

航空智能制造的基础——软件定义创新工业范式

宁振波

(中国航空工业集团信息技术中心, 北京 100028)

摘要: 本文依据中国工程院最新观点性文章《走向新一代智能制造》, 结合航空工业智能制造的演进路径, 从传统研制方式人-物理系统入手, 分析了飞机制造业的数字化到智能化的发展。对飞机基于模型的数字定义, 到基于信息-物理系统的数字定义进行了阐述。新一代智能制造就是在新一代信息技术(云计算、物联网、移动通信、大数据、智能制造)的支持下, 实现与人、设备和物料的深度融合, 其典型特点就是数字主线使能的数字孪生。

关键词: 新一代智能制造; 数字化产品定义; 数字化产品预装配; 集成产品研发团队; 基于模型的定义; 人-信息-物理系统

中图分类号: T-01 文献标识码: A

The Foundation of Aeronautical Intelligent Manufacturing—Software Definition to Innovate Industrial Paradigms

Ning Zhenbo

(AVIC Information Technology Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Based on the latest Perspective article from *Engineering*, a journal of the Chinese Academy of Engineering, *Toward New-Generation Intelligent Manufacturing*, and combined with the evolutionary path of intelligent manufacturing in the aviation industry, this paper starts with the traditional human-physical systems (HPS), analyzes the transition from digital to intelligent development of the aircraft manufacturing industry, and expounds the transition of aircrafts from model-based digital definition to digital definition based on the cyber-physical systems (CPS). The new-generation intelligent manufacturing relies on the new-generation information technologies such as cloud technology, Internet of Things, mobile communication, big data, and artificial intelligence to achieve deep integration with humans, equipment, and materials, and its typical feature is the digital twin enabled by the digital thread.

Keywords: new-generation intelligent manufacturing; digital product definition; digital product assembly; integrated product team; model based definition; human-cyber-physical systems

一、前言

中国工程院院刊《Engineering》推出最新观点

性文章《走向新一代智能制造》, 文章提出了智能制造的三个基本范式: 数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造——新一代智

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-08-01

通讯作者: 宁振波, 中国航空工业集团信息技术中心, 研究员, 研究方向为飞机数字化设计制造; E-mail: ningzhenbo@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代人工智能引领下的智能制造研究”(2017-ZD-08-03)

本刊网址: www.enginsci.cn

能制造。指出智能制造是一个从传统的“人-物理系统(HPS)”向“人-信息-物理系统(HCPS)”不断演进发展的新概念,其核心是在传统的人和物理系统之间增加信息系统,并不断提升信息系统的感知、计算分析与控制能力,最终使其具有学习提升、产生知识的能力[1]。

软件作为信息系统物化的表现,则是强化信息技术与工业技术融合发展的基础支撑。国务院印发的《关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》中也强调了加快计算机辅助设计仿真、制造执行系统、产品全生命周期管理等工业软件产业化,强化软件支撑和定义制造业的基础性作用[2]。新一代智能制造作为一个由智能产品、智能生产和智能服务三大信息系统以及工业物联网和智能制造云两大支撑信息系统组成的、并与工业技术集成的巨系统,在方法层面,推进研发虚拟化,产生了基于物理技术的各类专业工具;在过程层面,推进管理信息化,产生了以流程管理为核心的各类业务系统;在装置层面,推进生产装备的自动化和产品智能化,产生了各类嵌入式软件。因此,在智能制造发展的过程中,能否推动软件定义来创新工业范式(包括定义产品、定义企业流程、定义生产方式、定义企业新型能力、定义产业生态等)实现以软件定义为核心的生产方式变革,是新一轮工业革命的本质所在。

二、基于纸张的符号定义

我们把传统制造业的定义看作是基于纸张的符号定义。所谓传统当然是与现代相区分的。具体区分标准主要以技术为参照,现代制造业的特点是:高精尖,比如新型飞机、微纳米、激光、半导体、数控机床等一系列以现代高端技术为支撑的行业,与此相反,依然使用旧有的制造技术的就属于传统制造业。传统制造系统包含人和物理系统两大部分,是完全通过对机器的操作控制去完成各种工作任务。从工业革命发展过程来说,包含了第一次工业革命和第二次工业革命。无论是蒸汽机、内燃机或者电机(包含发电机和电动机)的应用,都是“人-物理系统”。按照《三体智能革命》一书中的论述,一个完善的智能系统一定具备“状态感知,实时分析,自主决策,精准执行,学习提升”并循环往复[3]。在“人-物理系统”中,由人完成状态感知,

