

面向智能制造的汽车产业升级路径研究

刘宗巍^{1,2} 张保磊^{1,2} 赵福全^{1,2}

(1. 清华大学汽车产业与技术战略研究院, 北京 100084; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 智能制造是全球公认的制造业发展方向, 中国明确提出建设制造强国, 其核心指向即在于实现智能制造的全面升级。本文对制造业的本质和智能制造的内涵进行了解析和阐释, 对传统制造业向智能制造体系升级的要点进行了梳理和分析, 在此基础上, 重点针对汽车产业, 全面论述了面向智能制造的升级路径, 并为企业提出了具体的行动策略建议。

关键词: 智能制造 汽车产业 数字化 网联化 智能化

中图分类号: U466 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20180276

1 引言

制造业是工业时代创造社会财富和价值的最主要行业之一。当前, 新一轮科技革命正在驱动全球制造业进入全面重构和快速发展期, 传统制造业面临深刻变革: 移动互联网、云计算技术使生产设备从孤立走向互联^[1-3]; 虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术使设计、装配过程进入虚实融合状态^[4, 5]; 数据的提取和应用使生产可以实现全程透明管理^[6, 7], 基于数据的资源优化调度方法为提升设备和人员效率提供了强大工具^[8], 同时大数据挖掘更为生产潜力释放和市场机遇拓展提供了全新可能^[9-10]; 此外, 3D打印技术为小批量、个性化定制

提供了更高的灵活性^[11]。而这一系列新技术的应用最终将集成于智能制造体系, 面向智能制造的转型升级将成为未来各国制造业较量的关键。

在此背景下, 各主要工业强国纷纷推出自己的制造业升级策略, 以期在未来的竞争中抢占先机。德国率先提出“工业4.0”概念, 并以其思想和架构指导德国企业的转型升级^[12, 13]。以美国通用电气公司(GE)为代表, 美国则提出了打造“工业互联网”的目标, 指明了美国应用最新信息技术发展制造业的方向。同期发布的还有日本的“机器人革命”和法国的“新工业法国”等国家战略。这些工业发达国家的制造业发展战略, 其共同点都是充分应用以信息技术为代表的最新科技成果升级传统制造业, 即发展智能制造^[14]。作为后发的制造大国, 中国也推出了建设制造强国的目标, 同样指向智能制造。当然, 这只是宏观层面的方向指引, 具体到不同领域制造业的升级策略, 仍需基于中国以及产业自身情况, 进行综合研究和积极探索。

汽车产业是国民经济的支柱产业, 具有产业

作者简介: 刘宗巍(1978—), 男, 副教授, 博士, 从事汽车企业技术管理研究, 侧重于研发方法论、产品开发流程与项目管理、以及技术战略评价与决策方法论等。

通讯作者: 赵福全(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事汽车产业发展、企业运营与管理、研发体系建设及技术发展路线等领域的战略研究。

规模大、价值链条长、关联领域多、拉动效应强、影响范围广的特点,因此是制造业转型升级的载体、龙头和抓手^[15]。同时,汽车产业的高度复杂性,决定了其面向智能制造的升级必然非常困难,这一点对于起步较晚、技术积累相对薄弱的中国汽车产业更为突出;但反过来讲,越是复杂的制造业实现智能化升级后产生的效益就越大。因此,汽车产业的智能制造升级策略,尤其需要进行系统深入的研究。

本文从制造业的本质、智能制造的内涵及其升级要点出发,重点分析了中国汽车产业面向智能制造的升级策略,详细梳理了汽车智能制造升级的关键要点和发展路径,以期为企业及产业提供参考和借鉴。

