



Research
Intelligent Manufacturing—Perspective

集成化智能制造——前景与推动力

Yubao Chen

Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, University of Michigan–Dearborn, Dearborn, MI 48128, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 March 2017

Revised 24 May 2017

Accepted 13 June 2017

Available online 26 September 2017

关键词

集成化制造

智能制造

云计算

信息物理系统

物联网

工业互联网

预测分析

制造平台

摘要

随着市场竞争的日益激烈和技术的进步,越来越多的国家把先进制造技术摆在促进经济增长的首要位置。德国于2013年公布“工业4.0”战略。美国政府于2011年推出“先进制造业伙伴关系”(AMP)计划,又于2014年推出“国家制造业创新网络”(NNMI)计划。最近,美国正式推出“美国制造业”计划,该计划通过加强工业界、学术界和政府伙伴间的密切合作,进一步有效“利用现有资源……培育制造业创新能力并加速商业化进程”。2015年,中国政府正式发布《中国制造2025》这一面向制造业的十年规划和路线图。在所有的国家计划中,核心技术的发展都集中应用于先进制造系统领域。一种新的制造模式正在兴起,其具备两个独特的特征:集成化制造和智能制造。这一趋势符合工业革命的发展进程,而在此进程中人们不断追求更高效率的生产系统。为此,人们为新的制造模式划定了10项主要技术。本文介绍了集成化智能制造(i²M)系统的基本原理和需求,同时也介绍了来自不同领域的相关技术。值得一提的是,本文还讨论了物联网和服务(IoTS)、信息物理系统(CPS)和云计算等关键的技术推动力量。通用电气(GE)的Predix和美国参数技术公司(PTC)的ThingWorx等商用平台的应用所面临的挑战也得到了有效应对。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

众所周知,制造业是当今世界创造财富过程中最重要的资源,制造业是所有地区经济增长的关键因素。随着德国“工业4.0”概念的引进,近年来,世界各地不论发达国家或发展中国家都极其重视制造技术的发展。而制造技术的发展进步则需要政府在政府和私营部门的共同努力以及工业界和学术界的密切合作下得以实现,它引领着制造业向更加光明的未来大步前进。

本文研究了制造技术的发展趋势以及集成化制造和智能制造的独特特征,介绍了先进制造系统的技术推动力,并讨论了其未来潜在的发展方向以及所面临的挑战。

1.1. 第四次工业革命

纵观制造系统技术的历史发展进程,人们常常使用三个基本的标准去衡量其发展:质量、生产力和成本,这三个重要的衡量标准相互关联、密不可分。然而,相对于质量和成本两个标准,早期的工业革命更侧重于对生产力的衡量,换句话说,制造生产力和效率是制造技术进步的焦点,而质量和成本则成为制约因素。在这种情况下,如何提高制造系统的生产力和效率是工业革命中的关键问题。

图1显示出了工业革命的发展进程和特点。第一次工业革命时期,随着18世纪末瓦特蒸汽机技术的引进,生产方式由手工工艺转变为机械生产,由此生产力得到了极大的提高。第二次工业革命期间的20世纪初,亨

E-mail address: yubao@umich.edu

2095-8099/© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2017, 3(5): 588–595

引用本文: Yubao Chen. Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.009>

亨利·福特（Henry Ford）率先引进电力和传输线，使得高速批量生产成为标准的生产实践，这使得生产力水平显著提高并达到了一个全新的高度。第三次工业革命期间，由于信息技术（IT）和自动化系统相结合[比如弹性制造系统（FMS）和机器人技术的结合]，生产力和生产效率得到了进一步提高。而如今，迎着第四次工业革命的曙光，互联网和智能设备正被广泛地应用，以进一步提高制造系统的生产力和灵活性。

1.2. 不同地区的制造计划

2013年，德国揭开了“工业4.0”战略的帷幕，由此得到了世界各国对制造系统技术发展的广泛关注[1]。2011年，美国政府推出“先进制造业伙伴关系”（AMP）计划。此后，美国其他各种计划蜂拥而出，包括2013年发布的先进制造业伙伴关系指导委员会“2.0”、2014年的“国家制造业创新网络”（NNMI）计划，以及美国总统于2014年12月签署的《振兴美国制造业和创新法案2014》[2]。近来，美国政府正式推出“美国制造业”计划，旨在通过促进工业界、学术界和政府伙伴间的密切合作，进一步“利用现有资源……培育制造业创新能力并加速商业化进程”[3]。2015年，中国政府正式出台《中国制造2025》这一面向制造业发展的十年规划和路线图[4]。由日本牵头的最大的国际合作项目“智能制造系统”（IMS）计划，也在其IMS2020项目中规划了下一步的发展路线。

2. 一种新的模式：集成化智能制造

在诸如精益、虚拟以及拥有快速反应系统等当今现代制造系统技术的众多特征中，有两个突出的特征必定会延续到下一代制造业中，即集成化制造和智能制造。如图2所示，市场需求和工艺需求已经将技术的发展模

