

基于“数字化、网络化、智能化”三个基本范式的智能制造成熟度模型构建研究

吉峰, 程贵晴, 贾学迪

中国矿业大学经济管理学院, 江苏 徐州
Email: cumtjifeng@163.com

收稿日期: 2021年7月1日; 录用日期: 2021年7月20日; 发布日期: 2021年7月27日

摘要

智能制造成熟度评估已被广泛用来帮助企业确定智能转型的方向和路径。然而, 由于美国、德国、新加坡、中国等国家对智能制造定义有着不同的内涵, 现有智能制造成熟度模型不能准确地反映中国制造企业的现实。本研究基于中国工程院将智能制造归纳总结提升为“数字化制造、数字化网络化制造和新一代智能制造”的三个基本范式, 根据Becker (2009)建立的成熟度模型开发程序, 构建了一个与中国制造企业智能化转型相配适的智能制造成熟度模型(Intelligent Manufacturing Maturity Model, IMMM), 该模型包括4个阶段、3个领域、7个维度、128个可操实践。本研究对指导中国制造企业实施智能制造能力评估, 推进智能制造转型升级具有重要的现实意义。

关键词

智能制造范式, 成熟度模型, 模型构建, 智能化转型

Research on the Construction of an Intelligent Manufacturing Maturity Model Based on the Three Basic Paradigms of “Digitalization, Networking, and Intelligence”

Feng Ji, Guiqing Cheng, Xuedi Jia

School of Economics and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
Email: cumtjifeng@163.com

文章引用: 吉峰, 程贵晴, 贾学迪. 基于“数字化、网络化、智能化”三个基本范式的智能制造成熟度模型构建研究[J]. 现代管理, 2021, 11(7): 761-773. DOI: 10.12677/mm.2021.117097

Abstract

Intelligent manufacturing maturity assessment has been widely used to help companies determine the direction and path of intelligent transformation. However, since the United States, Germany, Singapore, China and other countries have different connotations for the definition of intelligent manufacturing, the existing intelligent manufacturing maturity model cannot accurately reflect the reality of Chinese manufacturing companies. This research is based on the three basic paradigms of “digital manufacturing, digital networked manufacturing and a new generation of intelligent manufacturing” that the Chinese Academy of Engineering has promoted the summary and summary of intelligent manufacturing. According to the maturity model development program established by Becker (2009), it has established a relationship with China. The Intelligent Manufacturing Maturity Model (IMMM), which is suitable for the intelligent transformation of manufacturing enterprises, includes 4 stages, 3 fields, 7 dimensions, and 128 operational practices. This research has important practical significance for guiding Chinese manufacturing enterprises to implement intelligent manufacturing capability assessment and promoting the transformation and upgrading of intelligent manufacturing.

Keywords

Intelligent Manufacturing Paradigm, Maturity Model, Model Construction, Intelligent Transformation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景与目标

信息和通信技术(ICT)在过去几十年里发展非常迅速,其融入制造过程使整个价值链受益,并导致了一个被称为第四工业革命的新时代。新的制造模式除了预计能够管理整个价值链的敏捷和响应方式,集成到制造过程也预计能够利用工业生产力,降低生产成本,并提供有效的解决方案为客户提供质量、速度和整体成本和效益[1]。面对新革命的挑战和机遇,许多国家和地区,包括德国(工业4.0)、美国(智能制造业领导联盟)和韩国(智能工厂)、中国(中国制造2025)正在制定战略方法,以确保他们的行业转入到新的生产范式,努力开发与智能制造相关的技术,以成为智能制造的市场领导者。因此,在未来的几十年里,学者和从业者都设想主要通过随后的制造过程的数字集成、网络化协同和智能化运营来显著提高效率。很明显,如此深远的愿景将导致微观和宏观层面制造过程的复杂性增加[2]。