2 制造业的本质

制造业的本质可以概括为:以最小的代价获得最大的价值,并尽可能满足用户的个性化需求,这也是制造业的永恒追求所在。一方面,人们总希望以最低的成本、最快的速度(效率)和最高的质量(品质)来完成生产。历史上,实现这个目的的途径就是少品种、大批量的规模化制造,并最先由福特公司通过其汽车生产流水线实现,由此传统的手工作坊变成了真正意义上的现代工厂。但另一方面,消费者又有很多个性化的需求,每个人都希望产品是为自己量身打造的^[16]。所以,生产过程还需要尽可能大的灵活性。显然,个性化需求和大批量制造是一对天然的矛盾。未来制造业的发展方向就在于,如何将这两方面需求更有效地结合起来。

参考德国对制造业四个发展阶段的划分,即所谓工业 1.0 到 4.0,也体现了制造业越来越趋近其本质的过程。工业 1.0 实现了机械化;工业 2.0 实现了电气化;工业 3.0 实现了自动化;而工业 4.0 则致力于实现智能化,这将是实体物理世界与虚拟网络世界融合的时代,即基于生产要素的全面互联和智能调配,实现智能制造。

自“工业 4.0”的概念被提出以来,学术界和工

业界有各种解读。有观点认为,工业 4.0 即智能制造,是精益生产的替代版或升级版,也就是说精益生产将升级为智能制造,因此新时期中国企业致力于发展智能制造即可。实际上,这种理解似是而非,甚至可能会对产业造成误导。智能化只是制造过程的手段,而非目的。无论制造手段如何升级,制造业的本质从来没有改变,始终是以最低的成本、最快的速度、最高的质量来满足消费者的个性化需求。也就是要实现更高效、更精益求精的制造。从这个意义讲,智能化只不过是为实现更高水平的精益提供了全新可能:如果说工业 3.0 可以在工厂范围内实现精益,那么工业 4.0 则可以在整个制造体系中实现精益。因此,在本轮制造业转型升级的进程中,企业仍应秉承精益的思想来主导智能制造的发展,以实现更精益的生产,这才是智能化带给制造业的根本价值所在。

3 智能制造的内涵

3.1 智能制造的内涵、要点及未来图景

如前所述,智能制造的是大规模定制化的制造体系,这与制造业的本质正相符合。具体来说,这将是一个由数据驱动的互联、互动、全面智能化的生产制造体系。智能制造体系不仅包括智能工厂,也包括智能设计、智能生产、智能物流和智能服务等。这里所说的智能工厂和传统车间意义上的工厂截然不同,它是未来企业的数据中心、交互中心、判断中心、决策中心和控制中心,是面向整个产业生态的一个总体概念和实施平台。同时,智能工厂还必须与智能生产、智能物流等相互匹配和有效集成,从而把需求、设计、生产、物流和服务等各个环节彻底打通,充分实现互联、互动和智能,由此才能真正实现大规模定制化生产。显然,智能制造必然是未来制造业转型升级的发展方向。

智能制造的要点,可以概括为从万物互联到大数据,再到标准与端口,最后实现全面大集成。这种大集成既是指纵向的集成,即企业沿着产业链与上下游的其他企业联系在一起;也指横向集成,即企业打通自己内部的需求、设计、生产、物

流、服务等环节,跨越原有产业链,完成端到端的联接,创造全新的价值。也就是说,互联是基础,数据是核心,标准是规则,集成是终极形态,最终实现更加智能的制造业。

展望智能制造时代的未来图景,企业的核心竞争力将大不相同。从工厂的变化来看,当前工厂是集中式、计划式、强中心化和固定配置资源的,而未来工厂是分散式、需求式、去中心化和动态的配置资源方式^[17]。当前工厂只生产产品,通过产业链来实现价值,而未来工厂只生产产品是不够的,还必须产生数据,并且通过数据流来产生和驱动价值^[18]。当前工厂主要靠品质竞争,以过硬的产品质量乃至品质来支撑品牌,而未来工厂既要做好质量,更要实现定制化的产品以及个性化的服务,并由此形成品牌内涵。相比之下,前者只是一个基础条件,后者才是更核心的竞争力。

