



## Cloud Manufacturing

李伯虎 张霖 等著

清华大学出版社

# 云制造

Cloud Manufacturing



李伯虎 张霖 等著

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书首先从制造业的发展趋势及挑战、制造业信息化的发展历程以及云计算、物联网、服务计算、智能科学等新技术的发展等方面论述云制造产生的背景,在此基础上介绍云制造的概念、特点、与其他制造模式的区别与联系以及云制造模式、体系结构、技术体系,然后系统地介绍云制造主要的关键技术及部分成功的应用案例。本书是作者团队近5年的研究成果的总结。

本书可供从事云制造、物联网、软件工程、信息管理等领域的工程技术人员、研究人员阅读,也可供高等院校相关专业研究生参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

云制造/李伯虎,张霖等著. --北京:清华大学出版社,2015

ISBN 978-7-302-38969-9

I. ①云… II. ①李… ②张… III. ①计算机网络—应用—制造工业—研究 IV. ①F426.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 005632 号

责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:17.75

字 数:431 千字

版 次:2015 年 7 月第 1 版

印 次:2015 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:49.00 元

# 前言

## FOREWORD

制造业是国民经济和国防安全的重要支柱,是一个国家工业化的战略性产业。中国在2009年已成为仅次于美国的全球第二大工业制造国,但是“中国制造”的总体水平仍处于国际产业分工价值链的低端,创新能力相对较弱,并且受到资源环境的严重制约。所以,如何使我国的制造业由生产型向服务型、由价值链的低端向中高端、由制造大国向制造强国、由中国制造向中国创造转变,已成为中国制造业需要解决的核心问题。国内外大量实践表明,信息化是实现上述转变的关键与基础。

从“八五”到“十一五”,我国科技部及相关部门支持了以计算机集成制造、并行工程、敏捷制造、虚拟制造、网络化制造、制造网格等为代表的相关制造业信息化研究与应用,取得了一系列成果,在制造业各个领域发挥了重要作用,对推进我国制造业信息化进程做出了巨大贡献。然而,随着制造业信息化向集成化、数字化、智能化、敏捷化、网络化、绿色化和服务化的深入发展,特别是制造的服务化能力、基于知识的创新能力、对各类制造资源的聚合与协同能力以及对环境的友好性已成为当前企业竞争力的关键要素,传统的信息化制造技术面临着许多新的挑战。如何在制造过程中整合社会化存量资源,提高资源利用率,降低能源消耗,减少排放,从而实现服务型制造,成为当前我国制造业迫切需要解决的瓶颈问题。解决这些问题,需要探索新的制造业发展模式。

云制造就是在这种背景下被提出来的。云制造是一种面向服务、高效低耗和基于知识的网络化智能制造新模式,它融合了现有信息化制造、云计算、物联网、服务计算、智能科学、高性能计算等技术,通过对现有网络化制造与服务技术进行延伸和变革,将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化,并进行统一、集中的智能化管理和经营,实现智慧化、多方共赢、普适化和高效的共享和协同,通过网络为制造全生命周期过程提供可随时获取的、按需使用、安全可靠、优质廉价的服务。云制造将使得制造资源和能力也可以像水、电、煤气一样使用。

国家863主题项目“云制造服务平台关键技术研究”于2012年初正式启动,目的是对云制造服务平台的部分核心理论、关键技术和标准规范进行研究,开发相应的工具、平台和系统,并分别在典型集团企业和中小企业进行示范应用。项目一期已经通过国家科技部验收,本书在该项目成果的基础上,对云制造相关理论、技术、方法等进行较为系统的介绍。

全书共分为11章,第1章主要介绍云制造提出的背景,阐述了云制造的概念和原理以

及云制造和其他制造模式的关系,并且论述了云制造的特征和基本能力,是以后各章节的基础。

第2章着重介绍云制造的系统架构和技术体系,以云制造系统多视图为切入点,从功能视图、组织视图、资源视图、信息视图、过程视图等不同角度对云制造系统进行了分析;然后给出了云制造系统体系架构,并分别针对集团企业和中小企业云制造系统,从不同层次对各个部分进行了详细解释;最后提出了一个较为完整的云制造技术体系。

第3章讨论了云制造资源感知与接入技术,资源感知与接入是云制造得以实现的先决条件。该章首先对制造资源的特点进行了分析,然后探讨了不同类型的制造资源的感知与接入和适配方法及相关设备以及接入数据的采集、分析与处理技术。

第4章讨论了制造资源的虚拟化与服务化技术,云制造中的虚拟化技术与传统计算机领域的虚拟化既有联系又有区别,该章介绍了制造资源虚拟化的概念、理论框架、虚拟资源池的构建与管理等,同时对云制造资源的服务化描述与封装技术进行了讨论。

