

航空数字化环境中的制造执行系统

Manufacture Execution System in Aviation Digitization Environment

金航数码科技有限责任公司 张伦彦



张伦彦

高级工程师,金航数码科技有限责任公司生产管理业务部副经理。主要从事制造执行系统、精益制造、企业信息化等方面的研究,主持和参与了多家航空制造企业的生产管理系统建设工作。

在过去 10 年里,数字化技术在航空制造行业发展非常迅速,已经从最初的设计领域延伸到了制造领域,在制造领域内,又从虚拟制造逐步走向现实制造。制造执行系统(Manufacture Execution System, MES)是生产现场的管理软件,与产品的现实制造密切相关,如何在数字化环境中应用 MES 已经成为一个非常重要

在数字化设计和制造技术应用方面,航空制造行业一直走在现代制造业的最前列,但最终落地到产品现实制造环节的应用却并不多见,这已经成为制约数字化整体应用水平提升的关键所在。MES 作为与产品制造过程最密切的软件,在数字化技术走向现实制造的过程中,必将遇到巨大的挑战,也必将获得跨越式的发展机遇。

的研究课题。

MES 在数字化环境中的桥梁作用

数字化制造技术在各行各业都有着成功的应用,发展出来的门类也非常多,如 3D 打印、加法制造、快速原型、分层制造等。这些制造的共同特点是基于三维设计快速、直接地制造出成品,为此美国机械工程师协会专门为其定义了一个术语:“直接数字制造”(Direct Digital Manufacturing)。

“直接数字制造”一般见于小型、简单产品的制造,想要直接从三维模型打印出大型、复杂的航空产品,还只能停留在科学探索阶段。航空产品实现“直接数字制造”的最大困难是:虚拟世界与现实制造有着巨大

鸿沟,即虚拟世界中模拟的制造过程无法与现实制造做到百分之百的吻合,这是由航空产品的复杂性所决定的。

想要跨越这道鸿沟,需要完成 2 个关键动作:(1)将虚拟世界的信息,以参数化模型的形式传递到现实世界;(2)将现实世界的信息,以参数特征的形式反馈回虚拟世界。MES 是生产现场的管理软件,天生注定是横跨这道鸿沟的桥梁:一方面 MES 需要接收设计和工艺指令去指挥生产,另外一方面 MES 还拥有现实制造的大量数据,当然这还有一个重要前提,即 MES 必须与设计系统、工艺系统、自动化系统充分集成。

从数字线的角度理解 MES

数字化制造的最高境界是“直

接数字制造”,洛克希德·马丁公司在美国新一代战机 F35 制造中提出了“数字线”(Digital thread)的概念,这是国际航空制造业目前最接近“直接数字制造”的研究进展。所谓的“数字线”就是基于 3D 数模驱动零件制造和产品装配过程,形成了从原型设计直至最终产品的“不间断数字链路”^[1]。

“数字线”的核心特点就是形成了“不间断数字链路”,这就需要 MES 在一个高度自动化的生产现场里,完全打通虚拟世界与现实世界的数字链路。打通这一数字链路的关键在于:制造过程被数字化的工程模型参数化,固态模型用于机床编程和仿真,基于模型定义的制造过程参数和关键特征可以被用于修正机床编程和仿真的结果。

F35 进气道自动钻孔“数字线”是零件加工类的“数字线”。其工作原理图如图 1 所示,从中可以看出:在这条“数字线”上,系统采用了基于 XML 的程序,无缝连接了工程环节和制造环节,驱动 2 个机器人协同完成进气道的自动钻孔,在较短的时间内自动完成千个钻孔动作,同时激光跟踪仪实时提供在线位置信息的闭环反馈,帮助系统及时纠正发生的位置偏离,保证了产品质量。