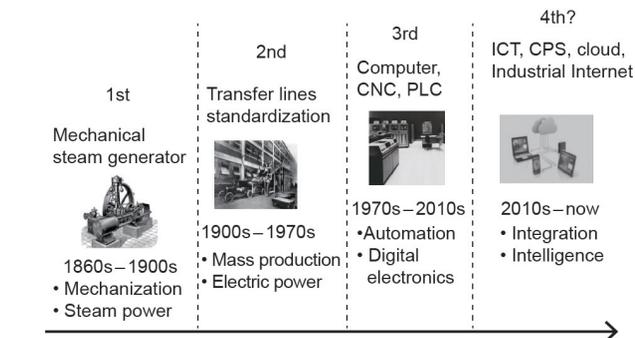


图1. 工业革命的发展进程和特点。CNC：计算机数值控制器；PLC：可编程逻辑控制器；ICT：信息和通信技术；CPS：信息物理系统。

式由信息密集型转变为知识密集型，其中，大数据分析 and 知识库在当前的生产环境中扮演着重要的角色。

集成化智能制造（i²M）技术的发展受市场需求和技术进步的驱动，有10项主要技术可以被划定为新的制造模式的关键元素。如图3所示，这些技术包括：三维（3D）打印或增材制造、机器人自动化、先进材料、虚拟现实或增强现实、工业互联网和信息物理系统（CPS）六大支持元素以及大数据分析、云计算、应用程序和移动设备四大基本元素。下文将会介绍这些元素是如何影响先进制造系统的，又或者更具体地说，它们是如何影响i²M的。

2.1. 集成化制造

制造系统概念的引入始于20世纪60年代数字计算能力的进步，在当时，制造业中就开始应用了一些集成化操作。在这种情况下，制造过程中的机器和设备不再是孤立的，相反，它们成为了同一个系统的组成部分，所有组件可以高效地协作以提高生产力。例如，计算机集成化制造系统（CIMS）就已被公司广泛地采用。

物联网（IoT）和CPS技术为将这种集成化提升到全新的高度，并使其更广泛、更深入、更开放而提供了绝好的机会。因此，制造系统控制装置不再局限于处理如材料和机器等实物和设备，如今它们也能够实时地对大量的数据、信息和知识进行加工处理。这一处理过程是通过制造中三个层次的集成实现的，即纵向集成、横向集成和端到端集成[1]。

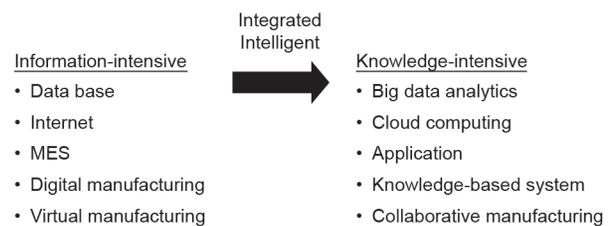


图2. 制造系统的新趋势。MES：制造执行系统。

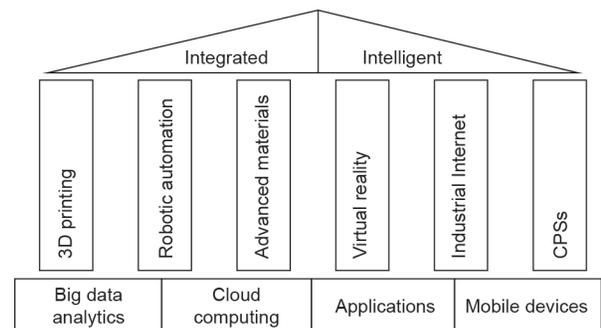


图3. i²M的十大主要技术。

2.1.1. 纵向集成

纵向集成解决了组织内产品生命周期中所包含的所有元素之间的无缝连接问题，使得营销、设计、工程、生产和销售活动紧密结合在一起。因此，人们才能更加充分地利用制造执行系统（MES）和计算机辅助工艺规划（CAPP）等技术，以支持组织内的信息与知识共享。通过这种方式，人们可以更加有效地使用公司内部资源（包括但不限于信息、数据、资金和人力资源）。

2.1.2. 横向集成

公司与供应商和合作伙伴密切合作时，横向集成就会产生。现代产业已经采用供应链管理技术，在许多行业中建立了横向价值网络，然而，在效率、知识产权保护、共同标准的制定及知识共享等方面依然存在着挑战。随着高级知识库的建立和工业互联网计划的实施，这些障碍很可能会被消除。为了进一步提高横向集成的效力和质量，我们需要建立一个具有可行性协议和标准的通用知识网络平台。

2.1.3. 端到端集成

端到端集成可能是新时代制造业中最活跃的领域。首先，在工厂车间，提供机器对机器集成，使机器真正成为制造系统的一部分。其次，将客户集成到制造系统中，从而使工程师能够轻松及时地获得客户的反馈。最后，产品到服务的集成使制造商能够直接监控产品的使用状况。通过这种方式，价值链就会延伸到产品的客户服务上。

2.2. 智能制造

由于现代制造系统越来越复杂，尤其是在所有单元/元素被整合到一个共同的系统里之后，过程决策就变得更为艰难，因此就急需利用大量的制造数据以及计算智能的力量来强化制造中的决策过程。

智能能力是指与人体中相似的三种功能：感知、决策和行动。随着当今传感和控制技术的迅速发展，制造系统中已不乏传感器或执行器。目前所面临的挑战是如何处理信息和知识，以便使计算机能够在几乎没有人为干预的情况下，在正确的时间和地点自动做出正确的决策。大数据分析、机器学习（ML）和云计算等新技术的涌现，为增强制造业智能能力提供了巨大的发展空间。