第5章着重讨论云制造环境下制造能力描述及服务化问题,内容包括制造能力的概念、特征及分类、制造能力的服务化描述机制以及制造能力的感知与接入方法等。

第6章介绍制造云服务综合管理,分别就云服务搜索与匹配、云服务组合、云服务计算资源优化配置等技术进行了讨论。

第7章介绍制造云服务运行与评估技术,讨论了云制造平台中服务的运行与容错技术以及定性定量相结合的云服务综合评估技术。

第8章介绍几个支持云服务个性化定制及展示的可视化关键技术,以及在此基础上设计的一个基于普适计算的个性化服务定制与可视化平台。

第9章以航天复杂产品集团企业和轨道交通装备集团企业为例,介绍了面向集团企业的云制造解决方案。

第10章介绍了针对两类不同应用模式的中小企业的云制造解决方案,分别是支持企业间业务协作的紧耦合云制造应用模式和支持区域性产业集群协作的云制造应用模式。

最后的第11章,对云制造现阶段的发展现状进行了概述,并对云制造未来的发展趋势作了展望。

本书由李伯虎、张霖总体策划,确定总体结构及各章内容,组稿并统稿,李伯虎最终审定。各章主要编写人员包括:

第1章李伯虎,张霖,柴旭东,陶飞,任磊,罗永亮,尹超,李孝斌。

第2章李伯虎,张霖,任磊,陶飞,柴旭东,尹超,张云,夏卿,钟婷,麦金耿。

第3章徐文君,李瑞芳,张帆,张霖,赵淳,任磊。

第4章任磊,张霖,赵淳,尹翰坤,黎振武。

第5章张霖,罗永亮,陶飞。

第6章张霖,陶飞,赖李媛君,郭华,倪志伟。

第7章曲慧杨,汪芸,段桂江,林廷宇,杨晨,肖莹莹,程颖。

第8章任磊,滕东兴,马翠霞,宋绍磊。

第9章柴旭东,王勇智,曲慧杨,林廷宇,张霖,王顺强,韩毅斌,贾鹏飞,战德臣,程臻,杨晨,肖莹莹,邢驰,姜戈,高成材,张振威,曹啸博。

第10章黄培,赵欣培,胥军,李波,张霖,陈皓,罗永亮。

第 11 章李伯虎,张霖,罗永亮。

罗永亮,周龙飞,赵淳等协助全书的编辑、排版、校对等工作。

本书内容凝聚了直接或间接参与云制造项目研究的大量科技人员、管理人员以及青年学生的心血和智慧,在此一并向他们表示真诚的感谢。

云制造作为一种制造业信息化的新模式和新手段,其相关理论、方法和技术还在不断发展和完善当中,读者若对书中的观点或技术有不同见解,欢迎与作者进行学术探讨,以共同推动云制造的健康发展。

作者

2015 年 3 月于北京

# 目录

## CONTENTS

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 云制造概念与内涵         | 1  |
| 1.1 云制造提出的背景           | 1  |
| 1.1.1 制造业的发展           | 1  |
| 1.1.2 中国制造业面临的挑战       | 2  |
| 1.1.3 制造业信息化的内涵        | 2  |
| 1.2 云制造的概念             | 3  |
| 1.2.1 云制造定义            | 3  |
| 1.2.2 云制造服务对象与内容       | 4  |
| 1.2.3 “云制造”的概念模型       | 6  |
| 1.2.4 “云制造”的应用模式       | 6  |
| 1.3 云制造的支撑技术           | 8  |
| 1.3.1 制造数字化技术          | 8  |
| 1.3.2 云计算              | 9  |
| 1.3.3 物联网              | 9  |
| 1.3.4 服务计算             | 9  |
| 1.3.5 高性能计算            | 10 |
| 1.3.6 大数据技术            | 10 |
| 1.3.7 安全技术             | 10 |
| 1.3.8 智能科学技术           | 10 |
| 1.4 云制造是云计算在制造领域的落地与拓展 | 11 |
| 1.4.1 在资源共享内容方面的拓展     | 11 |
| 1.4.2 在服务内容与模式方面的拓展    | 12 |
| 1.4.3 在技术方面的拓展         | 12 |
| 1.5 云制造的制造模式与技术特征      | 12 |
| 1.5.1 云制造的制造模式         | 12 |
| 1.5.2 云制造系统的技术手段       | 13 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 1.5.3 云制造服务的特点 .....           | 17        |
| 1.6 云制造是制造业信息化的一种新模式和新手段 ..... | 18        |
| 1.6.1 制造业信息化模式与技术的发展 .....     | 18        |
| 1.6.2 云制造与几种典型制造信息化技术的比较 ..... | 19        |
| 1.7 本章小结 .....                 | 21        |
| 参考文献 .....                     | 21        |
| <b>第2章 云制造系统架构与技术体系 .....</b>  | <b>24</b> |
| 2.1 云制造系统多视图描述 .....           | 24        |
| 2.1.1 功能视图 .....               | 24        |
| 2.1.2 组织视图 .....               | 26        |
| 2.1.3 资源视图 .....               | 28        |
| 2.1.4 信息视图 .....               | 29        |
| 2.1.5 过程视图 .....               | 31        |
| 2.2 云制造系统的体系架构 .....           | 34        |
| 2.2.1 云制造系统概念框架 .....          | 34        |
| 2.2.2 集团企业云制造系统架构 .....        | 35        |
| 2.2.3 中小企业云制造系统架构 .....        | 37        |
| 2.3 云制造技术体系 .....              | 41        |
| 2.4 本章小结 .....                 | 47        |
| 参考文献 .....                     | 47        |
| <b>第3章 制造资源感知与接入 .....</b>     | <b>48</b> |
| 3.1 制造硬资源的感知、接入与适配 .....       | 48        |
| 3.1.1 制造硬资源的感知 .....           | 48        |
| 3.1.2 制造硬资源的接入与适配 .....        | 54        |
| 3.2 制造软资源的感知、接入与适配 .....       | 59        |
| 3.2.1 软件类资源接入 .....            | 59        |
| 3.2.2 数据类资源接入 .....            | 61        |
| 3.3 感知与接入数据的分析与处理 .....        | 62        |
| 3.3.1 感知与接入数据信息融合 .....        | 62        |
| 3.3.2 感知与接入数据信息描述 .....        | 63        |
| 3.3.3 感知与接入数据信息分析 .....        | 63        |
| 3.4 本章小结 .....                 | 63        |
| 参考文献 .....                     | 64        |
| <b>第4章 制造资源虚拟化与服务化 .....</b>   | <b>66</b> |
| 4.1 制造资源虚拟化技术 .....            | 66        |
| 4.1.1 制造资源虚拟化概述 .....          | 66        |
| 4.1.2 制造资源虚拟化理论框架 .....        | 69        |
| 4.1.3 硬制造资源虚拟化 .....           | 72        |
| 4.1.4 软制造资源虚拟化 .....           | 73        |

