



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Special Funds for
Academic Publications

国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

数字制造信息学

Fundamentals of
Digital Manufacturing Information Science

陈德军 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金资助项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

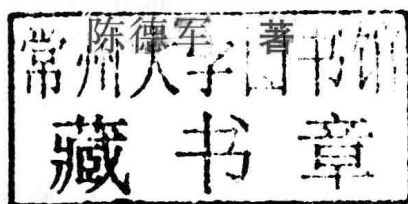
湖北省学术著作出版专项资金资助项目



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Provincial Academic Monograph
Publishing Special Fund

数字制造科学与技术前沿研究丛书

数字制造信息学



武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

数字制造信息学是数字制造科学的基础理论学科之一,它对数字制造信息的内涵、度量、采集、存储、传输、集成和应用方法等内容进行了定义、刻画和描述,按信息对数字制造的驱动过程和对数字制造的贡献,从语义、语法和效能等不同层面对数字制造信息的作用进行了全面、系统的阐述,为数字制造系统的设计、管理和应用提供了基础支撑理论。本书可作为从事数字制造研究的科学技术人员的参考书,也可以作为高校相关专业的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

数字制造信息学/陈德军著. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.1

(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5549-8

I. ①数… II. ①陈… III. ①数字技术-应用-机械制造工艺 IV. ①TH16-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 002998 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:张明华

责任校对:夏冬琴

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12

字 数:307 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1—1500 册

定 价:72.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书 编审委员会

顾问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁 汉

副主任委员：黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田 高

委员（按姓氏笔画排列）：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	毛宽民
王德石	冯 定	华 林	刘 泉	刘 强
关治洪	李仁发	李学军	肖汉斌	张 霖
陈德军	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,兴起了全球新一轮的数字化制造的浪潮。发达国家(特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家)面对近年来制造业竞争力的下降,大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)跟制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制

造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成提供了宝贵的经验和知识,付出了辛勤的劳动,在此谨表示最衷心的感谢!对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等制造领域资深专家及编委会成员讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇三个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

经济全球化和信息化使制造业的竞争环境、发展模式和活动空间都发生了深刻的变化,这些变化对制造业提出了严峻的挑战,同时也为制造业的发展提供了有利条件和新的机遇。信息化的基础是数字化,数字化已成为推动各门学科飞速发展的最重要的因素之一,作为人类生存最重要的产业之一——制造业,其方方面面毫无例外地将继续深受数字化的影响,并面临一系列重大的转变。在上述背景下,迄今为止制造业的经营观念和对制造系统的要求发生了深刻的改变,人们从各种不同的角度提出了许多不同的制造系统的新模式和新理论,如计算机集成制造,精益制造,并行工程,敏捷制造,业务过程重组,计算机产品工程,协同控制和智能制造,以及数字化制造、数码工厂和数字化服务等,这些新模式和新理论的核心是将产品知识、信息技术、自动化技术、现代管理技术相结合,从而带动产品设计方法和工具的创新、产品制造工艺技术与设备的创新以及管理模式创新;通过实现产品设计、制造和管理的手段与过程的数字化和智能化,缩短产品的开发周期,提高企业的产品创新能力,使企业在持续的动态多变、不可预期的全球性市场竞争环境中生存与发展,并不断地扩大其竞争优势。

随着 21 世纪全面信息化的到来,新一代信息技术与制造业深度融合,正在引发具有深远影响的产业变革,形成新的生产方式、产业形态、商业模式和经济增长点。各国都在加大科技创新力度,推动三维(3D)打印、移动互联网、云计算、大数据、生物工程、新能源、新材料等领域取得新突破。基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式的变革;网络众包、协同设计、大规模个性化定制、精准供应链管理、全生命周期管理、电子商务等正在重塑产业价值链体系;可穿戴智能产品、智能家电、智能汽车等智能终端产品不断拓展制造业新领域。这使我国和世界制造业转型升级、创新发展迎来重大机遇,也将给世界各国带来新一轮的制造业的发展规划和产业升级。作为上述制造业发展战略的典型代表,德国提出了“工业 4.0(Industry 4.0)”,中国提出了“中国制造 2025”规划,上述发展战略体现了制造业数字化、信息化、智能化的发展方向,已成为当前和未来的主要发展模式。