2.2.1. 大数据分析

大数据分析对当今物联网大环境的发展越来越重

要。它是指通过揭示隐藏着的集群和关联性来从大数据中攫取信息和知识，从而使人类可以识别系统模式并做出更好的决策的过程。如今，在整个制造过程中，从机器、生产、物流和用户反馈中都可以获得大量的数据，而这些数据在传统的制造环境中通常是不可用或是根本不存在的，所以常规分析人员是无法处理如此庞大的数据的。在大数据分析过程中，人们也在不断开发新的程序和方案，比如关联性和集群、统计建模以及认知机器学习。利用大数据分析，在制造过程中人们只使用百万兆字节以上的数据集中的相关核心信息成为可能，并且还能够有效地做出正确的决策。通过这种方式，制造系统的控制将从被动决策转变为主动决策。由于其在制造应用上显示出了巨大的潜力，大数据分析不断发展，并且对于先进制造系统变得愈发重要。

2.2.2. 机器学习

学习能力是人类智能的核心特征之一。ML是指计算机通过基于数据的计算算法来理解和学习物理系统内部的能力。ML方法的例子包括：数据挖掘、统计模式识别算法和人工神经网络（ANN）。对于制造系统来说，ML算法的运用就有可能实现机器或其他设备对基准线和工作条件的自动识别，以及知识库在整个制造过程中的创建和升级。

2.2.3. 云计算

云计算所提供的基于互联网的计算服务可以实现软件共享，这样用户就无需在本地安装所需的软件，这种做法通常被称为“软件即服务”（SaaS）。但是，就制造系统植入而言，通过互联网共享软件已经无法满足需求，而且也有必要以这样的方式共享信息和知识，从而创建一个软件和知识共享的市场，这种做法被称为“平台即服务”（PaaS）。科学家们正在努力开发和实施用于制造应用的PaaS。

可以预见，在不久的将来，随着智能制造技术的进步，人类将通过产品生命周期所有领域中设备齐全的传感器和转换器实时收集数据和信息，然后通过云计算进行加工处理，并可以在几乎不用人为干预的情况下做出持续、自主的准确决策。正如参考文献[5]中所指出的，“如果把云计算、物联网、服务导向型技术和高性能计算等新兴技术结合起来”，我们就可以构建一个新的制造平台，即云制造。随着集成和智能成为新制造模式的两大标志，一种高效的制造生态环境日益形成。

3. 技术推动力

3.1. 物联网

“物联网”一词是由英国企业家凯文·阿什顿（Kevin Ashton）于1999首次提出，当时他正在开发一个射频识别（RFID）连接对象的全球网络。如今，随着互联网技术的快速发展，许多实物都可以通过互联网与嵌入式电子、软件、传感器及网络设备连接起来。而这已经进一步扩展到诸如服务或社会元素等非实物系统。因此，IoT也被称为物联网和服务（IoTS）。

对于i²M系统来说，物联网为其提供了一个独一无二且必要的基础，它能够将制造系统的所有元素连接在一起。这样不仅可以提高数据采集的效率，而且也能极大地提升数据的质量。物联网还支持网络控制和制造设备、资产、信息流的管理。

知名IT企业正不断为智能制造系统的实施提供网络硬件和软件支持。比如，思科（Cisco）公司就提供了网络连接、雾计算、安全性、数据分析和自动化等产品和服务[6]。

3.2. 信息物理系统

CPS是一种能够使计算元素和控制物理实体两者协作的系统。它是指具有集成计算和物理能力，并且可以通过多种新的模式与人类进行交流的系统[7]。航空航天、汽车、能源、医疗保健和制造业等行业已经开发并使用了CPS设备。新一代系统通常被认为是嵌入式系统，事实上，CPS是物联网实现的中坚力量。

嵌入式设备具有特殊感应和计算能力，它们是保证工业互联网成功实施的关键要素。有了这些设备就可以在本地处理数据，这样就能直接通过网络传送有用的信息或是提取数据。

目前，嵌入式设备的计算能力有限，因此科学家在不断为各种应用程序开发新型的智能嵌入式设备。在制造过程中，诸如看门狗Agent™等智能嵌入式设备不仅能够收集数据还能够处理数据，进而可以在本地快速地做出决策。越来越多的此类智能嵌入式设备将被应用于制造系统的智能决策中。

一个完全成熟的CPS通常被设计为具有物理输入和输出交互元素网络，而不是独立设备。人们已经关注到了它的连接性和计算智能的智能机制。随着云计算和无线传感技术的发展，移动CPS应运而生，而安全性和可

靠性则成为移动CPS的两大关键要求和挑战。远程和全球移动CPS时代尚未到来。

3.3. 工业互联网

如前文所述，物联网为云计算提供了基础，使SaaS和PaaS能够得以实现。然而，制造应用程序则需要一个强化产业的IoT以保障产业所需的可靠性和安全性。为此，由通用电气（GE）发起的产业联盟正在开发工业互联网技术，致力于创建一个特殊的工业应用物联网系统，即工业物联网（IIoT）。

