

智能制造系列教材

制造系统中的 信息集成技术

INFORMATION INTEGRATION
TECHNOLOGY IN MANUFACTURING SYSTEM

张智海 杨建新 主编
朱峰 李璠 黄毅 孙林 马俊杰 副主编



清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

制造系统中的信息集成技术/张智海,杨建新主编. —北京:清华大学出版社,2023.9
(智能制造系列教材)

ISBN 978-7-302-64252-7

I. ①制… II. ①张… ②杨… III. ①集成制造系统—教材 IV. ①TP278

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 138304 号

责任编辑:刘 杨

封面设计:李召霞

责任校对:薄军霞

责任印制:刘海龙

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:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:小森印刷霸州有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:9.5

字 数:185 千字

版 次:2023 年 10 月第 1 版

印 次:2023 年 10 月第 1 次印刷

定 价:32.00 元

产品编号:096803-01

智能制造系列教材编审委员会

主任委员

李培根 雒建斌

副主任委员

吴玉厚 吴 波 赵海燕

编审委员会委员(按姓氏首字母排列)

陈雪峰	邓朝晖	董大伟	高 亮
葛文庆	巩亚东	胡继云	黄洪钟
刘德顺	刘志峰	罗学科	史金飞
唐水源	王成勇	轩福贞	尹周平
袁军堂	张 洁	张智海	赵德宏
郑清春	庄红权		

秘书

刘 杨

多年前人们就感叹,人类已进入互联网时代;近些年人们又惊叹,社会步入物联网时代。牛津大学教授舍恩伯格(Viktor Mayer-Schönberger)心目中大数据时代最大的转变,就是放弃对因果关系的渴求,转而关注相关关系。人工智能则像一个幽灵徘徊在各个领域,兴奋、疑惑、不安等情绪分别蔓延在不同的业界人士中间。今天,5G 的出现使得作为整个社会神经系统的互联网和物联网更加敏捷,使得宛如社会血液的数据更富有生命力,自然也使得人工智能未来能在某些局部领域扮演超级脑力的作用。于是,人们惊呼数字经济的来临,憧憬智慧城市、智慧社会的到来,人们还想象着虚拟世界与现实世界、数字世界与物理世界的融合。这真是一个令人咋舌的时代!

但如果真以为未来经济就“数字”了,以为传统工业就“夕阳”了,那可以说我们就真正迷失在“数字”里了。人类的生命及其社会活动更多地依赖物质需求,除非未来人类生命形态真的变成“数字生命”了,不用说维系生命的食物之类的物质,就连“互联”“数据”“智能”等这些满足人类高级需求的功能也得依赖物理装备。所以,人类最基本的活动便是把物质变成有用的东西——制造!无论是互联网、物联网、大数据、人工智能,还是数字经济、数字社会,都应该落脚在制造上,而且制造是其应用的最大领域。

前些年,我国把智能制造作为制造强国战略的主攻方向,即便从世界上看,也是有先见之明的。在强国战略的推动下,少数推行智能制造的企业取得了明显效益,更多企业对智能制造的需求日盛。在这样的背景下,很多学校成立了智能制造等新专业(其中有教育部的推动作用)。尽管一窝蜂地开办智能制造专业未必是一个好现象,但智能制造的相关教材对于高等院校与制造关联的专业(如机械、材料、能源动力、工业工程、计算机、控制、管理……)都是刚性需求,只是侧重点不一。

教育部高等学校机械类专业教学指导委员会(以下简称“机械教指委”)不失时机地发起编著这套智能制造系列教材。在机械教指委的推动和清华大学出版社的组织下,系列教材编委会认真思考,在 2020 年新型冠状病毒感染疫情正盛之时进行视频讨论,其后教材的编写和出版工作有序进行。

编写本系列教材的目的是为智能制造专业以及与制造相关的专业提供有关智能制造的学习教材,当然教材也可以作为企业相关的工程师和管理人员学习和培

训之用。系列教材包括主干教材和模块单元教材,可满足智能制造相关专业的基础课和专业课的需求。

主干教材,即《智能制造概论》《智能制造装备基础》《工业互联网基础》《数据技术基础》《制造智能技术基础》,可以使学生或工程师对智能制造有基本的认识。其中,《智能制造概论》教材给读者一个智能制造的概貌,不仅概述智能制造系统的构成,而且还详细介绍智能制造的理念、意识和思维,有利于读者领悟智能制造的真谛。其他几本教材分别论及智能制造系统的“躯干”“神经”“血液”“大脑”。对于智能制造专业的学生而言,应该尽可能必修主干课程。如此配置的主干课程教材应该是本系列教材的特点之一。

本系列教材的特点之二是配合“微课程”设计了模块单元教材。智能制造的知识体系极为庞杂,几乎所有的数字-智能技术和制造领域的新技术都和智能制造有关,不仅涉及人工智能、大数据、物联网、5G、VR/AR、机器人、增材制造(3D 打印)等热门技术,而且像区块链、边缘计算、知识工程、数字孪生等前沿技术都有相应的模块单元介绍。本系列教材中的模块单元差不多成了智能制造的知识百科。学校可以基于模块单元教材开出微课程(1 学分),供学生选修。

本系列教材的特点之三是模块单元教材可以根据各所学校或者专业的需要拼合成不同的课程教材,列举如下。

课程例 1——“智能产品开发”(3 学分),内容选自模块:

- 优化设计
- 智能工艺设计
- 绿色设计
- 可重用设计
- 多领域物理建模
- 知识工程
- 群体智能
- 工业互联网平台

课程例 2——“服务制造”(3 学分),内容选自模块:

- 传感与测量技术
- 工业物联网
- 移动通信
- 大数据基础
- 工业互联网平台
- 智能运维与健康管理

课程例 3——“智能车间与工厂”(3 学分),内容选自模块:

- 智能工艺设计
- 智能装配工艺

- 传感与测量技术
- 智能数控
- 工业机器人
- 协作机器人
- 智能调度
- 制造执行系统(MES)
- 制造质量控制

总之,模块单元教材可以组成诸多可能的课程教材,还有如“机器人及智能制造应用”“大批量定制生产”等。

此外,编委会还强调应突出知识的节点及其关联,这也是此系列教材的特点。关联不仅体现在某一课程的知识节点之间,也表现在不同课程的知识节点之间。这对于读者掌握知识要点且从整体联系上把握智能制造无疑是非常重要的。

本系列教材的编著者多为中青年教授,教材内容体现了他们对前沿技术的敏感和在一线的研发实践的经验。无论在与部分作者交流讨论的过程中,还是通过对部分文稿的浏览,笔者都感受到他们较好的理论功底和工程能力。感谢他们对这套系列教材的贡献。

衷心感谢机械教指委和清华大学出版社对此系列教材编写工作的组织和指导。感谢庄红权先生和张秋玲女士,他们卓越的组织能力、在教材出版方面的经验、对智能制造的敏锐性是这套系列教材得以顺利出版的最重要因素。

希望本系列教材在推进智能制造的过程中能够发挥“系列”的作用!