数字制造信息学是数字制造科学的基础理论之一,它涵盖数字制造信息的内涵、度量、采集、存储、传输、集成和应用方法等内容,是科学地构造数字制造系统的基础,因此必须对其进行系统化的定义和描述。

从 20 世纪 90 年代以来,我国一批著名学者就已经开展了对信息科学与技术对制造系统中作用的研究,并逐步促成了制造信息学的研究方向,为制造科学的发展指明了方向。21 世纪是信息化时代,随着信息科学和技术的快速发展,各行各业的信息技术得到迅猛的发展。作为我国经济发展的重要支撑行业,数字制造及其智能化已成为当前的发展热点。如何对数

字制造信息进行系统的研究,并为上述研究方向提供理论和技术支持,已成为数字制造科学研究的重要任务。由于数字制造的内容丰富,其系统构造复杂,如何用数字制造信息来贯穿整个系统,为数字制造系统提供完整的理论体系支持是本书的重点。

本书根据数字制造系统的创建、管理和运行特点,从数字制造过程全生命周期的信息驱动作用出发,将数字制造信息分为语义、语法和效能,并从这三个不同层面对其进行定义和描述。在此基础上,结合数字制造过程不同阶段的需求,分别用不同层面的信息对数字制造行为和过程进行定义和描述,从而让数字制造信息学能从概念和科学问题方面得到广大制造领域的学者认可,并使之能得到广泛和系统的应用,进而在数字制造系统的设计、管理和应用的科学实践中能充分、显现化、系统地体现出数字制造信息的基础支撑作用。根据上述思想,本书展开了对数字制造信息的内涵、度量、采集、存储、传输、集成和应用方法等内容的描述,试图给读者一个完整、清晰的理论逻辑体系,为该学科后续的发展和研究打下基础。

全书共分7章,主要对数字制造信息的基础理论体系进行了阐述,第1章,阐述了数字制造信息学的基本理论体系,第2章和第3章给出了数字制造信息的定义、度量、评价和表征方法,第4章至第6章则对数字制造信息的采集、存储、管理、传输、集成方法进行了归纳和总结,第7章则对数字制造信息的集成共享管理方法进行了阐述。对数字制造信息学扩展性应用成果,如云制造、基于物联网的制造等,没有再做进一步的分析,这些内容将在后续的专门论著中进行论述。周祖德教授审阅了全书,提出了细致、中肯的建议,在此表示衷心的感谢。

作者

2016年9月

目 录

1	数字制造信息学概论	(1)
1.1	数字制造的本质与特征	(1)
1.2	数字制造信息的定义与内涵	(2)
1.3	数字制造信息的属性与分类	(6)
1.3.1	数字制造信息的属性	(6)
1.3.2	数字制造信息的分类	(9)
1.4	数字制造信息学的理论体系	(11)
2	数字制造信息的度量与质量评价方法	(14)
2.1	信息的熵量度量	(14)
2.1.1	信息度量的数学表达式	(14)
2.1.2	用于信息度量的熵的基本性质	(16)
2.2	数字制造信息的特征	(18)
2.3	数字制造信息的几种度量方法	(21)
2.3.1	信息密度决策矩阵方法	(21)
2.3.2	贝叶斯方法及在信息化制造中的应用	(23)
2.3.3	贝叶斯估计算例分析	(29)
2.4	数字制造信息的质量评价方法	(30)
2.4.1	信息灵敏度	(31)
2.4.2	信息价值灵敏度	(31)
2.4.3	信息准确度	(32)
2.4.4	信息质量的评价算例	(33)
3	数字制造信息的表征与建模方法	(35)
3.1	数字制造信息的描述形式和方法	(35)
3.1.1	数据模型的定义	(35)
3.1.2	数据模型的组成要素	(36)
3.1.3	概念模型	(37)
3.2	基于关系模型的数字制造信息表征建模	(41)
3.2.1	关系模型的基本概念	(41)
3.2.2	关系模型的数据结构	(42)