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 4.2   | 物理-虚拟资源的映射与转化技术 .....              | 73  |
| 4.3   | 虚拟资源池的构建与管理技术 .....                | 75  |
| 4.3.1 | 虚拟资源池架构设计 .....                    | 75  |
| 4.3.2 | 基于关系数据库和 Hadoop 框架的虚拟资源池数据管理 ..... | 77  |
| 4.4   | 制造资源的服务化封装技术 .....                 | 79  |
| 4.4.1 | 云制造系统中制造资源特征与属性分析 .....            | 79  |
| 4.4.2 | 基于模板的制造资源服务化封装方法 .....             | 83  |
| 4.4.3 | 云服务的本体建模与语义描述 .....                | 89  |
| 4.5   | 本章小结 .....                         | 93  |
|       | 参考文献 .....                         | 93  |
| 第 5 章 | 制造能力描述与服务化 .....                   | 94  |
| 5.1   | 制造能力的内涵 .....                      | 94  |
| 5.1.1 | 制造能力的概念 .....                      | 94  |
| 5.1.2 | 制造能力基本特征 .....                     | 95  |
| 5.1.3 | 制造能力多视图分类 .....                    | 96  |
| 5.1.4 | 制造能力生命周期 .....                     | 97  |
| 5.2   | 制造能力信息模型结构 .....                   | 99  |
| 5.2.1 | 制造能力建模框架描述 .....                   | 99  |
| 5.2.2 | 制造能力层次模型 .....                     | 99  |
| 5.2.3 | 举例 .....                           | 105 |
| 5.3   | 制造能力服务化描述机制与方法 .....               | 107 |
| 5.3.1 | 制造能力服务化描述需求 .....                  | 107 |
| 5.3.2 | 理论基础 .....                         | 108 |
| 5.3.3 | 制造能力服务化描述框架及流程 .....               | 109 |
| 5.3.4 | 制造能力特征信息形式化描述方法 .....              | 112 |
| 5.3.5 | 举例 .....                           | 115 |
| 5.4   | 制造能力的感知接入 .....                    | 118 |
| 5.5   | 制造能力服务网络 .....                     | 121 |
| 5.5.1 | 社会网络概述 .....                       | 122 |
| 5.5.2 | 制造能力服务关联网络 .....                   | 123 |
| 5.5.3 | 用户个性化需求获取及表示 .....                 | 126 |
| 5.6   | 本章小结 .....                         | 127 |
|       | 参考文献 .....                         | 128 |
| 第 6 章 | 云服务综合管理 .....                      | 129 |
| 6.1   | 云服务搜索与匹配 .....                     | 129 |
| 6.1.1 | 基于本体的云服务搜索与匹配 .....                | 129 |
| 6.1.2 | 云服务搜索与匹配方式 .....                   | 130 |
| 6.1.3 | 云服务搜索与匹配实现 .....                   | 133 |
| 6.2   | 云服务组合 .....                        | 135 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 6.2.1 交互式服务组合方法              | 136        |
| 6.2.2 Web 服务映射模型             | 137        |
| 6.2.3 服务组合流程框架               | 138        |
| 6.3 云服务计算资源优化配置              | 144        |
| 6.3.1 云服务计算资源配置问题的结构与特点      | 145        |
| 6.3.2 云服务计算资源配置模型的构建         | 147        |
| 6.3.3 问题复杂性分析                | 152        |
| 6.3.4 智能算法的选取                | 152        |
| 6.3.5 遗传算法中几种典型改进的比较         | 153        |
| 6.3.6 各算法在云服务计算资源配置问题中的比较与测试 | 157        |
| 6.4 本章小结                     | 161        |
| 参考文献                         | 161        |
| <b>第7章 云服务运行与评估</b>          | <b>165</b> |
| 7.1 云服务运行技术                  | 165        |
| 7.1.1 面向时空一致单阶段协同的运行技术       | 165        |