2021 年 1 月

制造业是立国之本,是打造国家竞争能力和竞争优势的主要支撑,历来受到各国政府的高度重视。而新一代人工智能与先进制造深度融合形成的智能制造技术,正在成为新一轮工业革命的核心驱动力。为抢占国际竞争的制高点,在全球产业链和价值链中占据有利位置,世界各国纷纷将智能制造的发展上升为国家战略,全球新一轮产业升级和竞争就此拉开序幕。

近年来,美国、德国、日本等制造强国纷纷提出新的国家制造业发展计划。无论是美国的“工业互联网”、德国的“工业 4.0”,还是日本的“智能制造系统”,都是根据各自国情为本国工业制定的系统性规划。作为世界制造大国,我国也把智能制造作为推进制造强国战略的主攻方向,并于 2015 年发布了《中国制造 2025》。《中国制造 2025》是我国全面推进建设制造强国的引领性文件,也是我国实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领。推进建设制造强国,加快发展先进制造业,促进产业迈向全球价值链中高端,培育若干世界级先进制造业集群,已经成为全国上下的广泛共识。可以预见,随着智能制造在全球范围内的孕育兴起,全球产业分工格局将受到新的洗礼和重塑,中国制造业也将迎来千载难逢的历史性机遇。

无论是开拓智能制造领域的科技创新,还是推动智能制造产业的持续发展,都需要高素质人才作为保障,创新人才是支撑智能制造技术发展的第一资源。高等工程教育如何在这场技术变革乃至工业革命中履行新的使命和担当,为我国制造企业转型升级培养一大批高素质专门人才,是摆在我们面前的一项重大任务和课题。我们高兴地看到,我国智能制造工程人才培养日益受到高度重视,各高校都纷纷把智能制造工程教育作为制造工程乃至机械工程教育创新发展的突破口,全面更新教育教学观念,深化知识体系和教学内容改革,推动教学方法创新,我国智能制造工程教育正在步入一个新的发展时期。

当今世界正处于以数字化、网络化、智能化为主要特征的第四次工业革命的起点,正面临百年未有之大变局。工程教育需要适应科技、产业和社会快速发展的步伐,需要有新的思维、理解和变革。新一代智能技术的发展和全球产业分工合作的新变化,必将影响几乎所有学科领域的研究工作、技术解决方案和模式创新。人工智能与学科专业的深度融合、跨学科网络以及合作模式的扁平化,甚至可能会消除某些工程领域学科专业的划分。科学、技术、经济和社会文化的深度交融,使人们

可以充分使用便捷的软件、工具、设备和系统,彻底改变或颠覆设计、制造、销售、服务和消费方式。因此,工程教育特别是机械工程教育应当更加具有前瞻性、创新性、开放性和多样性,应当更加注重与世界、社会和产业的联系,为服务我国新的“两步走”宏伟愿景做出更大贡献,为实现联合国可持续发展目标发挥关键性引领作用。

需要指出的是,关于智能制造工程人才培养模式和知识体系,社会和学界存在多种看法,许多高校都在进行积极探索,最终的共识将会在改革实践中逐步形成。我们认为,智能制造的主体是制造,赋能是靠智能,要借助数字化、网络化和智能化的力量,通过制造这一载体把物质转化成具有特定形态的产品(或服务),关键在于智能技术与制造技术的深度融合。正如李培根院士在丛书序1中所强调的,对于智能制造而言,“无论是互联网、物联网、大数据、人工智能,还是数字经济、数字社会,都应该落脚在制造上”。

经过前期大量的准备工作,经李培根院士倡议,教育部高等学校机械类专业教学指导委员会(以下简称“机械教指委”)课程建设与师资培训工作组联合清华大学出版社,策划和组织了这套面向智能制造工程教育及其他相关领域人才培养的本科教材。由李培根院士和雒建斌院士、部分机械教指委委员及主干教材主编,组成了智能制造系列教材编审委员会,协同推进系列教材的编写。

考虑到智能制造技术的特点、学科专业特色以及不同类别高校的培养需求,本套教材开创性地构建了一个“柔性”培养框架:在顶层架构上,采用“主干教材+模块单元教材”的方式,既强调了智能制造工程人才必须掌握的核心内容(以主干教材的形式呈现),又给不同高校最大程度的灵活选用空间(不同模块教材可以组合);在内容安排上,注重培养学生有关智能制造的理念、能力和思维方式,不局限于技术细节的讲述和理论知识的推导;在出版形式上,采用“纸质内容+数字内容”的方式,“数字内容”通过纸质图书中列出的二维码予以链接,扩充和强化纸质图书中的内容,给读者提供更多的知识和选择。同时,在机械教指委课程建设与师资培训指导组的指导下,本系列书编审委员会具体实施了新工科研究与实践项目,梳理了智能制造方向的知识体系和课程设计,作为规划设计整套系列教材的基础。

本系列教材凝聚了李培根院士、雒建斌院士以及所有作者的心血和智慧,是我国智能制造工程本科教育知识体系的一次系统梳理和全面总结,我谨代表机械教指委向他们致以崇高的敬意!