图 2 是 F35 紧固件安装连接“数字线”的示例图,这是产品装配类的“数字线”。图 3 是其工作原理图,从图 3 可以看出:在这条“数字线”上,

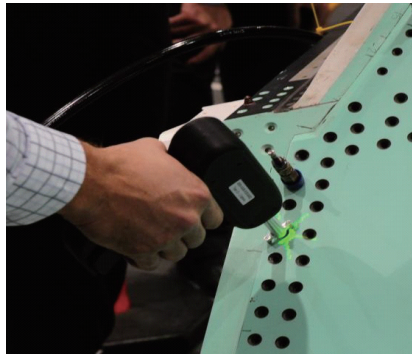


图2 紧固件安装连接“数字线”

世界与现实世界的数据同步。

将精益和数字化结合起来 理解 MES

MES 的概念是 1990 年由美国先进制造技术研究所首先提出的,传统上一般认为 MES 是上层计划管理系统与底层工业控制之间的车间管理系统。在数字化环境下, MES 又肩负起了虚拟世界和现实世界的桥梁作用,使得产品全生命周期管理

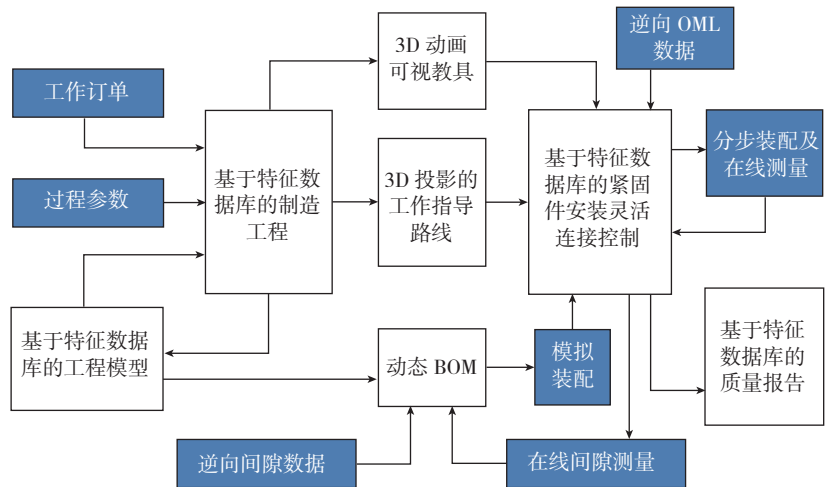


图3 紧固件安装连接“数字线”的工作原理

系统使用 3D 图像和仿真的工作指导书、工程图纸和辅助教具被直接投影在零件表面,引导工人做出装配操作,同时系统实时测量握固长度,实现了动态自动纠错;系统通过自动化系统集成,实现自动数据采集和数字记录保存,使得系统拥有了与实际生产相一致的动态 BOM,实现虚拟

(Product Lifecycle Management, PLM) 的领域往制造、维护端延伸。最终形成了如图 4 所示的“十字结构”。

对于图 4 所示的“十字结构”,可以有 2 个层面的理解:

第一个层面是从信息流的角度来理解,可以概括为:“MES 的计划来自于 ERP (纵向), MES 的内容来自于 PLM (横向)。”MES 成为产品全生命周期过程和价值链过程的交汇点,是制造业企业实现全面数字化和全面信息集成的关键环节。

第二个层面是从精益流的角度来理解,可以概括为:“制造环节的精益改进需求,推动了管理领域(纵向)和工程领域(横向)的全面精益化。”管理领域的精益化已经不是新概念,对于价值链过程而言,制造现场的精益化是核心,企业级资源计划和物流

