

智能制造的意义、技术与实现

Significance, Technology and Implementation of Intelligent Manufacturing

南京航空航天大学 朱剑英



朱剑英

教授、博士生导师。南京航空航天大学原校长,国际生产工程科学院(The International Academy of Production Engineering, CIRP)院士。国家973计划咨询专家、南京航空航天大学科学技术协会原主席、南航机械电子工程研究所所长、南航航天学院名誉院长、南航民航学院名誉院长。国务院学位委员会学科评议组成员,国家自然科学基金评审委员会及国家自然科学基金委员会学科评议组成员,中国生产工程学会名誉理事长,中国航空学会原副理事长。研究方向为机械电子工程、机械制造自动化、智能系统及机器人。

智能科学技术现在还不是中心科学技术,但智能化已是所有高新科学技术的发展方向,特别是制造业信息化的发展方向。所有现代工业生产和产品智能化以后都大大提高了生产效率和产品的质量与价值,因此认知科学技术的中心地位很可能会提前来到。

美国依靠什么控制全世界

是她的价值观?是她的军队?还是她的跨国公司?都不是!那么到底是靠什么呢?是靠高新科学技术!当前,主要是靠智能化高新科学技术,特别是智能化信息科学技术。

我们只要看看历届美国总统亲自主持的国家科技发展战略计划便可确信上述结论。

1 曼哈顿工程

1942年6月美国原子弹研制计划正式开始,总部开始设在纽约曼哈顿区,因此叫“曼哈顿计划”。该工程利用核裂变技术来研制原子弹。动员了10万多科技人员参加,历时

3年,耗资20亿美元,于1945年7月16日成功地进行了世界上第一次核爆炸,并迅速制造出了两颗原子弹,于1945年8月6日和9日分别投掷在日本的广岛和长崎,造成总计达30多万人的死伤,迫使日本法西斯投降,最终结束了二战。“曼哈顿计划”的成功,使美国人认识到,在美国总统主持下,靠高新科学技术可以确保美国的霸主地位。

2 阿波罗计划

即美国太空和登月计划。美国从1961年开始研究载人登月计划,1969年7月16日,巨大的“土星5号”火箭,载着“阿波罗11号”飞船,从美国肯尼迪角发射场点火升空,开始

了人类首次登月的太空征程。美国宇航员尼尔·阿姆斯特朗、埃德温·奥尔德林、迈克尔·科林斯驾驶着阿波罗 11 号宇宙飞船跨过 38 万公里的征程,承载着全人类的梦想踏上了月球表面。工程历时约 11 年,耗资 255 亿美元,先后完成 6 次登月飞行,把 12 人送上月球并安全返回地面。参加工程的有 2 万家企业、200 多所大学和 80 多个科研机构,总人数超过 30 万人。阿波罗计划带动了 20 世纪 60、70 年代美国和全世界计算机技术、通信技术、测控技术、火箭技术、激光技术、材料技术、医疗技术等高新技术的全面发展,把科技整体水平提高到了一个全新的高度。阿波罗计划为美国走向巨无霸地位奠定了更坚实的基础。

3 星球大战计划

即在太空部署反弹道导弹防御系统。名为“反弹道导弹”,实为部署“弹道导弹”。1985 年 1 月 4 日美国正式向全世界宣布:美国将在太空或地面部署以定向能(激光、粒子束、微波等)武器为主、包括攻击卫星、反弹道导弹的多层综合防御系统,拦截并摧毁袭击美国的战略导弹。这一计划就是“星球大战计划”。美国总共动员了 1 万多名科学家参与此计划,全部耗资为 1 万亿美元,到 20 世纪末要建成整个防御系统(可能没有建成)。此项计划推动美国高技术进步并为振兴美国经济打下坚实的基础。