由此可知,数据尤其是工业大数据将成为未来的第一生产力。如图1所示,未来智能工厂汇聚的大数据,既包括产品、设备及环境,更将涵盖人本身。而掌握了大数据分析能力的企业,将获得智能制造的核心驱动力,赢得关键的竞争优势。

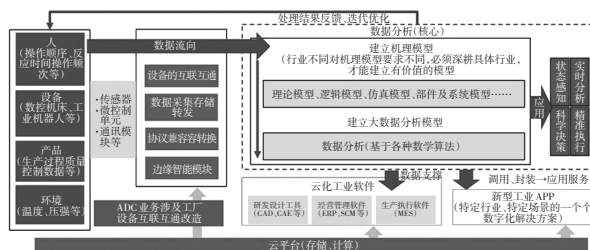


图1 工业大数据的价值流与关键要素

3.2 智能制造的战略价值

智能制造是一个综合体系,代表着一个全新的工业文明时代。对中国而言,制造业是立国之本,实体经济是整个经济体系的最根本支撑,应始终置于战略关注的首要位置。而智能制造代表着制造业的理想境界,是制造业未来的战略制高点,必须充分认识其战略价值。

智能制造将使大规模定制化生产真正成为可能,这是人类历史上前所未有的重大变革。通过充分互联、互动和智能,可以使原来分散甚至多余

的产能得到有效的集成和利用,从而化过剩产能为有效产能。所以,智能制造也对供给侧改革具有重要意义。智能制造允许制造方实时捕捉客户需求,实现企业与消费者直接互动,即所谓c2B模式^[19]。因此,智能制造也是企业商业模式创新的重要切入点和关键突破口。

从更宏观的视角来看,当前人类正在进入所谓VUCA时代(Volatility、Uncertainty、Complexity、Ambiguity),这个时代的本质就是不确定性,而智能制造最大限度地减少了中间环节,避免了人与人之间传递信息的慢速度、高成本和不准确,正是减少不确定性的最有效途径之一。

智能制造还是人类进入智能时代的基础。所谓智能时代,意味着人们在生活中使用的基本都是智能产品,而智能产品只能靠智能制造体系来打造。如果说智能产品是发展智能制造的需求和前提,那么,智能制造是提供智能产品的支撑和保障。两者互相影响、互为促进,共同构成智能时代。而且智能产品还将成为智能制造体系的重要组成部分。这其中包括两层含义,一是智能产品本身就是智能网联终端,可以收集数据并反馈给智能制造系统;二是智能制造本身集成了大量数据,可以确保产品更加智能,如利用数据预先解决没有发生但可能发生的产品问题。形象地讲,智能制造是父母,智能产品是子女,后者的基因是由前者决定的。

4 传统制造业向智能制造升级的要点

4.1 智能制造系统的构建

智能制造有三个特性,即整体性、充分性和全面性。整体性,是指智能制造代表着一个国家制造业的整体水平,不是个别工厂,也不是某家企业甚至某个产业达到了一定水平就能实现的。充分性,是指既要实现充分互联,也要实现充分智能,机器不但要有足够的人工智能(AI)赋能,能够像传统的工人一样工作,而且要彼此实时联通和互动。全面性,是指以往历次科技革命都是由技术进步驱动,而本轮革命将由技术进步和模式创新

共同驱动,而且需要在每家企业的每个环节甚至每个车间都全面实现。

图2展示了智能制造体系的构成及各部分的相互关系。如前所述,只有智能生产才能提供高质量的智能产品,而有了高质量的智能产品才能提供高质量的服务,三者之间又相互联通,从而实现了所谓设计、制造、服务的一体化,也就是c2B和B2B模式的有效组合,这就是未来智能工厂的核心。对此提供底层支撑的是工业物联网,即工业物联网加上人工智能。工业物联网可以把分散的云端制造资源有效地集成在一起,根据消费者的不同需求,统一、实时地优化调配资源,完成智能产品的打造^[20-22]。同时,未来实现智能制造的企业也一定是能源友好型和环境友好型的。因为只有充分互联和智能,才能获得最节能、最减排的生产解决方案。最终,在智能制造大体系的支撑下,人类将真正进入到智能社会或者说智能时代。