赵继

2021年3月

前言

PREFACE

集成化系统建设是制造行业发展的重要工作和必备工程。企业单一业务体系的发展建设已跟不上制造行业转型升级的步伐,建设打破“自动化孤岛、数据孤岛、应用孤岛”的信息集成系统,是当前制造行业的重点和难点问题。

随着信息化的发展,信息集成技术日新月异,智能制造、工业 4.0、工业互联网等制造系统得以快速发展。依托信息集成技术形成的制造一体化体系为降低成本、提升制造效率、提高生产质量奠定了一定的基础,为制造行业转型升级提供了重要帮助,也成为推动经济社会发展的新引擎。

目前,对于企业管理人员、业界实践者、学生及学者而言,缺乏针对智能制造系统中信息集成技术相关的教材书籍。同时,对其而言,短时间内快速地了解 and 掌握制造系统中信息集成技术的相关知识,几乎是不可能的。因此,亟须编写一套涵盖智能制造系统中信息集成技术理论、应用和实践分析的教材。作者基于日常科研工作中对智能制造、信息集成技术的理解和研究,系统地归纳、介绍和分析了制造系统中信息集成的技术、标准、维度(跨产品端到端集成、纵向集成、横向集成)和应用。本书囊括了可以促使读者对制造系统中信息集成技术具有详备理解的理论内容,并且结合制造系统信息集成的实践经验,针对制造系统中的信息集成技术给出了从宏观到微观的全面视图。

本书不仅参考了国内外这一研究领域前沿的学术成果,还邀请了目前产业界较为活跃的几位企业专家进行相关内容的编写,使读者在学习的同时也能够了解产业界最新的技术发展动态。

本书可作为机械自动化、工业工程等智能制造相关专业的模块单元教材,亦可作为计算机科学与技术、各类工程学科的辅修教材。此外,本书也适用于企业技术部门、管理部门相关人员使用,便于其快速了解制造系统中信息集成技术的基础知识和典型应用。

本书第 1 章、第 9 章由清华大学张智海副教授编写,第 2 章、第 6 章由北京力赢数字智能科技有限公司联合创始人兼 CEO 黄毅编写,第 3 章由清华大学杨建新副教授和梁雄讲师编写,第 4 章由清华大学朱峰讲师编写,第 5 章由清华大学李璠讲师编写,第 7 章由德曦(南京)咨询有限公司首席顾问孙林编写,第 8 章由上海李数科技公司创始人 CEO 马俊杰编写。同时感谢和利时集团公司赵赫楠总监、麦肯

锡中国公司李铁良总监对第 4 章内容编写的支持;感谢智奇铁路设备有限公司和沧州新兴新材料有限公司为第 9 章的编写提供案例支持;感谢清华大学张延滋博士,博士研究生龚海磊、刘冲、黄森、刘晓航、李兆恩,本科生张岳伟等,对全书内容的整理编辑。

感谢张秋玲编审对智能制造系列教材的策划和推进,感谢清华大学出版社为此系列教材出版所做的重大贡献,感谢刘杨编辑为本书出版付出的努力。

鉴于作者对制造系统中信息集成技术的理解和认知有限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正。

张智海

2022 年 9 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 制造系统信息集成概述	1
1.1 制造系统	1
1.1.1 现代制造系统的研究现状	1
1.1.2 现代制造系统的未来发展趋势	2
1.2 计算机集成制造系统	3
1.2.1 CIMS 的概念	3
1.2.2 CIMS 的组成	3
1.2.3 CIMS 的效益	4
1.3 智能制造系统	4
1.4 制造系统信息集成的必要性	5
1.4.1 消除信息孤岛	5
1.4.2 确保软硬件集成工作	6
1.4.3 实现信息融合	6
1.5 制造系统信息集成的三个维度	7
1.5.1 产品生命周期端到端集成	7
1.5.2 制造系统纵向集成	8
1.5.3 制造系统横向集成	9
1.6 制造系统信息集成的五个层次	9
1.6.1 数据源层	9
1.6.2 网络通信层	10
1.6.3 信息建模与语义层	10
1.6.4 业务流程层	11
1.6.5 系统集成层	11
习题	12
参考文献	12

第 2 章 制造系统信息集成的关键技术	14
2.1 信息集成总体框架技术	14
2.2 数据建模与表达技术	14
2.2.1 关系模型	15
2.2.2 文档模型	15
2.2.3 图状模型	16
2.2.4 分析场景的数据模型	17
2.2.5 时序场景的数据模型	17
2.3 数据通信技术	18
2.3.1 工业现场总线	18
2.3.2 工业以太网	19
2.3.3 工业无线	20
2.3.4 OPC UA	20
2.4 业务流程数字化技术	21
2.4.1 业务流程建模语言	21
2.4.2 工作流引擎	23
2.4.3 机器人流程自动化	23
2.4.4 流程挖掘	24
2.5 数据安全技术	24
2.5.1 网络基础安全	24
2.5.2 数据传输安全	25
2.5.3 数据存储安全	25
2.5.4 数据使用安全	26
2.5.5 数据交换安全	26
2.5.6 工控系统安全	26
2.6 数据集成技术	27
2.6.1 点对点数据集成	27
2.6.2 总线式数据集成	28
2.6.3 微服务数据集成	28
2.6.4 离线批量数据集成	29
2.6.5 实时流式数据集成	29
2.6.6 数据湖式数据集成	30
本章拓展阅读	30
习题	30
参考文献	30

第 3 章 制造系统信息集成的相关标准	32
3.1 设备互联标准	32
3.1.1 OPC/OPC UA	32
3.1.2 MTConnect 与 NC-Link	34
3.1.3 IPC 互联工厂数字交换	37
3.2 产品数据交换标准 STEP	38
3.3 BOM 集成标准	40
3.4 自动化领域工程数据交换标准 AML	42
3.5 IEEE 工业自动化系统与集成	43
3.6 信息安全标准	45
习题	45
参考文献	46
第 4 章 自动化生产系统中的信息集成	47
4.1 自动化生产系统的主要构成	47
4.2 自动化生产系统信息集成的基本需求	52
4.3 DCS/SCADA 系统	54
4.4 DNC/MDC 系统	56
4.5 制造工厂的物联网应用	58
4.6 基于物联网的信息集成案例	62
4.7 基于 OPC 规范的信息集成案例	64
本章拓展阅读	66
习题	66
参考文献	67
第 5 章 面向产品生命周期的信息集成	68
5.1 PLM 系统概述	68
5.2 以 PDM/PLM 为中心的产品生命周期信息集成框架	70
5.2.1 产品生命周期信息集成	70
5.2.2 以 PDM 系统为中心的产品生命周期管理	72
5.3 BOM 多视图与信息集成	73
5.4 PDM/PLM 系统与其他系统的集成	78
5.5 PDM/PLM 系统信息集成案例	79
习题	81
参考文献	81

