



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

工业4.0环境下的智能 制造服务理论与技术

张卫 李仁旺 潘晓弘 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

工业 4.0 环境下的智能制造 服务理论与技术

张 卫 李仁旺 潘晓弘 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合工业 4.0 宏观理论和智能制造微观技术,针对制造与服务融合的目标,提出了智能制造服务理论与技术体系框架,主要包含智能制造服务知识的建模与演化理论、智能制造服务运作的企业与模式理论、智能制造服务模块的生产与集成技术、智能制造服务系统的设计与组建技术等。本书尝试从整体角度,以生产性服务和制造服务化为对象,构建服务企业、制造企业、终端用户三个主体之间的制造服务运作环境,同时建立智能制造服务在工业 4.0 环境下随时随地运作的理论与技术体系。

本书可供从事先进制造领域研发和工程应用的科技人员、高校院所的研究人员作为技术参考,也可作为机械工程、工业工程、管理科学与工程等相关专业本科生及研究生的教学辅助资料。

图书在版编目(CIP)数据

工业 4.0 环境下的智能制造服务理论与技术/张卫,李仁旺,潘晓弘著. —北京:科学出版社,2017.5

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-052795-0

I. ①工… II. ①张… ②李… ③潘… III. ①智能制造系统—制造工业—服务经济—研究—中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 107266 号

责任编辑:陈 静 霍明亮 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 5 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:232 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

中国制造 2025 的提出与推进给制造业信息化带来了新的机遇,其中的生产性服务、服务型制造、智能制造等内容强化了制造业服务化的发展趋势。为了解决制造与服务的融合,可以在工业 4.0 环境中基于智能制造研究制造服务的智能化,从而更好地在制造企业、服务企业和终端用户之间实现制造服务资源的智能化应用,促进中国制造业走出大而不强的困境。本书结合国家自然科学基金、中国博士后科学基金特别资助和浙江省博士后科研择优资助项目,对智能制造服务知识的建模与演化理论、智能制造服务运作的企业与模式理论、智能制造服务模块的生产与集成技术、智能制造服务系统的设计与组建技术等智能制造服务理论与技术进行了深入研究。

本书构建了智能制造服务的理论体系,主要内容包括如下四个部分。第 1 章主要介绍研究背景和主要研究内容。第 2 章主要介绍智能制造服务理论框架构建,通过工业 4.0 理论和智能制造技术综述,界定制造服务与智能制造服务内涵,提出工业 4.0 环境下的智能制造服务的理论与技术体系框架。第 3~6 章主要介绍智能制造服务四方面的核心理论技术体系的建立,是本书的重点部分。针对智能制造服务知识,提出一种基于可拓理论和知识演化技术相结合的智能制造服务知识建模演化理论方法;针对智能制造服务运作,提出一组基于价值创造理论和智能工厂技术相结合的智能制造服务运作企业模式理论方法;针对智能制造服务模块,提出一套基于模块化理论和智能生产技术相结合的智能制造服务模块生产集成技术方法;针对智能制造服务系统,提出一种基于自组织理论和复杂网络技术相结合的智能制造服务系统设计组建技术方法。第 7 章为总结与展望,简要指出智能制造服务的核心技术、研究难点以及应用前景。

本书是作者制造服务三部曲的第二部,从 2008 年起研究制造服务以来,结合制造业信息化与工业工程背景,以多学科角度考察制造服务的本质与运作,分别尝试了制造服务链、制造服务信息化、第四方制造服务运营环境等多个视角研究,取得了关于制造服务的初步认识。在博士后与访问学者期间试图把这种对制造服务的初步认识写成制造服务三部曲,梳理和总结制造服务的研究思路,第一部移动制造服务理论是将移动互联网与商业生态系统引入制造服务研究,获得制造与服务融合的一种方式;第二部智能制造服务理论是要构建工业 4.0 环境下的制造服务,并且融合在智能制造的探索中;第三部复杂制造服务理论是从制造服务自身的概念与内涵出发,揭示制造服务化的基本问题。现在出版了前两部,结合项目进展尽快完成最

后一部，构成作者对于制造服务研究第一个阶段的总结。本书得到了李仁旺和潘晓弘等教授的指导和帮助，借鉴浙江省两化融合与智能制造研究实践经验，以智能工厂和智能生产为基础，提出智能制造服务的概念，通过项目实践和理论思考，逐步建立起制造与服务融合的理论体系。