3.2.3	关系模型的操作	(44)
3.2.4	关系模型的完整性约束	(48)
3.2.5	关系数据模型的优缺点	(49)
3.3	基于面向对象模型的数字制造信息表征建模	(50)
3.3.1	面向对象模型的核心概念	(50)
3.3.2	类层次结构	(51)
3.3.3	类继承	(52)
3.3.4	对象嵌套层次结构	(52)
3.3.5	对象类型及其定义	(53)
3.4	基于 XML 数据模型的数字制造信息表征建模	(56)
3.4.1	XML 的基本描述规则	(57)
3.4.2	XML 的数据模型	(59)
3.4.3	SQL/XML	(62)
3.5	基于 STEP 的数字制造信息表征建模	(64)
3.5.1	STEP 标准的基本内容	(65)
3.5.2	STEP 标准的层次概念	(67)
3.5.3	STEP 标准的形式化定义语言 EXPRESS	(67)
4	数字制造信息的采集、存储与管理	(70)
4.1	数字制造信息的来源	(70)
4.1.1	信息采集的概念	(70)
4.1.2	数字制造信息采集的来源	(70)
4.1.3	数字制造信息采集的原则	(73)
4.2	数字制造信息的典型采集方法	(74)
4.2.1	传感采集法	(74)
4.2.2	RFID 采集法	(79)
4.2.3	条码采集法	(79)
4.2.4	文档类采集法	(81)
4.3	数字制造信息的预处理方法	(83)
4.3.1	信息滤波	(83)
4.3.2	信息融合	(85)
4.3.3	信息编码	(88)
4.4	数字制造信息的存储管理技术	(90)
4.4.1	基于文件的信息存储管理	(90)
4.4.2	基于数据库的信息存储管理	(91)

4.4.3	基于数据仓库的信息存储管理	(91)
4.5	数字制造信息的组织使用方法	(93)
4.5.1	数据结构的定义	(93)
4.5.2	数据结构的常用结构类型	(94)
4.5.3	数据结构的抽象表示与算法描述	(95)
5	数字制造信息的传输与交换方法	(99)
5.1	基于现场总线的数字制造信息的传输与交换	(99)
5.1.1	现场总线技术概述	(99)
5.1.2	PROFIBUS 和 CAN 总线介绍	(99)
5.2	基于无线自组网的数字制造信息的传输与交换	(103)
5.2.1	无线自组网的基本概念	(104)
5.2.2	无线自组网的特点	(104)
5.2.3	无线自组网的分类	(107)
5.3	基于 TCP/IP 的数字制造信息的传输与交换	(108)
5.3.1	TCP/IP 协议族的体系结构	(108)
5.3.2	TCP/IP 协议族的主要协议	(109)
5.3.3	IP 地址及其分类	(111)
5.3.4	TCP 的通信过程	(112)
5.4	基于其他形式的数字制造信息传输与交换	(116)
5.4.1	光纤通信传输	(116)
5.4.2	卫星通信方式	(117)
5.4.3	量子通信传输	(119)
6	数字制造信息的集成方法	(120)
6.1	数字制造信息集成的实现技术	(120)
6.2	基于 XML 的信息集成方法	(124)
6.2.1	基于 XML 的应用信息描述	(124)
6.2.2	制造信息集成规范	(125)
6.3	基于 EAI 的信息集成方法	(127)
6.3.1	EAI 的模式选择	(128)
6.3.2	Web Service 技术	(129)
6.3.3	中间件技术	(131)
6.4	基于信息集成的数字制造企业应用系统集成过程	(132)
6.4.1	基于 EAI 的 CAPP/PDM/ERP 集成	(133)
6.4.2	CAPP/PDM/ERP 过程集成	(141)

7 基于 NGGPS 的数字制造信息集成共享管理方法	(147)
7.1 基于 NGGPS 的数字制造特征信息共享管理模型	(147)
7.2 基于 NGGPS 的数字制造特征信息共享平台功能需求与流程分析	(151)
7.2.1 设计过程功能需求与流程	(151)
7.2.2 制造过程功能需求与流程	(152)
7.2.3 检验过程功能需求与流程	(153)
7.3 应用 NGGPS 的 CAx 集成协同共享策略	(154)
7.3.1 NGGPS 与 CAx 集成策略分析	(154)
7.3.2 应用 UML 对 NGGPS 与 CAx 功能集成系统建模	(158)
7.4 基于 SOA 的数字制造信息集成共享管理	(162)
7.4.1 基于 SOA 系统结构框架与特征信息获取流程图	(163)
7.4.2 基于面向对象 XML 元数据格式的处理机制	(164)
7.4.3 基于 SOA 架构的数字制造信息系统	(174)
参考文献	(176)