4 信息高速公路计划

即互联网计划。20 世纪 90 年代初,克林顿政府将“信息高速公路”建设作为其施政纲领。1996 年 10 月 10 日提出将当前网络传输速度提高 100~1000 倍,使全球实现互联网,并将快速发展的信息技术及应用作为增强美国国力和竞争力的基本手段。首先用于军事,其次是民用。1999 年 1 月 24 日,美国副总统戈尔宣布,为了确保美国在信息技术领域

的全球领先地位,美国将以网络化为中心,大力发展信息技术、网络技术、超级计算机技术、多媒体技术和软件技术,大大加快全球网络化的进程,从而使互联网功能,扩展到跨地域、跨国界的范围。美国将以互联网技术控制全世界。

5 导弹防御系统

“911”事件后,美国提出了导弹防御计划。分析人士认为,美国进行导弹防御系统的研制,实际上是在谋求战略核武器的控制地位,加强自己在全局的军事优势,借此占领全球军事技术和科学技术的制高点。

纵观美国的上述计划,其战略目标不言自明,即是通过国家科技发展战略计划,依靠高新科学技术(当前特别是依靠智能化信息科学技术),实现其军事、科技、经济、社会的全面发展,并以无与伦比的军事优势(军事装备)控制全球。

本世纪中心科学技术转移的趋势

科学技术门类繁多,但在一个时期,只有一类科学技术是中心科学技术。这一类科学技术的发展不但成为经济社会发展的动力源,而且也带动了其他门类科学技术的发展。各行各业只有大力应用中心科学技术,并围绕中心科学技术开展自己的业务活动,才能得到发展。21 世纪中心科学技术转移趋势如图 1 所示。

(1)当前的中心科学技术是信息科学技术。目前是其发展的高峰期,预计其中心科学技术的地位至少还可持续 30 年。

(2)下一个中心科学技术将是生命科学技术。现在已非常注重其发展与应用,原因很简单,因为人最宝贵的就是自己的生命。预计 21 世

纪 40 年代开始会逐步转变为中心科学技术。

(3)再下一个中心科学技术将是认知科学技术。现在智能化趋势已显露,智能手机、智能机器、智能电器、智能交通、智能大厦……比比皆是。但是人类智能的秘密远未解开,在人类智能还不清楚的情况下,任何“智能机器”或“机器智能”都不是真正意义上的。预计认知科学技术在 21 世纪下半叶开始将会成为中心科学技术。

虽然智能科学技术现在还不是中心科学技术,但智能化已是所有高新科学技术的发展方向,特别是制造业信息化的发展方向。所有现代工业生产和产品智能化以后都将大大提高生产效率和产品的质量与价值,因此认知科学技术的中心地位很可能会提前来到。

预测科学发展趋势是一件很困难的工作,我们只能根据科学技术发展的历史和现状来推断其未来的发展,所以以上的预测只能供作参考。

制造技术是所有科学技术的实现技术^[1]

科学、技术和产业的关系是相互联系、相互促进的关系,是理论与实践的关系。这些关系中的纽带和桥梁就是制造。

邓小平指出:“科学技术是第一生产力”。但一切科学技术只有通过制造技术才能成为现实的生产力,没有制造技术,科学技术只能是潜在的生产力。制造技术是所有科学技术的实现技术(图 2)。