本书内容来源于国家自然科学基金(51205353)、中国博士后科学基金特别资助(2013T60586)、浙江省博士后科研择优资助项目(BSH1202053, BSH1402022)等的研究成果，同时，从课题组的以下项目中受益匪浅，国家自然科学基金(71571161, 51175463, 51475434)、国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA040601, 2013AA041304, 2015AA042101)、国家科技支撑计划资助项目(2013BAF02B10)等，十分感谢这些项目的资助。本书第一作者单位为浙江师范大学，第二作者单位为浙江理工大学，其余作者单位为浙江大学，特别感谢浙江师范大学工学院鄂世举教授的大力支持，以及朱信忠、程光明、王冬云、杨灿、王琳琳、汪彬、王成武等同事的热心帮助。

制造服务研究是一个多学科交叉领域，相关研究还不成熟，并且对于制造服务本身内涵认识还处于初级阶段，国外学者多从定性角度以公司案例确定制造服务性质是较好的研究方法，国内专家从企业角度以解决方案实现制造服务应用也是较好的研究思路。本书只是探索和尝试将生产性服务和制造服务化统一起来，顶层设计一种研究框架，指导后续深入研究。

由于作者水平和经验有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

张 卫

2016年9月于杭州

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 研究背景	1
1.2.1 制造服务研究的重大意义	1
1.2.2 制造服务的相关支撑技术	2
1.2.3 从制造服务到智能制造服务	6
1.3 制造服务相关理论与技术研究现状	7
1.3.1 生产性服务与制造服务化	7
1.3.2 云制造与制造物联	10
1.3.3 工业互联网与中国制造 2025	11
1.4 本书结构与主要内容	14
1.4.1 研究目标	15
1.4.2 本书结构	15
1.4.3 主要内容	16
1.5 本章小结	17
第 2 章 智能制造服务的理论与技术体系框架	18
2.1 概述	18
2.2 工业 4.0 理论	18
2.2.1 信息物理系统	19
2.2.2 智能工厂模型	19
2.2.3 智能生产技术	21
2.3 智能制造技术	22
2.3.1 智能制造模式	22
2.3.2 智能产品	23
2.3.3 智能制造过程	24
2.4 工业 4.0 环境下的智能制造服务研究框架	25
2.4.1 制造服务	26
2.4.2 智能制造服务	27

2.4.3	工业 4.0 环境中的智能制造服务技术体系	28
2.5	本章小结	30
第 3 章	智能制造服务知识的建模与演化理论	31
3.1	概述	31
3.2	智能制造服务信息提取及知识获取	31
3.2.1	智能制造服务知识规范化编码	32
3.2.2	智能制造服务信息提取	33
3.2.3	从智能制造服务信息中获取智能制造服务知识	35
3.3	智能制造服务知识的可拓建模	36
3.3.1	智能制造服务知识的可拓性	36
3.3.2	智能制造服务知识模型的建立	37
3.3.3	智能制造服务知识模型的拓展	41
3.4	智能制造服务知识的蕴含演化	42
3.4.1	智能制造服务知识演化活动分析	43
3.4.2	智能制造服务知识蕴含系统的组建	43
3.4.3	智能制造服务知识派生和递归的可拓变换	45
3.5	本章小结	50
第 4 章	智能制造服务运作的企业与模式理论	51
4.1	概述	51
4.2	制造企业的智能工厂构建	51
4.2.1	基于智能工厂的制造企业参考模型	52
4.2.2	制造企业的智能工厂使能技术	58
4.2.3	面向服务型制造的智能制造企业建模	62
4.3	服务企业的智慧工厂模型	66
4.3.1	基于智慧工厂的服务企业参考模型	66
4.3.2	服务企业的智慧工厂使能技术	72
4.3.3	面向生产性服务的智慧服务企业建模	76
4.4	终端用户的智能制造服务模式	80
4.4.1	基于价值创造的终端用户智能制造服务参考模型	80
4.4.2	终端用户智能制造服务的价值创造使能技术	87
4.4.3	面向制造服务化的终端用户智能制造服务建模	90
4.5	本章小结	95
第 5 章	智能制造服务模块的生产与集成技术	96
5.1	概述	96
5.2	制造企业的智能产品生产	96

