

SMART MANUFACTURING SYSTEM
AND PRACTICES

智能制造之路

数字化工厂

陈明

同济大学中德工程学院

梁乃明

西门子数字化工厂

等编著

解读智能制造的发展、内涵与特征
阐述智能制造系统架构和参考模型
诠释智能工厂体系要素和解决方案
剖析西门子数字化工厂集成和实施



机械工业出版社
China Machine Press

工业控制与智能制造丛书

SMART MANUFACTURING SYSTEM
AND PRACTICES

智能制造之路

数字化工厂

陈明 梁乃明 方志刚 刘晋飞 唐堂 王亮 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

智能制造之路：数字化工厂 / 陈明, 梁乃明等编著. —北京: 机械工业出版社, 2016.10 (2017.1 重印)
(工业控制与智能制造丛书)

ISBN 978-7-111-55073-0

I. 智… II. ①陈… ②梁… III. 智能制造系统—制造业—研究—中国 IV. F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 236291 号

智能制造之路：数字化工厂

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）

责任编辑：张梦玲 王颖

责任校对：董纪丽

印刷：北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次：2017 年 1 月第 1 版第 2 次印刷

开本：170mm×242mm 1/16

印张：18

书号：ISBN 978-7-111-55073-0

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

客服热线：(010) 88379426 88361066

投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问：北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

当前，人类在技术革命领域不断开拓创新，大数据、云计算、物联网以及务联网（Internet of Service）等技术得以成熟应用，工业自动化、数字化的水平不断提高，这些都悄然孕育着一场新的工业革命。

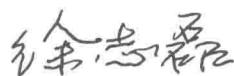
2013年年底，德国正式发布“工业4.0战略计划”，破晓了第四次工业的晨光。作为老牌工业发达国家，德国一直致力于引领全球工业发展的步伐，因此“工业4.0”的发布在全球范围内引起了极大的反响。继德国之后，美国、英国、日本等世界主要工业发达国家均出台了一系列国家政策以支持本国工业发展，应对新一轮工业革命所带来的挑战。我国政府通过统筹兼顾国内外环境，提出了实施制造强国“三步走”战略，并于2015年5月由国务院颁布出台了指导未来工业发展第一个十年计划“中国制造2025”，力争在十年内跻身世界制造强国行列。尽管各个国家在制定相应战略政策时，由于各自工业基础和发展环境的不同，其战略侧重点有所区别，然而智能制造却一直作为未来工业发展的主旋律备受重视。



在这一工业发展的重要变革时期，中德两国政府高度重视合作共赢，包括两国重要领导的高层互访，双边政府性文件的出台。中德双方在关于未来工业发展的道路上已经具备了良好的、广阔的平台。为了更好地对接国际形势，积极推动我国智能制造的发展，同济大学充分利用对德合作优势，继德国“工业4.0”计划发布不到一年，与相关德国企业共同建立了“工业4.0-智能工厂实验室”。一方面，作为教育部“智能制造/工业4.0”师资培养基地，为我国智能制造产业培养了大量的人才。另一方面，作为智能制造关键技术研究的重要基地，为我国智能制造相关企业提供了有效的技术支持和验证平台，在国内外产生了广泛且积极的影响。西门子

(Siemens)作为德国大型跨国公司，一直致力于服务全球工业发展。自进入我国以来，不断拓宽业务领域，并以优异的品质和领先的技术水平，确立了领先的市场地位。作为“工业4.0”的发起者和倡导者之一，西门子在“工业4.0”的发展过程中始终处于领军地位，先后建成了德国安贝格数字化工厂和成都数字化工厂，作为通往未来智能制造的先驱试点，引起了全球制造业的高度关注。同济大学与西门子在智能制造领域也已开展了广泛的合作，从中德双方的角度审视“工业4.0”和智能制造，为我国的工业发展道路打开一扇启迪的窗户。

本书从智能制造环境下的理论研究、产品生命周期、制造运营管理、全集成自动化、系统集成等五个方面对智能制造进行深入分析和探讨，最终以典型案例形象地描述了我国智能制造企业在发展道路上的优势和不足，对理解和分析智能制造具有前瞻的理论价值，对企业开展智能制造的实施与改造具有重要的指导意义！