NBICM 技术将会引发一场新的产业革命

2001 年 12 月 3~4 日,美国商

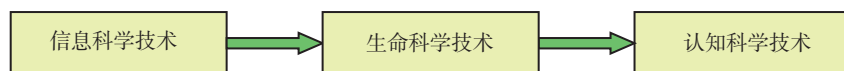


图1 21世纪中心科学技术转移的趋势

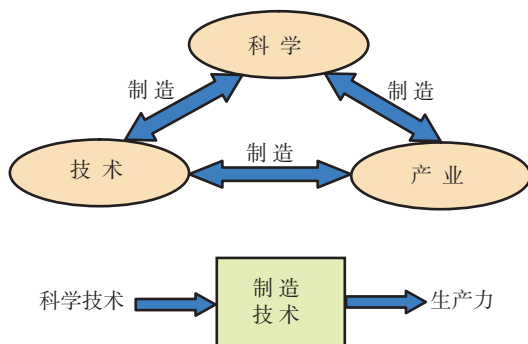


图2 制造技术是所有科学技术的实现技术

务部技术管理局、国家自然科学基金会 (NSF)、国家科学技术委员会纳米科学工程与技术分委会 (NSTC-NSEC) 在华盛顿联合发起了一次有科学家、政府官员等各界顶级人物参加的圆桌会议,会议就“汇聚四大技术,提升人类能力”这一议题进行了研讨,并首次提出了“NBIC 汇聚技术”的概念。

NBIC 是 Nano-Technology (纳米技术)、Bio-Technology (生物技术)、Information Technology (信息技术) 和 Cognitive Science (认知科学) 4 个英文字头的打头字母的联式。

由于制造技术是任何高新技术的实现技术,只有通过制造,科学技术才能从潜在的生产力变成现实的生产力。笔者认为,从可实现的意义上看,汇聚技术中应包含有先进制造技术。亦即,汇聚技术是指用先进制造技术将纳米技术(包括微/纳机电系统 MEMS/NEMS)、生物技术(包括生命科技、生物制药及基因工程)、信息技术(包括先进计算机、网络及通信)、认知科学(包括认知神经科学)汇聚、协同和融合起来,并最终制造出产品的综合交叉技术。这样,以上 5 种技术的简化英文联式就成为: Nano-Bio-Info-Cogn-Manuf, 缩写为 NBICM。

以上 5 个领域的技术,当前都在迅速发展,每一个领域都潜力巨大。而其中任何技术的两两融合、三种汇聚或者四者集成,都将产生难以估量

的效能。

NBICM 会聚技术,代表着研究与开发的新的前沿领域,其发展将显著改善人类生命质量,提升和扩展人的技能,人类将在纳米尺度的物质层次上重新认识和改造世界以及人类自身,甚至可以以原子或分子为起点来诊断和修复自身与世界的效能。

五大前沿技术的融合还将缔造全新的研究思路和全新的经济模式,将大大提高整个社会的创新能力和社会生产力水平,社会可大幅度地减少资源与能源的消耗,因而减少生态环境的破坏与污染。各类组织在快速可靠地沟通信息的基础上,使管理效率大大提高。国家将拥有威力强大的武器装备、免受攻击的数据网络和先进的指挥系统,使国家安全大大增强。

总而言之, NBICM 汇聚技术将会引发一场新的产业革命,为未来的发展提供巨大的机遇,不断创造新的产业、新的市场、新的生活、新的文化、新的进步,实现科技与经济的新突破,并将人类社会带入创新与繁荣的新时代。

智能制造系统的特征^[2-3]

具有下列特征之一的机械系统或制造系统,就可称为智能机器系统和智能制造系统:(1)多信息感知与融合;(2)知识表达、获取、存储和处理(包括识别、设计、计算、优化、推理与决策);(3)具有联想记忆功能 (Associate Memory);(4)具有自主学习、自适应、自组织、自维护功能;(5)具有自优化功能(系统越用越好用);(6)智能的分解与集成;(7)容错;(8)智能控制。

智能机器系统或智能制造系统的最大优点在于:这样的机器或系统是越用越好用的。这一优点是智

能机器或系统与传统的机器或系统本质上不同的地方。大家知道,传统的机器或系统其性能在使用中是不断退化的。

其次,智能机器或系统具有容错功能,即使环境异常或使用有错,智能机器或智能系统仍然能够正常工作。本来,容错是人类的高级智能,现在让机器或系统也具有了,这样的机器或系统难道还不是智能化的机器或系统吗?