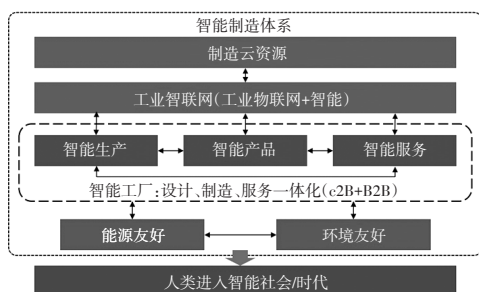


图2 智能制造体系的构成图

4.2 全产业链的智能化升级

对于智能制造体系的升级,企业必须有正确的认识,避免似是而非的理解误区。有观点认为智能制造就是生产升级,只需要进行制造环节的升级。其实智能制造涉及到不断扩展的产业链的各个环节,绝不仅仅是生产端的事情。另有观点认为智能制造就是去人化,工厂里多装一些机器人和其他自动化设备就是工业4.0了。其实,在智能制造体系下,人的作用没有下降反而上升,因为人不能解决的问题,智能机器也难以解决。所以,人一定要成为真正意义上的指挥者和创造者,要有能力同时有效地管理人和机器。还有观点认为智能制造就是大企业的事情,小企业根本不必考

虑。其实智能制造是一个全面的体系,最终可能由大企业提供工业物联网这样的平台,但中小企业同样不可或缺^[23]。因为消费者的个性化需求一定非常零散,高水平地满足消费者的不同需求就要靠中小企业,这也正是中国和德国相比最大的问题所在。中国不像德国那样拥有大量优质的中小企业,难以为工业物联网提供足够的优质云资源。当然,从后发赶超的角度,这也是巨大的商机所在。

4.3 智能化升级的进程判断

目前,智能制造已经成为全球公认的发展方向,世界各国都在积极探索,中国切勿轻忽这一历史机遇,必须积极探索和实践。不过同时必须清楚,智能制造不可能一蹴而就,其完全实现预计至少还需要20年时间。所以,具体到每家企业,也不可盲目跟风,进行“大跃进”式的升级。

总体上,智能制造的终极目标虽远,但当下的实践就可以获益。随着时间的推移,发展智能制造所带来的收益还将不断提升。当然,这不会是一个简单线性的过程,而是呈波浪状的发展。而面向智能制造的升级,每打通一个环节,智能制造水平就会又提升一个台阶;每加入一个产业,智能制造体系就将又完善一个板块。

对于智能制造的升级策略,同样有很多认识误区亟待澄清。有观点认为智能制造时代即将到来,必须抓紧采购德国和日本的工业自动化设备、机器人;也有观点认为真正的智能制造时代依然遥远,现在尚不需要过早准备。显然,这两种观点皆不可取。因为,通向智能制造的征途就是不断提升企业竞争力的过程。企业只要踏踏实实地实践智能制造,每前进一步,都可以在效率、成本、质量、个性化需求的满足、暴露和解决问题的能力等方面获得提升。更重要的是,企业如果不及早参与、努力践行,将来工业物联网一旦形成,企业将丧失参与其中的机会和主动权,在未来全球制造业格局中恐将陷于长久的被动。所以,智能制造的升级是一个循序渐进、不断积累的过程,中国企业从现在起就需要统筹规划、有序推动。

