业计划的编排、平衡、分派, 同时涉及到相关制造资源的分配和准备^[13]。国内外已有较多提供 MES/MOM 解决方案的产品提供商, 如艾普华在离散制造业特别是汽车及零部件、工程机械、航空等行业, Camstar 在太阳能、电子行业, 宝信在钢铁行业, 石化盈科在石油化工行业, 西门子在制药、烟草行业等, 这些产品依托自身对制造业务的深刻理解, 已确立了在这些行业的领先地位。Rockwell、Wonderware 和 GE 依托在自动化领域

的优势, 也已逐步向 MES 延伸。目前各厂商在研发高性能高可靠的系统平台和模块化产品方面投入巨大, 上述平台和产品提升了快速搭建 MES/MOM 解决方案的能力。

现场制造数据采集的一个明显趋势是以 RFID、无线

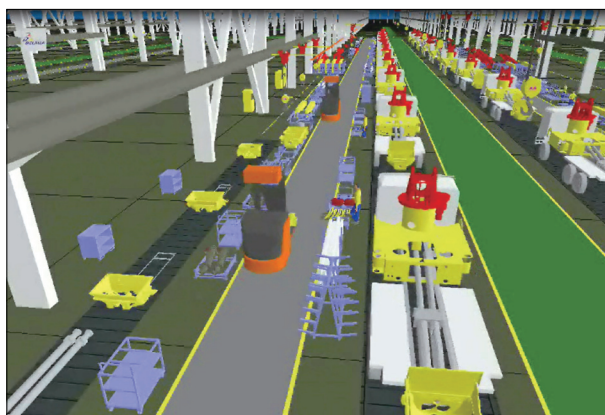


图2 三一重工生产线规划中的物流仿真

传感网络等技术为核心的物联网技术的应用^[14]。物联网技术被认为是信息技术领域革命性的新技术,借其可实现对于制造过程全流程的“泛在感知”,特别能够是利用 RFID 无缝、不间断地获取和准确、可靠地发送实时信息流。汽车行业,比如自主品牌的江淮汽车,在 2006 年前后就开始应用 RFID 技术对生产环节的在制品进行跟踪^[15]。航空航天企业由于通常不允许在零部件上附加标识,因此通常采用以激光标刻为代表的二维码技术来实现 WIP 和关键零部件跟踪。在更细分的领域,RFID 技术在刀具、设备管理方面也有成功应用,主流技术是利用刀柄上的预留空槽置入 RFID 标签,同时通过与机床刀库和对刀仪的集成对刀具使用、维护等进行全面管理。如 Balluff 的 Fanuc miLink Tool ID 系统就可以方便地连接 Fanuc 控制器控制的 CNC 机床,自动进入 CNC 取得刀具跟踪信息。值得一提的是,随着基于泛在信息的智能制造系统进一步发展,装备本身的智能化水平也得到了提升,这使得 MES/MOM 执行管理系统不再被动地获取制造数据,而是能够主动感知用户场景的变化并进行提供实时反馈。

随着 MES/MOM 等软件的应用推广,制造企业已逐步获得了大量制

造数据。如何充分利用这些实时和历史生产数据,通过制造绩效可视化提高对异常状况的预知、响应和判断能力,也是近期发展趋势之一。对于实时数据,主要解决的问题是对制造异常事件的敏捷响应以及对制造绩效偏离的快速修复。自动控制系统中常用的组态是一个典型的例子,但由于组态通常是桌面应用并基于连续量的,对于多客户端的分布式展示和多并发的并行数据流支持存在一定困难。目前的趋势是利用基于 B/S 的可定制可缩放矢量图形技术来动态刷新来自服务端的数据推送。图 3 是一个展现 5 条冲压线生产实绩的例子,所展示的生产绩效可视化功能同时支持了实时数据以及统计数据,能够辅助分析出瓶颈环节。通过向管理者推送并共享全方位的实时制造状态数据,能够有效消除信息的不对称问题,有助于对突发问题快速达成解决方案并作出快速响应。

对于历史数据,主要解决的问题是如何从中找出改善未来制造业务的依据,特别是从质量趋势、物流瓶颈、计划执行情况、设备运行历史等数据中发现可能影响未来生产过程的规律。这方面的技术基础是商业智能分析,在 ERP 系统中已经比较成熟,典型的代表是 SAP 的 BO。由于 MES/MOM 实时性更强并且事务

更频繁,需要更针对性的进行设计,目前这方面的成熟解决方案尚不多,多数仍以基于通用分析软件进行定制为主。典型的通用分析软件有 Microstrategy、Information Builder、Tableau 等。Gartner 近年来每年都会针对支持通用业务的分析软件产品发布被称作“魔力四象限(Magic Quadrants)”的调研报告^[16],对这些软件在集成、展现和分析方面的能力做综合评估。另一方面,目前的计算技术和存储技术对基于大数据的分析提供了强大的支撑,未来还会出现更丰富更专业的制造智能分析产品。

结论与展望

数字化工厂技术已在航空航天、汽车、造船以及电子等行业得到了较为广泛的应用,特别是在复杂产品制造企业取得了良好的效益,据统计^[17],采用数字化工厂技术后,企业能够减少 30% 产品上市时间;减少 65% 的设计修改;减少 40% 的生产工艺规划时间;提高 15% 生产产能;降低 13% 生产费用。另一方面,本文所述的 3 个层次数字化是紧密相关的。毫无疑问,设计层发布的三维模型是后续仿真规划分析的基础,而车间生产状态又可以反过来驱动生产模型,作为分析工厂运作的数据来源;数字化车间需要智能装备的支撑,而要想最大限度地发挥智能装备的效益,则需要数字化车间提供全局的信息和基于全局信息的决策。

在我国,面对传统产业转型升级、工业与信息化融合的战略发展要求,大力开展对于数字化车间技术系统的研究、开发与应用,有利于推动实现制造过程的自动化和智能化,并可望有效带动整体智能装备水平的提升。

本文共有参考文献 17 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 夏宛)

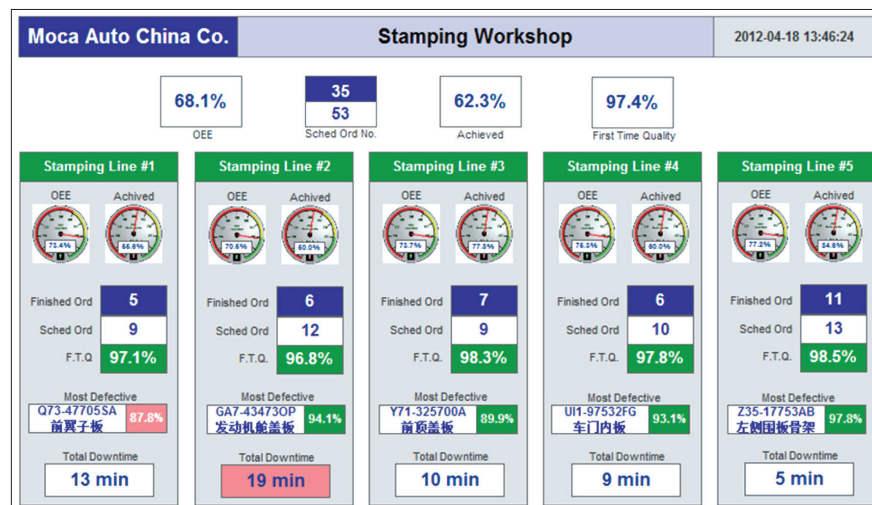


图3 生产实绩与警示的动态展现