| 7.1.2 面向业务流程跨阶段协同的运行技术       | 172        |
| 7.2 云服务评估技术                  | 174        |
| 7.2.1 云服务 QoS 评价指标体系         | 174        |
| 7.2.2 云服务 QoS 建模及评估方法        | 176        |
| 7.2.3 定性定量相结合的能力服务评估技术       | 179        |
| 7.3 本章小结                     | 184        |
| 参考文献                         | 184        |
| <b>第8章 云制造中的普适用户界面与可视化技术</b> | <b>186</b> |
| 8.1 云制造环境下用户界面的特征分析          | 187        |
| 8.1.1 普适化与自然性                | 187        |
| 8.1.2 智能化与移动性                | 187        |
| 8.1.3 虚拟化与松耦合                | 188        |
| 8.1.4 个性化与全生命周期可定制           | 188        |
| 8.2 云制造环境下的用户个性化服务定制         | 188        |
| 8.2.1 云制造环境下以用户为中心的个性化服务需求   | 188        |
| 8.2.2 基于普适计算的个性化服务定制模式       | 189        |
| 8.3 云制造环境下的用户个性化服务定制平台体系结构   | 190        |
| 8.3.1 基于普适计算的个性化服务建模         | 190        |
| 8.3.2 个性化服务定制平台体系结构          | 190        |
| 8.4 关键技术                     | 191        |
| 8.4.1 基于交互历史的多通道融合技术         | 192        |
| 8.4.2 Focus+Context 可视化与交互技术 | 192        |
| 8.4.3 基于双曲树的云服务搜索结果可视化技术     | 193        |
| 8.5 基于普适计算的个性化服务定制与可视化平台     | 195        |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 8.6 云制造网络可视分析平台 .....                 | 196 |
| 8.7 本章小结 .....                        | 198 |
| 参考文献 .....                            | 198 |
| <b>第9章 面向集团企业的云制造应用案例</b> .....       | 200 |
| 9.1 航天复杂产品集团企业云制造应用案例 .....           | 200 |
| 9.1.1 航天复杂产品特点 .....                  | 200 |
| 9.1.2 航天复杂产品研制需求 .....                | 201 |
| 9.1.3 航天复杂产品集团企业云制造服务平台方案 .....       | 203 |
| 9.1.4 航天复杂产品集团企业云制造服务系统构建与应用 .....    | 218 |
| 9.2 轨道交通装备集团企业云制造应用案例 .....           | 228 |
| 9.2.1 轨道交通装备集团企业需求 .....              | 228 |
| 9.2.2 中国北车云制造服务平台建设目标和内容 .....        | 229 |
| 9.2.3 轨道交通装备集团企业云制造服务平台实施方案 .....     | 230 |
| 9.2.4 中国北车云制造系统实现效果 .....             | 236 |
| 9.3 本章小结 .....                        | 237 |
| 参考文献 .....                            | 237 |
| <b>第10章 面向中小企业的云制造应用案例</b> .....      | 239 |
| 10.1 支持业务协作的中小企业云制造应用案例 .....         | 239 |
| 10.1.1 需求分析 .....                     | 239 |
| 10.1.2 平台服务模式 .....                   | 240 |
| 10.1.3 实施方案 .....                     | 242 |
| 10.1.4 平台运营效果 .....                   | 247 |
| 10.2 支持产业集群协作的中小企业云制造应用案例 .....       | 247 |
| 10.2.1 中小企业产业集群协作需求分析 .....           | 247 |
| 10.2.2 服务模式 .....                     | 250 |
| 10.2.3 支持产业集群协作的中小企业云制造服务平台实施方案 ..... | 251 |
| 10.2.4 平台运营效果 .....                   | 262 |
| 10.3 本章小结 .....                       | 263 |
| 参考文献 .....                            | 263 |
| <b>第11章 云制造的发展与展望</b> .....           | 264 |
| 11.1 云制造的发展现状 .....                   | 264 |
| 11.1.1 云制造理论方法与关键技术研究现状 .....         | 264 |
| 11.1.2 云制造应用现状 .....                  | 266 |
| 11.2 云制造发展趋势 .....                    | 268 |
| 参考文献 .....                            | 269 |

