



国之重器出版工程
制造强国建设

智能工业丛书

The Roadmap: Digital transformation
and Industry 4.0
——Under perspective of electronic
components industry

企业数字化转型 与工业4.0渐进之路

——电子元器件行业视角

胡耀光

著

姜海洋 焦景勇

审校



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



国之重器出版工程

制造强国建设

智能工业丛书

企业数字化转型与工业 4.0 渐进之路

——电子元器件行业视角

The Roadmap: Digital transformation and Industry 4.0

——Under perspective of electronic components industry

胡耀光 著

姜海洋 焦景勇 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从互联网时代的工业变革出发，立足于电子元器件行业在智能制造背景下的发展需求，探究在工业强基领域实现企业数字化转型与工业 4.0 渐进发展的可行之路。针对建立优质的客户体验、基于数字化转型实现生产过程可视化、面向客户的产品质量追溯等问题，以电子元器件行业视角探讨企业数字化转型的起步、进阶、提升与拓展的渐进发展之路，并结合实际企业的信息化建设与数字化转型历程，详细阐述信息化、数字化乃至智能化的相关技术在电子元器件企业全生命周期运营过程中的具体应用。

本书适于从事企业数字化转型、数字化设计与制造、智能生产等方面研究与开发实践的工程技术与企业管理人员阅读，也可作为高等院校相关专业教师、研究生和高年级本科生的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

企业数字化转型与工业 4.0 渐进之路：电子元器件行业视角 / 胡耀光著. —北京：电子工业出版社，2019.5

ISBN 978-7-121-36375-7

I. ①企… II. ①胡… III. ①自动化技术—应用—电子元器件 IV. ①TN6-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 073045 号

策划编辑：张正梅

责任编辑：张正梅 特约编辑：余敬春 等

印 刷：固安县铭成印刷有限公司

装 订：固安县铭成印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：720×1000 1/16 印张：14 字数：246 千字

版 次：2019 年 5 月第 1 版

印 次：2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价：68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254757。

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉 梁志峰 高东升 姜子琨 许科敏

陈 因 郑立新 马向晖 高云虎 金 鑫

李 巍 李 东 高延敏 何 琼 刁石京

谢少锋 闻 库 韩 夏 赵志国 谢远生

赵永红 韩占武 刘 多 尹丽波 赵 波

卢 山 徐惠彬 赵长禄 周 玉 姚 郁

张 炜 聂 宏 付梦印 季仲华



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

于全 中国工程院院士

王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授

王建民 清华大学软件学院院长

王哲荣 中国工程院院士

王越 中国科学院院士、中国工程院院士

尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授

邓宗全 中国工程院院士

甘晓华 中国工程院院士

叶培建 中国科学院院士

朱英富 中国工程院院士

朵英贤 中国工程院院士

邬贺铨 中国工程院院士

刘大响 中国工程院院士

刘怡昕 中国工程院院士

刘韵洁 中国工程院院士

孙逢春 中国工程院院士

苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

近年来，工业互联网、智能制造、工业 4.0 等相关技术的飞速发展，极大提升了国家制造业竞争力。2016 年以来，汽车、家电、航空航天等领域的智能制造实践案例不断涌现，制造企业的数字化转型已从十年前的部门单项数字化应用向全过程、全周期的数字化应用转变，工业 4.0 的渐进发展态势正在形成。然而，在国家相关高新技术领域飞速发展的过程中，我们依然有很多关键核心技术受制于人，在一些关键领域仍然存在“卡脖子”的技术问题。

本书的写作初衷是分享多年来我在企业信息化、数字化领域积累的知识和实践经验。希望能够为推动我国电子元器件行业制造企业的数字化、网络化和智能化发展，提供一些可参考借鉴的案例及企业数字化转型的有效做法。2010 年秋的一天，我接到毕业没多久的一名研究生的电话，他受朋友之托为北京市团校组织的市属企业精益生产培训寻找合作单位。精益生产是工业工程专业核心课程的主要内容，也是我们所擅长的领域。基于我们的教学与科研实践，结合企业的实际发展需求，在北京市团校的积极组织下，我们很顺利地构建了针对北京市属电子元器件制造企业的精益生产培训课程体系，并在 2010 年年底至 2011 年年初，完成了第一轮培训课程，并由此开启了我们为电子元器件行业进行相关咨询、培训服务的历程。正是源于这次针对电子元器件制造企业的培训课程，才有了我们对这个行业的认识、了解及深入实践，并逐步形成了我们对电子元器件行业信息化、数字化与智能制造发展路线的深刻认识，也因此奠定