IIoT是指为了实现工业的生产和运营，通过网络传感器和软件对复杂的物理机器和设备、人类以及资源进行集成和连接。正如GE所说：“利用传感器的快速爆炸、超低成本连接、数据存储以及强大分析功能（通常称为IIoT……），这些增值服务可以为客户带来业务成果并为公司带来增量收益。”[8] “IIoT”这个词最早是在21世纪初由弗罗斯特和苏利文提出。当时，工业互联网作为实现IIoT的基本工具，被用作数字企业转型的集体工具集。今天，这个术语经常与其他术语一起使用，比如IoT、工业4.0、大数据、ML和机器对机器通信。这是美国的一个核心战略，并为下一次工业革命提供关键的能力：IT连接的机器、人力和资源。

除了常规的诸如办公自动化等互联网应用程序外，工业互联网还需要具备强化的工厂车间环境以及赖以生存的可靠性等条件。例如，工厂车间设备必须能承受高温、振动、电气干扰、潮湿以及频繁的中断等一系列挑战；此外，工业互联网必须与各种实体设备兼容，如机器、机器人、传送带、检测设备和工装设备。由于大多数工厂车间的技术和设备得到了发展，IIoT必须与现代和传统的设备与制度都相适应，同时需要具备高水平的安全性能，以防止受到来自工厂内外的侵害。

为了应对这些挑战，我们已经开发了强化工业的工业网络，这些工业网络通常使用网络交换机将大型系统按地址、协议或应用程序划分为不同的逻辑子网络。当需要连接到办公自动化网络时，我们也会使用系统的逻辑控制和防火墙系统来实现企业的纵向和横向一体化目标。

为了促进IIoT实施以开发有效的工业应用程序，GE最近宣布了其软件解决方案：Predix Cloud[9]。Predix软件系统的核心功能是从大型制造或工业操作中采集数据并对其进行分析。

4. 工业实践和实施

4.1. 制造业中的新兴技术趋势

在持续推动实现“工业4.0”能力的过程中，许多制造商已经认识到，采用新技术趋势对他们的业务是很有必要的。去年年底，*Manufacturing News*预测了i²M系统的五大新兴技术趋势，它们分别是：网络安全、先进材料、3D打印、预测分析和协作机器人[10]。

4.1.1. 网络安全

随着网络技术的进步，尤其是移动网络系统的发展，个人隐私和公司安全仍然是一个重要的课题，因为这不但关乎信息保护，更重要的是还关乎先进制造系统的安全。

越来越多的企业开发和运用内部网络安全系统。美国政府采取了必要的技术和法律保护以加强产业网络安全。美国国家标准与技术研究院已经建立了一个网络安全框架，以便分享最佳实践经验和技术，使各行业能够有效地解决安全问题。在准备实施“工业4.0”计划时，保障网络安全仍然是各企业的首要任务。

4.1.2. 先进材料

现代产品和制造非常需要新型材料和优良材料。碳纤维以其优良的材料性能和较轻的重量迅速被工业界采用，碳纳米管制造近年来取得了令人瞩目的成就。

高科技领域同样也有着巨大的需求，比如电池和3D打印对新材料的需求。新材料的理想特性包括能量储存功能、较轻的重量、信息处理能力、智能记忆等。

4.1.3. 3D 打印

近年来，新型增材制造系统和材料得到了极大的改良，并且未来还将继续发展。增材制造在生产效率以及产品设计和开发的过程中具有巨大的潜力。随着新材料的应用以及3D打印机精度的提高，越来越多的行业将把这项技术应用于生产中。据预测，今年可能是制造商开始大规模采用3D打印的一年。事实上，一些行业，比如航空航天和医疗行业，已经开始使用3D打印技术生产一些核心部件。

4.1.4. 预测分析

预测分析可能是大数据技术在当今工业应用领域最成功和最有前途的应用。制造业公司已经意识到，在他

们的生产系统中，有大量的可用数据，要么被浪费，要么没有得到充分利用。为了弥补这一缺陷，预测分析可能是最有效的解决方案。许多公司竞相开发学习和分析算法，以进行有效和实用的分析，从而可以对机器或设备状况进行未来预测。通过这种方式，可以更有效地进行维护并且可以显著缩短设备的停机时间。

4.1.5. 协作机器人

协作机器人为制造系统提供了独特的优势，那就是它们能够与操作人员一起合作。这种能力使机器人系统能够灵活、智能地处理复杂且具有挑战性的物料搬运和制造情况。机器人不再被视为独立于人类交互作用的独立机器，越来越多的机器人将被用于制造业，以提高自动化水平并降低成本。为此，人类正在集中力量开发并运用协作机器人技术。

4.2. 智能制造平台

为了实施智能制造技术，各行业都在准备开发基于IIoT的云计算平台。据估计，在未来的15年内，用于IIoT的投资将达到60万亿美元。到2020年，预计有超过500亿台设备连接到互联网。为了发挥IIoT在工业应用程序中的优势，许多软件平台被人类开发和部署，如前文提到的GE的Predix平台。