# 第 1 章

## 云制造概念与内涵

### 1.1 云制造提出的背景

#### 1.1.1 制造业的发展

制造业是国民经济和国防安全的重要支柱,是一个国家的战略性产业。

本书所提及的制造,不仅仅是传统所理解的产品加工的活动与过程(即将原材料加工为成品),而是已经扩展为“大制造”的概念范畴。首先,其覆盖产品全生命周期的活动与过程“大”,包括从产品的论证、设计、仿真、加工生产、试验测试、定型、管理、运营、维护、服务到最终的报废处理中的各类信息、资源、能力的集成与优化活动与过程;其次,其制造活动的空间范围“大”,包括从企业内部,到企业之间,到产业集群之间,乃至全球的范围;第三,其制造类型“大”,包括机械、电子等离散制造业,石油、化工等流程(或连续)制造业以及钢材、食品等混合制造业。

近几十年来,在市场应用需求的牵引下,在先进制造技术与迅猛发展的信息技术持续深化融合的推动下,制造业正以前所未有的深度和广度向前发展,呈现出“全球化、精益化、专业化、服务化、绿色化、智能化”的发展趋势。全球化,即制造企业通过无所不在的网络建立面向全球的资源配置、设计生产和销售服务体系,突破了传统企业在地域上的界限,融入全球产业链,参与全球协作和市场竞争。精益化,即通过信息化的工艺管理模式、工艺配置和服务平台,实现企业的有效管控,优化业务流程和资源配置,强化运行细节管理和过程管理,实施企业高效精益运作,提高核心竞争力。专业化,即通过供应链和企业集群的专业分工协作,制造企业从“大而全”向“专而精”转变,依靠核心竞争力和优势资源,在价值链中寻找合适的定位,实现利润和附加值的最大化。服务化,即制造企业大幅提高服务能力,增加产品附加值,将以生产产品为主的盈利模式转变为以提供产品加服务为主的盈利模式。绿色化,即综合考虑环境影响和资源消耗,提高资源利用率,从以往的高能耗向低耗高效转变,实现

绿色设计与绿色生产。智能化,即充分利用信息技术和智能技术,实现产品和制造全系统与全过程的智能化和自动化。

### 1.1.2 中国制造业面临的挑战

改革开放以来,我国制造业发展迅速,正极大地带动着我国的经济的发展。当前,我国已经成为名副其实的全球制造业大国和世界工厂。2010年,我国制造业产出占全球总产出量的比重提升到19.8%以上,规模位居世界第一<sup>[43]</sup>;增加值接近12,000亿美元,位居世界第二<sup>[44]</sup>。但是,与美、德、日等制造强国比较,“大而不强”的问题仍十分突出,主要表现为:

(1) 自主创新能力不足。与国际先进制造企业相比,我国制造企业大多处于价值链低端,原始创新能力、设计研发能力不足。高端设备、关键零部件和元器件、关键材料严重依赖进口。我国制造业产业链和产业集群的协作能力和服务能力均处于较低水平。

(2) 制造业生产模式落后。全球制造业正在经历从“生产型”向“生产+服务型”的转变,欧美主要发达国家制造业中,服务比重已达20%以上,美国制造业中服务比重更是高达58%。而在中国,97.8%的制造型企业仍停留在纯产品生产加工阶段,没有任何的增值服务,中国制造需要从“卖产品”向“卖产品加服务”转变。

(3) 制造资源利用率低下。2010年的一项问卷调查显示,中国制造业的生产设备利用率仅有70%到75%,而在一些基本原料领域生产部门,闲置率甚至会高达50%,资源浪费十分惊人。而与此同时,许多中小企业因投入不足,生产设备非常落后,制造资源需要整合、共享和优化。

(4) 对环境破坏严重。在我国,制造业是对环境造成破坏最严重的行业之一,造成这种破坏的原因来自很多方面,其中,落后的观念、产业结构、制造技术以及生产、运输、维护、销毁等诸多环节的粗放管理,都是造成制造业污染严重的重要原因。

面对上述挑战,我国制造业必须探索、培育新型、持续发展的制造模式与手段,加快经济发展方式转变、促进制造业转型升级;迫切需要持续推进以“工业化与信息化融合”为特征的“制造业信息化”,使我国制造企业从“生产型制造”向“生产加服务型制造”转变,从价值链的低端向价值链高端转变,实现高效、优质、低耗、绿色的制造,持续提高企业核心竞争力,逐步完成我国从制造大国迈向制造强国的宏伟目标。

### 1.1.3 制造业信息化的内涵

制造业信息化是一项复杂、战略的系统工程,是我国实现工业现代化道路的重要组成部分,是实现从制造大国向制造强国迈进、从中国制造向中国创造转变的战略举措。

制造业信息化的指导思想:与时俱进,从十六大提出的“信息化带动工业化”到十七大提出的“工业化和信息化两化融合”及目前十八大提出的“工业化和信息化两化深度融合”。

制造业信息化的实现途径:将新兴信息(采集、传递、加工、处理、应用)技术、先进(大)制造(设计/生产/管理/试验及其集成)技术及产品有关专业技术等三类技术融合运用于产品研制的全系统、全生命周期过程,实现可持续发展的制造新模式与新技术手段。

