

INDUSTRIAL INTERNET

Framework and Technology

工业互联网

体系与技术

夏志杰◎著



介绍互联网发展的历史，定义工业互联网的体系架构
描述工业互联网的四大关键技术
展望工业互联网发展的前景和面临的挑战

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



INDUSTRIAL
INTERNET
Framework and Technology

工业互联网
体系与技术

夏志杰◎著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书介绍了互联网发展的历史,定义了工业互联网的体系架构,描述了工业互联网的四大关键技术,展望了工业互联网发展的前景和面临的挑战。通过阅读本书,读者可以全面了解工业互联网及其包括的关键技术。通过阅读本书,读者可以对工业互联网及其相关的云计算、物联网、互联网、大数据技术都有一个清晰的了解,可以为迈入工业互联网时代做好准备。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业互联网:体系与技术/夏志杰著. —北京:机械工业出版社, 2017.9

ISBN 978-7-111-58167-3

I. ①工… II. ①夏… III. ①互连网络-应用-工业发展-研究 IV. ①F403-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 244833 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: 陈瑞文

责任校对: 郭明磊 版式设计: 张文贵

责任印制: 常天培

北京联兴盛业印刷股份有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

145mm × 210mm · 9.375 印张 · 3 插页 · 180 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58167-3

定价: 69.00 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

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

34 年前的 1983 年，我当时还在攻读硕士研究生，那是一个大型计算机编程需要使用打孔机，IBM 个人计算机还没有进入中国的计算机的“石器时代”。实验室买了一台当时很先进的个人计算机，装有 CP/M 操作系统，没有硬盘，运算时使用两张 500KB 的 8in (1in = 2.54cm) 大的软盘。作为完成国家齿轮标准制定项目任务的一员，使用这台微型计算机，我开发了一套模拟齿轮齿面动力学的计算机程序，研究了各种因素对齿轮胶合失效的影响。这是我第一次将计算机应用到工业系统中，通过运用计算机提供的计算能力来分析各种因素对齿轮系统运行的影响。当时使用的是本书描述的“确定性”思维，首先建立齿轮的动力学模型，然后研究各种因素对齿轮胶合失效的影响，再通过实验结果来验证模型的准确性。

第一次与互联网“结缘”是 1988 年我在美国俄亥俄州立大学攻读博士学位时。使用 Telnet 协议就可以连接到几百千米外的 Cray 超级计算机，向它提交任务并获得结果；使用 FTP（文件传输协议）可从千里之外的服务器下载、上传文件；使用 E-mail 可与太平洋彼岸的教授交流工作。互联网技术令我叹为观止，沉迷其中。

20 世纪 90 年代中期，因为 Win 3.0 的巨大成功与互联网浏览器的普及，互联网走入了平民百姓的家中，进入了本书所描述的“大众互联网”时代。互联网技术发展的日新月异，吸引我在职业生涯中破釜沉舟，从机械行业进入了互联网软件行业，从事通信软件的开发工作。我们开发的软件产品为 20 世纪 90 年代美国大规模互联网基础设施建设，为大量同轴电缆和光纤通信网络的建设提供设计与管理工具。尽管 20 世纪 90 年代美国互联网的金融泡沫在 2001 年破灭，大批互联网企业破产，但这段时间大量热钱的融入为美国建设了完备的互联网基础网络，为美国后来直至现在互联网经济的发展打下了良好的基础。

20 世纪 90 年代末我们开发的一款软件产品，使用美国政府的人口普查数据，结合第三方提供的家庭住址及其经纬度坐标，以及通信企业拥有的用户账单数据，进行数据分析，研究影响用户购买通信增值服务的因素，确定最优商业价值的新设光纤结点的位置和新建光纤线路路由。这是我第一次将数据分析工具应用到商业中。因为这个模型过于庞大、复杂，这个工具使用了本书描述的大数据分析的完备性和相关性原则，试图发现相关性因素，获取“商业智能”，并将“商业智能”应用到商业决策中。尽管“大数据”这个词在媒体上被广泛宣传是在 2007 年以后，但这个项目的数据分析其实符合大数据的方法，使用了本书中描述的“不确定性思维”。

大数据分析为人类提供了解决复杂问题的方法。即使人们对

许多复杂问题的机理缺乏了解，但通过大数据分析，找到强相关性因素，就可以解决相当多的复杂问题。人类并不是最近几年才突然有如此想法，正如我个人 20 世纪 90 年代末期的尝试以及许多更早的其他人也使用过类似的方法解决了许多实际问题。大数据突然被人们关注是因为两个原因：一是云计算技术带来的计算能力的飞速提高使得人们具有了对海量数据进行分析的能力；二是互联网的普及使得系统可以记录人们在网上的活动，从而获得大量的数据。基于大数据分析而引起的人工智能的革命将会彻底改变人类社会的生活方式。