中国工程院院士

中国创新设计产业战略联盟副理事长

21 世纪以来，全球出现了以物联网、云计算、大数据、移动互联网等为代表的新一轮技术创新浪潮。当前，新兴经济体快速崛起，全球市场经济交流合作规模空前庞大，多样化、个性化需求快速发展，用户体验成为市场竞争力的关键要素；资源、能源需求快速增长，生态环境、气候变化备受关注，绿色低碳的发展理念渐成共识；信息网络、先进材料、智能制造、生物医药等科技与产业酝酿新突破，服务与业态创新日新月异。

在此背景下，德国提出“工业 4.0”，中国推出“中国制造 2025”，美国推进振兴高端制造，日本发展协同机器人和无人工厂，英国着力生物、纳米等高附加值制造，法国开启“新工业法国”总动员。这些国家都将智能制造视为振兴实体经济和新兴产业的支柱与核心，以及提升竞争力和可持续发展能力的基础与关键。

本书以同济大学中德工程学院“工业 4.0 - 智能工厂实验室”和西门子相关解决方案为背景，结合作者在智能制造领域的实践经验和关键技术编写而成。

本书共分六篇，分别为理论篇、产品全生命周期管理篇、制造运营管理篇、全集成自动化篇、系统集成篇、案例分析篇。书中介绍了智能制造在国内外的发展与应用状况、智能制造的内涵与特征；描绘了智能制造参考模型、智能工厂体系架构以及智能工厂解决方案要素；分享了智能制造前站——数字化工厂三个不同维度的数字化蓝图和实施路线图；通过系统集成篇与案例分析篇，结合西门子数字化企业软件套件，帮助读者更好地理解智能制造相关理念，促进企业打造新一代智能制造创新平台，从而在设计研发、工艺开发、生产制造、售后维护等产品全生命周期实行全面数字化与智能管理，同时促进企业实现工业物联网与应用服务联网的深度融合，更好地满足客户持续多变的个性化需求。

本书在注重智能制造基础理论架构的同时，也注意与数字化工厂多维信息管控

系统及企业实践案例相结合，使读者能准确认知智能制造理论，体验实践环境。本书适用于开设智能制造课程的高校教师和学生、致力于打造数字化企业的从业人员、研究智能制造关键技术的科研人员及系统设计与开发人员。

由于笔者水平有限，且编写时间仓促，如有纰漏，恳请积极反馈！

陈明

同济大学中德工程学院副院长

同济大学工业 4.0- 智能工厂实验室主任

2016 年 10 月

“中国制造 2025”的主攻方向是智能制造，要推进信息化与工业化深度整合，促进工业互联网、云计算、大数据在企业研发设计、生产制造、经营管理、销售服务等全流程和全产业链的综合集成应用；加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，把智能制造作为两化深度融合的主攻方向；着力发展智能装备和智能产品，推进生产全过程智能化、培育新型生产方式，全面提升企业研发、生产、管理和服务的智能化水平。

作为德国“工业 4.0”的倡导者和世界级智能制造实践者之一，西门子数字化工厂集团及西门子工业软件公司长期扎根中国，积极响应《中国制造 2025》的号召，参与组建中德智能制造联盟，利用西门子广泛的全球资源和本土创新能力，协助中国制造企业不断提升自动化、数字化、智能化水平，深度参与中国从制造大国转型为制造强国的历史进程。在此过程中，西门子积累了大量成功案例和宝贵的工程实践经验。我们十分愿意和业界分享这些经验，在分享经济时代实现健康的共同成长。

为此，在机械工业出版社计算机出版中心总编温莉芳女士的全力支持，以及副总编王颖女士的策划下，2015年9月，西门子工业软件技术团队组织编写了《工业 4.0 实战：装备制造业数字化之道》一书，该书以基于模型的数字化企业（Model Based Enterprise, MBE）为主线，比较全面地阐述了数字模型在全流程和全产业链中的应用。

MBE 的理想目标是建立数字孪生（Digital Twin）模型，即通过产品系统和生产系统的全数字化建模和仿真，全面或部分替代成本高且周期长的物理孪生、半数字孪生等工程开发和验证手段，并在工程设计和工艺设计领域应用工业大数据和预测性工程分析（Predictive Engineering Analytics）技术，逐步实现“十三五”规划中提出的智慧院所和智能工厂的愿景目标，打通贯穿全价值链的数字神经系统，通过工业