4.4 智能化升级的发展路径

基于中国汽车产业的现实基础,可将其智能制造的发展路径分解为三个阶段。第一阶段是数字化,第二阶段是数字化加网联化,第三阶段则是数字化、网联化加智能化。数字化是基础,它贯穿始终,使信息变成数据,并为网联化提供支撑^[24, 25]。网联化是在数字化基础上实现互联,使分散的资源得到集成应用,也让人可以更灵活地控制机器。智能化则是在数字化、网联化之后再应用人工智能(AI)。有AI赋能的机器之间不仅可以互联,而且还能互动,从而挖掘出网联化的最大价值。

对于后发的中国而言,智能制造的合理发展策略一定是三化并行推进、融合发展。发达国家在推行数字化时期,网联化和智能化条件尚非常欠缺。而中国企业今天推行数字化,已经具备了网联化和智能化能力。我们理应也必须针对网联化和智能化的需要开展数字化工作,同时积极推进网联化、智能化。

由此可知,中国制造业的智能制造升级过程中,数字化是当务之急。数字化即以数字来表征信息,通过数字化产生大数据。大数据中既包括一般大数据,也包括工业大数据,如产品、价值链、企业运营和外部资源数据等。在此基础上,才能实现工厂的数字化和供应链的数字化,进而实现产品的数字化,再进一步实现营销的数字化和服务的数字化。有了这些环节相互联通的大数据,就能通过训练形成并不断提升AI的能力,最终实现智能制造。从这个意义上讲,人工智能是通向智能制造理想彼岸的桥梁,而数字化则是最重要的桥头堡。

5 中国汽车产业的智能制造升级道路

5.1 智能汽车与汽车智能制造的关系

汽车产业面向智能制造的转型升级具有其自身特点。智能产品与智能制造的相辅相成的关系在汽车领域体现得尤为明显。汽车智能制造的升级,一定是智能汽车(产品)和智能制造(体系)相向而行、同步升级。一方面,未来汽车产品将是高

度复杂、可移动的智能网联终端,本身就是大数据的采集、中转和处理节点,同时也特别需要智能制造体系积累的大数据帮助其解决遇到或可能遇到的各种问题。另一方面,汽车智能制造体系也必须回应智能汽车产品的这些需求并调整出最佳的制造条件。

5.2 汽车智能制造与全产业链升级

由于汽车是高度复杂的民用工业产品,在新时期将与更多的新旧产业深度交融。所以,发展汽车智能制造并不只是整车企业的任务,甚至也不只是传统汽车零部件企业的任务,而是整个全新产业生态圈的共同使命。从这个意义上讲,传统的零部件配套概念应被供应链概念代替。因为很多新产业力量,包括智能硬件和软件的提供商,也已成为汽车产业的重要组成部分。显然,汽车“智造”不仅要在工厂内部,更要在工厂之间乃至全产业链条之间实现充分互联和协作。在此基础上,汽车产业的转型升级一定会引领和带动制造业整体的转型升级,如图3所示。总之,面向智能制造的实践,汽车产业是最复杂、最困难的应用载体。反之,正因为复杂和困难,所以汽车产业又是智能制造价值最高、影响最大的应用载体^[26]。

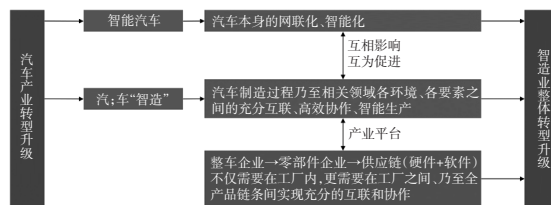


图3 汽车智能制造升级的特点与价值

5.3 汽车企业信息化系统的集成

具体到企业的实际升级策略,目前应全力推行数字化,也就是要在各个环节、各个层级都实现信息化,并努力把各信息子系统有效集成起来。图4显示了企业内部推行全面数字化的战略要点及逻辑图,其中PLM(产品全生命周期管理系统)、ERP(企业资源计划系统)、WMS/WCS(仓库管理/控制系统)和MES(生产过程执行系统)等子系统当前已有成熟解决方案。如果企业在各软件业务板块仍有缺口,应及时补充。当然拥有这些软件

