

INDUSTRIAL BIG DATA

the revolutionary transformation and value creation in
INDUSTRY 4.0 Era

工业大数据

工业4.0时代的工业转型与价值创造

[美] 李杰 (Jay Lee) / 著
邱伯华 等 / 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



INDUSTRIAL BIG DATA

the revolutionary transformation and value creation in
INDUSTRY 4.0 Era

工业大数据

工业4.0时代的工业转型与价值创造

[美] 李杰 (Jay Lee) / 著

邱伯华等 / 译

工业大数据是未来工业在全球市场竞争中发挥优势的关键。无论是德国工业 4.0、美国工业互联网还是《中国制造 2025》，各国制造业创新战略的实施基础都是工业大数据的搜集和特征分析，及以此为未来制造系统搭建的无忧环境。本书基于工业 4.0 的时代背景，通过深入剖析未来工业的商业模式和智能服务体系的技术变革，论述如何通过工业大数据的分析和应用去预测需求、预测制造，整合产业链和价值链，发现用户的价值缺口，发现和管理不可见的问题，实现为用户提供定制化的产品和服务。

本书的中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字：01-2015-2049 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业大数据：工业 4.0 时代的工业转型与价值创造/
(美) 李杰 (Lee, J.) 著；邱伯华等译. —北京：机械工业出版社，2015.6

ISBN 978-7-111-50624-9

I. ①工… II. ①李… ②邱… III. ①制造业—研究 IV. ①F407.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 121688 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：坚喜斌 责任编辑：刘林澍 杨冰

责任校对：郭明磊 版式设计：张文贵 责任印制：刘岗

涿州市京南印刷厂印刷

2015 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

145mm×210mm·7.125 印张·3 插页·128 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-50624-9

定价：39.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：(010) 88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：(010) 68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

(010) 88379203

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

认识工业 4.0 所需要的重要元素与概念

第四次工业革命：由于互联网和计算机技术的高度发展，在与工业系统深度融合过程中引发的生产力、生产关系、生产技术、商业模式以及创新模式等方面的深刻变革，是整个工业系统迈向全面智能化的革命性转变。

工业 4.0：由德国提出和倡导的，以 Cyber-Physical Production System (CPPS，信息物理生产系统) 为核心技术的制造系统变革。

工业互联网：由美国通用电气公司 (GE) 提出，代表全球工业系统与智能传感技术、高级计算、大数据分析，以及互联网技术的连接与融合。其核心三要素包括智能设备、先进的数据分析工具，以及人与设备的交互接口。工业互联网是智能制造体系与智能服务体系的深度融合，是工业系统产业链与价值链的整合与外延。

信息物理系统：又译为网络实体系统，英文表述为 Cyber-Physical System (CPS)，由美国 NSF (美国国家科学基金会) 于

2006 年提出。是通过网络虚拟端的数据分析、建模和控制对实体活动内容的深度对称性管理。CPS 是第四次工业革命的核心技术。

物联网 (IoT): 实体之间通过传感器数据与控制信号实现相互索引、相互连接、相互通信和相互协同的集群网络。其主要技术元素包括智能传感网、M2M (机器对机器通信) 和云计算与存储技术等。

数据的分析与预测 (Data Predictive Analytics): 从人和设备的各类活动数据中通过统计分析、特征提取、关联挖掘、模式识别和深度学习等智能分析方法, 实现对实体活动内容的认知和预测。

互联网 +: 互联网与传统行业相融合的模式, 其本质是利用互联网技术颠覆传统行业商业模式和服务模式的经济新形态, 是生产系统革命引起生产关系和商业模式变革的必然趋势。

故障诊测与健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM): 利用工业系统中产生的各类数据, 经过信号处理和数据分析等运算手段, 实现对复杂工业系统的健康状态进行检测、预测和管理的系统性工程。PHM 技术将设备的健康管理从传统的故障管理转变为衰退管理, 通过预测性维护实现设备的零宕机和持续可靠的运行。

推荐序一

工业大数据分析是未来工业在全球市场中发挥竞争优势的关键领域。随着物联网和信息物理系统时代的来临，更多数据可以被收集和分析，并用于做出更明智的决策。此外，加深我们对工业大数据分析的理解和将其应用到未来的工业系统中是至关重要的。很高兴得知李杰教授正在撰写一本关于未来工业转型与工业大数据分析的书。