制造业信息化的工作内容:通过上述技术手段,使企业(或集团)全系统、全生命周期活动中的人/组织、经营管理、技术/设备(三要素)及信息流、物流、资金流、知识流、服务流(五流)集成优化,进而改善产品(P)及其开发时间(T)、质量(Q)、成本(C)、服务(S)、环境清洁(E)和知识含量(K),实现高效、优质、低耗、绿色制造。

制造业信息化的目标:提高企业(或集团)的敏捷性、柔性及健壮性,以达到增强企业(或集团)的市场竞争能力。

经过多年的实践,我国制造领域许多专家们对制造业信息化技术发展趋势的认识可以用“八化”来概括,分别是“数字化、网络化、集成化、协同化、敏捷化、服务化、绿色化、智能化”。其中,从“八五”到“十一五”,我国制造业信息化主要关注于“数字化、网络化、集成化、协同化”,并取得了令人瞩目的成绩<sup>[40]</sup>。当前,在“数字化、集成化、协同化、网络化”的基础上,“敏捷化、服务化、绿色化、智能化”正成为制造业核心竞争力的关键因素。

“敏捷化、服务化、绿色化、智能化”分别对应于“敏捷制造、服务制造、绿色制造、智能制造”,其中,敏捷制造致力于灵活组织制造资源与能力,快速响应市场需求;服务制造致力于推动制造企业从以“产品”为主导的盈利模式向以“产品及服务”为主导的盈利模式的转变;绿色制造致力于提高资源利用率,降低能源消耗,减少污染物排放,实现可持续发展;智能制造致力于通过知识、智能科学等技术,提高制造资源、能力构建、运行、评估的智能化,支持探索新规律、创立新学说、积累新知识、创造新技术。“敏捷化、服务化、绿色化、智能化”正在为制造业信息化注入新的、更加丰富的内涵。

笔者团队于2009年提出了“云制造”的理念,并以制造中的“仿真”与“设计”为突破口,取得了阶段性的研究成果,继而在2010年1月在《计算机集成制造系统》杂志上发表了一篇文章为“云制造——面向服务的网络化制造新模式”的学术文章<sup>[15]</sup>。近几年来,在我国科技部等的领导和支持下,笔者团队进一步联合产、学、研、用等30余个单位,开展了以集团级和中小企业群的云制造为背景的技术研究与应用工作,目前已取得了阶段性成果,本书将介绍这些阶段成果。我们的实践表明,云制造是制造业信息化的一种新模式和新技术手段,云制造的研究与应用将会促进我国制造业向“产品”加“服务”为主导的经济增长方式的转变,加速推进我国“制造业信息化”,进一步加强“数字化、网络化、集成化、协同化”,并向“敏捷化、绿色化、智能化、服务化”方向发展,进而加快我国制造业实现高效、优质、低耗、绿色制造,促进我国从制造大国向制造强国迈进。

## 1.2 云制造的概念

云制造是在制造业应用持续需求牵引以及新兴信息技术与制造技术深度融合的推动下,提出的一种新的制造业信息化模式与技术手段。

### 1.2.1 云制造定义

云制造是一种基于网络的、面向服务的智慧化制造新模式和手段,它融合发展了现有信息化制造(信息化设计、生产、实验、仿真、管理、集成)技术与云计算、物联网、服务计算、智能科学、高效能计算等新兴信息技术,将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化,构成制造资源和制造能力的云服务池,并进行统一的、集中的优化管理和经营,从而用户只要通过云端就能随时随地按需获取制造资源与能力服务,进而智慧地完成其制造全生命周期的各类活动<sup>[15-17]</sup>。

基于云制造模式和手段所构成的系统称为云制造系统或制造云,它是一种基于各类网络(组合)的、人/机/物/环境/信息深度融合的、提供制造资源与能力服务的智慧化制造务联网。云制造服务平台是云制造系统中支持各类制造资源和能力的感知与接入,虚拟化,服务

化,以及综合管理和按需使用的支撑环境和工具集,是云制造系统的核心(详见第2章)。

## 1.2.2 云制造服务对象与内容

### 1. 云制造的服务对象

云制造的服务对象包含两类,一类是制造企业用户,一类是制造产品用户,具体如下:

(1) 制造企业用户。传统的信息化主要是面向企业内部的业务管理,缺乏对企业间各类往来业务协作的有效支持。而云制造提供的是一种全新的产业生态环境,提供面向制造企业用户的多租户服务支持,将企业推到云端,突破企业在资源环境和能力上的束缚,实现面向全球的企业资源与能力的互联,使企业在云端可以基于网络按需获取和配置自己所需的制造资源和制造能力或提供制造资源和制造能力服务,以敏捷响应市场、降低产品成本,提高企业市场竞争能力。