5.2.1	智能产品的适应性生产	97
5.2.2	智能产品的预测性生产	100
5.2.3	面向服务型制造的智能产品生产动态调度	107
5.3	服务企业的智慧服务设计	112
5.3.1	智慧服务的功能设计	112
5.3.2	智慧服务的流程设计	118
5.3.3	面向生产性服务的智慧服务设计	121
5.4	终端用户的智能制造服务集成	128
5.4.1	终端用户智能制造服务的横向集成	128
5.4.2	终端用户智能制造服务的纵向集成	132
5.4.3	面向制造服务化的终端用户智能制造服务集成方案评价	138
5.5	本章小结	142
第 6 章	智能制造服务系统的设计与组建技术	144
6.1	概述	144
6.2	智能制造服务系统的自组织设计	144
6.2.1	智能制造服务系统的模型构建	145
6.2.2	用户个性化需求的可拓挖掘方法	147
6.2.3	交互式自组织设计方法	148
6.3	智能制造服务自组织组建	150
6.3.1	智能制造服务系统的组建条件和演化动力	150
6.3.2	智能制造服务模块自组织组建模型	152
6.3.3	智能制造服务系统自组织组建过程	153
6.4	智能制造服务系统自组织示例	156
6.4.1	智能制造服务系统需求示例	156
6.4.2	智能制造服务系统自组织设计示例	157
6.4.3	智能制造服务系统自组织组建示例	158
6.5	本章小结	159
第 7 章	总结与展望	160
7.1	智能制造服务的理论技术总结	160
7.2	智能制造服务的研究难点探讨	162
7.3	智能制造服务的应用前景展望	162
	参考文献	164
	后记	181
	编后记	183

第 1 章 绪 论

本章基于制造和服务融合的目标，阐述研究智能制造服务的背景和重要意义；结合生产性服务与制造服务化，综述制造服务相关理论与技术的研究现状。在此基础上，提出本书的结构和主要内容。

1.1 概 述

制造与服务融合是制造服务化的核心问题，从多学科角度看，机械工程注重产品结合服务获得更多的价值，计算机科学注重服务平台的构建技术，管理科学与工程注重服务的运作模式等。这些学科从各个角度探索了制造服务化问题，有助于解决制造与服务的融合。在制造与服务融合过程中，服务企业通过生产性服务获得更多价值，制造企业通过服务化提升竞争力，终端用户随着产品和服务的集成供应得到更多实惠，这三方的工程实践促进了制造与服务融合，进而促进制造业的转型升级。然而工程中三方的业务往来存在知识不统一、集成不智能、协同不及时等问题，这就需要在制造业信息化的基础上研究制造服务理论与技术，使制造服务活动产生的制造服务知识自演化、制造服务模块自适应以及制造服务系统自组织来统一配置三方的制造服务资源，使三方利益达到价值共享、资源优化和合作共赢的目的。本书基于制造和服务融合的目标，从工业 4.0 和智能制造角度提出智能制造服务概念及其理论与技术体系。

1.2 研究背景

制造业的服务化趋势在近些年更加明显，更多的制造企业向服务型制造转型，在中国制造 2025 的推动下，制造企业出现智能制造发展的新机遇。制造服务是智能制造的重要内容，不论生产性服务，还是制造服务化，都在学术界和产业界获得重视，从引入服务业理论制造全生命周期，到为终端用户提供个性化的产品服务系统，都为制造服务研究提供了丰富的理论技术支持。智能制造来源于工业 4.0 和工业互联网，作为最新的中国制造战略，更为依赖于制造业的服务化。

1.2.1 制造服务研究的重大意义

服务业在国民经济中的分量持续上升，发达国家的服务业比例都高于 60%，如美国 78.1%、英国 78.4%，即使一些发展中国家也达到 50%以上，如印度 52.1%、

菲律宾 53.2% 等。中国也在 2015 年达到 50.5%。生产性服务是服务业中的重要组成部分，在制造业转型过程中，制造服务研究具有重要的战略意义。制造服务的核心专注于将服务渗透到产品生命周期来获得价值增值，产品生产过程的增值空间较小，在产品前期研发和后期销售过程的增值空间较大，而且在这两个过程中，制造与服务的融合更容易实现。因此，有必要研究制造服务的内涵、作用和关键技术，以此来促进制造业与服务业的融合。