智能制造的基本技术^[4-5]

1 数字制造技术是智能制造的基础技术

虽然计算机从发明到现在已过去了半个多世纪,但计算机工作的基本原理没有改变,其基本元件的工作逻辑还是二值逻辑,处理的信息是二值信息,计算的数据是二进制数据。

从计算机发明起,制造业一直致力于应用计算机来进行计算和信息处理。这种依赖于计算机二值数据和二值逻辑来工作的制造技术就称为数字制造技术(Digital Manufacturing Technology, DMT)。数字制造技术是制造业信息化的基础,它贯穿于制造业信息化的全过程,是制造企业的神经网络和核心技术。

数字制造能够帮助现代企业实现技术创新、提高产品研发和设计能力、优化产品制造过程,提高制造资源的利用率,缩短企业产品的设计和制造周期,降低产品研发和生产成本,提高产品质量,加快产品上市速度。所以数字制造技术从某种程度上看,它是现代工业技术水平的标志。

到目前为止,数字制造技术已发展得相当成熟。各种计算机辅助技术和系统,如 CAD(计算机辅助设计)/CAM(计算机辅助制造)/CAPP(计算机辅助工艺规划)/CAT(计算机辅助检测)/CAA(计算机辅助装配)/CAE(计算机辅助工程)/……名目

繁多、层出不穷。基于数字技术的现代制造系统模式像雨后春笋般出现,作者在文献 [4] 中曾列举了 34 种,近 10 年来在国际上又相继出现了许多先进制造模式,各种制造系统模式的总数可能超过了 100 多种,其中比较重要的制造系统模式有:(1) 计算机辅助设计 (CAD)/ 计算机辅助制造 (CAM)/ 计算机辅助工程 (CAE);(2) 成组技术 (Group Technology, GT);(3) 柔性制造系统 (Flexible Manufacturing System, FMS);(4) 准时生产制 (Just In Time, JIT);(5) 计算机辅助工艺规划 (CAPP);(6) 计算机集成制造系统 (CIMS);(7) 并行工程 (Concurrent Engineering, CE);(8) 精益生产 (Lean Production, LP);(9) 敏捷制造 (Agile Manufacturing, AM);(10) 虚拟现实制造 (Virtual Reality Manufacturing, VM);(11) 增广现实制造 (Augmented Reality Manufacturing, ARM);(12) 开放结构制造系统 (Open Architecture Manufacturing System, OAMS);(13) 可重构制造系统 (Reconfigurable Manufacturing System, RCMS);(14) 生物型制造 (Biological Manufacturing, BM) 等。

尽管数字制造模式林林总总,但与其有关的共性基础使能技术却有限,这些技术就是数字制造系统的核心技术,主要有:

- (1) 数字建模技术;
- (2) 曲线曲面拟合与生成技术;
- (3) 数据库技术;
- (4) 计算机网络技术;
- (5) CAD/CAM 技术;
- (6) 数字化协同设计制造技术;
- (7) 数字微分分析技术;
- (8) 数控插补技术;
- (9) 数控驱动技术;
- (10) 电子线路逻辑设计技术;
- (11) 数控编程技术;
- (12) 数字虚拟现实与模拟仿真技术等。

波音 777/787 飞机采用了全数字化设计制造的研制策略,所有设计、制造、装配过程均采用数字化技术(如图 3 所示),采用并行工程方法在不同地点和部门同时展开研制,并利用虚拟现实技术进行各种条件下的模拟试飞。如此,波音公司实现了机身和机翼一次对接成功和飞机一次上天成功,缩短研发周期 40%、减少返工量 50%。

数字化设计制造技术在我国飞机研制中也已推广。产品数字化定义技术、产品数据管理技术、数字样机技术、数字化工艺与虚拟装配技术等已得到了较深入的应用,并取得了显著的经济效益。我国的 ARJ21 飞机研制已全面采用了三维数字化设计技术和并行工程方法,最终实现