越来越多的智能物体将被接入互联网，预计这个数字会从现在的 80 亿增加到 2020 年的 500 亿。这些被连接到互联网上的大量智能物体将会产生超过目前人类拥有数据的几个数量级的工业数据。通过对它们的分析而获得的知识 and 机器智能将会使人类的工业系统乃至整个人类社会的生产和生活方式产生革命性的变化。这也将使得人类进入一个全新的发展阶段——工业互联网时代。

本书介绍了互联网的历史，提出了工业互联网的体系架构，描述了工业互联网的四项主要技术：物体感知技术、数据传输技术、平台构建技术和数据分析技术，讨论了互联网的发展和对人类的挑战。对这个刚刚开始工业互联网时代提出体系架构是一个大胆而鲁莽的举动。本书的目的在于抛砖引玉，为所有对这个新的时代感兴趣的人提供一个全面而通俗的介绍。

作为一个从 20 世纪 80 年代开始使用互联网，90 年代开始一直为互联网的建设添砖加瓦的幸运儿，我见证了互联网从只有学术圈和教育界几千人使用的象牙塔里的工具变成今天超过 30 亿人使用，已经连接超过 80 亿台智能设备，成为人们生活飞速发展中不可或缺的一部分，见证了互联网从“学术互联网”到“大众互联网”到“工业互联网”的演变。在这个人类进入“工业互联网”时代的黎明的时刻，我将自己身历其中的感悟与 20 多年来从事计算机软件开发、物联网、云计算、通信技术、大数据分析等实践获得的对相关技术的了解呈现给读者，期望能在人类踏入工业互联网之路的进程中贡献自己的一份绵薄之力。

夏志杰

2017 年 4 月

目 录

前 言

第 1 章 互联网的前世今生 / 001

- 1.1 互联网的起源与关键技术突破 / 003
- 1.2 学术互联网时代 / 013
- 1.3 大众互联网时代 / 018
- 1.4 工业互联网时代 / 027
- 1.5 互联网的本质与特点 / 032

第 2 章 工业互联网的体系架构 / 037

- 2.1 工业互联网的定义 / 038
- 2.2 工业互联网相关技术的发展 / 040
- 2.3 工业互联网的体系架构模型 / 046
- 2.4 工业互联网与相关技术的关系 / 057
- 2.5 工业互联网的发展 / 058

第 3 章 物体感知技术 / 067

- 3.1 物体标识技术 / 068
- 3.2 状态获取技术 / 086
- 3.3 场景记录技术 / 091
- 3.4 位置定位技术 / 100

第4章 数据传输技术 / 111

- 4.1 互联网的基本原理 / 113
- 4.2 有线传输技术及传输介质 / 133
- 4.3 以太网 / 142
- 4.4 无线通信技术 / 151
- 4.5 互联网数据传输架构 / 171

第5章 平台构建技术 / 173

- 5.1 计算机硬件技术的发展 / 174
- 5.2 云计算 / 182
- 5.3 工业互联网平台 / 191
- 5.4 工业互联网平台应用示例 / 230

第6章 数据分析技术 / 237

- 6.1 数据、信息与知识 / 238
- 6.2 工业数据的特征 / 240
- 6.3 工业大数据的处理技术 / 249
- 6.4 机器智能 / 256
- 6.5 机器智能在工业中的应用 / 266

第7章 工业互联网时代的挑战与发展 / 271

- 7.1 思维模式的变革 / 272
- 7.2 问题与挑战 / 281
- 7.3 工业互联网与经济发展 / 286

参考文献 / 290

第1章 互联网的前世今生

人类社会的重大发展总是伴随着重大的技术突破而呈跳跃式发展。人类在技术上的重大突破，往往会带来人类生活方式的巨大改变。9000年前，当两河流域的人们发展了播种技术，通过将种子播入土地收获其果实的时候，人类就从以捕猎为生的原始社会进入到农业社会。人们不再需要不断地迁移，成千上万的人可以在一个固定的地方生活，可以在固定的土地上建设自己的家园，享受自己耕种的果实。

1776年，瓦特制作的蒸汽机，在英国波罗姆菲尔德煤矿点火，标志着人类从农业社会进入到工业社会。人类从此通过对无生命能源的利用，突破了自身体力的局限。机器的大量使用，使得社会分工精细，社会流动性增强，业缘关系取代了血缘和地缘关系而成为人类社会关系的主要形式。通过大量使用机器，人类社会的生产力得到了飞速提高。

从20世纪60年代开始发展起来的互联网技术，通过计算机网络，将全球的计算设备连接起来。通过计算机网络，信息可以在非常快的时间内传递到全球的任何一个角落，从而使得人类的