了我们与北京 718 厂长久合作的坚实基础，一路并肩探索企业数字化转型与工业 4.0 的渐进发展之路。

随着国家工业强基工程方面相关规划的发布，我们开始关注基础工业领域，包括零部件、元器件、原材料等行业的信息化、数字化发展现状。与之形成鲜明对比的是，在中国智能制造发展规划的十大领域如火如荼地开展工业 4.0、智能制造建设时，基础工业领域的信息化、数字化却没有得到充分重视。作为工业强基核心领域的基础零部件、核心元器件生产制造企业的信息化和数字化仍然处于起步阶段。

在我国的装备制造领域，电子元器件的选用历来得到了“型号两总”系统的高度重视。电子元器件的选用，直接影响着整个型号工程的成败。如何结合产品全生命周期，在从设计、制造到交付的过程中加强电子元器件的质量稳定性、可靠性，提高电子元器件选用的高效、准确、可靠，是装备制造领域电子元器件管理亟待解决的课题。但目前针对电子元器件的生产制造环节，却缺乏有效的管理和控制手段，面向可靠交付的制造能力亟待提高。信息技术的发展、智能制造的提出，为实现电子元器件全生命周期各环节的管理和控制，提供了有效的技术方法和实现手段。本书就是在这样一种背景下，探究了数字化对提高电子元器件制造能力的促进作用，并结合电子元器件的全生命周期各环节的数字化，给出了几种典型的信息系统对电子元器件生产系统的支撑案例。

本书从互联网时代的工业变革出发，立足于电子元器件行业在智能制造背景下的发展需求，探讨在工业强基领域实现企业数字化转型与工业 4.0 渐进发展的可行之路，是针对企业借助信息技术进行生产管理变革，逐步实现智能生产的有益尝试，体现了工业 4.0 以智能生产为主体的发展本质。针对建立优质的客户体验、基于数字化转型实现生产过程可视化、面向客户的产品质量追溯等问题，从电子元器件行业视角探讨企业数字化转型的起步、进阶、提升与拓展的发展之路，并结合实际企业的信息化建设与数字化转型历程，详细阐述信息化、数字化乃至智能化的相关技术在电子元器件企业全生命周期运营过程中的具体应用。主要章节内容如下：

第 1 章：变革来临——企业数字化转型进行时。围绕互联网时代的工业变



革，重点阐述了电子元器件行业转型发展需求、数字化转型与两化融合对实现工业 4.0 的渐进发展的促进作用。

第 2 章：订单跟踪——企业数字化转型起步。通过数字化转型建立优质客户体验，在电子元器件企业与客户之间实现数字化信息共享，借助数字化的订单跟踪系统，实现优质客户体验。

第 3 章：生产可视——企业数字化转型进阶。从订单到生产过程的数字化转型进阶，实现以生产计划及进度为核心的生产过程可视化，这是工业 4.0 技术从提高客户体验向企业生产运作管理的自然延伸。

第 4 章：过程监控——企业数字化转型提升。产品质量是企业的“生命线”，提高产品质量也是工业 4.0 时代企业生产过程智能化的核心目标。围绕产品质量在线检测与控制需求，通过过程监控实现电子元器件关键工序的工艺参数控制、产品质量数据实时采集与智能分析。

第 5 章：质量追溯——企业数字化转型拓展。企业数字化转型“由内向外”拓展，从电子元器件的客户视角分析产品质量追溯的迫切要求，构建产品批次清单，实现基于数字化的产品质量正向跟踪与反向追溯，满足供应链下游客户的“质量归零”需求。