云和工业大数据实现向服务型制造转型。

欣闻同济大学中德工程学院副院长陈明教授和他的团队编著《智能制造之路：数字化工厂》，决定选择西门子数字化工厂技术作为核心案例，西门子很荣幸地向同济大学团队提供了全套技术参考资料。资料收集团队由方志刚、王文华牵头，PLM部分：王昕、李志明、陈铁锋、邹明政、曾法力；MES部分：戚锋、吕平、张炬、何梦琼；TIA部分：葛蓬、崔坚、程瀚依、冯学卫、杨德奇、杨光、赵欣。在此一并对做出贡献的同事表示感谢。

衷心希望本书对读者有一定的参考价值，让我们共同为实现“中国制造 2025”而继续努力！

梁乃明 (Leo Liang)

西门子数字化工厂集团工业软件全球副总裁兼大中华区董事总经理

中德智能制造联盟副理事长

2016 年 10 月

序
前言一
前言二

理论篇

第1章 智能制造概述	2
1.1 智能制造国内外发展与应用状况	2
1.1.1 美国智能制造的发展与应用	2
1.1.2 欧洲智能制造的发展与应用	5
1.1.3 亚太智能制造的发展与应用	10
1.2 工业4.0	16
1.2.1 工业4.0的背景	16
1.2.2 工业4.0的主要内容	17
1.2.3 工业4.0的执行情况	24
1.3 中国制造2025	28
1.3.1 中国制造2025的背景	28
1.3.2 中国制造2025的主要内容	30
1.3.3 中国制造2025的执行情况	31
1.4 智能制造的内涵与特征	32
1.4.1 国内外对智能制造定义、内涵和特征的理解	32

1.4.2	智能制造与传统制造的异同	40
1.4.3	智能制造解读	40
1.5	智能制造参考模型	43
1.5.1	美国	44
1.5.2	德国	46
1.5.3	中国	48
第2章	智能工厂方案与体系	51
2.1	智能工厂的体系架构	52
2.1.1	智能工厂的架构与功能定义	52
2.1.2	智能工厂的雏形——安贝格数字化工厂	54
2.2	智能工厂解决方案要素	57
2.2.1	产品数字化建模与开发系统	57
2.2.2	产品全生命周期管理系统	60
2.2.3	生产制造执行系统	63
2.2.4	全集成自动化系统	64
2.2.5	企业资源计划	65

产品全生命周期管理篇

第3章	数字孪生模型	70
3.1	概述	70
3.1.1	数字孪生模型的概念及定义	70
3.1.2	数字孪生模型在制造中的作用	74
3.1.3	数字孪生模型的应用和进展	76
3.2	基于模型的企业	77
3.2.1	技术标准与规范	78
3.2.2	从MBD到MBE	81
3.3	MBE的体系建设	91
3.3.1	西门子MBE解决之道	91

3.3.2	西门子 MBE 解决方案的价值定位	95
第 4 章	数字孪生模型的组成	96
4.1	产品设计	96
4.1.1	MBD 模型定义的挑战	96
4.1.2	MBD 模型定义的解决方案	98
4.2	过程规划	116
4.3	生产布局	118
4.4	过程仿真	122
4.5	产量优化	123
4.6	维护保障管理	139
4.6.1	服务规划	139
4.6.2	服务手册管理	140
4.6.3	维护 BOM 管理	141
4.6.4	维护保障执行	143
4.6.5	服务调度和执行	143
4.6.6	维护保障知识库管理	144
4.6.7	FRACAS 管理	145
4.6.8	维护保障报告和分析	146
4.6.9	维护物料管理	146

制造运营管理篇

第 5 章	制造执行系统概述	150
5.1	制造执行系统定义	150
5.1.1	MES 的定义及内涵	150
5.1.2	MES 的位置及与其他信息系统之间的关系	153
5.2	MES 的体系架构简介	154
5.2.1	设计原则与项目目标	154
5.2.2	MES 的体系架构	155