1

数字制造信息学概论

1.1 数字制造的本质与特征

制造业是国民经济的重要支柱和基础。随着信息技术和计算机网络技术的快速发展,世界正经历一场由“互联网+”引起的深刻的“网络化革命”。这场革命极大地改变着人类的生存环境和生活方式,并深刻影响着人们过去常规的思维定式和工作模式,进而使为人类提供生存条件的各行各业从概念、组织模式、运行方式到结构、管理模式、功能特性等都发生了前所未有的深刻变化。这场革命使主导世界经济的制造业面临五大突出问题的挑战,即网络化、数字化、全球化、知识化和服务化,而数字化是其核心。

数字化已成为制造业中产品全生命周期不可缺少的因素。由于制造业市场需求的快速变化、全球性的经济竞争以及高新技术的迅猛发展,促使制造业发生了革命性的变化,极大地拓展了制造活动的深度和广度,推动制造业朝着信息化、自动化、智能化、集成化、网络化和全球化的方向发展,从而导致了制造信息的表征、存储、处理、传递和加工的深刻变化,使制造业由传统的能量驱动型逐步转向为数字信息驱动型。这主要表现在:制造已不再仅仅是传统意义上的制造行为,还包括社会、经济、人文等多种综合因素。因此,制造和制造系统必须置于社会、经济和人文环境中,成为一个复杂的社会化大系统中的一个重要因素。

制造的全球化,使制造业的组织形态、经营模式和管理机制需要重新定位和创新,这就要求新一代企业必须实现网络化、数字化、信息化,构建新一代制造系统的模式,从而提出了实施数字制造工厂的要求。随着制造系统复杂程度的增加,制造过程中所必须接收和处理的各种信息正在爆炸性地增长,限量制造信息成为制约制造系统效能的关键因素。解决这一问题的关键是在分布式数字化、网络化结构的基础上,通过限量数据的几何与拓扑建模,使制造系统中的制造单元或装备具有一定的自主性和智能化水平。

制造市场需求的快速变化以及消费需求日趋个性化与多样化,要求新一代制造系统必须体现柔性化、敏捷化、客户化与全球化等特征。柔性化与敏捷化是快速响应客户化需求的前提,这意味着新一代制造系统必须具备动态易变性,能通过快速重组,以快速响应市场需求的变化。而柔性化、敏捷化、客户化与全球化实现的基础是网络化、数字化、信息化,在此基础上提出了制造过程数字化和数字化产品的要求。

制造活动的全球化,对制造活动的服务环节也提出了新的要求。由于制造产品复杂程度的不断增加,服务地域的不断扩大,用户对服务时间的要求越来越短,因此,迫切需要新的服务手段和服务技术的支持。这就很自然地提出了数字培训、数字维护与数字诊断的概念与技术。

由此可见,互联网的发展带来了互联网经济,并由此引起的生产活动和商务活动导致制造

企业从形式到内容结构性的深刻变化,同时,制造企业的竞争态势、市场结构、企业结构、公司形式、业务流程、管理模式、制造过程等也将随之改变。从 20 世纪 90 年代开始,随着互联网的快速发展,许多学者对制造业发展的机遇和可能出现的发展形态从整体和局部进行了大量的研究,取得了大量的理论和实际应用成果^[1-20]。上述成果已有效地推动了我国制造业的发展,并为我国政府出台相关时期的制造业中长期规划奠定了坚实的基础。