第 6 章：研发创新——工业 4.0 的持续推进。创新是工业 4.0 推动企业价值提升的重要手段。以产品工艺及标准规范为基础，构建融合材料特性、工艺特性的电子元器件基础数据库，实现工业 4.0 持续推进的研发创新基础。

第 7 章：制造能力——企业数字化转型的重新审视。工业 4.0 的渐进发展有助于全面提升企业制造能力。本章从工业 4.0 提升企业制造能力的视角审视数字化转型及工业 4.0 渐进发展的核心价值，深入分析电子元器件制造能力表征，指出电子元器件企业在工业 4.0 时代提高制造能力的主要路径。

第 8 章：智能制造——中国制造步入新时代。大规模个性化定制正在成为制造的新模式，智能制造是推动个性化定制发展的催化剂。近年来，国家加速推动工业大数据、工业互联网、人工智能等新技术的产业化应用，中国正在步入“智造”的新时代。



本书是作者所在科研团队多年来在企业数字化转型实践中研究成果的总结，作者指导的多届研究生也为本书的写作做出了贡献。本书在撰写过程中，还得到了中国航天科技集团公司元器件专家组顾问夏泓先生的若干具体建议，特此感谢。

企业数字化转型及发展仍在持续推进，可以预见，今后会有更新的理论、方法与技术不断推动企业管控水平的提高，本书的内容也将有待丰富和发展。由于作者水平所限，书中难免存在不妥之处，恳请各位专家与读者给予批评和指正。

著者

2019年3月



目录

第 1 章 变革来临——企业数字化转型进行时	001
1 互联网时代的工业变革.....	001
美国：工业互联网.....	002
德国：工业 4.0.....	004
中国：智能制造发展规划.....	004
2 电子元器件行业的产业变革.....	006
变革伊始：生产难题.....	006
现场印象：差距明显.....	007
3 电子元器件行业数字化转型的核心需求.....	008
客户体验：从订单开始.....	008
生产可视：计划与控制.....	008
质量追溯：供应商管控.....	009
4 变革本质：工业 4.0 时代的数字化转型.....	009
信息化+数字化.....	009
数字化能力+制造能力.....	011
两化融合+工业 4.0.....	013
核心观点 数字化转型需求要点与数字化能力的主要标志.....	014
第 2 章 订单跟踪——企业数字化转型起步	015
1 数字化转型起步：为什么从订单开始.....	016
2 订单交付过程分解.....	018
订单跟踪.....	018



订单交付	018
过程分解	019
3 订单建模与状态定义	021
订单信息建模	021
订单状态定义	024
4 订单履约和拖期订单	026
订单履约	026
拖期订单	027
数字化转型之典型应用①——订单跟踪系统	028
功能分析	029
功能架构	031
应用实例	032
核心观点 数字化转型建立优质客户体验	035
第 3 章 生产可视——企业数字化转型进阶	036
1 数字化转型进阶：为什么要关注生产过程	036
关注过程的本质是关注产品质量	037
传统生产过程急需转型升级	037
2 电子元器件的生产组织	038
电子元器件产品分类	039
电子元器件的典型生产工艺	040
3 生产计划与控制	042
生产系统构成	042
电子元器件的生产计划体系	043
生产计划与控制的层级结构	046
4 生产过程可视化	048
生产指令——电子元器件的工作令	048
多生产线工作令集成建模	052
基于工作令的生产过程跟踪	054
5 电子元器件瓶颈工序调度优化	056
问题描述	057
订单分批	058
批次排序	059



问题建模·····	059
模型求解·····	061
数字化转型之典型应用②——生产过程可视化系统·····	070
功能分析·····	073
功能架构·····	076
应用实例·····	077
核心观点 数字化转型实现生产过程可视化·····	080
第4章 过程监控——企业数字化转型提升 ·····	081
1 数字化转型提升：智能生产系统·····	081
2 电子元器件生产过程监控难点·····	085
3 质量检验——过程监控的重要手段·····	086
原材料质量检验·····	087
制造过程质量检验·····	088
成品质量检验·····	090
4 基于关键工序的过程监控·····	091
刻槽工序控制·····	092
点焊工序控制·····	093
精调工序控制·····	093
5 生产过程监控信息建模·····	094
过程监控信息构成·····	094
过程监控信息采集·····	098
面向对象的过程监控信息模型·····	100
数字化转型之典型应用③——过程监控系统·····	103
功能分析·····	103
应用实例·····	104
原材料质量监控·····	104
制造过程监控·····	106
成品质量监控·····	109
核心观点 过程监控助力企业数字化转型提升·····	111
第5章 质量追溯——企业数字化转型拓展 ·····	112
1 数字化转型拓展：工业4.0 横向集成·····	112