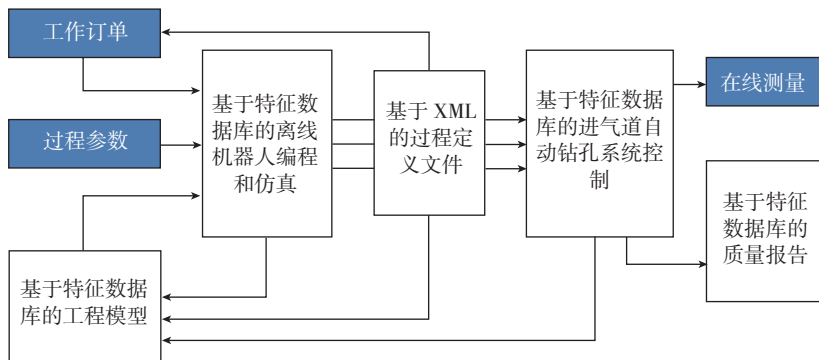


图1 进气道自动钻孔“数字线”的工作原理

管理的精益化都需要服务于制造现场的精益化,从而共同构建起一个精益化的制造型企业;工程领域的精益化正在逐渐为人所知,就产品全生命周期过程而言,只有在设计和工艺阶段就考虑制造阶段的需求,才能够从根本上保证制造现场的精益化,因为精益的生产组织形式是伴随着产品设计和工艺设计而产生的。在数字化设计和制造的实现过程中,各环节传递的信息不仅是数字化的,而且这些信息的存在形式、存在环境也是精益的。

航空复杂制造属于典型的科研转批产模式,不同阶段有着不同的精益要求:在科研阶段,产品的技术状态不稳定,需要通过频繁的试制和试验来不断改进产品,缩短研发周期成为这个阶段的核心诉求,这种研发诉求是精益思想的体现;在批产阶段,为了满足产量提升的需要,又迫切需要建立单元生产或移动生产的组织形式,这种组织形式是基于精益思想构建起来的。如果将精益的视角放大到科研转批产的全过程,那么再重新审视 MES 及相关的信息系统将会收获更加深刻的认识。

在对科研转批产模式抽象化后,可以将制造划分为3个阶段^[2]:首

件阶段(Building-the-first-one)、提升阶段(Ramping-up Production)、剩余阶段(Building-the-rest-of-them),这也是新产品导入(New Product Introduction, NPI)的必然规律。图5是从精益的角度看待3个阶段的经验学习和改进成本,可以发现经验学习在初期较多,而在后期较少,改进成本在初期较低,而在后期较高。通过对这2条曲线的分析,我们大致能够找到 MES 的定位和作用: MES 在初期的主要作用是帮助增长产品经验,帮助找到降低成本的方法,而在后期的主要作用是帮助快速、稳定的制造出产品,下面就具体分析 MES 在这3个阶段的运用。

1 首件阶段

设计人员需要建立包括机器和人在内的数字化工厂模型,不仅需要通过对仿真模拟每个制造步骤,验证能够生产出满意的产品,还需要提供多种产品制造过程的配置,通过仿真找到降低人力、物料和设备成本的最佳配置。需要强调的是:按照这种理念,航空制造中的精益生产单元、移动生产线应该在这个阶段就开始设计了,因为越到后期,改进成本的代价就越大。

仿真与现实制造之间存在鸿沟,

需要 MES 来填充或缩小这道鸿沟。MES 中拥有人力、物料、设备和时间等大量实际制造信息,更重要的是, MES 中包含两类变化的信息:首先, MES 能够建立制造变量的范围,使得仿真不再使用理想值,而采用范围值,从而帮助仿真找到缩小制造变量范围的办法;其次, MES 中的历史制造变量可以用于发现制造中存在的问题。比如:产品的初始状态比较理想,经过一段时间后,虽然还在公差允许的范围之内,但产品却已经无法装配。

2 提升阶段

如图5所示,这个阶段的目标就是要使得成本曲线快速向下。只有当仿真显示制造成本下降,物理产品才会开始大量制造,但是仿真不可能涉及到现实制造中的所有变量。许多变量停留在制造阶段,没有返回到工程领域,这使得车间的生产不可避免地存在返工。为了解决这种问题,需要对 MES 提出与首件阶段完全不同的要求: MES 采集的数据不能局限于工艺文件的要求,因为工艺无法预计现场有哪些未来可能需要用到的变量。