(1) 制造服务是中国制造业发展战略的现实需求。中国制造是新型工业化道路的重要组成部分，新型工业化道路决定了中国制造业发展战略的内涵式发展，就是从劳动密集型转向知识密集型。制造与服务的融合就是内涵式发展的具体措施之一，特别是面对环境和资源约束的增强，服务型制造获得了制造业战略的普遍认可。分析中国经济发展和国际工业竞争环境，就可以发现，制造服务在发达国家已经广泛应用，而国内核心企业纷纷转向制造服务化的实践，这就促使制造业发展必须依赖于制造服务的推广应用。

(2) 制造服务是中国制造业转型的重要途径。传统制造业遇到更多的瓶颈，外部环境迫使中国制造业转型。制造服务使得制造业的价值创造获得新的提升，服务型制造成为制造业转型的主要途径，同时也是制造服务的集中反映。服务型制造不仅反映出生产性服务对于制造业的作用，也反映出制造服务化的具体实现。加快制造与服务的协同发展，推动商业模式创新和业态创新，促进生产型制造向服务型制造转变是中国制造业发展的必由之路。

(3) 制造服务是中国服务业创新的关键动力。服务业在国民经济中的占比越来越大，也提供了众多的就业岗位，特别是信息产业创新在服务业中成效显著。生产性服务作为服务业的重要部分，在与制造业的渗透中出现更多的服务创新模式，如电子商务、物流服务的创新，促进了大批新兴产业的发展。在生产性服务的创新中，制造服务成为重要源泉，特别是基于制造业信息化的集成制造系统，为制造业的改造贡献巨大。随着服务创新的深入，制造服务会促进制造业中更多的应用服务模式，在价值分配过程中获取更大的收益。

1.2.2 制造服务的相关支撑技术

制造服务研究涉及多学科交叉，将制造业信息化和服务业创新等理论成果结合，寻求制造服务的本质特征以及制造服务生产与运作模式，同时要利用新兴信息技术支撑制造服务的运作。比较有代表性的有服务型制造、服务工程方法、产品服务系统等，而制造服务相关支撑技术有互联网计算、大数据、云计算、物联网、面向服务架构、Web 服务、ASP 模式等。

制造服务是基于制造战略在制造业发展到特定阶段出现的制造与服务融合活动，制造战略源于 1969 年 Skinner 把制造职能和企业战略相联系^[1]，随后制造战略

的概念体系和方法论等内容获得深入研究,并且取得大量的成果^[2-24]。新技术的出现就会催生新的制造战略,新的制造战略也影响着制造业的发展。然而,以往服务业在制造业中的作用没有得到足够的重视。制造业面对的种种压力^[25]催生了制造服务,随着制造全球化的发展,各国的制造新战略中逐步将制造服务列入重要任务。

2006年,服务型制造由西安交通大学孙林岩教授等提出^[26],作为新的生产模式,服务型制造是制造与服务相融合的新产业形态,它是服务的制造,也是制造的服务^[27,28]。一方面,生产性服务企业和制造企业共同为顾客提供产品服务系统,产品全生命周期的业务流程和服务由生产性服务企业为制造企业和顾客提供;另一方面,产品制造可以应用制造企业之间相互提供工艺流程级的制造过程服务来完成^[29-32]。国外对于服务型制造研究各有名称,英国是产品服务系统、美国是基于服务的制造、澳大利亚是服务增强型制造、日本是服务导向型制造等。国内人们对服务型制造开展了大量研究,取得了丰富的成果,并且在《中国制造2025》中对其有所提及。

2004年,IBM公司提出服务科学、管理与工程(service sciences, management and engineering, SSME)的概念,试图从计算机科学角度,整合相关学科形成服务科学学科^[33]。其中的服务科学研究服务系统及其自身的运作规律;服务管理研究服务需求预测、高满意度服务提供、高质量服务设计、高效率服务运作等问题;服务运作研究服务的具体执行技术;服务工程研究利用IT(information technology)来支持服务系统的设计、构建和部署。2007年,哈尔滨工业大学徐晓飞教授等提出一种用以刻画服务系统建模、构建与部署的服务工程概念性框架^[34],该框架是可定义、可实现、可评价的服务模型驱动体系结构。同时该课题组还研究了组合Web服务的价值分析方法^[35]、支持大规模个性化功能需求的服务网络构建^[36]、制造服务及其成熟度模型^[37]、基于E3-Value的服务供应链运作管理流程和方法^[38]、基于分层超图的服务价值依赖模型^[39]、多层次图形化服务价值建模方法^[40]、面向双边资源整合的服务创新模式^[41]等。