为了帮助制造业企业将智能制造付诸实践,学者们在概念和实证研究中深入研究了智能制造能力的准备度和成熟度,开发了不少智能制造能力(数字化能力、工业4.0)成熟度评估模型。例如IMPULS—Industrie 4.0 Readiness (2018) [3]、PwC Industry 4.0/Digital Operations Self-Assessment (2016) [4]、Schumacher Industry 4.0 Maturity Model (2016) [5]等。与此同时,智能制造能力成熟度评估已被广泛开展,以帮助企业来规划和推进智能转型。与不同公司举办的几次战略导向研讨会表明,公司在掌握智能制造概念、内涵方面存在严重的问题。一方面,他们无法将智能制造与他们的特定领域和特定的业务策略联系起来。

另一方面，他们在确定自己关于智能制造转型愿景发展状态时遇到了问题，无法确定具体的行动、项目和领域。其中比较重要的原因在于德国的工业 4.0、美国的先进制造与中国制造 2025 对智能制造的概念与内涵存在一定差异，现有许多成熟度模型不能准确地反映中国制造企业的现实，未能结合数字化、网络化与智能化的三阶段给出适合中国企业智能化转型的评估体系与路径图。

因此，本研究旨在试图使智能制造成熟度评估具有可操作性，并在现有的一般概念框架的基础上实现特定的于中国制造企业智能化转型相适应的评估框架，同时考虑其实施智能制造转型战略在评估和执行方面的差异。为了研究这个问题，我们根据 Becker (2009) [6]建立的成熟度模型开发程序，开发并评估一个智能制造成熟度模型(IMMM)。由于成熟度模型(MM)是能力开发的有效管理工具(Santos-Neto and Costa 2019) [7]，IMMM 旨在帮助制造业企业通过智能制造能力成熟度评估，找到符合公司实际的智能化转型升级路线图。

2 理论基础

2.1. 智能制造的概念和使能技术

2.1.1. 智能制造的概念

Kagermann *et al.* (2015) [8]将智能制造系统描述为一种技术驱动的变化，从而导致优化决策、定制生产和提高资源效率。Zhang and Tao (2016) [9]将智能制造的概念与物联网设备的部署联系起来，以确保系统的互连性、无缝的数据交换和互操作性，它导致了制造工厂的水平和垂直集成。水平集成确保了车间制造资源之间的数据通信性，使不间断的数据能够在人机之间流动(Fei T. *et al.*, 2018) [10]。垂直集成侧重于跨层级级别的数字集成，即从传感器级别到企业规划级别(Xu, Xu, and Li 2018) [11]，增强互联性，从而实现更好的决策和效率。

Shafiq *et al.* (2016) [12]将智能制造系统称为制造资产的虚拟化，以及导致创建自我制造软件和自我监控系统的过程。系统的虚拟化依靠数字孪生技术，通过部署产品生命周期管理系统，在产品整个生命周期的有效管理方面发挥着重要作用(Lee, 2020) [13]。数字孪生还可以在执行前帮助建模和模拟制造活动，这将导致在初始阶段预防错误，并作为优化工厂制造操作的工具，以便进行更好的决策(Ghobakhloo, 2018) [14]。

Kusiak (2017) [15]认为智能制造是指整个制造和供应链企业中网络化的信息技术的普遍实施和应用，创建能够实时适应变化条件的灵活智能的制造系统。智能制造可以在不同的变化中采用，其不同的复杂程度取决于所涉及的技术应用的范围和集成(Kusiak, 2019) [16]。

周济等(2018) [17]指出智能制造是将先进制造技术与数字化网络化智能化赋能技术深度融合，推动制造企业产品创新、生产创新、模式创新、集成创新的整体突破的制造模式，在迭代融合演进过程中逐步形成了 3 种基本范式：数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造；其中，智能制造作为一个大系统，贯穿于设计、制造、服务等产品全生命周期的各个环节，关联制造系统优化集成，支撑实现制造的数字化网络化智能化。

2.1.2. 智能制造使能技术

随着智能制造实践的采用，组织正在关注受技术进步影响的制造系统的特征(Kusiak 2017) [15]。包括网络物理系统(CPS)、物联网(IOT)、协同机器人、自主机器人、自主机器、水平和垂直集成、建模和仿真、增强现实、数字孪生、大数据分析、增材制造、网络安全和云制造等在内的技术变化对智能制造系统产生重要影响(Rojas R A, Rauch E 2019) [18] (见表 1)。这些技术是实施智能制造系统所需采用的关键推动因素。但是，根据组织对所需的智能水平的战略决策，这些技术的选择和水平可能会有所不同。智能水平是指组织准备为特定流程、制造资产和工厂实施智能制造的程度。