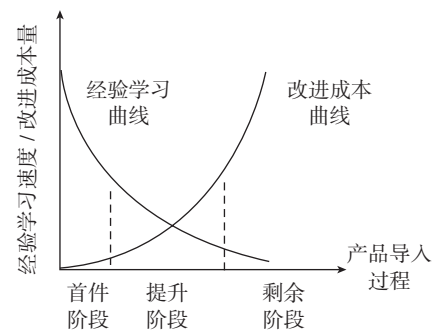


图5 从精益的角度看制造的3个阶段

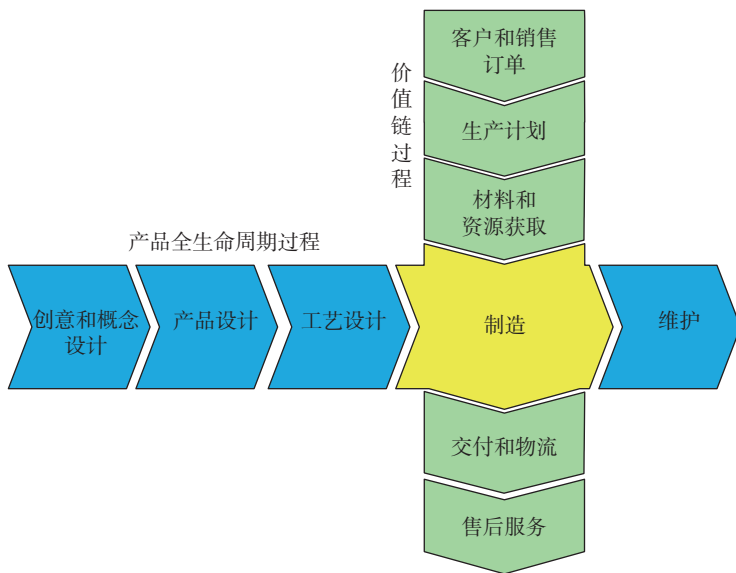


图4 数字化使MES处于产品全生命周期过程和价值链过程的十字路口

3 剩余阶段

剩余阶段就是最终的批产阶段。在全球化环境下,剩余阶段的概念还有所扩大,即在其他地方复制产品(也包括复制制造环境和制造过程)。对于航空军工制造来说,甚至还可以有更广义的理解,比如:和平时期

转为战争时期的“民转军制造”或者“动员演练生产”。

在这个阶段, MES 的关注点包括: 控制制造过程中的资源; 实现制造过程的可视化, 帮助及时发现偏离; 追踪人力和物料的使用, 与计划用量对比; 使用标准的故障探测手段, 按照计划维护设备, 收集测量数据, 验证产品的合格。

基于模型的制造数据管理

数字化的核心是基于模型的技术, 其已经能够被较好地应用于设计环节, 但只有其应用走向制造环节, 才能将其价值最大化。洛克希德·马丁公司的 F35 “数字线” 为我们很好的诠释了“基于模型的制造”的价值。这也给了我们新的思考: 基于模型的技术是否能够带来一种全新的制造数据管理方式?

航空产品有着试制转批产的特点, 在新产品导入的不同阶段, 制造数据管理的重点都有什么不同? 制造数据如何能够在后期被有效使用? 这些问题也同样引人深思。

产品数据管理(Product Data Management, PDM) 是面向设计领域的数据库系统, 在业界已经拥有了广泛且成熟的应用, PDM 的应用模式为制造数据管理提供了较好的参考: PDM 面向的是虚拟产品, 而制造数据管理面向的是实作产品, 这种关系好比软件开发中的继承或实例化; PDM 的主要数据来自于计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD) 软件, 而制造数据管理的主要数据来自于 MES, 数据管理系统与主要数据来源系统的高度集成化成为必然的发展方向; 在全球化的背景下, PDM 使用基于模型的技术成功解决了协同设计的难题, 而制造数据管理也遇到了协同制造类似挑战(需要解决异构系统及异构数据问题), 基于模型的技术依然是解决异构问题的最佳利器。