纵观各类新型制造的形式和理念,数字制造应是新时期制造业发展的基础。为应对时代发展带来的挑战,制造企业和制造过程必须走数字化的道路,数字制造已成为一种以适应日益复杂的产品结构,日趋个性化、多样化的消费需求和日益形成的庞大制造网络而提出的全新制造模式,并成为未来制造发展的重要特征。这里,数字制造是指用数字化定量、表述、存储、处理和控制在方法,支持产品全生命周期和企业的全局优化运作,以制造过程的知识融合为基础,以数字化建模仿真与优化为特征;数字制造是在虚拟现实、计算机网络、快速原型、数据库等技术支撑下,根据用户的需求,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以及原型制造,进而快速生产出达到用户要求性能的产品的整个制造过程。按照产品的制造过程,可以将对制造工艺工程知识的获取及进行制造工艺自主设计和优化控制等数字化作为微观生产过程数字化,而对生产系统的布局设计与实际优化运作等数字化作为宏观生产过程数字化^[6]。

可见,数字制造的本质是产品全生命周期的数字化与信息化。通过数字化将计算机和网络技术引入制造过程,通过信息化实现基于模型和知识的制造。因此,数字化是数字制造的基础,是制造数据的生成技术;信息化是数字制造的灵魂和核心,是制造过程的逻辑表征。

数字制造的特征表现在:用于形式化描述与表示时,产品数字表达的无二义性、可重用性;用于可制造性分析与产品性能预估时,产品开发和产品性能的可预测性;网络环境下制造活动对于距离、时间和位置的独立性。

作为新的制造形式,数字制造已成为推动 21 世纪制造业向前发展的主流,数字制造使产品设计制造从传统的部分定量、部分经验、定性化逐步转向产品全生命周期全面数字量化,从而革新了制造信息的表征形式,催生出了数字制造信息的表征方法体系。

1.2 数字制造信息的定义与内涵

信息是事物本体的,也是通过主体认知对象的状态、过程与控制的表述。信息是物质的基本属性,具有客观和主观的二重性。信息不仅含义广泛,而且具有多层次、多侧面,既涉及事物本体又涉及认知主体等的特点^[1]。正因为信息和主体认知有关,因此,信息的定义与领域有关。有鉴于此,本节将从制造的角度探讨数字制造领域中信息的定义。

定义 1:数字制造信息是产品全生命周期各个环节中有关事物的状态、过程和控制直接或间接的表述;也是通过主体认知的事物本体、认知主体或信息的状态、过程与控制的直接或间接的表述;还是制造信息本身的状态、过程与控制的直接或间接的表述。

这里,事物既包括事物的本体,也包括认知主体和数字制造信息。数字制造信息不等同于事物,它是事物的属性,是数字制造的特征表征方法。例如,材料的性状、刀具的类型等是有关这些事物本体的数字制造状态信息,材料的变形、刀具的磨损等是有关这些事物本体的数字制造过程信息,如何约束材料变形、刀具磨损到什么程度就要更换刀具等是有关这些事物本体的

数字制造控制信息。

人的技能和企业领导层决策水平等的表述是这些认知主体的数字制造状态信息,技能的口头传授和决策过程的表述是有关这些认知主体的数字制造过程信息,实施技能和董事会对企业决策层的监控等是有关这些认知主体的数字制造控制信息。

可采用有穷集合 $\Pi = I(\cdot)$ 来表述数字制造信息,该表述的前提是:

- (1) 将相互间有排序关系的数字制造信息视为一个数字制造信息单元。
- (2) 多个相同的数字制造信息元等同于一个数字制造信息单元。
- (3) 集合内允许数字制造信息单元的不同排序。

这样就可以利用集合和群的运算规律来对数字制造信息作形式化运算,数字制造信息的语义则通过信息改变信念来处理。

数字制造信息的定义已明确了其内涵,也可通过如下数字制造信息的本质特性来进一步理解其内涵。

1) 数字制造信息是物质的基本属性

数字制造信息同信息一样不是物质也不是能量,但是它的存在却又离不开物质和能量。物质及其运动是数字制造信息的载体,数字制造信息运动需要能量。总之,数字制造信息是物质的基本属性。

数字制造信息不等同于意识。认知主体中存在意识,尽管什么是意识还有待研究,但数字制造信息和信息都不是意识,数字制造信息是意识与环境通信或实现控制时交换的内容。

数字制造信息难以有统一的量化标准。工程信息论中不考虑信息的语义,而是按对应的先后验概率场的熵量之差计算信息量。考虑语义的数字制造信息会因主体而异而具有主观性,所以难以建立统一的制造信息量化标准。没有统一量化标准的数字制造信息只能作局部的、相对的量化。