所有这些平台的一个显著特点就是拥有建立“数字双胞胎”的能力。“数字双胞胎”是物理设备或系统的一种计算机模型，它展现了所有的功能特征以及与工作元素的链接。“数字双胞胎”不仅仅是一个用于模拟研究的虚拟计算机系统，它还提供了与物理系统的确切功能相联系的操作状态、见解、结果和知识。“数字双胞胎”能够通过实时传感设备与其所代表的物理系统进行通信，从而与实时状态、工作状况、位置和环境现状保持同步。“数字双胞胎”能够预测未来的情况。

4.2.1. 通用电气：Predix

通用电气（GE）的Predix是一个全面、有目的性的工业平台，它通过工业互联网实施智能系统，以便对物理设备或系统进行监测或控制[9]。如图4[9]所示，Predix中的关键元素包括Predix边缘（Predix Edge）、Predix云（Predix Cloud）和Predix机器（Predix Machines）。Predix中应用了一个“边缘到云”的部署模型，它与其他公共云计算模型不同，它的这种架构适用于多种工业应用程序。

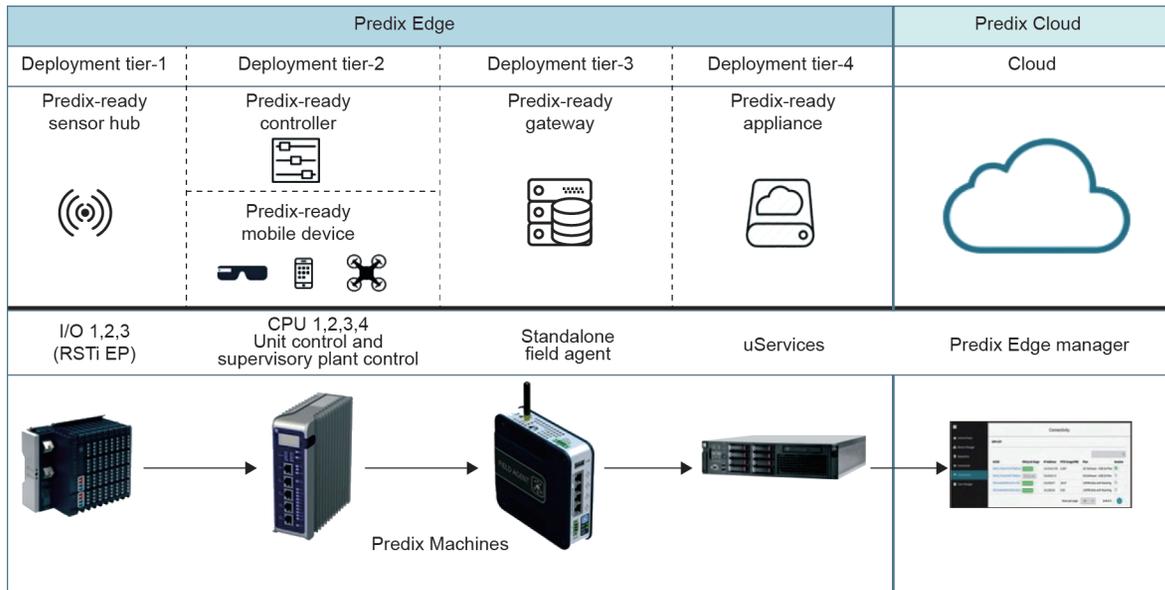


图4. Predix平台[9]。CPU：中央处理器。

GE根据自身的实践经验研发了Predix。早年间，GE需要建立“数字双胞胎”来监测和控制涡轮机等机器，为此，GE开发了“双胞胎”和边缘，并通过工业互联网成功地将它们应用到了生产中。随后，GE向公众开放了这个平台，以便原始设备制造商（OEM）和第三方开发商为各种系统构建双虚拟模型。

Cloud Foundry是Predix的核心，它提供了一个开源的PaaS，并且具有独特的微服务架构，因此支持许多现有的语言和编程工具。利用其现代化的开发和运营（DevOps）环境，第三方开发人员尤其是应用程序开发人员，能够快速构建、测试和实施适用于各种工业应用程序的可伸缩系统。目前有50多万“双胞胎”和应用程序在利用这个平台。

在Predix中，人们以前所未有的规模把工业数据从制造过程中收集而来，这对公共云来说几乎是不可能处理的。此外，Predix还为特定行业提供智能分析服务，用于帮助公司处理、分析并根据制造现状做出决策。有了这样的能力，公司就可以做出实时决策，从而大大改善企业的业务运作状况。

Predix的典型应用程序包括：

- 调度和物流
- 连接产品
- 智能环境
- 场力管理
- 工业分析
- 资产绩效
- 应用程序性能管理（APM）

• 操作优化

需要指出的是，Predix平台的开发和部署还有很长的路要走。目前它仍处于初级阶段，其应用程序主要集中于监测和诊断决策的过程中，其分析能力仍然非常有限，以及其人工智能（AI）和深度学习算法仍需要进一步强化。

最近，GE宣布与中国电信合作，为中国客户提供Predix服务。这次合作必将推动世界最大制造业基地——中国的智能制造技术的发展。

4.2.2. 西门子：产品生命周期管理和智能工厂

智能工厂是德国“工业4.0”战略的主导理念。智能工厂技术包含两个层次。第一层次主要关注车间，所有的生产设备将通过有线或无线通信系统完全集成，并且不再隔离单独的机器或设备；为全自动MES配备各种类型的传感器、换能器和设备控制器；可以在不同位置实时采集设备状态、工作条件、环境参数（即温度或湿度）等数据和信息。这些信息将会很容易被提供给人类或系统控制，用于监控、预测和制造系统的控制。