产品服务系统(produce service system, PSS)作为制造服务化的结果,是集成产品与服务提供给终端用户的系统方案^[42-44]。一般认为,产品服务系统有面向产品的PSS、面向效用的PSS、面向应用的PSS等^[45,46]。剑桥大学制造研究院(institute for manufacturing, IfM)Evans教授的工业可持续(industrial sustainability)研究组定性研究了产品服务系统相关问题,为产品服务系统实现提供了有益参考^[47-53],并在企业咨询中获得成功。国内对于产品服务系统研究也取得一些成果^[54-62]。浙江大学顾新建教授等通过在杭州汽轮机、海尔家电等企业的制造服务实践,提出了产品服务系统的共性关键技术^[63],既包括面向产品服务的设计技术、产品维修服务技术、面向产品服务的用户需求挖掘技术、产品服务的人性化技术、产品服务信息采集技术等,也包括产品服务系统的组织和过程优化理论、产品服务全生命周期管理理论和方法等。西安交通大学江平宇教授等对工业产品服务系统的概念及其执行逻辑进行了详

细定义,并提出工业产品服务系统的分类方法^[64],以及工业产品服务系统关键技术。关键技术主要有工业产品服务系统生产能力建模、工业产品服务系统运作模式与过程建模、工业产品服务系统服务价值分析等。

(1) 互联网计算。20 世纪 60 年代,人工智能之父图灵奖得主 McCarthy 提出效用计算的愿望可以通过互联网计算来表征,它是一种按需计算能力。互联网计算是构建互联网分布式系统的相关方法、原理和理论体系,是云计算、网格计算、Web2.0、面向服务架构、软件即服务等各种计算模式的共性支撑,这些模式本质上都是互联网计算^[65-68]。在互联网内利用互联网资源实现用户按需提供服务的分布式系统就是互联网分布式系统,各类互联网资源应用互联网分布式系统按需集成,并且广泛共享。互联网计算的特征主要有:满足大规模多样性的用户需求;支持资源的跨域共享与集成;支持开放环境下的可用性和可靠性保障;以面向服务为基本范型;采用“软件即服务”的部署、运营和使用模式;支持开放环境下的可伸缩性;可在线演化和动态优化等。

(2) 大数据。大数据(big data)是一种海量、多样化、高增长率的信息资产,这些信息资产需要新处理模式才能获取其价值^[69-76]。最初,把更新网络搜索索引需要同时进行批量处理或分析的大量数据集称为大数据,它用于 Apache org 的开源项目 Nutch。后来,谷歌 MapReduce 和 Google File System(GFS)发布,大数据概念包含了处理数据的速度。大数据的特点是类型多、容量大、应用价值高、存取速度快,并且可以对数量巨大、格式多样、来源分散、格式多样的数据处理,如存储、采集、关联分析等,以此来实现价值创造、新知识发现等。大数据技术、大数据应用、大数据科学、大数据工程等领域组成大数据的研究范围。大数据技术是从各种各样类型的数据中快速获得有价值信息的能力;大数据应用是将大数据分析用于特定环境获得价值的过程;发现和验证大数据的规律及其与自然和社会活动之间的关系是大数据科学;大数据的规划建设运营管理的系统工程是大数据工程。大数据的特征反映在四个层面,分别为数据体量巨大、处理速度快、数据类型繁多、价值密度低而商业价值高等。2015 年 8 月 31 日,国务院印发《促进大数据发展行动纲要》,提出发展工业大数据等应用。

(3) 云计算。云计算(cloud computing, CC)作为一种商业计算模型,用大量分布式计算机构成的资源池来承担计算任务分布,并且用户可以获取计算力、信息服务、存储空间^[77-83]。基础设施即服务(infrastructure as a service, IaaS)、软件即服务(software as a service, SaaS)、平台即服务(platform as a service, PaaS)是云计算的基本形式。规模超大、按需服务、服务虚拟化、可扩展性高、可靠性高、费用廉价、具有通用性等是云计算的基本特征。云计算在亚马逊、IBM、谷歌、微软、雅虎等公司都有发展,2008 年,IBM 在无锡和北京建立两个云计算中心;中国移动通信研究院建立的云计算实验中心内含 1024 个 CPU;世纪互联推出的 CloudEx 产品线,