第 6 章 企业内部的纵向信息集成	82
6.1 企业内部的纵向集成框架	82
6.2 MES/MOM 在纵向集成中的地位	84
6.2.1 从 MES 到 MOM	84
6.2.2 MES/MOM 在数字化企业中的定位	85
6.2.3 MES/MOM 的技术架构演进	87
6.3 MES/MOM 与底层控制系统的信息集成	88
6.3.1 MES/MOM 与底层控制系统的连接技术	88
6.3.2 MES/MOM 与底层控制系统的技术	89
6.4 MES/MOM 与上层管理系统的信息集成	90
6.4.1 MES/MOM 与管理系统集成	90
6.4.2 MES/MOM 与智能算法集成	91
6.4.3 MES/MOM 与业务流程编排技术	92
本章拓展阅读	92
习题	92
参考文献	93
第 7 章 企业与外部的信息集成	94
7.1 外部信息集成的重要性	94
7.1.1 复杂供应网络的形成	94
7.1.2 竞争态势与数字化韧性运营	95
7.2 面向供应链的信息集成	97
7.2.1 供应链管理的定义	97
7.2.2 供应链网络布局及其信息集成	98
7.2.3 供应链计划管理及其信息集成	98
7.2.4 供应链物流管理及其信息集成	100
7.2.5 供应链采购管理及其信息集成	101
7.2.6 多系统间数据集成技术	103
7.3 面向工业互联网的信息集成	104
7.4 制造企业与客户的信息集成	105
本章拓展阅读	107
习题	107
参考文献	108
第 8 章 信息集成与数字孪生	109
8.1 数字孪生的概念与驱动要素	109

8.1.1 数字孪生的概念	109
8.1.2 数字孪生的五大驱动要素	109
8.2 数字孪生系统与产品集成	111
8.2.1 工业设备数字孪生系统架构	111
8.2.2 数字孪生产品全生命周期应用场景	112
8.3 数字孪生工厂与信息集成	115
8.3.1 工厂级数字孪生平台理念与架构	115
8.3.2 系统信息多源融合	116
8.3.3 工厂数字孪生平台功能应用	118
本章拓展阅读	121
习题	121
参考文献	121
第 9 章 信息集成技术应用案例	122
9.1 铁路设备智能检修系统	122
9.1.1 MES 总体介绍	122
9.1.2 数字孪生技术	123
9.1.3 自动化生产系统信息集成技术	127
9.2 智能球团车间信息集成技术	128
9.2.1 信息集成设计方案介绍	128
9.2.2 信息集成的关键技术	129
9.2.3 自动化生产系统中的信息集成	131
9.2.4 信息集成与数字孪生	132
本章拓展阅读	134
参考文献	134

第1章

制造系统信息集成概述

现代制造系统是信息物理相互融合的系统,由各种制造设备(硬件)和信息系统(软件)构成,是现代信息技术与制造技术相结合而产生的各种设备、技术、系统的总称^[1]。本章介绍与制造系统信息集成相关的概念,包括现代制造系统及信息集成的必要性及其内涵。

1.1 制造系统

1.1.1 现代制造系统的研究现状

1. 先进制造技术发展现状

随着信息技术的发展,制造技术与信息技术的结合成为现代机械制造的显著特点。现代制造系统将信息技术、制造技术与管理技术集成,应用于产品全生命周期的各个阶段,通过综合机械、计算机、自动化技术等,实现更精密、自动化程度更高、集成度更高的制造过程。制造业信息化主要通过实现数字化设计、数字化装备、数字化制造的开发应用^[2],带动产品设计方法和工具的创新,实现产品设计制造的数字化。

数字化设计解决方案是以三维设计为核心,结合产品设计过程的具体需求(如设备空间布局、人机工程校核等)而形成的一套解决方案。数字化装备是在传统机械装备中嵌入传感器、芯片、软件和其他信息元器件,从而形成机械技术与信息技术、机械产品与电子信息产品深度融合的装备或系统。数字化设备极大地推动了制造数字化、网络化和智能化的进程。数字化制造在虚拟现实、计算机网络、快速原型和机器人等技术的支撑下,根据用户的需求,迅速收集资源信息,对产品信息、工艺信息和资源信息进行分析、规划和重组,实现对产品设计和功能的仿真评估,进而快速生产出满足用户需求的产品。

2. 现代管理技术发展现状

现代制造系统的管理主要体现在数字化管理方面。通过工业互联网技术、大

数据技术、虚拟现实技术、计算机仿真技术和人工智能的应用^[3],基于信息物理系统(cyber-physical systems,CPS)的智能工厂逐渐取代传统工厂,成为现代制造系统的主要形式。

基于工业互联网、大数据分析的制造管理,在顾客服务模式和生产系统运维中发挥着日益重要的作用。一方面,通过大数据技术可以方便地实时收集、存储表征顾客行为的大数据,挖掘顾客偏好和潜在的行为模式,通过用户画像实现大批量定制化生产,提升顾客个性化服务体验;另一方面,遍布生产系统的各类传感器便捷、低成本地收集制造数据,预测设备的剩余使用寿命,并实时检测产品质量问题,实现制造系统的预防性维护和产品的全生命周期管理。

数字孪生技术作为实现物理与虚拟工厂交互融合的有效途径,利用来自机理模型、数字模型、传感器、运营管理系统等的多源数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多维度的仿真过程,在虚拟空间(信息空间)中完成虚实映射,从而反映相应实体装备、生产线、生产车间或生产网络的全生命周期过程。形成从分析到控制再到分析的闭合回路,进而优化制造系统。

随着人工智能技术应用的日益成熟,现代制造系统的“制造”逐渐向“智造”升级转化,人工智能为现代制造系统赋能,在故障诊断、生产排产、系统装配等领域都有广泛应用。

1.1.2 现代制造系统的未来发展趋势

现代制造系统的主要发展目标可概括为实现网络化、智能化、绿色化^[4]。

在网络化方面,为快速响应市场需求,企业可以通过制造系统的网络化,有效组织管理分散在各地的制造资源,开展覆盖产品全生命周期的企业间协同和各类资源的共享,设计网络化制造模式,构建网络化制造系统,制定网络化制造协议规范及知识共享平台等,从而高速度、高质量、低成本地为市场提供所需的产品和服务。

在智能化方面,随着信息化技术的发展,为了应对大量复杂的信息、瞬息万变的市场需求和小批量、多品种、高质量的产品需求,现代制造系统应实现信息驱动和生产柔性。其中越来越短的交货周期、越来越快的产品更迭速度、越来越复杂的产品功能结构、越来越高的生产柔性需求都给运营决策带来了极大挑战。通过人工智能为复杂生产系统的运作提供全方位的决策支持,实现具备自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能新型生产方式。

在绿色化方面,随着环境问题成为全球性问题,人类发展对现代制造系统提出了环保要求,由此催生了绿色、低碳制造等概念。在设计阶段,将可持续性纳入产品设计准则,从源头减少资源浪费和环境污染;在制造阶段,开发和应用节能技术,通过创新工艺减少污染物排放,助力碳达峰目标的实现;在产品生命周期结束阶段,进行产品规范化的回收处理,提高资源利用率,从而践行可持续发展的目标。