(2) 制造产品用户。云制造面向的是制造全生命周期产业链的各个环节,包括研发环节、采购环节、生产环节、营销环节、服务环节,其中,服务环节针对的就是制造产品用户(这里有企业也有个人)。云计算、物联网等新兴信息技术的应用,给服务环节的完善和提升带来了巨大的发展机遇,可有效提升产品和服务的智能化水平,支持产品的接入感知、健康状态管理以及远程维护诊断等,为产品用户按需提供定制化的增值服务。

### 2. 云制造的服务内容<sup>[16]</sup>

在制造产品全生命周期活动中,云制造的服务内容可以分为云制造资源服务及云制造能力服务两类内容。云制造资源服务内容包括软制造资源服务 MSaaS(manufacturing soft resource as a service),如制造过程中的各种模型、(大)数据、软件、信息、知识等及硬制造资源服务 MHSaaS(manufacturing hard resource as a service),如制造生产加工硬设备(如机床、机器人、加工中心)、计算设备、仿真试验设备、测试设备等。云制造能力服务内容包括论证能力为服务、设计能力为服务、仿真能力为服务、生产加工能力为服务、试验能力为服务、经营管理能力为服务、运营能力为服务、维修能力为服务、集成能力为服务等。能力服务的具体地体现如下:

(1) 论证为服务 AaaS(argumentation as a service)。对于产品规划、发展战略等企业论证业务,云制造服务平台将(成本、进度、风险等)决策分析软件等软制造资源封装为云服务,并提供用于辅助决策分析的模型库、知识库、数据库作为支持,帮助制造企业用户对各种概念产品、规划方案的可行性与预期效果进行论证分析。另外,制造企业用户如果对论证这块业务不是很擅长的话,也可以直接在制造云中寻找到合适的论证能力服务,通过电子化的方式达成交易,委托其协助进行论证。

(2) 设计为服务 DaaS(design as a service)。对于产品的设计过程,当用户需要计算机辅助设计工具时,云制造服务平台可将各种 CAD、CAE 软件功能封装为云服务以批作业或者虚拟桌面等方式提供给用户。在产品的设计过程中,三维可视化、复杂分析计算等往往需要高效能计算条件,制造云中整合了高效能计算资源,可以动态构建相应的渲染和分析的支撑环境。制造云也提供了设计能力服务,企业可以将外观设计、子系统设计等外包给制造云中专业的设计能力。随着众包设计的兴起,制造云中的产品研发社区可以整合全球范围内的专业能力,通过竞争和协作的方式提供整体式产品设计方案。

(3) 仿真为服务 SimaaS(simulation as a service)。产品的虚拟样机仿真和半实物仿真

需要大量软硬仿真资源的支持,云制造服务平台可根据仿真任务的需求,动态构建虚拟化的仿真环境,将所需的计算资源、各种专业仿真软件、仿真模型和仿真数据等封装为云仿真服务,支持在广域网范围内和在高效能计算环境内开展联合仿真。对于仿真专用的半实物设备,能够提供远程使用、监控服务,使得用户无需关心设备的具体位置。同上,用户如果对仿真这块业务不是很擅长的话,可以利用制造云中的仿真能力服务完成产品仿真。

(4) 生产加工为服务 FaaS(fabrication as a service)。产品的生产加工过程需要各种硬制造资源和软制造资源的配合,云制造服务平台能够根据生产加工任务需求快速构建一个虚拟生产单元,其中包括了所需的物料以及机床、加工中心等硬制造设备,也包括了制造执行系统软件、知识库和过程数据库等软制造资源。云制造服务平台可以提供诸如生产物流跟踪、任务作业调度、设备状态采集和控制等云服务资源,辅助用户对生产加工过程的监控与管理。同上,用户如果对生产加工这块业务不是很擅长的话,可以利用制造云中的外包生产加工能力服务完成企业用户的产品生产加工。

(5) 试验为服务 EaaS(experiment as a service)。对于产品的试制和试验过程,云制造服务平台能够根据实验所需的软硬资源建立一个虚拟实验室,其中封装了各种用于实验分析的软件功能作为云服务,同时也提供了对于部分试制设备、检测设备、试验平台等硬制造资源的远程接入和使用服务。制造能力的试验服务对于单个产业来说具有一定的共性,在制造云中作为产业配套服务进行提供,可有效降低产业的发展成本。实验的数据分析是一项重要的增值服务,制造企业用户也可外包给制造云中的专业能力服务来高效完成。

(6) 管理为服务 MaaS(management as a service)。在企业的制造全生命周期过程中,对于各项经营管理活动如销售管理、客户关系管理、供应链管理、生产计划管理等业务,云制造服务平台能够提供云端客户关系管理(CRM)、云端供应链管理(SCM)、云端企业资源规划(ERP)等资源和能力服务,用户可以根据不同的管理需求定制个性化的业务流程,实行企业外部协作和内部管理、核心业务无缝衔接,支持构建虚实结合的数字化企业。通过这些服务,可以对制造企业用户的供应商和分销渠道等环节的能力进行有效管理。