了大部段对接一次成功,飞机上天一次成功。

2 发展中的智能制造技术

2.1 智能制造系统建模的非经典数学方法

智能制造系统的基本工作原理是:基于数字制造技术,利用“知识处理”、“智能优化”和“智能数控加工”方法,使制造系统稳定、高效、高质地生产出理想的产品。它与传统制造系统的根本区别在于:(1) 传统制造系统处理的对象是数据,而智能制造系统处理的对象是知识;(2) 传统制造系统处理的方法是机械的,而智能制造系统处理的方法是智能的。(3) 传统制造系统建模的数学方法是经典数学(微积分)方法,智能制造系统建模的数学方法是非经典数学(智能数学)方法。但遗憾的是至今智能数学方法还没有系统完整地建立起来。

近年来在智能制造领域,研究、发展和应用的智能化建模的数学方法有:(1) 专家系统 (Expert System);(2) 模式识别 (Patter Recognition);(3) 图论 (Graph Theory);(4) 计算几何 (Computational Geometry);(5) 相似理论 (Similarity Theory);(6) 优化理论 (Optimization Theory);(7) 博弈论 (Game Theory);(8) 时间序列分析 (Time Series Analysis);(9) 小波分析 (Wavelet Analysis);(10) 图像处理 (Image Processing);(11) 计算机视觉 (Computer Vision);(12) 自然语言处理 (Natural Language Processing);(13) 知识表示 (Knowledge Representation);(14) 启发搜索 (Heuristic Search);(15) 基于约束的搜索 (Constraint Based Search);(16) 可信度理论 (Confidence Theory);(17) 定性推理 (Qualitative Reasoning);(18) 机器学习 (Machine Learning);(19) 机器证明 (Machine Proving);(20) 多值逻辑 (Multiple Logic);(21) 模糊逻辑