因此，车间将变得更加智能和灵活，甚至人类还推动端到端以及机器对机器通信成为现实。为此，许多传感和信号处理技术，包括智能图像处理 and 识别技术，也都在车间进行开发和实施。将来，每台机器甚至每个产品都可以携带一个芯片，而每个芯片里都储存了所有相关信息以进行有效的通信。当一个产品到达某个位置时，产品的芯片将会传输过程信息到一台机器上，这样就可以进行适当的处理准备和执行，而无需人工干预，

这是可以实现的。

在智能工厂技术的第二层次，一个智能工厂为生产系统提供了完全数字化的工厂模型（即“数字双胞胎”）。“数字双胞胎”已经完全连接到包括传感器、控制器、可编程逻辑控制器（PLC）、计算机数字控制器（CNC）、监督控制与数据采集（SCADA）系统以及其他通信设备在内的企业产品生命周期管理（PLM）系统。系统的工厂车间条件会立即反应到它的“数字双胞胎”中，以便其对当前和未来事件进行有效的监控、预测和控制。

为了促进“数字双胞胎”之间的通信，西门子推出了Intosite软件平台。这是一个基于云的应用程序，用于在3D环境中共享数字化制造和生产信息[11]。它提供了不同位置的虚拟工厂的智能地图导航，并且不同工厂的工程师和管理人员通过共享相同的制造数据来实现协作。

通过这个软件智能工厂平台，人类可以实施基于云的制造运营管理（MOM）系统，如果需要做出关于这个过程的决策，那么利用该系统可以实时更新，也很容易得到工厂车间的数据和信息。工厂车间的所有变化也可以使用西门子的PLM软件Teamcenter自动上传到其他IT系统，如PLM存储库。这样一来，制造系统的效率和生产力就会显著提高。西门子的Fusion系统试图去支持IIoT平台，而这一系统也可用于制造的实施。

然而，西门子的基于智能工厂的技术的发展需要软件平台与工厂车间系统的广泛集成。该系统还应该与预测分析更紧密地集成，以进一步强化其智能制造决策过程。

4.2.3. 美国参数技术公司：ThingWorx

2014年，美国参数技术公司（PTC）收购了ThingWorx，并将其与本公司基于互联网的PLM项目融合在一起，将其进一步发展成为主要的IIoT平台。如今，ThingWorx在智能制造技术的实施中发挥着重要作用。它是一个发展前景良好的平台，其主要包括ThingWorx工作室（ThingWorx Studio）、ThingWorx分析（ThingWorx Analytics）、ThingWorx实用工具（ThingWorx Utilities）和ThingWorx工业连通性（ThingWorx Industrial Connectivity）等。如图5[12]所示，所有这些元素与中心部分ThingWorx基础（ThingWorx Foundation）共同运作。

ThingWorx基础通过端到端的安全技术将所有ThingWorx组件连接起来。它使用户能够在整个IoT系统

中连接、创建和部署特定行业的应用程序。ThingWorx中的组件具备三个基本功能，即核心、连接服务和边缘。

ThingWorx平台是基于底层和模型驱动的方法开发出来的。许多图像拖放工具已经开发出来，可供终端用户构建特定的应用程序，这使得它的应用程序相对简单方便。由于它是业界最早的十大工业应用平台之一，因此有许多用户满意的工具和算法可用于分析和数据显示。一些工具也为其他Predix这样的平台所使用。

4.3. 智能制造的预测分析

在智能制造技术的发展过程中，有效的预测分析显然是使这种技术得以用于实践的最重要元素。所有的PaaS系统都主要致力于建立关于决策的有效分析。近年来，美国国际商用机器公司（IBM）、微软、英特尔、谷歌等众多领先的计算机软件和硬件提供商都在加紧研发分析技术。分析技术的进步将进一步推动智能制造的实施。

4.3.1. IBM：预测分析

IBM在为工业应用程序提供软件工具方面具有悠久的历史。2010年，IBM推出了一个特定的预测分析服务平台：企业预测分析统计产品与服务解决方案（SPSS Predictive Analytics Enterprise）。该平台旨在为包括制造业、医疗保健和行政管理在内的各种工业应用程序提供深入的描述性和预测性分析。作为一个单一的解决方案，它可以处理所有类型的数据，无论是结构性的还是非结构性的，或者是数字或图形格式。此外，它还包括一些用于统计数据分析和数据挖掘和ML功能的处理工具。看制造商如何从另一个IBM构建的强大的知识引擎即IBM沃森分析（IBM Watson Analytics）中受益是一件非常有趣的事情。

IBM声称企业预测分析统计产品与服务解决方案可

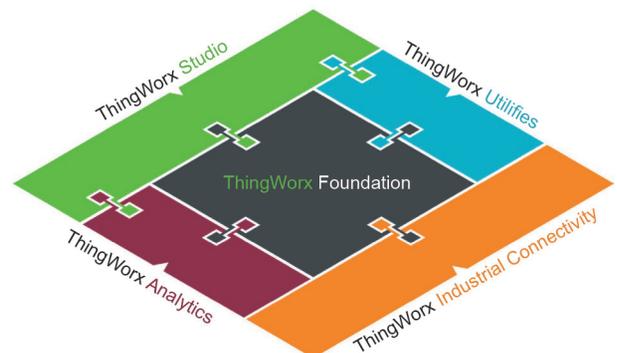


图5. ThingWorx平台[12]。

以提供以下功能和好处[13]:

- 描述和推理统计分析;
- 用于数字、文本和图形数据格式的预测建模和高级算法;
- 数据和信息的交互式视觉和简单语言表达的能力;
- 安全、自动化的数据收集和管理框架;
- 实时对公司资产的预测性控制进行评分。

4.3.2. 微软 Azure: 机器学习和预测分析

微软通过其Azure框架提供了一系列集成云服务[14]。这个框架包括了一些ML和预测分析工具。如图6所示[14], 用户可以通过在ML工作室中选择一组读取使用算法来创建一个ML应用程序, 然后通过互联网连接的处理器[如个人计算机(PC)]部署应用程序, 以便为特定应用程序建立预测模型。

Azure框架中其他可用于数据处理和智能决策的元素包括HD insight和R 服务器(R Server)。借助微软Azure的HD insight和微软R语言, 可以在Azure中创建HD Insight集群, 以便用户或R程序员(R programmers)选择特定的算法或方法来建立实用的分析。

目前, 微软Azure的大部分应用程序都集中于商业和服务领域, 比如web服务的管理。但是, 这些分析工具应该能够应用于未来的制造领域。

4.3.3. 英特尔: Nervana™人工智能学院

计算机硬件巨头英特尔也积极开发其AI功能, 以便为各个行业应用程序提供ML和预测分析。它是通过Nervana™人工智能学院(Nervana™ AI Academy)的框架来实现的[15]。

Nervana是一个专门用于机器深度学习的平台, 它基于Nervana neon™和Nervana引擎技术而建立。Nervana引擎使用了一种被称为高带宽存储器的新型内存技术, 这种技术容量大且速度快, 因此在当今典型的工业

环境中特别擅长处理海量数据。Nervana neon™是一种用于深度学习计划的高级编程语言。随着英特尔新一代处理器的集成, Nervana提供了一个功能强大的人工智能平台, 其处理和内置网络的速度以及可扩展性前所未有。英特尔声称, 所有形式的数字数据(如自然语言和图形), 都能够在此平台上进行处理。

4.3.4. 谷歌: 云端机器学习平台

谷歌长期以来一直致力于开发AI和深层ML技术, 它通过谷歌云端机器学习平台(Google Cloud ML Platform)提供了基于云的ML服务, 这种基于网络的ML算法具有卓越的性能和准确性。谷歌人工智能平台的独特之处在于其强大的文本分析、语音识别和图像分析功能。

为了增强工业应用, 谷歌最近在其ML平台上添加了一个新的组件: Tensor Flow, 这是一个用数据流图结构进行数据处理的开源软件库。在数据流图中, 节点代表数学运算, 边则代表多维数据阵列。在高度不确定的情形中, 这个框架可以处理大量的数据和信息。这种技术可以在制造业中实施, 因为在制造业中总是存在高度不确定性。

4.4. 挑战

尽管制造系统技术取得了极大的进步, 然而在以下领域中仍然存在着重大挑战: 传统的IT基础架构、标准化、知识库和闭环控制。

4.4.1. 传统的 IT 基础架构

很多公司的IT基础架构基本上作为连接不同数据或信息池的通信网络而发展起来的。虽然这能够有效地处理有限的数字数据, 但与此同时, 当处理不同制造平台上的海量数字数据和信息时, 这种方式却作用不大。特别是当

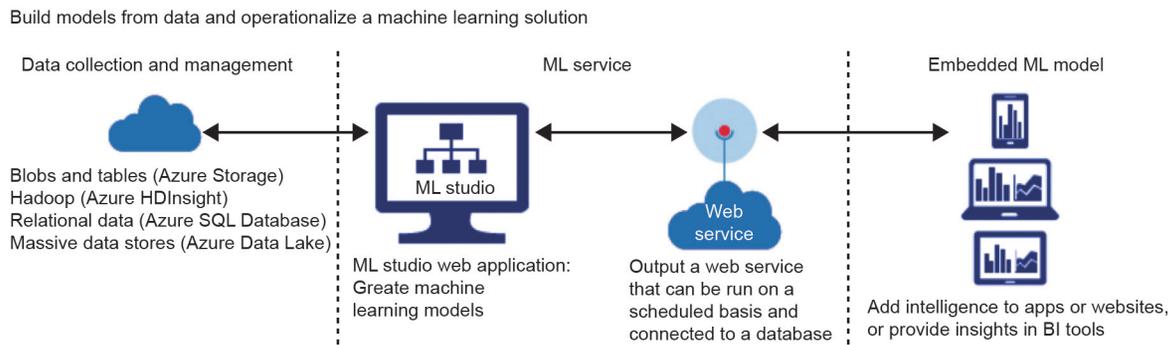


图6. Azure机器学习工作流程[14]。SQL: 结构化查询语言; BI: 商业智能。

采用强大的云计算平台时，它面临着严峻的安全挑战。因此必须重新评估传统的IT基础架构或者把它更换为新的制造模式。

4.4.2. 标准化

为了在制造系统（包括硬件和软件）中集成不同的元素，实现标准化是很有必要的。在设备层面，通信输入/输出和协议必须标准化以实现有效且安全的数据传输，这对于端到端的集成尤为重要；在平台层面，软件模块之间的接口必须标准化，以充分发挥计算智能的潜力。