1.2 计算机集成制造系统

1.2.1 CIMS 的概念

1973年,美国约瑟夫·哈林顿(Joseph Harrington)博士在 *Computer Integrated Manufacturing* 一书中首先提出计算机集成制造(computer integrated manufacturing, CIM)的概念。CIM概念强调,企业作为各种生产活动和系统的统一有机体,需要从系统和全局角度出发,利用信息技术提高企业数据的采集、传递和加工处理能力,对制造系统进行全局优化,从而提高企业的整体效率和水平。CIM尤其重视信息流和物流的有机集成和管理运行^[5]。

计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system, CIMS)是基于CIM概念,利用计算机技术对生产制造过程中的管理、设计、制造等不同子系统进行集成而组成的系统。国家高技术研究发展计划(863计划)CIMS专家组将其定义为:“CIMS是通过计算机硬件和软件,综合运用现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术,将企业生产全部过程中有关的人、技术、经营管理三要素及其信息流与物料流有机集成并优化运行的复杂的大系统。”^[6]

随着科学技术的发展,计算机技术在制造业中的应用越来越广泛,针对经营决策、管理、产品设计、工艺规划等活动,出现了多种不同的子系统。如物料需求计划(MRP)系统、计算机辅助设计(CAD)系统、计算机辅助制造(CAM)系统、柔性制造系统(FMS)等。CIMS由这些子系统发展而来,在整个企业层面对这些子系统进行信息和功能的集成。

1.2.2 CIMS 的组成

从功能角度分析,CIMS主要包括四个功能子系统与两个支撑系统^[7]。其中,四个功能子系统包括管理信息子系统、产品设计与制造工程设计子系统、制造自动化或柔性制造子系统、质量保证子系统。两个支撑系统为计算机网络系统和数据库系统。上述各子系统之间会进行大量的信息交换。

从技术角度看,CIMS是一个跨学科的复杂大系统,是基于现代管理技术、制造技术、信息技术、计算机技术、自动化技术、系统工程技术的综合性系统。CIMS综合并发展了企业生产各环节相关的计算机辅助技术,例如,计算机辅助经营管理与决策技术(如管理信息技术、办公自动化技术、物料需求计划等),计算机辅助分析与设计技术(如计算机辅助设计、计算机辅助工艺规划等),计算机辅助建模、仿真、实验技术。

总之,CIMS强调在计算机网络和数据库支持下,实现制造系统各模块之间的协同工作。

1.2.3 CIMS 的效益

CIMS 在设计和实施过程中,要结合企业实际情况和制造特点,将企业的信息流和物流有效地集成起来,优化生产资源配置,以充分发挥企业生产能力,提高企业的经济效益^[8]。

(1) 在工程设计方面,可缩短产品的研发周期,提高产品的设计能力。设计结构精细、技术含量高、模块化程度高的产品,保证产品的设计速度,保障产品的设计质量,提高产品的更新升级速度。

(2) 在加工制造方面,CIMS 采用柔性制造单元或分布式数控等技术,可提高制造过程的柔性质量,并提高设备利用率,缩短产品制造周期,满足客户对产品小批量、多品种的生产需求,使企业生产更加高效化和自动化,提高生产能力。

(3) 在经营管理方面,CIMS 可使企业的经营决策与生产管理科学化。在市场竞争中,可保证产品报价的快速、准确、及时;在生产过程中,可有效发现生产瓶颈,平衡生产负荷,提高生产效率;在库存控制方面,可降低库存水平,减少资金和资源的占用。

总之,CIMS 通过计算机网络和数据库的支持,将企业的产品设计、加工制造、经营管理等方面的所有活动有效地集成起来,提高管理和生产效率,缩短开发周期,最终为企业带来更多的效益。然而,随着技术的进步和市场需求的变化,从 20 世纪末开始,CIMS 逐渐趋于沉寂,智能制造系统越来越受到各国的关注。

1.3 智能制造系统

智能制造系统(intelligent manufacturing system,IMS)是一种现代制造系统,它基于智能制造技术(intelligent manufacturing technology,IMT),综合应用人工智能、智能制造设备、现代管理技术、信息技术、自动化技术、系统工程理论与方法等,使整个企业制造系统中的各个子系统智能化,并使制造系统形成网络。

IMS 最主要的特征体现在工作过程中知识的获取、表达与使用方面。这一特征使 IMS 尤其强调信息与物理的深度融合,以及数据的获取、分析与应用,从而实现智能决策支持。具体而言,IMS 借助 CPS、集成知识工程、制造软件系统、机器人技术等,实现对专家知识的建模与自主学习,确保智能机器在没有人工干预的情况下进行生产。

与 CIMS 相比,IMS 强调制造系统的自组织、自学习和自适应能力^[9]。随着各种智能计算技术的发展,IMS 正在逐步向具有持续发展能力的自主式发展。根据信息技术水平及其与制造系统集成的程度,IMS 可以归纳为以下三种模型或范式。

(1) 数字化制造。数字化制造范式也称为第一代智能制造。自 20 世纪 80 年代出现以来,随着 CAD/CAM 等软件与制造系统的融合,IMS 可以迅速收集并分

析资源信息,实现对产品设计和功能的仿真及原型制造,进而快速生产出满足用户需求的产品。

(2) 数字网络化制造。第二代智能制造集成了互联网的应用。制造环境内部的网络化可以实现制造过程的集成,而制造环境与整个制造企业的网络化则可以实现制造环境与企业工程设计、管理信息系统等各子系统的集成。数字网络化IMS也日益成为当前的主流。

(3) 新一代智能化制造。智能技术赋予IMS更多“智能化”。人工智能(artificial intelligence, AI)与数字和网络技术的融合促进了IMS的战略突破,提升了决策效率。近年来提出的数字孪生、元宇宙等概念更是直接将物理世界与数字世界联系起来,使信息集成程度更高,IMS体现出更高的效率与柔性。

1.4 制造系统信息集成的必要性

信息集成(information integration)指的是系统中各个子系统和用户之间在信息传递过程中使用的信息均采用统一的标准、规范和编码,以保证信息含义的一致性,促进相关用户软件间的沟通、交流和有序工作。在制造系统中,为了共享大量独立异构信息源,为高层决策和组织提供全局视野,就需要运用信息集成技术来完成数据的整合工作^[10]。