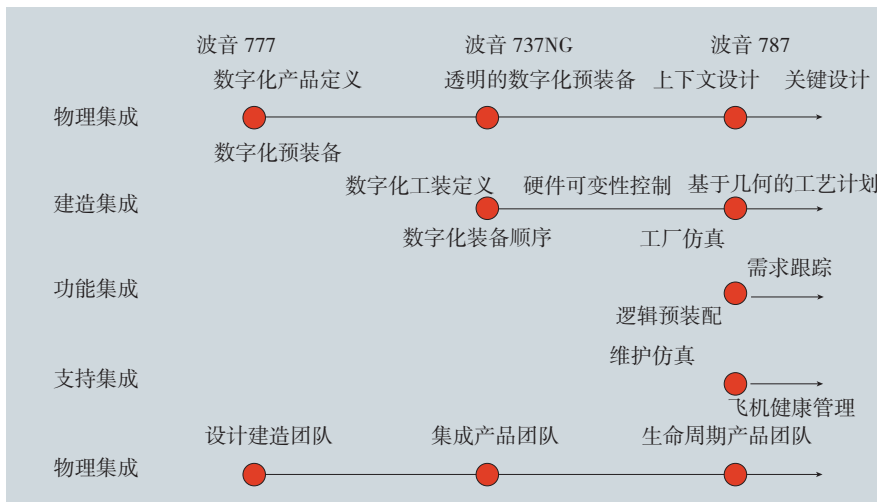


图3 波音787飞机的研制策略

(Fuzzy Logic);(22)神经网络(Neural Network);(23)Petri 网络(Petri Network);(24)免疫网络(Immune Network);(25)遗传算法(Genetic Algorithm);(26)灰色系统理论(Gray System Theory);(27)粗集理论(Coarse Set Theory);(28)蚁群算法(Ant Colony Algorithm);(29)人工智能(Artificial Intelligence);(30)人工生命(Artificial Life);(31)联想记忆(Associative Memory);(32)黑板结构(Blackboard Architecture);(33)多智能体系统(Multiple-agent System);(34)成组技术(Group Technology);(35)并行工程(Concurrent Engineering);(36)生物制造计算(Biological Manufacturing Computation);(37)Holonic 制造计算(Holonic Manufacturing Computation);(38)非经典控制论(Nonclassical Control Theory);(39)运筹学(Operations Research);(40)系统工程(System Engineering);(41)模拟退火(Simulated Annealing);(42)组合数学(Combinatorial Mathematics);(43)数据挖掘(Data Mining);(44)海量数据处理(Massive Data Processing);(45)网络流理论(Network Flow Theory);(46)网格计算(Grid Computing);(47)物联网(The Internet of Things);(48)云计算(Cloud Computing);(49)分形与分维(Fractal Theory);(50)混沌理论(Chaos Theory)等。

在实际应用中常将以上各方法组合起来形成新的算法,如模糊神经网络、模糊遗传算法、模拟退火优化和模糊模式识别等等。

2.2 智能制造技术

将上述数字制造技术与众多的智能化方法结合起来就形成形形色色的智能制造技术,如智能CAD/CAM技术(ICAD/ICAM),智能计算机辅助工艺规划技术(ICAPP),智能数控技术(INC),智能数据库技

术(IDB),智能计算机集成制造系统(ICIMS)等等。

企业管理原本就是基于人的经验和知识的,亦即在本质上就是智能化的。上述各种数字制造模式应包括设计、制造、管理3个层面,相应地便应有这3个层面的相关技术。但实际上,大部分制造模式主要是一种管理模式,在设计、制造层面,仅以相关的制造哲理来涵盖技术,很少研发具体的设计、制造技术。也有一些制造模式,实际上就是管理模式,如(1)全面质量管理(Total Quality Management, TQM),(2)材料需求计划(Material Requisite Planning, MRP-I),(3)制造资源计划(Manufacturing Resource Planning, MRP-II),(4)企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)等。在上述各种数字制造模式中,用智能化的方法加以改进,就形成各种智能制造系统模式,如智能制造资源计划(IMRP-II),智能企业资源计划(IERP)等等。

智能化方法与制造系统模式及技术的结合非常灵活,通过领域交叉、学科交叉、层次交叉、方法交叉,出现了许多新的智能制造技术和方法,如基于知识的数字产品/过程设计、基于知识的虚拟企业、灵境虚拟技术、基于智能体(Agent)的制造技术、远程网络化制造技术、智能网络技术、智能物联网技术、智能云计算技术、智能海量数据处理技术等等。

实现智能制造的几个认识问题^[7]

1 要重视传统产业和中小企业的数字化智能化

数字化智能化是我国制造业转变经济增长方式的核心任务,也是新的产业革命的核心技术。战略性新兴产业是建立在重大前沿科技突破基础上的产业,代表着未来科技和产业的发展新方向,体现了当今世界知

识经济发展的潮流,对经济社会具有全局带动和重大引领的作用。因此,数字化智能化应首先应用在战略性新兴产业中。

在目前和今后相当长的时期中,传统产业仍然是我国国内生产总值的主要贡献者。据统计,2010年末,我国战略性新兴产业增加值只占GDP的4%。国务院2012年7月发布的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》指出:到2015年,我国战略性新兴产业增加值占国内GDP的比重力争达到8%左右;到2020年,力争达到15%左右。因此,传统产业的转型升级及其制造模式和商业模式的更新换代,就是对我国经济社会发展的全局起决定性影响的因素。但非常遗憾的是,目前我国数字化智能化在传统产业中的推广应用,还没有受到应有的重视。我们应像对待战略性新兴产业一样,让数字化智能化在传统产业中遍地开花。

中小企业是推动国民经济发展,构造市场经济主体,促进社会稳定的基础力量。据统计,我国现在总计有超过4千万的注册中小企业,占全部注册企业总数的99%。中小企业工业总产值、销售收入、实现利税分别占总量的60%、57%和40%。大约提供了75%的城镇就业机会。近年来的出口总额中,有60%以上是中小企业提供的。