5.3	MES 的发展趋势	161
5.3.1	MES 朝着新一代 MES 的方向发展	161
5.3.2	MES 成为智能工厂的核心	162
5.3.3	MES 成为实现精益生产的关键环节	163
第 6 章	智能制造执行系统——SIMATIC IT	166
6.1	数据展现和功能系统	167
6.1.1	控制系统的管理	169
6.1.2	业务系统的管理	170
6.2	生产过程和生产管理	174
6.2.1	产品定义和产品生产	175
6.2.2	人员管理和生产规划	177
6.2.3	工单管理和制造执行	179
6.3	SIMATIC IT 产品组合战略部署	181
6.3.1	SIMATIC IT 生产套件	183
6.3.2	SIMATIC IT Preactor	189
6.3.3	SIMATIC IT 智能套件	191
6.3.4	SIMATIC IT 研发套件	193
6.3.5	SIMATIC IT eBR	195

全集成自动化篇

第 7 章	全集成的系统概念	198
7.1	客户对于自动化解决方案的需求	199
7.2	全集成自动化解决方案的优势	201
7.3	一体化的工程	202
7.3.1	TIA 的统一性	202
7.3.2	TIA 的开放性	204
7.3.3	联合调试与联合编程	205
7.3.4	远程维护	206
7.3.5	过程的模拟与仿真	206

7.3.6	通过 TIA 实现高效工程及其带来的效益	207
7.4	工业数据的管理	207
7.4.1	跨部门的横向集成	207
7.4.2	跨各层的纵向集成	207
7.4.3	工业数据管理可以提供多种维度和视角来视察与利用数据	207
7.5	故障安全集成	208
7.5.1	安全集成理念	209
7.5.2	设备安全的实现	209
7.6	工业通信	215
7.6.1	以太网和工业以太网	215
7.6.2	PROFINET	216
7.6.3	工业无线通信	219
7.6.4	PROFIBUS (IEC 61158/61784)	220
7.6.5	AS-Interface (EN 50295/IEC 62026)	221
7.6.6	IO-Link (IEC 61131-9)	221
7.7	工业信息安全	222
7.7.1	工业信息安全的防护理念	222
7.7.2	工厂安全	223
7.7.3	网络安全	224
7.7.4	系统完整性	228

系统集成篇

第 8 章	企业间价值网络的横向集成	234
8.1	横向集成	234
8.2	横向集成解决的问题	235
8.3	横向集成与车间	236
8.4	横向集成与网络化	236
第 9 章	全流程的端到端集成	237
9.1	全流程的端到端集成简介	238

9.2 端到端——供应链要达到最佳的状态	239
9.3 端到端集成解决方案	240
9.4 全价值链端到端系统工程	240
第 10 章 网络化的纵向垂直集成与网络化制造	243
10.1 PDM 与 ERP 集成	244
10.1.1 PDM 与 ERP 集成的必要性	244
10.1.2 PDM 与 ERP 的集成模式	244
10.2 ERP 与 MES 集成	245
10.2.1 ERP 与 MES 的集成分析	246
10.2.2 ERP 与 MES 的集成模式与方法	247
10.2.3 SAP 制造行业的 ERP 与 MES 集成架构	250
10.3 PLM 与 MES 集成	251
10.3.1 PLM 与 MES 的集成分析	251
10.3.2 西门子的 PLM 与 MES 集成架构	251