在与 PDM 的对比分析后, 展望出制造数据管理的如下特点:

(1) 标准化的模型特征定义。

PDM 背后的 CAD 软件面临着异构系统和异构数据的问题, 从早期的产品模型数据交换标准(Standard for the Exchange of Product Model Data, STEP), 到近期的 MBD (Model Based Design) 标准, 都是为解决这类异构问题而产生的。同样, 制造数据管理背后的 MES 也存在异构系统和异构数据的问题。遗憾的是, 在制造领域还没有一部类似的标准, 这也严重制约了制造数据管理的发展。考虑到现实制造是对虚拟世界的实例化, 可以预见到制造数据管理方面的标准一定是对 STEP 和 MBD 标准继承和发展的产物。

(2) 支持逆向工程的特征解析。

当前的 MES 是基于关系数据库的大型信息系统, 中性文件是解决此类信息系统集成的主要思路之一, 符合标准格式的数模文件则是一种最佳的中性文件, 能够较好地解决异构 MES 之间的数据共享问题。

制造数据共享问题的最大难点是“制造数据是持续变化的”, 这要求能够准确、高效地共享增量数据, 因此对数模文件的特征解析提出了逆向工程的要求: 不仅能够解析数模文件的特征数据并存入特征数据库, 而且能够从特征数据库中逆向生成原来的数模, 与新数模比较增量部分的差异。这种逆向工程后的新老数模对比分析, 对于分析和改进工艺方法有着非常显著的意义。

(3) 多维度的二次造型功能。

针对不同的应用需求, 从特征数据库中抽取特定的特征数据, 构造出具有针对性的产品实作模型, 比如: 面向力学分析用的产品强度模型, 面向结构分析的产品几何模型等。在新产品导入的不同阶段, 使用不同的造型方式, 能够解决各阶段的关注问题, 从而提高新产品导入的效率。我

们甚至还可以将应用的范围继续放大, 比如: 将二次造型的功能应用于产品维修和维护阶段。

(4) 统一的产品数据管理平台。

虚拟产品和实作产品的数据管理不应该被割裂开来。对于航空复杂制造而言, 数字化的核心标志就是要做到“能去能返”: 不仅要虚拟产品模型传递到现实制造, 更要将实作产品模型返回给虚拟世界用于产品改进, 这种数字模型的往返动作是持续存在的, 涉及到了新产品导入的全过程。割裂的平台不利于数字模型的频繁往返, 因此, 从长远来看, 虚拟产品和实作产品的数据管理需要最终统一到一个平台上来。

(5) 制造数据结构由上游决定。

制造数据结构的设计是在设计阶段完成的, 这是因为制造数据的最大作用是用于产品改进, 这就如同回收卫星要提前设计好返航路线一样, 这又从另外一个层面上印证了统一产品数据管理平台的重要性。

结束语

在数字化设计和制造技术应用方面, 航空制造行业一直走在现代制造业的最前列, 但最终落地到产品现实制造环节的应用却并不多见, 这已经成为制约数字化整体应用水平提升的关键所在。MES 作为与产品制造过程最密切的软件, 在数字化技术走向现实制造的过程中, 必将遇到巨大的挑战, 也必将获得跨越式的发展机遇。

参考文献

- [1] Realizing the Digital Thread. Michael Kleemann[EB/OL]. 2011-4. <http://compufacturing.org/docs/Realizing%20the%20Digital%20Thread.pdf>.
- [2] Multiplying MES Value with PLM Integration. Michael Grieves[EB/OL]. 2007-3. https://www.qmc.com/Portals/0/pdf_resources/MES.pdf.

(责编 小城)