20世纪70年代以来,全球高新技术型的中小企业像雨后春笋般出现,它们在微型电脑、信息系统、半导体部件、电子印刷和新材料等方面取得了极大的成功。有许多中小企业仅在短短几年或十几年里,迅速成长为闻名于世的大公司如惠普、微软、雅虎、索尼和施乐等。但从总体来看,目前我国的中小企业在高新技术的利用方面,特别是在数字化智能化方面仍然处于弱势地位。

数字化智能化在中小企业中的推广应用,应当受到各方面的重视。



图4 波音787飞机的全球协同环境^[6]

其在管理层面推广应用的具体方案和技术路线是：用智能化技术将企业资源计划(ERP)与现代电子商务相结合。企业ERP的作用为对企业资金流、物流和信息流实施优化管理，而电子商务则主要借助现代宽带网络，优化企业的采购、销售与服务。用智能化技术将两者结合起来，就能使企业实现零库存，减少资金占用，加快市场响应，提高生产效益，优化售后服务。应当特别指出的是：上述结合应有我们中国自己的特点。

2 企业管理的数字化智能化更重要

企业管理的重要意义在于：在不改变企业的资源、人力、设备的情况下，通过管理模式和机制的改革创新，可以大幅度地提高企业的生产效率和产品的质量，大幅度地降低资源消耗和生产成本。从这个意义上来说，企业管理的数字化智能化比设计制造技术的数字化智能化更为重要。

目前，许多国际制造大公司为适应全球市场的需要，正在大力改革产品的制造模式及商业模式，以便实现远程定制、异地交互设计、就地协同

化生产。图4所示为波音787飞机的全球协同化制造环境。不言而喻，如此数以千计的供应商、制造商、客户和数以几十万计的专业人员和职工，围绕着飞机的设计、制造、销售、服务和运营展开相关的活动，没有快速、高效、精确、可靠的智能协同化管理系统是不可想象的。

企业家对制造业管理模式改革创新的重视，甚至影响到经济学家们对新的产业革命的理解。西方某些经济学家们认为：第一次产业革命是大机器生产，第二次产业革命是大批量生产，而第三次产业革命则是多品种、小批量、定制式智能协同生产。不难看出，这种生产模式，只有依靠数字化智能化技术才能实现。

3 数字化智能化的关键在人才

发展我国现代数字化智能化制造系统与技术，关键中的关键在人才。“有什么人，办什么事”：没有盖茨，就没有“微软”，没有王选，也难以有“北大方正”。现在最需要的是两类复合型人才：一类是掌握高科技诀窍、懂技术、懂经营、有创新能

力的复合型高级专业人才(工程师)，另一类是有战略眼光和创新勇气、懂得科技、经营、经济、管理的复合型高级管理人才(企业家)。这些人才只能在实践中产生。但是有组织地选择对象，重点培训，委以重任，在实践中锻炼，不断提高也是十分重要的。

参考文献

- [1] 朱剑英. 机械工程智能化的发展趋势. 航空制造技术, 2003(5):17-20.
- [2] 朱剑英. 智能系统非经典数学方法. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [3] 史忠植. 智能主体及其应用. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 朱剑英. 现代制造系统模式、建模方法及关键技术的新发展. 机械工程学报, 2000, 36(8):1-9.
- [5] Kusiak A. 智能制造系统. 杨静宇, 陆际联, 译. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [6] 罗琳胤. 通用飞机与数字化技术. 航空制造技术, 2012(7):60-63.
- [7] 周济. 制造业数字化智能化. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2395-2400.
- [8] 冯潼能, 王铮阳, 宋娅. MBD技术在协同设计制造中的应用. 航空制造技术, 2010(18):64-67.

(责编 亦非)