对于制造系统来说,信息集成的必要性主要体现在三个方面:消除信息孤岛;确保软硬件集成工作;实现信息融合。

1.4.1 消除信息孤岛

信息孤岛指的是一个个相对独立的不同类型、不同学科的数字资源系统,由于各系统之间相互封闭,无法进行正常的信息交流^[11]。制造系统中的信息孤岛是一种常见现象。产生信息孤岛的原因有^[12]: ①需求不到位,前期的设计缺陷导致最终系统建设完成后不能满足需求; ②标准不统一,各子系统的数据库之间没有统一的信息编码,难以实现信息共享; ③管理孤岛,即由于职能划分,导致管理人员在决策和管理时缺乏全局观,形成管理孤岛。信息孤岛按类型可以划分为数据孤岛、系统孤岛、业务孤岛和管控孤岛^[12]。

信息孤岛的存在会产生多种危害^[12],由于没有统一的信息编码,会导致信息重复输入和多口采集,影响数据的实时性、一致性和正确性;信息孤岛无法实现信息的实时共享和及时反馈,影响业务和经营管理的顺利进行;信息孤岛会导致决策者缺乏全局观,进而影响操作和决策。

信息集成是消除信息孤岛的重要且有效的措施。需要对各子系统的数据库进行整合处理,确定统一的信息编码,保证信息结构和含义的一致性^[13-14],并避免数据冗余;同时还可以打破子系统间的信息壁垒,帮助决策者获得足够的决策信息

支持,建立一定全局观。

1.4.2 确保软硬件集成工作

制造系统中存在多种软件和硬件,为了保证系统正常、高效地运作,需要确保不同软件和硬件之间的信息传递和集成工作。制造系统中不同的工艺流程往往对应不同的软硬件设备,它们之间的交互较少,可能具备完全不同的信息协议和编码系统。在引进这类系统时,很难直接通过它们完成软硬件之间的交流和合作,彼此之间存在一定的交流壁垒;同时,由于制造系统各个部门对信息化的功能要求可能不同,彼此之间的信息化进程也不同步,造成系统规划和软硬件配置存在一定差异,这也导致信息共享难以实现^[15]。

当制造系统较为复杂时,使用的软硬件会越来越多,这时就需要通过信息集成消除不同软硬件之间的壁垒。信息集成可以将不同子系统中各自的软硬件设备进行信息编码、传递方式等的统一,实现不同子系统的交流协作,还可以统一存储所有子系统中需要的种种信息,减少信息传递、存储的维护成本。采用信息集成,还可以有效提升资源利用率,最大限度地深层次开发利用现有的信息资源。从硬件上看,将系统信息集成共享应用到有限的系统设备,可以节约企业的硬件投入^[15]。

1.4.3 实现信息融合

信息融合又称数据融合,也可以称作传感器信息融合或多传感器信息融合,是一个对从单个或多个信息源获取的数据和信息进行关联和综合,以对系统态势进行全面、及时评估的信息处理过程;该过程是对其评估和额外信息源需求评价进行持续提炼的过程,同时也是信息处理不断进行自我修正的过程,以获得结果的改善。

信息融合主要分为两类:信息物理融合和信息虚拟融合。信息物理融合指的是计算、通信和物理过程的高度集成,通过在物理设备中嵌入感知、通信和计算能力,实现对外部环境的分布式感知、可靠数据传输、智能信息处理,并通过反馈机制实现对物理过程的实时控制^[16]。信息虚拟融合也叫虚拟化,是指计算机软件在虚拟的基础上运行,是一种实现简化管理、优化资源的解决方案,通过把有限的固定资源根据不同需求进行重新规划,以实现利用率最大^[17]。

信息集成对于制造系统来说是十分重要且必要的一个环节。通过信息集成可以完成对所有子系统之间信息的统一和标准化处理,可以构建统一的编码体系,可以消除系统中的信息孤岛,可以保证不同子系统中软硬件的集成工作,还可以实现信息物理融合与信息虚拟融合。利用信息集成,可以帮助高层决策者和管理者获得足够的信息支撑,帮助他们做出更加智能、全局最优的决策。

1.5 制造系统信息集成的三个维度

在先进制造与新一代信息技术融合的背景下,制造系统将贯穿设计、生产、管理、服务等多个重要环节,并集成横向、纵向制造流程的端到端信息和关键运营内容,形成智能制造中核心元素的有效组合。企业级制造系统的基本框架囊括多维度的数据信息,制造信息集成的实现需要集成其中多维度的制造流程信息数据,主要分为产品生命周期端到端集成、制造系统纵向集成和制造系统横向集成三个核心维度。

1.5.1 产品生命周期端到端集成

信息集成的第一个维度是基于产品全生命周期的信息集成。产品的全生命周期贯穿“产品设计、制造生产、物流配送、终端销售、售后服务”等一系列紧密相关的具有信息交互价值的关键环节。不同的产品类别、行业属性会导致产品生命周期的差异性,相关制造系统的信息集成更需要分析不同关键周期阶段对制造系统的影响程度,进行该维度下的信息集成。因此,集成产品全生命周期信息的核心在于对不同产品生命周期的分析,并集成多端信息进行关键制造信息集成,从而实现先进生产技术的飞跃。下面主要阐释该维度下的“产品全生命周期分析”“端到端集成”两类核心内容。

1. 信息时代产品全生命周期分析

产品的生命周期包括从“产品设计”到“售后服务”的全阶段运营内容,“是产品从进入市场开始,直到最终退出市场所经历的市场生命循环过程”^[18]。面对智能制造中出现的新需求,从制造系统集成的视角看,生命周期不同阶段存在不同的内涵。

(1) 产品设计阶段:工业4.0时代信息采集、集成技术的发展,促使产品设计成为一种更重要的策略工具,从而提升产品制造的情感价值,对不同类型用户产生不同程度的吸引力,进而增加产品的综合价值。

(2) 产品生产阶段:产品生产阶段主要包括产品的加工、运送、装配、检验等过程。产品生产阶段既容纳了纵向不同制造部门的核心业务,又包含横向多类型企业的关键运营环节。需要集成多端信息,实现高精度、即时需求建模、高效流程化生产方式。

(3) 产品物流阶段:产品物流阶段主要是指从产品制造产地向各级供应商/用户实体流动的过程。物流信息对产品生产计划、库存管理、原材料供应等关键管理决策问题具有显著影响,高效的物流信息集成能够改善产品生产流程,进一步实现高质量的产品智能制造。

(4) 销售-服务阶段: 产品销售-服务阶段综合了产品从企业转移至用户端的过程, 以及用户使用产品的过程。产品销售-服务阶段是产品实现定制化生产、服务的关键, 同样是端对端产品价值链实现信息集成的重要一环。