子系统还远远不够,因为智能制造要求把各独立的软件系统进行无缝联接。例如,ERP系统负责在企业层面管理销售、采购、财务和物料等资源,显然应该和PLM系统紧密结合在一起。因为PLM系统管理整个产品体系,在智能制造即c2B+B2B模式下,必须与ERP系统彼此实时互动。PLM系统要打造什么样的产品,ERP就应该提供什么样的资源进行支持,反之亦然。其他信息系统的集成也与此类似。不过在当前阶段彻底打通各个子系统是非常困难的,因为各个子系统所处的逻辑层级不同、联接端口不同、数据标准也不同。反过来说,正因如此,在系统整合上能够做得更好的企业,将能占据未来智能制造的战略制高点。

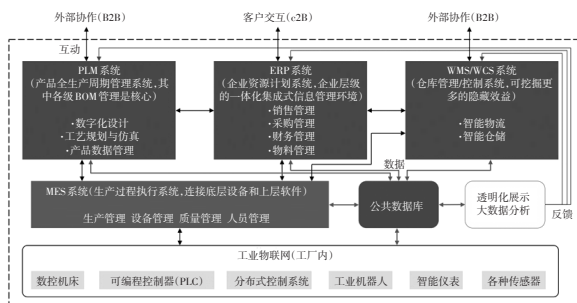


图4 企业推行全面数字化的战略要点及逻辑关系图

5.4 汽车智能制造与数字化建设

汽车企业开展数字化工作的核心任务是联接、数据和流程。在联接方面,要尽可能把有条件入网的设备、系统全面入网;对尚不具备连接条件的,则先进行设备改造,然后再连接入网。在数据方面,要形成采集、存储、呈现和分析的全面能力。实际上,要实现ERP、PLM、MES等众多信息子系统的集成,数据库是关键的联接纽带。所以,根据整体和各子系统的需要,开发高效集成的数据库是智能制造实践的重点工作之一。在流程方面,以链接和数据为基础,企业还要开展流程数字化改造的工作,基于大量电子信息系统的集成,对原有流程进行相应的取消、增加和修改,使其满足联接和数据能力的需要。具体可参见图5。

5.5 汽车智能制造与数据应用

在智能制造前景下,数据管理和分析将成为企业的核心能力,也是确保数字化工作真正产生

效益的关键。企业的的核心数据管理和分析系统必须形成一个相互关联的整体,实现各个环节、不同层级、多种数据的无缝互通。

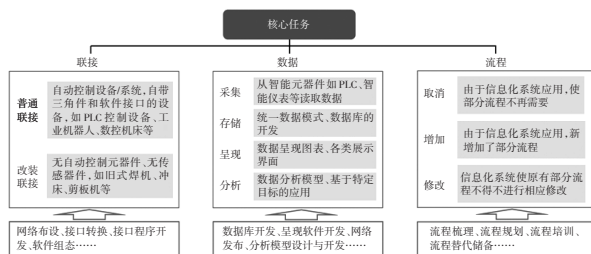


图5 企业推行数字化的核心任务

以产品数据管理为例,在软件应用上属于PLM系统的范畴,其核心工作是要做好各级不同BOM(物料清单)的管理。但很多企业只有少数几种BOM,又或者虽然BOM种类齐全,却彼此割裂,标准完全不统一。显然,这样的产品数据管理是存在巨大缺陷的。数字化建设的最后阶段,必须通过企业级的BOM将ERP和PLM统一起来。而一旦具备了良好的数据能力,企业就可以在数据应用方面大有作为,包括数据共享与交换、知识工程管理、质量追溯应用、虚拟研发与制造,也包括企业运营管理、上下游数据的潜在价值挖掘等。具体如图6所示。