2) 数字制造信息的支配性作用

数字制造信息与物质和能量不同,物质和能量都遵守守恒定律,数字制造信息由于具有主观性而没有(或者说迄今还没有发现)普遍可遵循的守恒定律。数字制造信息的支配性作用主要表现为:

- (1) 减少事物的不确定性,是序的增加。
- (2) 建立或改变主体信念,信念则用于知情或决策。
- (3) 信息与约束相结合实现控制。

3) 实现数字制造信息支配性作用的中间环节

信息的支配性作用取决于信息本身的可供支配的资源,而与其物质载体和耗能多少无关。信息的这个特点来源于信息是一种支配性力量,而不是直接作用力量。这就是为什么同样的信息对有的企业效果可能较大,而对另一些企业由于缺乏可供支配的资源,其效果却可能较小的主要原因。

制造资源包括劳务、资金、物料、装备、信息、能量、技术、时间、组织和制造等,只有在有效的数字制造信息支配下,这些资源才能发挥效用。例如,宏观决策需要并产生数字制造信息,供给决策的数字制造信息支持了决策,而作为决策结果的数字制造信息则支配着企业制造资源的有效利用。

时间作为不可再生的关键数字制造资源常常被忽视,而这里需要特别强调可供支配的时

间资源对制造活动的极端重要性。众所周知,没有事物能独立于时间以外而存在,且没有任何手段可以改变时间的流逝。制造企业都是以有效的生产时间为代价来获取利润,时间对于每个人和每个企业都是平等的,企业运作优势在很大程度上取决于时间的有效利用程度,从这个意义上讲时间就是一切。制造企业中的每一个员工特别是领导阶层都要珍惜生产时间,管理生产时间,充分利用生产时间。

数字制造信息对制造资源的支配作用需要通过“信息/能力转换”环节来实现。“信息/能力转换”环节可以由事物本体、认知主体或二者共同组成。不难看出,“信息/能力转换”环节要能以一定精确度按输入信息产生输出支配能力,做不到这一点,制造信息就不能产生有效的支配作用。

当数字制造信息是单纯的位移运动脉冲指令时,“信息/能力转换”环节可以是开环、半闭环或闭环位移伺服系统。但是当数字制造信息是企业组成单元间的指令时,由于这时的数字制造信息包括语义信息,对相关的“信息/能力转换”环节的要求就要复杂得多。为了能较准确地按输入信息产生输出能力,“信息/能力转换”环节要具有能够提供足够的可重构的事物本体和认知主体型的输出能力组成单元,后者经过重构能形成所要求的输出能力。当“信息/能力转换”环节的能力不足以按指令信息产生相应的输出能力时,要能够通过动态联盟借用其他环节的组成单元来构造输出能力,即建立虚拟“信息/能力转换”环节。

4) 数字制造信息内容的不变性与可变性

从事物本体即客观角度看,信息是客观现象,对不变的事物本体信息内容具有不变性。但从认知主体的主观角度看,信息则是主体感知到的有关事物的属性,信息的内容会随主体认知不同而不同,信息内容又有可变性。

信息的这种既不变又可变的二重性,是由它既取决于事物本体又取决于认知主体的原因造成的。众所周知,时间、空间和运动都具有相对性,信息则不仅具有相对性,还具有客观的不变性和主观的可变性。

5) 数字制造信息的产出

数字制造信息作为对象的特定表述,需要通过“对象/信息转换”环节来产出。如对某工程或社会对象,人的感官可以直接承担“对象/信息转换”。在另一种情况下,如信息是精确的直线位移的表述时,由于车间状态的多元性、多维性和“对象/信息转换”环节中常包括认知主体,对相关的“对象/信息转换”环节的要求就要复杂得多。为了获得对象较准确的表述,方法之一是采用并行多通道融合表述。考虑到对象含有众多信息,为了能如实、较准确地表述所要求的对象侧面,“对象/信息转换”要有选择性,即有所表述和有所不表述。对于电子信号,这就是滤波或是带宽限制。