2. 端到端的信息集成

产品生产过程包括销售-服务阶段的需求采集与确定、产品设计阶段的个性化需求匹配、生产阶段的生产计划、物流阶段的高效产品配送等核心运作内容。上述产品全生命周期活动涉及多类型的价值链整合, 每个环节可以由企业的不同部门或不同类型企业间协作完成, 而围绕生产活动的多类型部门则产生“端到端”的多源异构信息传递。

传统的产品全生命周期端到端信息集成一般通过 CAX、SFCMESERP 等系统的数据接口实现^[19]。在信息时代的制造系统框架中, 为了实现即时信息对接和高效需求建模, 可利用信息物理系统(CPS)通过底层的无缝集成实现, 同时 CPS 与 SFCMESERP 之间通过纵向集成实现数据交互, 进而实现端到端的信息集成。

1.5.2 制造系统纵向集成

智能制造系统试图整合产品销售-服务阶段信息, 使产品使用状况、维护与产品设计、生产制造相融合, 打通制造过程的服务端与制造端, 实现需求信息与制造管理信息的全透明^[20]。基于端到端的基础思想, 为进行制造价值链上不同端口的融合, 完善个性化的产品制造, 首先需要在制造流程内部进行“纵向”的信息整合, 从而实现客户需求反馈与产品设计、生产端相链接的高效闭环信息互通。

制造系统需实现对不同制造环节的集成, 包括传感器、自动化生产设备、库存间领料智能机器人、智能车间等递进式关联环节。进一步将纵向制造信息集成至企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)系统、制造执行系统(manufacturing executive system, MES)、过程控制系统(process control system, PCS)或集成式制造数据仓库, 实现数据自动采集、数据自动传输、数据自动决策、自动操作运行、自主故障处理^[21], 形成集约式制造流程数据管理系统, 从而辅助端对端的产品制造-服务效率提升。

纵向维度视角下的制造系统集成需要克服诸多困难, 包括制造系统多模块化管理及多源异构数据集成两个方面。首先, 制造系统集成制造生产内部部门的多模块体系。完善不同环境下的模型、数据、信息通道是实现纵向信息集成的关键。其次, 在同一产品的不同生产环节, 模块化管理及相关数据集成可更为精确地实现用户服务端产生的即时需求信息反馈, 实现高效的个性化制造。

1.5.3 制造系统横向集成

制造产品全生命周期涉及分布式智能生产资源,跨越多类型的原材料提供商、制造商、物流分销中心、多类型客户、售后服务端等诸多关键阶段。纵向制造信息集成仅可辅助内部高效的制造模块化管理,实现自动化生产。然而,进一步完善全域制造信息融合、提升制造和生产水平,需要进一步集成产业横向相关信息,包括制造厂商内部的制造、生产计划、设施能耗管理等设备采集信息,以及产业内跨公司的核心关联信息数据。

制造信息的横向信息集成是产品所处行业链群上各企业信息的集成,将链群上紧密相关的不同生产单元转化为可识别的信息,对其提供的即时信息流进行描述与表示,并对其关键核心业务的动态或静态数据进行集成。

制造系统横向集成同样是面向服务的体系结构(service-oriented architecture, SOA)构建的关键^[22]。围绕 SOA 框架基础,制造系统需要基于产品行业系统开放的优势,建立不同关键业务间的接口,完善以产品服务功能为主的信息传递渠道,从而为标准统一、高效的横向数据获取、管理与交付提供有效基础。此外,横向数据管理部分的核心问题为数据统一规范管理,以及通过企业服务总线实现多主体的信息传递。针对该问题,建立集成的数据管理中心,形成数据仓库,能够为企业横向集成数据提供相应的数据管理平台。

产品生命周期端到端集成、制造系统横向与纵向集成三个维度的数据集成一起构成了智能制造网络,为全方位打通产品不同节点的信息流,实现高效生产、高质量产品服务管理及个性化制造提供基础。

1.6 制造系统信息集成的五个层次

制造系统信息集成的流程具备一定的层次性,从数据产生到信息系统集成,可以分为数据源层、网络通信层、信息建模与语义层、业务流程层和系统集成层五个层次。

1.6.1 数据源层

数据源层是制造系统信息集成的最底层,由信息采集设备、生产设备信息交互系统和信息处理软件组成,为制造系统信息集成提供数据支撑。

信息采集设备主要包括设备数据采集系统、采集传感器、现场监测系统等,采集包含设备运行状态信息、工序状态信息、产品质量信息等在内的生产现场信息^[23],是重要的生产数据源。

生产设备信息交互系统主要包括 RFID 和可编程逻辑控制器(programmable

logic controller, PLC)等,一方面负责生产设备之间的信息交互,实现设备之间的协同工作;另一方面收集传递信息,以用于系统状态分析。

信息处理软件包括嵌入设备的支持软件,也包含数据在导出、存储过程中对数据进行预处理的软件。信息处理软件会对原始数据进行初步的分析、清洗,由此得到的分析结果也会作为数据存入数据库,供上层软件调用^[24]。

数据源层在制造系统信息集成的过程中,主要完成数据的采集、清洗、标准化、存储等工作,最终形成可供外界调用的标准化数据接口,供各子系统调用数据。

1.6.2 网络通信层

网络通信层主要包括物理传输设备、数据传输协议、网络安全技术,实现制造系统内部信息准确、实时、安全的通信。

物理传输设备主要包括网线、电缆、交换机、路由器等,将物理设备映射到对应的硬件地址上,并完成网络地址与硬件地址之间的翻译,最终通过介质传输不同子系统要求的数据。

数据传输协议包括 IPX/SPX、TCP/IP、STP 协议等多种传输协议,分别在不同的硬件节点之间形成数据传输规范,确保数据传输过程中的完整性、正确性和及时性^[25]。

物理传输设备配合数据传输协议即可实现系统之间的数据通信。但通信过程中,会不可避免地出现数据安全问题,因此,制造系统的信息集成过程需要将网络安全技术纳入构建过程。

网络通信层在制造系统信息集成中起着“桥梁”作用。在数据源层完成数据的采集、存储后,网络通信层搭建起数据传输通道,主要完成硬件与硬件、硬件与软件、软件与软件之间的互联互通工作,确保数据能够以实际需求的速率及质量传输,同时防范外部攻击、数据意外损坏等问题。