可以提供在线存储虚拟化服务、互联网主机服务等；北京大学云计算课题组研究了云计算模式下资源的有效管理和优化等。

(4) 物联网。物联网(the internet of things, IOT)是物物相连的互联网, 1999年最先提出。物联网是一种智能化识别、跟踪、定位、监控和管理的网络, 实现方法是利用信息传感设备来连接物品与互联网, 然后进行信息交换和通信^[84-97]。常见的信息传感设备有射频识别(radio frequency identification, RFID)、全球定位系统、红外感应器、激光扫描器等。物联网一经提出, 就获得产业界和学术界的重视, 纷纷深入研究, 应用到各个领域。在互联网延伸到物联网的同时, 网络化发生了质的变化, 促进了信息化发展, 也催生了物联网相关产业。各国在先进制造战略中都强调物联网的应用, 在制造业信息化过程中, 物联网将扮演重要角色。

(5) 面向服务的体系结构。面向服务的体系结构(service oriented architecture, SOA)是一整套企业应用构造方法和企业环境, 企业应用构造方法主要是编程模型、架构风格、运行环境等, 企业应用软件建设的生命周期表现为建模、开发、整合、部署、运行、管理等^[98-100]。SOA的概念1996年由Gartner公司首先提出, 认为SOA主要是一种架构风格, 是以业务驱动、面向服务为原则的IT架构方式。作为一个组件模型, 面向服务的体系结构利用接口和契约来联系应用程序的不同功能单元(称为服务)。接口独立于实现服务的硬件平台、操作系统和编程语言, 具备了中立特征, 可以实现异构系统之间的交互。服务化、模块化、易集成、数据标准化、灵活业务定制、用户体验良好等都是SOA的主要特点。面向服务的体系结构为制造服务的运作提供了坚实的技术基础。

(6) Web服务技术。Web服务(web service, WS)是模块化思想在互联网中的应用, 并且提高了网络环境中软构件的性能^[101,102]。Web服务提供具有平台无关性和松散耦合性的系统集成环境, 它统一封装了数据、消息、行为以及业务逻辑流程等, 作为对象或组建部署在Web上, 用户可以在线访问Web服务来完成某种功能。Web服务已经具有一切即服务的思想, 服务的提供方和使用方相互独立, 不仅可以实现企业应用的动态组合, 还可以为企业应用提供粒度较小、松散的业务对接。在制造领域, 企业的某些业务逻辑组件应用Web服务的形式封装成Web服务在网上发布, 整合企业的业务逻辑, 用户可以在线调用Web服务来满足需求。在此基础上建立的网络化制造平台大大推进了中小企业的制造业信息化。

(7) 应用服务提供模式。应用服务提供(application service provider, ASP)是基于软件租赁思想的应用服务模式, 它利用广域网从数据中心为多个实体提供和管理应用服务^[103-105]。实现方式是通过用户支付租金来在线使用平台提供的应用服务, ASP平台以租赁方式, 通过中央服务器实施、管理和远程托管套装应用软件。制造业信息化的硬件成本高昂, 软件维护困难等瓶颈可以通过ASP模式来突破。ASP源于美国, 并在欧洲和日本等地快速发展, 中国也及时跟进, 国家高技术研究发展计

划(863 计划)支持了多项关于 ASP 平台的网络化制造项目,取得了一批成果。例如,四川省面向汽车产业链协作 ASP 平台、重庆市以分销为主体的 ASP 协作平台、青岛市服装纺织行业进销存 ASP 平台、贵州省面向机电行业的应用服务平台、浙江省轻纺区域网络化制造系统平台等。

1.2.3 从制造服务到智能制造服务

制造服务活动是在制造业和服务业融合过程中逐步产生的,例如,生产性服务和制造服务化,生产性服务是服务业和制造企业互动过程中渗透到制造业的相关领域,而制造服务化是制造业和终端用户互动过程中融入服务业的相关领域。为了便于研究制造服务,可以假设服务企业是服务业中专门为制造企业提供中间性服务的企业,制造企业是与从服务企业获得生产性服务并为终端用户提供制造服务化的企业,终端用户是在制造服务化过程中使用制造服务的消费者。则制造服务是三类制造服务主体(服务企业、制造企业和终端用户)形成两类制造服务关系(生产性服务和制造服务化)的服务活动,也是在制造服务主体之间的价值创造和价值分配活动。