通过认知主体表述的信息,其如实、准确性在很大程度上会受到主体意识的影响。保证认知主体表述信息的准确、可靠,是企业制造信息管理和制造信息质量管理的首要任务。

6) 数字制造信息的流通性和不流通性

信息的支配性作用决定了信息的流通或不流通,其主要目的都是为了增加己方相对于竞争对手的信息优势。现代技术手段为信息的流通(传播)或不流通(垄断)提供了多种可能。一方面,在竞争对手之间,限制信息的流通是为了削弱对手的竞争力。例如垄断消息,即人为地制造己方和对手间的信息差,有可能间接增加己方的竞争力。另一方面,有意地传播不实消息,也有可能增加己方相对于竞争对手的信息优势。在企业内部,宏观利益一致的组元间信息

流通,是由组元组成的企业有效运作的必要条件。例如,信息通过流通统一了员工思想,会使企业竞争力增加。在另一种情况下,防止消极的信息在企业内流通,也可能防止企业竞争力的下降。

7) 数字制造信息的可处理、可干扰性和传递递减

数字制造信息可以被处理或干扰。信息经过处理或被干扰后,其内容和量都会发生变化。处理信息的目的是产生预期的变化,干扰则会产生非预期的变化。处理可分为真实化处理和 非真实化处理。

(1) 真实化处理包括压缩、转换、发现等,目的是有效地传递信息内容,而不是改变信息的内容,如图像信息的压缩、数控刀具位信息的后置处理、实验数据的整理等。

(2) 非真实化处理是有意改变信息内容,如增删信息内容。从正面讲这样做是改善信息质量,从负面讲是为了提供不实信息。

流通着的信息不可避免地会受到干扰,如电子通信中的电磁干扰、车间流通文档的污损、车间口头信息的误传等,所以有效的数字制造信息是传递递减的。增加信息的冗余或编码是最常用的提高数字制造信息抗干扰能力的方法。为了减少传递信息递减的影响,信宿应尽可能直接从信源获取信息,尽量减少数字制造信息中间传递环节。

不流通的数字制造信息也会受到干扰(不是信息时效),如固化在机床中的几何精度信息会因使用磨损而降低,人记忆中的信息会遗忘,存储的纸质文档会发黄损毁等。及时更新、及时补充或正面提高抗干扰能力可以改进这方面的抗干扰能力。

由于准确地传递制造信息(如精度信息传递)是机械制造中的关键,因此,抗干扰在制造技术领域具有重要的实用意义。制造信息的可干扰性必然引起制造信息的可信性问题,即所收到的信息是否和所表述对象的真实状态、过程和控制的真实信息在允许范围内一致。解决这个问题最常用的方法就是对同一事物通过多个通道或是通过单一通道,多次获取对象信息 I_1, I_2, I_3, \dots , 经过融合(如对比分析)提高信息的可信性。

8) 数字制造信息的累积和重复

数字制造信息可以用各种方式(图纸、书面、计算机内存、人的记忆等)和方法(字符、图形、语言等)加以累积。累积是数字制造信息处理的一种特殊形式,累积的目的是为了重复利用。

由于被累积的信息中常包含有重复信息,因此,累积后得到的有效信息常少于被累积的信息。例如,被累积的信息为 $I_1, I_3, I_4, I_7, I_7, I_7, I_{12}$, 而累积后得到的有效信息仅为 $I = \{I_1, I_3, I_4, I_7, I_{12}\}$ 。这个问题看起来简单,但实现起来却不容易。需要指出,这里所谓的信息重复和信息的可压缩并不等同。信息重复是指信息含义上的重复,信息的可压缩则是指结构上的可压缩。众所周知,自然语言即使含义无重复,结构上一般也是可以压缩的。

在制造活动中,制造信息重复的主要方式有:

(1) 在同一介质中以同一方式发生重复。这种重复不难发现,如图纸上的尺寸重复、书面报告中的重复阐述。

(2) 在不同介质中重复。例如,图纸制造信息和书面制造信息重复,需要在海量的制造信息中仔细查找才能发现重复。

(3) 重复的制造信息包上粘贴了其他信息,需要细心辨识才能发现重复部分。

(4) 以不同的方式表述的相同的制造信息。为了发现重复需要专家对它们进行辨识。