1.6.3 信息建模与语义层

信息建模与语义层主要包括信息同构技术、信息建模技术及语义集成技术。

信息同构技术是指将各系统中的异构化数据进行处理,形成统一的信息表示和集成数据接口的技术。由于制造系统的数据源具有多元异构性、复杂多变性、分布性等特点,信息同构技术可以分为虚拟同构和物理同构^[26]。虚拟同构指在信息调用时采用映射的方式进行数据转换。物理同构是指在数据接口和应用接口之间增加中间数据存储层,通过统一编码方式对数据进行转换并存储。

信息建模技术是指构建数据之间的关联性、建立描述数据关联性模型的技术。原始数据缺少数据与数据之间关联性的刻画,因此需要建立信息模型,统一刻画数据关联性^[27]。信息建模包括多种方式,常见的有 ER 模型、IDEF1X 模型等。

语义集成技术是指将不同子系统对同一对象的差异化描述转化为同一逻辑表达形式的技术。由于子系统信息的语法结构和语义的差异性,会导致子系统之间无法直接进行沟通^[26]。因此,需要先构建语义中的本体,即不同子系统指代的对象,然后通过构建本体的属性、关系、类等建立语义映射,将不同的描述方式映射到同一本体上。

信息建模与语义层在制造系统信息集成中起到“翻译”的作用,通过构建统一的数据格式、数据模型及语义模型,能够将数据按照子系统的要求传递到各个子系统中,实现数据的可描述性和可理解性。

1.6.4 业务流程层

业务流程层主要包括企业的各项业务流程,内嵌于各业务软件中。业务流程层是企业经营活动的集合,从生产流程到企业战略流程,不同的管理层级均对应不同的业务流程。业务流程层是数据的主要应用层次,不同的业务根据流程需求发出数据需求,经过语义集成映射到对应的信息模型,再从数据库中调取相应的数据进行传输。制造系统中常见的业务软件包括 ERP 软件、MES 软件、CRM 软件等,不同的业务软件之间也存在信息的交互。在构建业务流程层时,常用的方法是业务流程重组。

业务流程层在制造系统信息集成中是数据需求的发出层次,也是创造数据价值的层次之一。在信息建模与语义层完成信息模型和语义对象的构建后,业务流程层就可以实现对底层数据的有效运用,并根据数据分析系统的状态,给出系统控制命令。业务流程层也会产生大量的分析数据和控制数据,这些数据中的一部分在不同的业务软件之间进行传递,实现整个系统的协作运行,另一部分则作为描述系统状态的信息存入数据库,供系统集成时进行优化分析。

1.6.5 系统集成层

系统集成层是制造系统信息集成的最顶层,也是信息集成的最终目标。系统集成层使制造系统形成完整的物理信息系统,借助信息与信息的关联关系,最终辅助实现智能决策。在业务流程层,各业务软件仍是独立的子系统,因此,需要构建系统集成层,将不同的业务流程进行整合。通过划分流程层级,对层级内部的流程进行整合联动,对层级之间的流程进行数据关系梳理,建立完整的企业信息模型,实现数据信息与物理实体、业务流程的融合,并通过引入大数据分析、人工智能、边缘计算等新一代智能决策技术,实现企业的智能决策,构建具备自感知、自组织、自决策的智能生产体系。

系统集成层在制造系统信息集成中充当“大脑”的角色,通过收集分析各层次的数据,辅以智能决策技术,对生产制造过程发出决策指令,使生产系统能够高效、平稳、连续地运行。系统集成层是数据产生价值的最终层次,通过数据流与业务流

的融合,深层次发掘数据价值,也使系统内部功能得到互联,最终将整个制造系统打造成一个有机整体。

习题

1. 分析计算机集成制造系统和智能制造系统的异同。
2. 简述信息集成在智能制造系统中的必要性。
3. 制造系统信息集成的三个维度是什么?
4. 简述制造系统信息集成五个层次包含的内容。

参考文献

- [1] 田彬,王率领,赵基伟. 现代制造系统的研究现状及发展趋势[J]. 中外企业家,2015(8): 1.
- [2] 周俊. 先进制造技术[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社,2021.
- [3] 刘颖. 基于制造业信息化的技术与应用浅析[J]. 锻压装备与制造技术,2021,56(6): 3.
- [4] 郑力. 智能制造: 技术前沿与探索应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2021.
- [5] 常本英. 计算机集成制造系统(CIMS)导论[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社,1997.
- [6] 严新民. 计算机集成制造系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社,1999.
- [7] GROOVER MIKELL P. 自动化、生产系统与计算机集成制造[M]. 许嵩、李志忠,译. 2 版. 北京: 清华大学出版社,2009.
- [8] 马士华,陈荣秋. CIM 哲理与现代企业管理模式[J]. 管理工程学报,1997,11(3): 3.
- [9] 李圣怡. 智能制造技术和智能制造系统[J]. 国防科技大学学报,1995(2): 1-11.
- [10] 杨先娣,彭智勇,刘君强,等. 信息集成研究综述[J]. 计算机科学,2006,33(7): 55-59.
- [11] 李希明,土丽艳,金科. 从信息孤岛的形成谈数字资源整合的作用[J]. 图书馆论坛,2003,23(6): 121-122.
- [12] 卞保武. 论企业信息化中的“信息孤岛”问题[J]. 中国管理信息化(综合版),2007,10(4): 22-25.
- [13] 李希明,梁蜀忠,苏春萍. 浅谈信息孤岛的消除对策[J]. 情报杂志,2003,22(3): 61-62.
- [14] 王俊杰. 冲出信息孤岛,实现数字资源共享[J]. 大学图书馆学报,2004,22(3): 16-18.
- [15] 刘玉照,杜言. 基于信息集成的信息资源共享[J]. 情报杂志,2003,22(7): 54-55.
- [16] 温景容,武穆清,宿景芳. 信息物理融合系统[J]. 自动化学报,2012,38(4): 507-517.
- [17] 张耀祥. 云计算和虚拟化技术[J]. 计算机安全,2011(5): 80-82.
- [18] 王鸿儒. 离散制造业产品全生命周期管理 PLM 应用研究[J]. 机械工程与自动化,2018(1): 225-226.
- [19] 秦峰. 浅析数据集成在数字化工厂建设中定位与实现[J]. 信息系统工程,2017(10): 138-139.
- [20] 张卫,朱信忠,顾新建. 工业互联网环境下的智能制造服务流程纵向集成[J]. 系统工程理论与实践,2021,41(7): 1761-1770.
- [21] 李清,唐骞璘,陈耀棠,等. 智能制造体系架构、参考模型与标准化框架研究[J]. 计算机集