制造服务的实现是通过信息化技术支撑的,在制造业信息化的基础上,计算机集成制造系统与网络化制造都是制造服务的运作环境,提供了数据传输、信息共享和知识发现等功能。随着工业互联网和信息物理系统的应用,制造服务需要引入工业 4.0,一方面制造服务涉及的产品制造和服务设计,都需要制造企业和服务企业的支撑,而工业 4.0 的智能工厂可以改造制造企业和服务企业使之智能化,利用工业 4.0 理论就可以较好实现制造服务的企业模式;另一方面有限的制造服务通过组合可以扩展制造服务资源的应用范围,而工业 4.0 的智能生产可以实现产品制造和服务设计的智能化,利用工业 4.0 理论也可以较好地实现制造服务的生产集成。因此,在制造服务研究中使用工业 4.0 理论是一次有益的尝试。

相对于互联网环境,工业互联网提供了更多的可能性,制造服务运作环境产生了新的飞跃。特别是智能手机等移动终端的普及,使得制造服务主体之间的复杂关系能够随时随地响应,制造服务主体不必要局限在工作台或者车间进行制造服务活动。工业互联网环境给制造服务带来新的机遇和挑战,机遇在于制造服务的方便快捷运作,挑战在于智能制造服务的商业模式研究。基于工业互联网的智能制造技术是工业 4.0 的核心技术之一,智能制造是制造技术与数字技术、智能技术及新一代信息技术的融合,是面向产品全生命周期的具有信息感知、优化决策、执行控制功能的制造系统,旨在高效、优质、柔性、清洁、安全、敏捷地制造产品、服务用户。

工业发达国家已走过了机械化、电气化、数字化三个发展历史阶段,具备了向智能制造阶段转型的条件。未来必然是以高度的集成化和智能化为特征的智能化制造系统,并以部分取代制造中人的脑力劳动为目标,即在整个制造过程中通过计算机将人的智能活动与智能机器有机融合,以便有效地推广专家的经验知识,从而实

现制造过程的最优化、自动化、智能化。发展智能制造不仅是为了提高产品质量和生产效率及降低成本，而且也是为了提高快速响应市场变化的能力，以期在未来国际竞争中求得生存和发展。美国再工业化提出的工业互联网，德国工业化提出的工业 4.0，中国新型工业化提出的中国制造 2025 等都将智能制造技术作为核心目标。

在此背景下，就有必要研究基于智能制造技术的智能制造服务。从制造服务到智能制造服务，制造服务主体和制造服务关系没有改变，改变的只是制造服务的运作环境和运作方式。但是智能制造服务必然产生工业互联网门槛，对终端用户很容易通过智能终端进入工业互联网环境，而服务企业和制造企业进入工业互联网环境就需要更多的技术支持。在制造业信息化基础上，随着信息物理系统技术的突破，增加工业互联网应用会变得更加容易，这就为制造服务向智能制造服务转变提供坚实基础。

制造服务本身的智能化并不复杂，只是将原来发布在互联网环境中的制造服务通过技术处理发布在工业互联网中。智能制造服务只是软件化制造服务形式上的变化，其背后的制造服务活动不变，就好像以前通过固定电话沟通，现在变成了智能手机而已。当然在工业 4.0 环境中，智能制造服务更具优势，市场交易的即时信息可以通过工业互联网准确把握，复杂多变的智能制造服务关系也更容易处理。

1.3 制造服务相关理论与技术研究现状

制造服务研究是一个多学科交叉的系统工程，机械工程学科提供了产品设计与制造的核心技术以及制造系统的实现模式；计算机科学与技术学科提供了制造业信息化的核心技术以及服务工程的平台架构；管理科学与工程学科提供了服务系统运作与管理的核心技术以及制造融合服务的概念特征；其他学科也为制造服务研究提供专门知识。工程界的制造服务主要是企业针对个性化顾客需求进行服务创新，以产品服务系统改进单纯产品来实现价值增值。学术界的制造服务研究主要是生产性服务和制造服务化理论，国内学者立足制造，提出现代制造服务、服务型制造、产品服务系统等概念，同时基于新兴信息技术，提出云制造、制造物联等制造服务模式。宏观层面，在美国提出振兴先进制造计划之后，德国、英国、中国等都在近期制定了制造业发展新战略，其中也涉及制造服务的内容，为制造服务研究提供明确导向。

1.3.1 生产性服务与制造服务化

国外制造服务研究从 20 世纪 60 年代开始于生产性服务，而后出现了对应的制造服务化研究。在 21 世纪初，国内研究服务业的学者开始关注并将生产性服务概念引入国内，同时引入了制造服务化概念。