4.4.3. 知识库

有效的知识库的可用性仍然是阻碍着智能制造技术的实施。尽管ML技术已经被用于从数据中建立知识库，但由于制造环境中的高度不确定性，仍然存在着重大挑战。根据GE的Predix等几个IIoT平台的开放结构，各方都在共同努力构建知识库；然而，一个具有制造监控能力的实用有效的知识库还有待研发。

4.4.4. 闭环控制

预测分析一直在智能制造中扮演重要角色，然而，其在工厂车间中的实施和影响仍然非常有限。因此必须切断分析和驱动之间的联系，这样才能在新一代智能制造中实现真正的智能闭环控制战略。为此，云制造平台的发展迫切需要硬件和软件的更新换代。

5. 总结

一场以制造业振兴和发展为先导的新的工业革命即将到来，我们可以将其定性为i²M系统。在很多国家，政府和私营部门正在紧密合作，以更新制造基础和提高市场份额。

i²M技术的核心突破在于完全实现了信息通信技术与现代制造系统的结合。为此，在转变成新的制造模式的过程中，先进的CPS和IIoT技术以及大数据和云计算发挥着不可磨灭的作用。工业平台因为新的制造生态系统的植入而得到发展。随着制造业的这些进步，第四次工业革命所带来的益处将会逐渐显现出来。

References

- [1] Kagermann H, Wahlster W, Helbig J; National Academy of Science and Engineering. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Munich: National Academy of Science and Engineering; 2013 Apr.
- [2] Revitalize American Manufacturing and Innovation Act of 2014, H.R. 2996, 113th Cong. (2014).
- [3] National Economic Council, Office of Science and Technology Policy. A strategy for American innovation. Washington, DC: The White House; 2015 Oct.
- [4] Lee XE. Made in China 2025: A new era for Chinese manufacturing China. In: CKGSB Knowledge [Internet]. Beijing: Cheung Kong Graduate School of Business; 2015 Sep 2 [cited 2016 Nov 2]. Available from: <http://knowledge.ckgsb.edu.cn/2015/09/02/technology/made-in-china-2025-a-new-era-for-chinese-manufacturing/>.
- [5] Zhang L, Luo Y, Tao F, Li BH, Ren L, Zhang X, et al. Cloud manufacturing: A new manufacturing paradigm. *Enterp Inf Syst-UK* 2014;8(2):167–87.
- [6] Evans D. The Internet of Things: How the next evolution of the Internet is changing everything. White paper. San Jose: Cisco Systems, Inc.; 2011.
- [7] Lee J, Bagheri B, Kao HA. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf Lett* 2015;3:18–23.
- [8] GE Digital. Predix: The industrial internet platform, white paper. Boston: General Electric Company; 2016.
- [9] Babcock C. GE Predix Cloud: Industrial support for machine data. In: *InformationWeek* [Internet]. San Francisco: UBM Tech; 2015 Aug 6 [cited 2016 Nov 2]. Available from: <http://www.informationweek.com/cloud/platform-as-a-service/ge-predix-cloud-industrial-support-for-machine-data/d/d-id/1321628>.
- [10] Schmidt M. 5 emerging technology trends for manufacturers in 2017. In: *Manufacturing News* [Internet]. Prospect: Design-2-Part; 2016 Dec 15 [cited 2016 Nov 2]. Available from: <http://news.d2p.com/2016/12/15/5-emerging-technology-trends-for-manufacturers-in-2017/>.
- [11] Feuer Z, Weissman Z. Smart factory—The factory of the future [Internet]. Sunnyvale: LinkedIn; 2016 Dec 19 [cited 2016 Nov 6]. Available from: <https://www.linkedin.com/pulse/smart-factory-future-zvi-feuer?articleId=8390740796107302304>.
- [12] The ThingWorx IoT Technology Platform [Internet]. Needham: PTC; c2017 [cited 2016 Nov 6]. Available from: <https://www.thingworx.com/platforms/>.
- [13] IBM SPSS Predictive Analytics Enterprise [Internet]. Armonk: IBM Corporation; [cited 2016 Nov 6]. Available from: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/spss-predictive-analytics-enterprise#product-header-top>.
- [14] Ericson G, Glover D, Franks L. Deploy an Azure Machine Learning web service [Internet]. 2017 Jan 6 [cited 2016 Nov 6]. Available from: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/machine-learning/machine-learning-publish-a-machine-learning-web-service>.
- [15] Page C. Intel's Nervana AI platform takes aim at Nvidia's GPU technology. In: *The Inquirer* [Internet]. London: Incisive Business Media (IP) Limited; 2016 Nov 18 [cited 2016 Nov 6]. Available from: <https://www.theinquirer.net/inquirer/news/2477796/intels-nervana-ai-platform-takes-aim-at-nvidias-gpu-technology>.