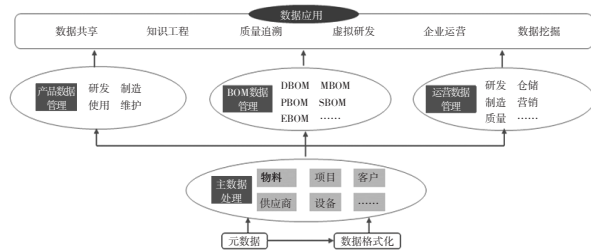


图6 面向智能制造的一体化数据管理及分析系统

展望智能制造时代,大数据将是未来制造业的黄金。基于工业大数据,可以实现广泛的价值扩展,不仅可以应用于原来的生产制造端,而且可以在服务和用户端创造巨大的价值。而目前数据仍然是中国多数企业的业务短板,尤其需要重点关注和加大投入。

5.6 汽车企业智能制造升级措施建议

第一,企业应重新定位自身的行业角色及产品特点,坚定开启转型征程。首先面向充分互联

的条件,思考自身价值所在。然后根据自身情况,确定合理的智能制造技术升级路线,包括互联方式、通讯规格、网络服务设施、网络安全等各个关键领域。总体来说,全面数字化是核心,掌控大数据是关键。

第二,企业应基于新模式、新能力和新需求,进行流程和体系再造。建立起完善的体系,并不意味着万事大吉。在产业全面重构的时代,企业要思考和尝试基于数据的全新商业模式,并据此建立适合数据的全新流程与体系。唯有如此,方能实现产品和服务的个性化、数字化,降低成本、提高效率。

第三,企业应全面提升数据管控能力,以数据生成价值。各种各样的生产设备(机器人)和辅助系统都要实现全面的数据信息管理,要使零部件及各种生产因素都成为信息载体,由此构建多元数据库并逐步实现联通,打通技术数据库、供应商数据库、成本数据库等。这些数据库有效联通后,企业就可以实时选择和修正全局最优的综合解决方案,其结果已经非常接近智能制造。

6 结论

智能制造是制造业未来发展的必然趋势,体现了制造业的本质追求,即以最小的代价创造最大的价值。因为智能制造是大规模、定制化的制造体系,可以在大批量生产的同时,满足用户多种多样的个性化需求。面向智能制造的升级是全局性和综合性的,绝不是某些环节、某些企业、甚至某个产业的升级,而是整个制造生态的全面升级。智能制造的终极目标虽远,但每一步实践都是下一步的基础,并将给企业带来实际的收益。为此企业既不能盲目跃进,又必须立即启动升级进程,并以数字化建设为基础,并行大力推进网联化和智能化建设。

对于智能制造而言,汽车产业具有特殊重要的战略价值。产品智能化和生产智能化相向而行、同步升级的特点,在汽车产业体现得尤为突出。众多智能硬件和软件提供商的加入,正在使传统汽车产

业链呈现出全新形态。作为最为复杂的民用工业品,汽车产业实现智能制造最为困难,也最有意义,将会引领和带动制造业整体的智能升级。当前,汽车企业面向智能制造转型升级的难点是既有各个信息化子系统的有效集成,能够做好系统整合的企业将会占据未来竞争的战略制高点。全面推行数字化建设应是企业的工作重点,其核心任务指向联接、数据和流程,企业应特别注意开发高效集成的数据库并成功拓展数据应用。

最后,实现智能制造是一个长期和渐进的过程,也必将伴随着诸多困难,对此企业要有充分的心理准备。同时,面向智能制造的升级,企业时不我待,必须抓紧做好顶层设计,进行前瞻的系统规划,把握战略机遇,积极有序行动。希望越来越多的中国汽车企业早日完成智能制造的转型升级,进而支撑汽车强国乃至制造强国的成功建成。

参考文献:

- [1] Omar Y M, Minoufekar M, Plapper P. Lessons from social network analysis to Industry 4.0[J]. Manufacturing Letters, 2017.
- [2] Rauch E, Unterhofer M, Dallasega P. Industry sector analysis for the application of additive manufacturing in smart and distributed manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2017.
- [3] Yan H, Hua Q, Wang Y, et al. Cloud robotics in Smart Manufacturing Environments: Challenges and countermeasures[J]. Computers & Electrical Engineering, 2017,63:56-65.
- [4] Angrish A, Starly B, Lee Y, et al. A flexible data schema and system architecture for the virtualization of manufacturing machines (VMM) [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017,45:236-247.
- [5] Kumar A. Methods and Materials for Smart Manufacturing: Additive Manufacturing, Internet of Things, Flexible Sensors and Soft Robotics[J]. Manufacturing Letters, 2017.
- [6] Zhou F, Lin X, Luo X, et al. Visually enhanced situation awareness for complex manufacturing facility monitoring in smart factories[J]. Journal of Visual Languages & Computing, 2018,44:58-69.

- [7] Colombo A W, Mendes J M, Leitão P, et al. Service-oriented SCADA and MES supporting Petri nets based orchestrated automation systems: IECON 2012 – Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012 [C].
- [8] Tao F, Qi Q, Liu A, et al. Data-driven smart manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018.
- [9] Wang J, Ma Y, Zhang L, et al. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018.
- [10] Edgar T F, Pistikopoulos E N. Smart manufacturing and energy systems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017.
- [11] Lee A Y, An J, Chua C K. Two-Way 4D Printing: A Review on the Reversibility of 3D-Printed Shape Memory Materials[J]. Engineering, 2017,3(5):663-674.
- [12] 赵福全.《中国制造 2025》促进汽车产业转型与升级[J]. 金属加工(冷加工), 2015(23):8-10.
- [13] 赵福全, 刘宗巍. 工业 4.0 浪潮下中国制造业转型策略研究[J]. 中国科技论坛, 2016(01):58-62.
- [14] 赵福全, 刘宗巍, 史天泽. 工业 4.0 与精益思想关系辨析及中国中小企业应对策略[J]. 科技管理研究, 2018 (3):1-5.
- [15] 赵福全, 苏瑞琦, 刘宗巍. 洞见汽车强国梦[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [16] 魏雪艳, 钱燕云. 移动互联网时代的工业 4.0——从 B2C 到 C2B[J]. 电子商务, 2015(08):18-19.
- [17] Chen T, Tsai H. Ubiquitous manufacturing: Current practices, challenges, and opportunities[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017,45:126-132.
- [18] Cheng Y, Chen K, Sun H, et al. Data and knowledge mining with big data towards smart production[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2017.
- [19] Zhao L, Feng M. Study on the Transformation and Upgrade of E-Commerce Application in Manufacturing Industry, 2017[C].
- [20] Grundstein S, Freitag M, Scholz-Reiter B. A new method for autonomous control of complex job shops – Integrating order release, sequencing and capacity control to meet due dates[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017,42:11-28.
- [21] Francalanza E, Borg J, Constantinescu C. A knowledge-based tool for designing cyber physical production systems[J]. Computers in Industry, 2017,84:39-58.
- [22] Wang S, Wan J, Zhang D, et al. Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination[J]. Computer Networks, 2016,101:158-168.
- [23] Wieland M, Hirmer P, Steimle F, et al. Towards a Rule-based Manufacturing Integration Assistant[J]. Procedia CIRP, 2016,57:213-218.
- [24] Bernstein W Z, Bala Subramaniyan A, Brodsky A, et al. Research directions for an open unit manufacturing process repository: A collaborative vision[J]. Manufacturing Letters, 2017.
- [25] Rossit D, Tohmé F. Scheduling research contributions to Smart manufacturing[J]. Manufacturing Letters, 2017.
- [26] 刘宗巍. 赵福全论汽车产业[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.