李杰教授是美国国家科学基金会（以下简称 NSF）智能维护系统（以下简称 IMS）产学合作中心的创始人和主任。从 2001 年起，他和他的团队与来自 15 个国家的 85 个团队进行了相关合作，并研发出众所周知的、可应用于众多工业领域的大数据分析工具 Watchdog Agent[®]。NSF 关注 IMS 在经济上对制造业的高度影响，并一直对其研究进行支持。2012 年，NSF 开展了一些有关经济影响的研究，IMS 在其中发挥了重大作用，其科研成果在各机构中排名首位，主要效果包括使公司节约成本，并且大幅增加了公司的盈利能力。此外，李杰教授指

导过的学生也都成为了公认的制造业人才。

2012年，李杰教授指导他的学生开办了一家新工业大数据分析公司——Predictronics，这使得工业大数据分析工具在更广阔的工业领域里进一步商业化。同时，李杰教授也是2014年美国国家科学基金会科技创新奖的获得者。

我相信这本书将对制造业企业盈利能力的提升产生有价值的影响。

亚历克斯·施华蔻 (Alex Schwarzkopf)

美国国家科学基金会产学合作中心项目创始人

推荐序二

新工业革命正朝我们迎面扑来，云计算、大数据、互联网常在耳边回响，机器人、物联网、智能化就在我们身边，中国制造业正面临严峻的挑战和难得的机遇。中国制造业就规模和总量而言，已居世界第一，但大而不强。面对资源环境压力加大、劳动力成本上升的现状，中国制造业必须寻求新的发展方式和路径。目前，中国已制订了迈向制造强国的三步走战略，《中国制造 2025》则是第一个十年期行动纲领。在未来的十年里，中国制造业将以两化深度融合为主线、以智能制造为主攻方向。有鉴于中国制造业层次多、差异大的特点，在瞄准世界制造业发展方向不断推进的过程中，中国制造业必须从各方向平衡发展，实行“工业 2.0 补课、工业 3.0 普及、工业 4.0 示范”的并行推进战略。无论是转型升级、两化深度融合，抑或是智能制造，工业大数据分析都是一个不可忽视的工程领域。

工业大数据是以工业系统的数据收集、特征分析为基础，对设备、装备的质量和生产效率以及产业链进行更有效的优化管理，并为未来的制造系统搭建无忧的环境。中国制造业推进

智能制造，除了在智能制造装备、自动化智能生产线、数字化车间、智能工厂等各方面推进技术创新和设计外，工业大数据分析也是一个不能忽略的方向，需要予以高度关注。这也是中国迈向制造强国的基础。在迈向制造强国的进程中，能源的有效利用、环境生态的保护、设备可用率的提高、工厂效率的提升、员工权利的保障等都是核心问题，从这些方面入手进行大数据分析，发现问题、寻找规律、进行预测、提出创新点，进而创新商业模式、自主开发出关键性的技术和产品。

《中国制造 2025》的推进实施，需要官产学研各方面更富创新精神的结合，需要重视和开展工业大数据分析，需要培养大批工业大数据分析人才。目前中国的人才教育体系中极度缺乏大数据分析人才，产业界不了解工业大数据分析的工具和方法，不了解大数据分析如何能帮助实现智能转型以及如何为更多客户提供创造价值的服务。产业与教育的结合是必不可少的，教育的专业设置也必须与时俱进。

《工业大数据：工业 4.0 时代的工业转型与价值创造》一书将向人们揭示工业大数据的分析及其价值。

朱森第

国家信息化专家咨询委员会委员、
中国机械工业联合会特别顾问

2015 年 6 月 5 日

推荐序三

制造业是一个工业化国家的重要基础。在 2008 ~ 2009 年的世界经济危机之后，许多国家重新认识了制造业的重要性，并且制定了一系列的政策来夯实本国的制造业基础。例如，美国政府推出了“先进制造业伙伴计划”，希望重夺制造业全球领导地位；德国政府也启动了“工业 4.0”国家战略，以巩固自身的制造业竞争力。最近，中国政府也颁布了一项意义重大的国家战略——《中国制造 2025》，旨在为中国制造业进一步夯实基础、推进变革。

以上所有国家战略的背后都有一个共同点，那就是对加快发展工业大数据和“信息物理系统”相关技术的重视，并以此作为未来制造业发展的新驱力。这些新驱力将给工业转型带来深刻影响，人们因此将制造业的这一次变革称为“第四次工业革命”。在众多媒体的宣传下，“工业 4.0”“信息物理系统”“物联网”“工业互联网”“大数据”“智能制造”等新的词汇向大众扑面而来，让人们对这些新名词和新概念的含义及