交流不再受到空间的限制。20世纪90年代互联网的普及与应用,标志着人类社会正式从工业社会进入信息社会。随着互联网技术的发展与普及,互联网已经逐步成为人们生活中一个不可缺少的部分。

有学者认为,互联网应该是泛指由多个计算机网络互联而成的一个大型网络。由“阿帕网”发展起来的现在成为一个覆盖五大洲150多个国家的开放型全球计算机网络系统应该被称为因特网。鉴于互联网和因特网使用同样的技术,故因特网也是互联网中的一个,而且互联网的本质在于联接,不联接的互联网的作用是有限的。因此在本书中对互联网和因特网不加以区分,统称为互联网。

1.1 互联网的起源与关键技术突破

最初关于互联网的概念是麻省理工学院(MIT)的李克里德(J. C. R. Licklider)在“人机共生”^[1]和“以计算机为通信工具”^[2]这两篇论文中提出来的。1950年在MIT研究心理学期间,李克里德对利用计算机进行人的知觉建模产生了浓厚兴趣。在此期间以及后来任BBN公司副总裁时,他和他的学生们开始产生了以计算机作为认知和通信工具的想法。在“人机共生”这篇论文里,李克里德提出了一个“思考中心”的概念。如果一台计算机要用于取回信息,那它可能需要访问远超单机所能存储的海量数据。思考中心是横跨大区域互联的多台计算机形成的一种新型图

书馆。用户在任意一台计算机上可访问思考中心任意计算机上的信息。这个概念在本质上与今天的互联网非常相似。在“以计算机为通信工具”这篇论文中提出的想法不只是联网的计算机能把广阔区域的人连起来，而且可以在基础传播心理学中起辅助作用。“创造性的、互动的交流需要一个可塑的或可模压的介质，这种介质是可建模的、动态的，在其上给出前提就能自动得出结果。最重要的是该介质是通用的，能贡献给大众使用”。李克里德认为计算机就是这种介质，能创造出人脑所不能想象的模型：“到目前为止，最大量的、最复杂的、最重要的模型存在于人的大脑。在丰富性、可塑性、便利性和经济性上，人的思维模型无可比拟，但在其他方面有短处。它不会静止下来让人研究，也不能使它重复一件事。没人知道它是如何工作的。它对拥有者的希望服务得比对理智更忠实。它只能访问一个人脑中存储的信息，只能被一个人观察和操控”。这个概念构建于更早的人机共生概念上，是把我们引入使用广域网进行分布式数据处理的基本概念。李克里德在当时就提出了在联接的计算机网络上进行类似于现在的即时通信的对话和网络银行的思想，显示出其非凡的远见卓识。

1962年10月，李克里德受聘于美国国防部高级研究计划局（ARPA），领导指令与控制研究和行为科学这两个分部。李克里德吸引了许多当时的顶尖计算机科学家到美国国防部高级研究计划局。他把这个紧密的科学家团体称为银河际计算机网络。这个

科学家团体中的一些人成为建设早期计算机网络阿帕网 (ARPANET) 的关键人物。李克里德关于联接的计算机网络的设想影响了那个时代的许多科学家。

英国国家物理实验室 (NPL) 的唐纳德·戴维斯 (Donald Davies)^[3], 兰德公司的保罗·巴兰 (Paul Baran)^[4] 和麻省理工学院的伦纳德·克兰罗克 (Leonard Kleinrock)^[5] 各自独立地创立了分组交换理论, 解决了计算机网络信息的传递方法。戴维斯认为在网络中路由消息分片类似于邮政服务系统传递小包裹。因此, 他把信息分片称为“包” (packets), 把包在网络中的路由称为“分组交换” (packet switching)。当戴维斯发现不同的机器使用的计算机语言不同导致了直接通信的困难后, 提出在主机和网络之间, 使用更小型的专用“接口计算机”。全网中这种计算机都使用通用语言。这种“接口计算机”就是现代路由器的先驱。“分组交换”理论的创立, 使得计算机网络发展迈出了重要的一步。分组交换是一种信息存储转发的交换方式, 它将用户的报文划分成一定长度的分组, 以分组为存储转发。分组由一块用户数据和必要的地址和管理信息组成, 保证网络能够将数据传递到目标。类似于从邮局发送的包裹上注明的收件人和发件人的地址一样, 通过提供给网络这些地址信息, 网络把分组 (包裹) 向正确的收件人地址传送。而在此之前的数据通信是基于电路交换的想法, 就像传统的电话电路一样, 在通话中需要占用专有的电路, 通信双方要在电路的两端。与电路交换相比, 分组交换的利用率高。