Table 1. Intelligent manufacturing enable technology
表 1. 智能制造使能技术

分类	技术
自动化和先进的制造	机器人, 协作机器人, 在生产中自动进行不合格识别
增材制造	增材制造(3D 打印, 连接到软件)
增强现实和/或虚拟现实	用于的增强和/或虚拟现实软件和设备: 智能培训、智能维护、新产品开发、虚拟调试、(数字双)流程仿真(数字制造)
垂直整合和水平整合	传感器、执行器和可编程逻辑控制器(PLC)制造执行系统(MES)企业资源规划(ERP)监控和数据采集(SCADA)机间通信(M2M)
远程操作	通过软件和设备进行远程生产
可追踪性	最终产品的可追溯性: 原材料的可追溯性
人工智能	人工智能的预测维护、为生产的人工智能
能量管理	能效监测系统、能效改进系统
连接性和分析支持技术	物联网、云计算、大数据分析

2.2. 能力成熟度模型

一般来说,“成熟”一词是指“完整、完美或就绪”状态,并意味着系统开发的一些进展。成熟度模型通常被用作一种概念化和衡量一个组织或一个过程中关于某些特定目标状态的成熟度的工具。成熟度模型的同义词是准备模型,目的是捕获起点并允许初始化开发过程。我们认为准备就绪度评估会在参与成熟过程之前进行,而成熟度评估的目的是捕捉成熟过程中的现行状态。成熟度模型有广泛的应用程序,但所有模型的结构都是相似的,一般来说,成熟度模型是一种测量调查对象当前状态的工具,例如,一个人、一个公司,或在特定区域内的一种行为。成熟度模型由四个基本要素组成:预设好的成熟度水平数,并附带相关描述;评价指标及其特征;每个成熟度水平与相应特征之间的联系;根据结果的成熟度水平进行的推荐活动[19]。

在能力开发的背景下,MMS 反映了组织能力的演变,MMS 是支持逐步能力开发的广泛使用的管理工具,MMS 可以是描述性的、指令性的、比较性的或任何组合,一个 MM 服务于一个描述性的目的,如果它有助于评估一个组织的成熟度,一个指令性的目的,如果它提供了如何确定一个理想的未来成熟度的指导,并建议实现它的措施,以及一个比较的目的,如果它支持内部或外部基准(Mettler *et al.* 2009) [20]。

根据这些目的,MMS 通常被概念化为矩阵,包括水平上的成熟度阶段和垂直轴上的维度,维度代表特定领域的能力领域(也称为重点领域、过程领域或因素),涵盖分析单元的不同方面,每个能力领域都可以通过实践操作。至于能力领域,在以前的研究中发现的众所周知的领域可能是足够的,而潜在的实践可以通过文献综述来确定,并辅以专家访谈完善。成熟阶段是成熟的原型水平,反映了一组不同的特征,也就是说,每个能力区域的所有实践都被分配到成熟阶段(Forstner, E., N. Kamprath, and M. Roßlinger, 2014) [21]。

为了将实践分配到成熟阶段,有自上而下和自下而上的方法。自上而下的方法被应用于对什么是成熟度知之甚少的领域,即定义“完整、完美或准备状态”和“使某物成熟的过程”的领域。因此,一般成熟度阶段被确定,然后将实践分配到成熟度阶段来操作。相比之下,自下而上的方法主要用于有证据表明什么是成熟度的领域,但对如何衡量成熟度知之甚少。这是首先通过确定每个能力区域的实践,然后归纳地分类它们来定义成熟度业务研究阶段,例如,通过进行调查,包括标准化问卷来评估实践的

困难(Cleven *et al.*, 2014) [22]。

2.3. 已有典型智能制造能力成熟度框架和理论模型

目前, 为了评估智能制造能力成熟度, 专家们编制并开发了许多成熟度评估模型, 其中包括美国 SMSRL 模型[23]、德国 IMPULS IRI 模型[3]、新加坡 SIRI 模型[24]、普华永道 RAMI 模型[4]和中国 IMCMM 模型[25]等:

Table 2. Typical intelligent manufacturing capability maturity model
表 2. 典型智能制造能力成熟度模型

模型名称	研究机构/资料来源	评估维度与方法
美国 SMSRL (2017)	Jung K, Kulvatunyou B, Choi S <i>et al.</i>	假设智能制造本质上是密集使用信息和通信技术来提高制造系统性能; 聚焦于制造系统的 4 个维度、6 个等级; SMSRL 评估的输出主要是描述性的。
德国 IMPULS IRI (2015)	VDMA, RWTH Aachen, IW Consult	提出了一种就绪模型和在线评估工具, 确定其对工业 4.0 的准备程度; 具体包括 6 维的评估、18 个项目、5 个级别的就绪度; 确定了进入下一阶段的障碍以及如何克服这些障碍的建议。
新加坡 SIRI (2019)	新加坡经济经发局与国际测试、检查、认证与培训机构 TÜV SÜD 联手创建	根据工业参考体系架构模型(RAM)框架提出, 包括 3 大基础模块和 8 大支柱以及底层 16 项评估指标; 以 6 个评级来决定企业目前处在什么阶段。
普华永道 RAMI (2016)	普华永道咨询公司	侧重于将“数字化”策略作为工业 4.0 功能的关键; 就绪度模型基于 4 个阶段以及 7 个维度。
中国 IMCMM (2016)	中国电子技术标准化研究院	生命周期、系统层级和智能功能 3 个维度; 10 大类核心能力以及细化的 27 个域; 模型中对相关域进行从低到高 5 个等级的分级与要求。

我们认为, “IMPULS-工业 4.0 准备就绪度”、新加坡 SIRI (2019)、中国 IMCMM (2016)的开发是基于一个全面的数据集, 并提供了关于等级、维度、指标和评估方法的细节。该类模型具有科学基础、结构和结果。表 2 中列出了典型的智能制造能力成熟度相关的评价模型。

本研究旨在提出一个成熟度模型和相关工具, 系统地用于评估中国制造企业基于数字化、网络化、智能化阶段的智能制造能力准备度和成熟度。成熟度模型是通过结合基于先前开发的模型的科学和实际方法来开发的。从该模型的测量结果中, 希望能从中国智能制造公司获得有关智能制造准备状态和成熟度的数据。通过这种模式, 它还允许公司自己实际评估智能制造能力的成熟度, 并反映对其当前战略的遵从性。

3. 智能制造能力成熟度模型构建流程

为了构建 IMMM 的设计过程, 我们遵循了 Becker *et al.* (2009) [6]被广泛使用的过程模型。它在 Hevner 的设计科学方法中有强大的理论基础, 并提供了一个严格的方法。按照 Becker 的程序, 进行了多方法的开发方法, 包括系统的文献研究和综述、专家访谈、概念建模和验证以及该领域新模型的测试(见图 1)。

我们使用自上向下的方法开发 IMMM, 将 AP 分配到成熟度阶段。现有的成熟阶段和这些阶段的进展提供了一个合理的基础。相比之下, 自下而上的方法是不合适的, 因为它专注于如何衡量成熟度。因此, 自下而上的方法旨在开发 MMS 基于大型数据集的推导得出成熟度阶段。由于智能制造(IM)是一个跨学科和复杂的现象, 专家很难获得, 因此, 通过自下而上的方法开发 IMMM 是不可行的。