关联倍感困惑。一时间，大量的文章和图解涌现出来，试图帮助人们更好地理解正在发生的变革，勾勒未来的具体轮廓。

面对这些新概念带来的困惑，本书的出现可谓非常及时。它为这些关键技术的发展提供了非常有见地的论述，并对一些关键概念给予了系统性的定义。这本书的作者李杰教授，是行业内最具权威的知识领袖。我与李杰教授相熟 25 载，并在过去 15 年中一直保持密切的联系与合作，共同建立了美国国家自然科学基金会产学合作智能维护系统中心，也因此亲眼见证了李杰教授在学术上的积极创新以及他对行业的敏锐洞察力。李杰教授拥有非常独特的经历，曾在政府机构担任制造业研究计划的项目主任，也曾在企业中担任技术研发主管。如今，李杰教授又成为制造行业的学术研究和教育的先驱者。这些丰富的经历使得李杰教授拥有非凡的视角和独到的观点。15 年前，李杰教授重返学界，以基于网络的智能维护系统作为研究切入点，逐渐将传统维护方式从依靠经验的“艺术”转变成为一门精密的“科学”。

李杰教授作为在智能维护、创新战略以及工业大数据分析方面国际公认的专家，多次受邀出席重大国际会议，并在会上发表主旨演讲。在他的大力推动下，智能维护系统中心在美国、欧洲、中国、韩国、日本、巴西、墨西哥、新加坡以及澳

大利亚等地启动了诸多研究项目，内容涉及工业设备的健康管理 and 预诊断。此外，他还受邀担任多个政府项目的战略顾问，在多个维度为行业发展献计献策。

我因这本书即将问世而感到十分激动，因为它不仅仅阐明了工业大数据相关的基本概念和工具，还通过李杰教授亲身指导的案例研究阐述了工业大数据将如何提高产品与服务的质量与性能。

倪军

美国密歇根大学 S. M Wu 制造科学教授

前 言

工业 4.0：一场不可见世界的竞争

工业 4.0 (Industry 4.0)，是德国政府和工业界定义的制造业的未来蓝图。德国人认为，18 世纪机械制造设备的引入标志着“工业 1.0”时代，20 世纪初的电气化与自动化标志着“工业 2.0”时代，20 世纪 70 年代兴起的信息化标志着“工业 3.0”时代，现在，人类正进入“工业 4.0”时代，即实体物理世界和虚拟网络世界融合的时代。其中，所谓信息物理系统 (Cyber-Physical System, CPS) 是新一代工业革命的核心技术。诺伯特·维纳在 1948 年就提出的“控制论” (Cybernetics) 是 CPS 技术的前身，现在为工业界广泛知晓的 CPS 则是美国国家科学基金会 (NSF) 在 2006 年正式提出的，是 NSF 重点资助的研究方向。德国工业 4.0 与美国 CPS，究其核心要义，是传统制造业利用物联网 (Internet of Things, IoT) 和大数据分析 (Big Data Analytics) 进行的智能化转型。

然而，我们在谈到工业转型带来的变革时，往往容易看到其代表性的技术特征，而忽视促使其转型的最原始的驱动力，

即对于新价值创造的永恒追求。如果说前三次工业革命从机械化、规模化、标准化和自动化等方面大幅度地提高了生产力，那么工业 4.0 与前三次工业革命最大的区别就在于：不再以制造端的生产力需求为起点，而是将用户端的价值需求作为整个产业链的出发点；改变以往的工业价值链从生产端向消费端、从上游向下游推动的模式，从用户端的价值需求出发提供定制化的产品和服务，并以此作为整个产业链的共同目标，使整个产业链的各个环节实现协同优化：这一切的本质是工业视角的转变。工业 4.0 的概念有三个支撑点：一是制造本身的价值化，不仅仅是做好一个产品，还要将产品生产过程中的浪费降到最低，实现设计、制造过程与用户需求相配合；二是让系统在制造过程中根据产品加工状况的改变自动进行调整，在原有的自动化基础上实现系统的“自省 (Self-Aware)”功能；三是在整个制造过程中实现零故障、零隐患、零意外、零污染，这就是制造系统的最高境界。

在现今的制造系统中，存在着许多无法被定量、无法被决策者掌握的不确定因素，这些不确定因素既存在于制造过程中，也存在于制造过程之外的使用过程中。前三次工业革命主要解决的都是可见的问题，如避免产品缺陷、避免加工失效、提升设备效率和可靠性、避免设备故障和安全问题等。这些问题在工业生产中由于可见、可测量，往往比较容易加以避免和解决。