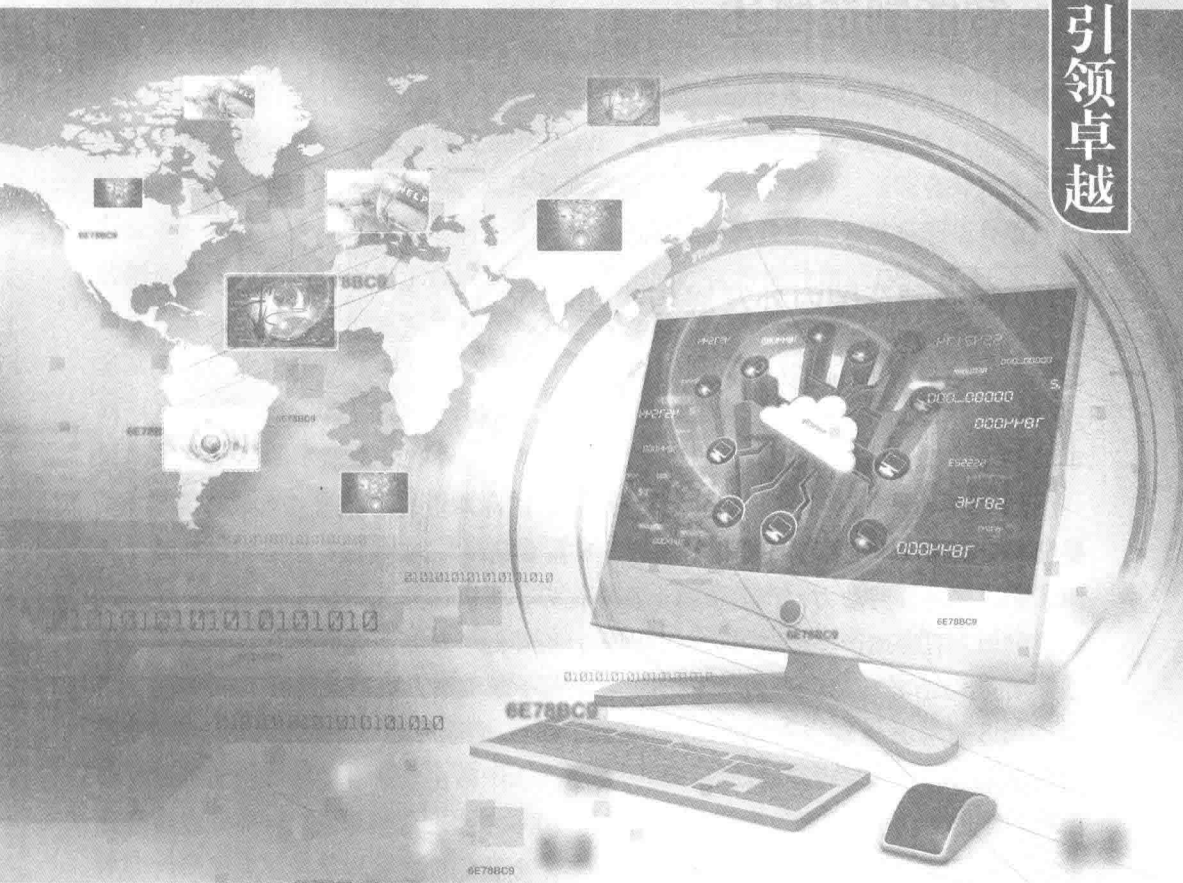
案例分析篇

制造运营管理案例	254
成功案例 1 青岛啤酒	254
成功案例 2 京信通信	258
产品全生命周期管理案例	264
全集成自动化案例	268

成就创新

引领卓越

理论篇



智能制造概述

1.1 智能制造国内外发展与应用状况

1.1.1 美国智能制造的发展与应用

1. 背景

20 世纪 80 年代以来，随着经济全球化、国际产业转移及虚拟经济不断深化，美国产业结构发生了深刻的变化，制造业日益衰退，“去工业化”趋势明显。因发展中国家占据廉价劳动力，产业资源丰富等优势，所以部分美国企业将工厂外迁，同时美国加大对房地产、金融等方面的投入，也降低了对制造业的投入。制造业的萎缩导致美国出口产品竞争力下降，净进口规模不断增加，贸易逆差由 1980 年的 190 亿美元迅速增加至 2008 年的 6983 亿美元。不仅美国低端产品在丧失出口竞争力，高端产品的领先优势也开始动摇，美国高新技术产品在全球市场出口份额所占权重由 20 世纪末的 20% 下降至 2008 年的 11%。2008 年金融危机爆发后，美国经济遭受重创，美国国内生产总值增长停滞。2009 年，金融危机进一步蔓延，美国国内生产总值萎缩 2.6%，创下 1947 年以来的新低。失业率方面，2009 年失业率高达 9.3%，远高于 1990 ~ 2008 年的平均失业率。此后，在美国政府一系列救助政策的强力干预下，经济下滑势头得以缓解，但失业率一直在 8.5% ~ 10% 徘徊。

面对由虚拟经济危机爆发导致的增长乏力、失业率居高不下的困境，美国社会各界深刻认识到实体经济的重要性，美国国内主张发展制造业、改变经济过分依赖金融业的呼声不断高涨。2009 年年末，美国提出了重振制造业的经济复活战略，提出了一系列的重振制造业措施。美国政府提出重振制造业战略，不仅是为了尽快摆脱所面临