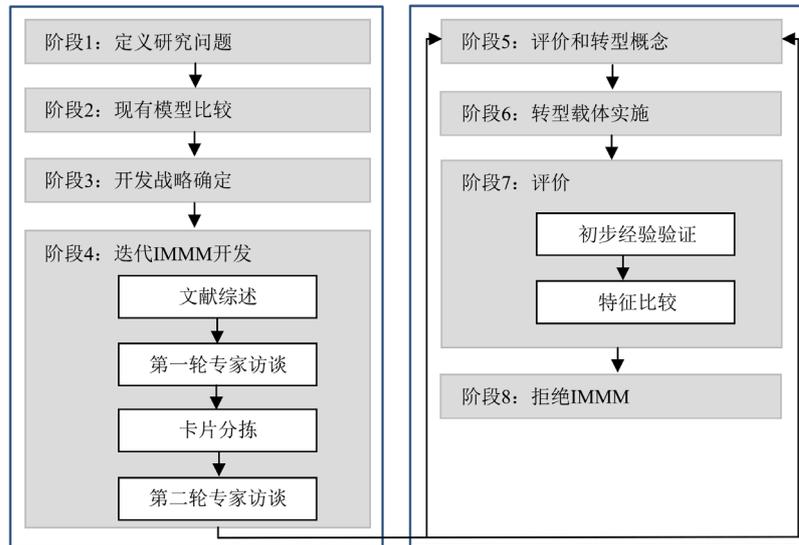


Figure 1. IMMM development process based on Becker maturity model
图 1. 基于 Becker 成熟度模型开发的 IMMM 开发流程

使用自上而下的方法，我们选择了构建一个阶段性的 MM，因为每个 AP 都代表了一个针对智能制造(IM)开发的动作，这需要实现不同水平的经验。因此，应将 AP 分配到其实施是合理的成熟度阶段。这并不意味着 AP 在其他成熟度阶段并不重要，而是表明哪些 AP 已经可以在较低的成熟度阶段实施，哪些需要更多的经验。将 IMMM 设计为一个连续的 MM 似乎是不可行的，因为根据文献中所包含的信息，在成熟度阶段区分 AP 是不可能的。

定义研究问题(第 1 阶段): IMMM 使组织能够评估其现状和未来的 IM 的成熟度。IMMM 的目标是任何在市场上运作的组织(或“独立”的部门)。由于 IM 的实施具有战略意义，IMMM 对高管很有用，特别是那些从事战略、创新管理、组织设计或业务发展的人员。

关于现有的 MM 回顾(第 2 阶段): 回顾了 IMMM 文献，总结现有智能制造(工业 4.0)呢你成熟度评估模型，总结其特点，分析存在的研究缺口，证实我们的研究差距和对 IMMM 研究的必要性。

开发策略(第 3 阶段): 我们将现有 MM 的结构组合为一个新的 MM，因为文献提供了关于能力开发的成熟知识和描述性 IM 知识。因此，我们通过采用现有的能力领域、IM 类型和成熟度阶段来开发了 IMMM。

评估 IMMM 中间结果(第 4 阶段): 开发 IMMM 时，我们轮流从文献中获得知识和与从业者一起评估中间结果。因此，我们进行了结构化的文献综述和卡片分类。为了继续进行评估，我们在两轮半结构化访谈中进行了专家访谈，以讨论 IMMM 的全面性、一致性和问题充分性(Becker *et al.* 2009) [6]。

IMMM 的迭代开发和评估(第 5 阶段和第 6 阶段): 为了将 IMMM 转移给制造业企业，我们让从业者参与了 IMMM 的迭代开发和评估。此外，我们还计划发布一个手册和一个评估工具来评估其组织的现状和未来的 IM 成熟度。为了评估 IMMM (第 5 阶段和第 7 阶段)，我们选择了一种涵盖经验和理论视角的评估策略。总的来说，其目标是确定 IMMM 是否与研究问题相一致，创造效用，并扩展关于 IM 的现有知识。

4. 智能制造能力成熟度(IMMM)模型描述

4.1. 智能制造能力成熟度领域维度和标准

为了定义模型架构，确定执行这些活动的制造过程非常基础，这对智能化转型具有战略意义。在构建制造相关过程时，首先要考虑的是它们如何高度依赖于公司的生产策略。构建了一个模块化和可扩展

的架构,使其能够适应公司使用不同生产战略的需求,从而进行评估。为了使架构尽可能通用,最终确定了3个主要领域和14个维度。这3个领域涵盖了一个公司价值链中的主要活动。公司的最终IM能力级别取决于所有维度的IM能力级别的综合。

4.1.1. 技术领域方面

信息和通信技术(ICT)融入制造过程,是四大工业革命的基础,新技术将成为智能制造转型的核心。技术方面包括技术、资源与平台3个维度。技术领域标准及其具体标准及其表述见表3。