实时分析,自主决策以及学习提升;机器仅仅在人的操作下完成精准执行。

基于纸张的符号定义决定了传统制造业的工业范式就是设计-制造-试验模式的串行模式,即过去所说爱迪生的“试错法”,首先基于纸张的符号定义是人工设计的蓝图(零件图和装配图)、工艺卡片、各类表单、生产计划、纸质文档等,基于人工定义的各类设计图文档,才能开展工艺设计等后续工作,然后在机器上试制各种零件,装配形成试验品,用试验来检验产品的设计功能和性能,达到设计指标就可以批生产了;达不到设计指标,就需要修改设计和工艺再试,直到达到设计指标为止。在这个工业范式下,200年来的手工制图以及早期的计算机辅助设计(CAD)软件,应用范围和深度都具有局限性,主要关注于工程意图表达的一致性、标准性,这类软件就是20世纪八九十年代大规模使用的CAD软件。工业效率的提升还是主要依靠加工用的机器(物料、设备、工装、工具、试验设备),表现在蒸汽机、内燃机和电动机的出现极大提高了物理系统(机器)的生产效率和质量,物理系统(机器)代替了人类大量体力劳动。在传统制造系统中,要求人完成状态感知,实时分析,自主决策,操作执行,学习提升等多方面任务,不仅对人的要求高,劳动强度仍然很大,而且工作效率、质量和完成复杂工作任务的能力也有限。

三、基于模型的数字定义

与传统制造系统相比,第一代和第二代智能制造的工业范式发生了本质变化,以波音777飞机的数字化产品定义(DPD)、数字化产品预装配(DPA)、集成产品研发团队(IPT)到波音787飞机的基于模型的定义(MBD)突破为例。它通过在人和物理系统之间增加信息系统,将人的相当部分的感知、分析、决策功能向信息系统复制迁移,局部信息系统可以代替人类完成部分脑力劳动,进而通过信息系统来控制物理系统,以代替人类完成更多的体力劳动。

波音777飞机是世界上第一个完全采用软件定义飞机研制生产过程的产品。采用了三项技术就是100%的DPD、100%的DPA、327个并行的IPT。研制过程采用的计算机软硬件为:8台IBM大型计

算机，用于 3D 设计的 3 200 台 UNIX 工作站均连接了网络，约 20 000 台 PC 机，800 种互不相关的软件。而在波音 787 飞机的设计中全面推广 MBD 技术，它改变传统由二维图文档来描述几何形状信息，用一个集成化的三维数字化实体模型表达了完整的产品定义信息，成为制造过程中的唯一依据 [4]。

由于以上数字化的技术进步和采用并行工程的管理变革，波音 777 飞机和与其相当的 767 飞机相比，研制周期由 12 年减少为 4.5 年；而造出的第一架飞机就比已经造了 24 年的第 400 架波音 747 飞机质量还好。更为重要的是基于模型的数字定义颠覆了传统设计-制造-试验的工业范式，实现了工业范式向设计-虚拟综合-数字制造-物理制造的转变。

如图 1 所示，为便于理解，把飞机研制分为四个阶段，分阶段加以描述：第一个阶段就是方案设计阶段（包含需求工程，概念设计以及方案设计），核心是飞机的气动布局和总体布置。以前的试错法就是根据战术技术指标，算出飞行剖面，依据剖面画出外形草图，加工出缩比模型，然后在风洞中吹风，来确定气动外形。这个过程反复迭代，一直到满意为止。因为加工一个飞机缩比模型需要好几个月，吹一次风花费几百万元，因此要得到一个满意的方案需要多年做多个方案反复对比才可以完成（如图 1 左上方的风洞照片）。现在的方法是首先根据气动力学计算方法计算结果，用软件在计算机上构建一个虚拟的飞机气动外形（如图 1 左下方飞机外形），然后做计算流体力学（CFD）计算，反复优

选拿出最好的几种方案，加工成缩比模型再吹风。这些技术已经在航空航天领域开始了大规模应用。

以波音 787 飞机为例：波音 787 项目高级副总裁迈克·拜尔指出：“在 767 项目中，我们曾对 50 多种不同的机翼配置进行过风洞测试。而在 787 项目中，只测试了 10 多种。”风洞试验少了，飞机质量提高了，这就是在方案阶段软件定义飞机的气动布局。