分组交换利用统计时分复用原理，将一条数据链路复用成多个逻辑信道，最终构成一条主叫、被叫用户之间的信息传送通路，实现数据的分组传送。分组交换网具有如下特点：①具有多逻辑信道的能力，故中继线的电路利用率高；②可实现分组交换网上的不同码型、速率和规程之间的终端互通；③由于分组交换具有差错检测和纠正能力，故电路传送的误码率极小；④分组交换的网络管理功能强。

人类在 1965 年第一次将两台计算机远程连接起来。罗伦斯·罗伯茨 (Lawrence G. Roberts) 和梅里尔 (Thomas Merrill) 一起把位于麻省的 TX-2 计算机用一条低速拨号电话线连接到加利福尼亚的 Q-32。这个实验表明计算机可以很好地一起工作、运行程序并在必要时从远程机器上检索数据。1967 年，罗伦斯·罗伯茨来到美国国防部高级研究计划局，着手筹建“分布式网络”。不到一年，他就提出阿帕网的构想。随着计划的不断改进和完善，罗伦斯·罗伯茨在描图纸上陆续绘制了数以百计的网络连接设计图，使其结构日益成熟。1968 年，罗伦斯·罗伯茨提交了研究报告《资源共享的计算机网络》，其中着力阐发的就是让“阿帕”的计算机达到互联，从而使大家分享彼此的研究成果。根据这份报告组建的美国国防部“高级研究计划网”就是著名的“阿帕网”。“阿帕网”与之前的电话网络相比有三个主要区别。

1) 在电话网中，作为终端的电话机功能较弱，网络要求比较高，主要任务由网络完成，控制权在网络。在“阿帕网”中，作

为终端的计算机功能强大，网络完成的功能比较简单，只负责传送数据，控制权在终端。

2) 在电话网中，一旦连接成功，从主叫端到被叫端就建立了一条连接。当通话结束挂机后，挂机信令告诉这些交换机，使交换机释放刚才这条物理通路。在建立电路之后、释放线路之前，即使站点之间无任何数据可以传输，整个线路仍不允许其他站点共享。在“阿帕网”中采用分组交换技术，在传输过程中，分组交换是逐段占用的，可在一条物理线路上提供多条逻辑信道，实现资源共享。

3) 在电话网中，网络的应用是单一的。在“阿帕网”中，因为网络只负责传输数据，所以在作为网络终端的计算机上可以开发各种各样的应用。

为了连接不同系统的大型计算机，为数据传输提供路由功能，科学家们在计算机网络连接线和大型计算机之间插入一种被称为接口信息处理机的设备来专门负责网络连接和数据传输的功能。接口信息处理机解决了不同操作系统的计算机之间的数据传输问题。1969年8月，接口信息处理机由BBN公司的弗兰克·哈特（Frank Hart）领导的一个小组在增强版的Honeywell DDP-516计算机上开发成功。

由于伦纳德·克兰罗克对分组交换理论的早期贡献，及其对分析、设计和测量的研究，当时已加入加利福尼亚大学洛杉矶分校的伦纳德·克兰罗克的网络测量中心被选为阿帕网上的第一个

结点。1969年9月，在加利福尼亚大学洛杉矶分校安装了首台接口信息处理机，并与计算机主机连接起来。道格·英格巴特（Doug Engelbart）在斯坦福研究所（SRI）的“人类智能增强”项目提供了第二个结点。1969年10月，第二台接口信息处理机在斯坦福研究所安装。两台接口信息处理机通过一条50kbit/s的链路将加利福尼亚大学洛杉矶分校和斯坦福研究所的大型计算机相连接。与1965年罗伯茨和梅里尔使用的电路交换不同，这次使用的是分组交换，成功地交换了人类历史上的第一个数据包“LO”。1969年12月，另外两个分别位于加州圣芭芭拉大学和犹他大学的站点加入网络。1970年初，加入了一条连接坎布里奇的BBN公司和加利福尼亚大学洛杉矶分校的横穿全国的链路。到1971年4月，有了15个站点。1972年10月，在华盛顿希尔顿酒店召开的国际计算机通信大会（ICCC）上，阿帕网进行了首次公开演示。大约40台不同种类和型号的终端连接到一个终端接口处理器，后者又通过两条50kbit/s的线路接入阿帕网。与会者受邀上前使用运行在全国各地的计算机上的各种各样的程序。ICCC事件获得了巨大成功。它向计算机和通信产业界展示了分组交换网络的可行性，并使很多人确信一个新的产业即将产生。阿帕网从此开始建立并运行起来，并不断有新的计算机主机被添加到阿帕网中。

尽管阿帕网开始运行，但还存在一个问题：最初的几个阿帕网站点进行连接时，指令集是在每台主机上临时开发的，而且互