纵向集成	113
横向集成	114
端到端集成	114
2 供应链视角下的产品质量追溯	115
电子元器件行业供应链	115
电子元器件的质量追溯	117
型号质量协同管理	118
质量归零	119
3 基于产品批次的质量追溯	121
产品批次	121
批次清单	123
质量追溯	125
数字化转型之典型应用④——质量追溯系统	127
功能分析	127
功能架构	129
应用实例	130
核心观点 数字化转型支持电子元器件供应链质量管控	132
第 6 章 研发创新——工业 4.0 的持续推进	133
1 研发创新：现状与难点	133
研发过程	134
创新难点	136
2 研发基础数据库——实现工艺知识共享	139
产品基础数据库	139
标准规范数据库	142
产品工艺数据库	143
3 案例推理与研发创新	144
研发方案表示	146
案例检索方法	148
案例检索实例分析	152
方案调整	155
数字化转型之典型应用⑤——研发支持系统	155



功能分析·····	155
功能架构·····	158
应用实例·····	160
核心观点 研发数字化转型核心需求在于实现工艺知识共享·····	168
第7章 制造能力——企业数字化转型的重新审视·····	169
1 制造能力及其提升路径·····	169
概念解析·····	169
如何提升制造能力?·····	171
2 制造能力提升——数字化转型的核心需求·····	173
电子元器件制造能力现状·····	173
数字化转型新需求·····	174
3 数字化与制造能力表征·····	175
数字化与制造能力的关系·····	175
制造能力表征指标·····	177
信度与效度检验·····	179
4 制造能力度量与验证·····	182
模型构建·····	182
结构方程模型·····	183
模型验证·····	185
制造能力度量结果分析·····	190
数字化转型之典型应用⑥——数字化助推制造能力提升·····	191
管理革新·····	192
技术改造·····	193
制造能力指标变化分析·····	194
核心观点 数字化转型是提升电子元器件制造能力的重要手段·····	194
第8章 智能制造——中国制造步入新时代·····	195
1 大规模个性化定制渐成趋势·····	195
模块化制造·····	196
定制化运作·····	198
2 大规模个性化定制的催化剂——智能制造·····	198
3 工业互联网平台助推智能制造发展·····	201
参考文献·····	204



第 1 章

变革来临——企业数字化转型进行时

自 2015 年以来，以德国工业 4.0 战略发布为标志，人类社会进入了第四次工业革命时代。世界各国纷纷推出了各自的“国家战略”，迎接新时代技术革新带来的产业变革。美国的工业互联网、德国的工业 4.0、欧洲的地平线 2020 计划、日本的 I-Japan 计划，以及中国智能制造发展规划，分别从各自国家的战略优势、技术与产业基础等各个层面，规划制定了未来 5~10 年工业领域的发展策略、计划与行动指南。

以技术创新为核心、以产业变革为根本的时代特征，将会给未来企业的发展带来深刻影响。企业的数字化转型与工业 4.0 的逐步升级，正在成为企业变革的内在需求。

未来已来，变革已来！

1 互联网时代的工业变革

在漫长的人类历史上，工业的出现像黎明的曙光，打破了延续千年的沉寂和昏暗，为世界带来了无限的创造和光明。18 世纪末蒸汽机的发明，以机器动力代替了手工作业，标志着人类社会步入了工业化时代。在蒸汽机出现后的短短 200 多年间，工业文明所缔造的社会财富，远远超越过去数千年的总和，历次工业革命都在不断改写人类的文明发展史。两百多年的工业文明进程，我们又经历了以电力的发明和使用为标志的第二次工业革命、以电子计算机的发明