不可见的问题通常表现为设备的性能下降、健康衰退、零部件磨损、运行风险升高等。这些因素由于其很难通过测量被量化呈现，往往是工业生产中不可控的风险，大部分可见的问题都是这些不可见的因素积累到一定程度后造成的。因此，工业 4.0 的关注点和竞争点是这些不可见因素的避免和透明呈现。

工业 4.0 的另一个特点就是制造过程和制造价值向使用过程的延伸，不仅仅关注将一个产品制造出来，还应该关心如何去使用好这个产品，实现产品价值的最大化。产品的创新和价值的创造不再仅仅以满足用户可见的需求为导向，而且要利用用户的使用数据创建使用情景模拟，从情景模拟中找到用户需求的缺口（GAP），这些缺口我们称之为“不可见的需求”，对此即便是用户自己都很难意识到。例如，买汽车的人都会提出省油的需求，各家汽车制造商因此致力于改进车型和发动机让车子更加省油，却很少去关注用户的驾驶习惯对于油耗的影响。同时，驾驶习惯对于用户而言也是不可见的，因此不会有用户要求汽车具备管理驾驶行为的功能。由此可见，工业 4.0 时代的市场竞争会从以往满足客户可见的需求向寻找用户需求的缺口转变。以往我们将产品卖给客户之后就几乎到达了生产价值链的终点，然而工业 4.0 时代将价值链进一步延伸：以产品作为服务的载体，以使用数据作为服务的媒介，在使用过程中不断挖掘用户需求的缺口，并利用数据挖掘所产生的信息为

用户创造价值。

我们不妨以汽车为例做一个大胆的预测，在未来的工业 4.0 时代，人们去 4S 店选车不再仅仅选择车型、颜色和内饰等定制化特征，而且用户还可以在一辆布满传感器的车内进行试驾，当用户坐上驾驶座椅时，传感器会自动记录整个座椅上的压力分布，一款符合用户身形和坐姿习惯的座椅就自动设计完成了；在用户开车过程中，汽车内部的传感器自动记录用户的驾驶动作，进而预测用户的驾驶习惯，一套兼顾驾驶操作体验和舒适性的动力系统和控制系统即被自动匹配完成；在用户驾驶汽车的过程中，汽车能够自动识别用户驾驶习惯的改变，提醒用户驾驶习惯的变化对于能耗和剩余里程的影响；在上下班高峰期，汽车能够通过海量的交通数据预测出未来一段时间内可能通过道路的拥堵情况，并为用户推荐最佳行驶路径；在驾驶过程中汽车还可以记录路面的平整度，这些数据首先在系统内被分享，提醒后面的驾驶者减速驶过一段坑洼的路面，随后被发送给市政管理部门，第二天再经过相同路段时发现坑洼的路面已经被修补好了。用户到家之后，可以通过手机或是网页查看一天的驾驶记录，不同驾驶模式下的能耗情况一目了然，可以与社区内的其他用户比一比谁更加节能环保，同时系统还提供了相应的驾驶习惯改善建议。此外，用户还能查看汽车的健康状态报告，各个关键部件的健康状况、衰退情况和故障风险一目了然，

与之相匹配的维护保养建议也被自动提供，网上预约后就可以到 4S 店进行维护。如果只是简单的更换，还提供视频及文字讲解的详细步骤说明。至此用户发现虽然去 4S 店的次数和保养维修的费用明显减少了，但汽车的故障却几乎降到了零。

这个例子离我们并不遥远，也许在未来 5 年甚至更短的时间内就会成为现实。未来工业界卖给用户的不再是产品，而是有价值的功能；对于驾驶者而言，汽车是一个产品，但是更重要的是汽车带来的行动力、时尚感、经济性、舒适性和安全性等一系列能力。这些能力对应的服务也不再像以往那样只提供给用户有限的选择，而是根据用户的使用情况和需求提供定制化的最佳匹配方案，因为每一个用户的使用数据都是定制化的，这使用户不再是统计结果中的一个样本，而是一个丰富的、高度个性化的个体。

再举一个与我们日常生活息息相关的例子。我们大部分人都有去超市买鞋垫和去制衣店量身定制西装的经历。过去我们买鞋垫只会问要买多大的尺码，同一个尺码的所有人得到的鞋垫都是相同的。但是我们每一个人的脚形、体重、站姿、走路习惯、搭配的鞋类都是不同的，因此不可能有一款鞋垫能够同时满足同一尺码每一个人的需求。美国的 Dr. Scholl's 公司在卖鞋垫给用户之前会先让用户站在一个连接传感器的踏板上，系统会记录用户站立时足底的压力分布，随即用户就可以获得一