(7) (产品)运营为服务 OpaaS(operation as a service)。运营为服务属于面向制造产品用户的重要环节,包括产品运输、安装、培训、咨询、改进、应用、金融等增值服务,当然其中既包括资源服务也包括能力服务。以改进和应用为例,云制造服务平台可将相应的服务能力整合到它的社区当中,对于电子产品来说提供各种应用下载,对于汽车等工具来说提供各种饰品定制,对于机床等装备来说提供各种数控编程。对于产品的市场运营来说,融资租赁等配套产业服务也是重要的盈利点,并可通过制造云来提供服务

(8) (产品)维修为服务 ReaaS(repair as a service)。维修为服务既是面向制造产品用户也是面向制造企业用户的服务内容,包括维护保养、备品备件供应、故障诊断/修理、回收再制造等服务。随着物联技术的发达,制造产品健康监测、故障诊断等资源服务可以通过制造云远程提供。对于制造产品用户,可以通过云制造服务平台来优选备品备件供应和保养/修理等能力服务;对于制造企业用户,可以通过云制造服务平台在广域范围快速建立备品备件供应和维修保障渠道,并对服务链进行有效的监控和管理。

(9) 集成为服务 InaaS(integration as a service)。集成为服务分为通用性的集成资源服务和实施系统集成的集成能力服务。经过云化改造以后的企业应用集成(EAI)、协同仿真支撑(COSIM)、多学科集成优化(MDO)、数据驱动 workflows 等资源集成服务可有效支持制

造云中各类服务的重构与组合。对于一个大型的集团企业或者虚拟企业联盟,集成工作是一个复杂的系统工程,需要委托制造云中的集成能力进行全面实施。

### 1.2.3 “云制造”的概念模型

如图 1.1 所示,云制造中的用户角色主要有三种,即资源提供者、制造云运营者、资源使用者。资源提供者通过对产品全生命周期过程中的制造资源和制造能力进行感知、虚拟化接入,以服务的形式提供给第三方运营平台(制造云运营者);制造云运营者主要实现对云服务池中的服务(即云服务,在不引起歧义的情况下,可简称为服务)的高效管理、运营等,可根据资源使用者的应用请求,动态、灵活地为资源使用者提供服务;资源使用者能够在制造云运营平台的支持下,动态按需地使用各类应用服务(接出),并能实现多主体的协同交互。在制造云运行过程中,知识/智慧起着核心支撑作用,知识/智慧不仅能够为制造资源和制造能力的虚拟化接入和服务化封装提供支持,还能为实现基于云服务的高效管理和智能查找等功能提供支持<sup>[17-18]</sup>。

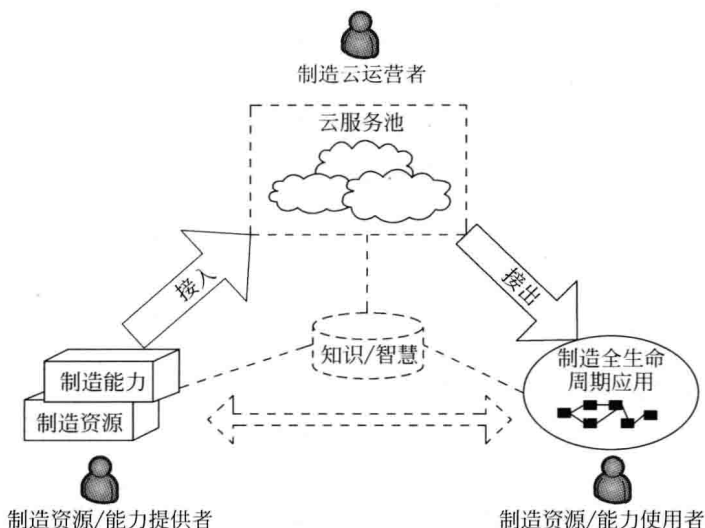


图 1.1 云制造概念模型

### 1.2.4 “云制造”的应用模式

从支持制造全生命周期过程角度,可分为四种典型应用模式,即:①支持单主体(单租户)完成某阶段制造(如设计);②支持多主体(多租户)协同完成某阶段制造(如多学科协同设计);③支持多主体(多租户)协同完成跨阶段制造(如设计与生产加工跨阶段制造);④支持多主体(多租户)按需获得制造能力(如设计能力、加工能力等)。

从云制造实施主体角度,可分为三种类型,即企业云、行业(区域)云和混合云。①企业云(也称为私有云,见图 1.2),它基于企业或集团内部网络构建,主要强调企业内或集团内制造资源和制造能力整合与服务,优化企业或集团资源和能力使用率,减少重复资源和能力的重复建设,降低成本,提高竞争力。②行业(区域)云(也称为公有云,见图 1.3),它基于“公用网”(如互联网、物联网)构建,主要强调企业间制造资源和制造能力整合,提高整个社会