第二个阶段就是工程研制，飞机气动布局和总体布置已确定，就可以开始结构设计了，现在几乎所有的 CAD 软件都可以完成结构设计，在 1991 年波音 777 项目中，当时的三维 CAD 软件只能定义几何外形，到了 2004 年波音 787 研制时，CAD 软件不仅仅可以定义几何外形，与机械结构相关的材料数据、工艺数据、标准数据、生产定义数据、检测数据等和制造过程相关的所有数据都可以在三维模型上表达出来，这就是实现了软件定义零件，进而定义产品，也就是 MBD。换句话说，在三维模型上可以表达所有的数据，也意味着传统的蓝图、工艺卡片等基于纸质的符号定义可以不要了，这就是数字化革命。有了完整的数字化样机（DMU），虚拟现实就可以逼真地展示各类应用，制造过程就是和设计的符合性问题了，也就是数字化样机的物理实现。这就是图 1 中间中下方的全数字样机，中上方的物理样机。需要强调的是，在基于模型的数字定义中主线仍然是基于几何模型的多学科仿真分析和优化。

第三个阶段就是批产交付，制造依据仍然是飞



图 1 产品研制流程、传统物理生产线和数字化主线

机全机数字化样机，在数字化样机指导下的生产，关键是生产能力的提升，满足客户需求，当然，现在生产线的建设一定要切合实际，数字的归数字，物理的归物理，混合的要混合。一切以提高质量，增加效益为主线。

第四个阶段是服务保障，有了全机数字化样机，可以一直延续到这个阶段，以前的飞机培训手册、空勤手册、地勤手册、维护维修手册，都是纸质的，数量巨大。现在可以全部模型化了，依据全机数字化样机可以生成交互式电子技术手册（IETM），加上混合现实（MR）技术，服务保障人员就可以如虎添翼了。

四、基于信息 - 物理系统的数字定义

“猎鹰-9”重型火箭的发射成功，宣告世界航天历史进入了一个全新的时代。“猎鹰-9”以及背后的美国 SpaceX 公司的成功，展示了很多技术路线、研发思路、流程管理体系上的可行性和巨大成功。它通过需求 / 功能架构、逻辑架构到物理架构的关联与转换，完整地回答从抽象的问题域（需求 / 功能）开始，对功能分解的行为（做什么）描述，并将行为（运行）分配到具体解决域的产品（结构）的过程。从而避免直接从功能映射到结构，导致在需求中提出要解决的问题后，就跨越逻辑设计和功能 / 行为分析而直奔物理实现的“飞跃式开发怪圈”。比如助推器的分离措施，传统上各国火箭主要采用火工品——比如爆炸螺栓进行分离。而“猎鹰-9”采用了机械分离方式，这种尝试此前不是没有人做过，中国台湾地区的雄风三导弹在早期曾经采用过，结果分离屡屡失败，最后还是采用了火工品分离。而 SpaceX 公司不仅采用了机械分离方式，而且没有做实物验证试验就正式采用了这一设计；其合理性和可靠性完全依靠仿真计算来实现。因此，SpaceX 公司的测试验证成本压缩要远低于传统火箭。避免使用火工品、取消大量实物试验的结果，使 SpaceX 公司节省了大量的时间和资金。必须要强调的是，仿真计算虽然在今天取得了长足的进步，但远远谈不上万无一失；它的结果可靠性，直接取决于基础研究的积累要求和操作、分析人员的水平。笔者认为这就是基于信息物理系统的数字定义。

在这个阶段中的虚拟环境下，实现自顶向下的设计、自底向上的综合设计思想，分阶段、分层次实现设计 - 虚拟综合（基于功能、性能和几何模型的系统仿真）再到数字制造 - 物理制造验证、最后到产品的转变。这就是新一代智能制造创新的工业范式，也是基于虚拟综合（基于功能、性能和几何模型的系统仿真）的最终追求的结果。

“猎鹰-9”重型火箭的机械分离方式的助推器，没有做实物验证试验，其合理性和可靠性完全依靠仿真计算实现，避免了使用火工品、取消大量实物试验的原因就是大量计算和仿真，大量工业软件的应用就是把人的知识和智能赋予软件，这已经是具备了新一代“人 - 信息 - 物理系统”的基础了。我们再从理论上分析一下，第一代和第二代智能制造系统通过集成人、信息系统和物理系统的各自优势，系统的能力尤其是计算分析、精确控制以及感知能力都得以很大提高。一方面，系统的工作效率、质量与稳定性均得以显著提升；另一方面，人的相关制造经验和知识转移到信息系统，能够有效提高人的知识的传承和利用效率。制造系统从传统的“人 - 物理系统”向“人 - 信息 - 物理系统”的演变可进一步进行抽象描述：“信息系统”的引入使得制造系统同时增加了“人 - 信息系统（HCS）”和“信息 - 物理系统（CPS）”。其中，“信息 - 物理系统”是非常重要的组成部分。美国在 2006 年提出了“信息 - 物理系统”的完整理论，德国将其作为工业 4.0 的核心技术。“信息 - 物理系统”在工程上的应用是实现信息系统和物理系统的完美映射和深度融合，而人是实现“信息”的核心要素，在人的全程参与下，形成的新一代“人 - 信息 - 物理系统”中，“人 - 信息系统”“人 - 物理系统”和“信息 - 物理系统”三者都将实现质的飞跃 [1]。

五、新一代智能制造创新的工业范式

2002 年，国防科学技术工业委员会启动了“飞机制造业数字化工程”项目的论证工作，参加的国内飞机研制单位多达 18 家，制定了明确的发展目标：打通飞机制造业数字化生产线，形成飞机数字化研发体系，实现管理方式、生产模式、组织流程、技术标准等方面的变革。换句话说，就是在飞机制造业的全部流程上，从方案设计阶段的数字化模型

不断完善演进，一直沿用到工程研制、批生产、维护维修、报废回收的全寿命周期环节。今天回头来看，这个是什么？不就是数字主线（digital thread）吗？到了今天，中国的工业体系已经发展并形成了世界最完整的工业体系，我们必须建立自己的理论自信。

飞机制造业数字化工程的目标中已经包含了数字主线的概念，而且一脉相承。让我们再研究图 1 最上面的一条线物理线，就是传统制造业的定义：基于纸张的符号定义。图 1 中间的一条线就是飞机研制流程，下面的一条线就是基于软件定义的数字化线；整个图就构成了 CPS 中的系统之系统(SoS)，而图中的每个研制阶段的垂直对应的物理系统和数字化系统，构成了多对数字孪生（digital twin）；当然，数字孪生不仅仅是垂直相关，前后也是关联的。

毋庸置疑，智能制造的前身是数字化制造，而数字化制造的成功是基于几百年来传统制造业打下的物理制造的基础。工业范式的创新是应用软件定义的数字化模型来实现的，因此软件定义数字模型，乃至定义一切，都必须具备强大的物理实体的基础。中国古语说：“皮之不存，毛将焉附。”物理实体是皮，数字模型就是毛，两者的相互融合，构成了智能制造的基础。在智能制造体系中，工业软件不仅仅是核心，更是人类的新思维方式，因此，我国工业软件的发展，急需提升到国家战略层面，并借鉴国外发达国家经验，软件人才培养从娃娃抓起，认识工业，认识软件，重视人才，保护产权，必须成为全民共识。

随着以大数据、云计算、物联网为代表的数字技术的崛起，我们已身处数字经济时代。发展软件

定义技术和 CPS 技术，并在新一代信息技术（云计算、物联网、移动通信、大数据、智能制造）的支持下，实现与人、设备和物料相融合的未来新一代智能制造创新的工业范式，其典型特点就是数字主线使能的数字孪生。

我国是世界第一制造大国，在工业化尚未全面完成的情况下，迎来了数字化浪潮，面临着追赶工业化进程、同步数字化机遇的双重历史任务和严峻挑战。党的“十九大”报告提出，“推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合”，培育新增长点、形成新动能。新一代智能制造为助推我国传统产业数字转型，催生新业态、重塑创新链、重构产业链、拓展经济发展新空间提供了重要的方针和路径。我们必须充分发挥人工智能技术创新的引领作用，加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合，促进我国产业向全球价值链中高端迈进。

参考文献

- [1] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 11–20.
- [2] 安筱鹏. 软件视角下的未来工业 [C]. 苏州: 中国信息化百人会第三届信息战略论坛, 2016.
An X P. Future industry from a software perspective [C]. Suzhou: The 3rd Information Strategy Forum of China Information Conference, 2016.
- [3] 胡虎, 赵敏, 宁振波. 三体智能革命 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Hu H, Zhao M, Ning Z B. Three body intelligence revolution [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [4] 范玉青. 现代飞机制造技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
Fan Y Q. Modern aircraft manufacturing technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2000.