Table 3. Standards in the technical field

表 3. 技术领域方面的标准

标准	描述
技术	包括为产品添加“大脑”的数字化技术;允许供应商、企业、设备和产品之间低成本且广泛的连接的网络化技术;以及具有“感知和学习”的能力的AI和大数据技术。具体有:技术自动化、智能制造设备准备就绪、机器集成与互操作性、操作数据收集、IT和数据安全、IT系统支持、处理和分析能力、大数据、云计算、AI、AR等等
资源	数字化人才、数字能力和结构化通信;基于业务需求的基础网路设施(硬件基础设施+网络基础设施)、基于识别传感技术核心管理技术的智能设施、无人化与少人化的存储搬运和生产自动化设施;劳动力、机械、设备、工具、材料和最终产品;信息系统、软件工具和管理系统等。
平台	设备平台:机器人、两个AGV、一个输送机系统和一个仓库 工业网络平台:在不同通信技术的信息交互和智能连接中发挥着关键作用,如工业无线本地网络(Wi-Fi、ZigBee)、工业以太网、工业近场通信(近场通信)和移动通信。 数据分析平台:涉及大数据的分析、计算和知识挖掘。 云服务平台:大量的制造资源存储在云平台上,它提供提供了模式识别、准确的建模、知识发现、推理和决策能力等不同类型的的人工智能服务。

4.1.2. 流程(Process)领域方面

智能制造最重要的变化之一是关注所有物理资产的端到端数字化,以及与价值链合作伙伴集成到数字生态系统的优化流程,进而实现虚拟与现实、设备与设备、地域/组织与管理、作业与管理、信息化与自动化、产品与服务等的融合,通过数据驱动管控、智能决策优化,最终实现敏捷柔性生产。流程领域具体标准及其表述见表4。

Table 4. Standards in the process area

表 4. 流程领域方面的标准

标准	描述
系统集成互联	互联网及其互补技术作为整合物理对象、人类参与者、智能机器、生产线和核心供应商,形成新型的以智能和大部分自主方式操作的敏捷智能网络和价值链,需要尽可能少的人为干预。具体包括:工厂内外产品和资产生命周期的全面集成;价值网络中所有利益相关者的全面整合;基于数字化、网络化、智能化支持的新业务模式。
数据驱动管控	物理资产、设备与企业系统集成,以实现持续和动态的数据交换和分析以数据和分析为核心功能,集成的产品生命周期、数据收集、数字建模和数据使用在智能制造框架内发挥着评价、监控、预测、控制以及决策优化的核心作用。
智能决策优化	通过认知计算、机器状态感知、机器学习、实时数据分析等智能技术实现操作优化、动态重新配置和智能决策并独立、明智地实施行动。
敏捷柔性生产	以全局化的视角,协同优化制造单元内生产、质量、库存、物流、能源、设备及成本业务以及多基地制造单元之间的制造和物流协同,实现生产和销售、计划、采购之间的快速协调响应,满足高质量、多品种、小批量、敏捷性的柔性制造。

4.1.3. 战略与组织领域方面

战略与组织使企业智能制造转型的重要保障。智能化战略不仅关注企业内部的职能和流程的智能化战略，更关注其在市场上的整体竞争力，差异化能力、连接和影响消费者的能力，以及融合、维护、拓展生态的能力。战略与组织方面包括战略、组织结构、管理机制、领导风格、变革文化等。战略与组织领域具体标准及其表述见表 5。

Table 5. Standards in the areas of strategy and organization

表 5. 战略与组织领域方面的标准

标准	描述
战略	解决智能制造企业战略的战略规划和控制。包括智能制造战略实施程度、智能制造战略与管理。
组织结构	有助于实现智能化转型的扁平化、有机式、自主赋能、打破边界、互为主体、整体多利、柔性灵活、效率协同的共生型组织结构和敏捷动态价值网络。
管理机制	以共生组织整体价值为本，重视每一位成员的价值创造，通过赋能与激活充分发挥成员的创造性激情，让共生组织成员能够互助成长、共享成就。数据驱动的管理与自组织管理成为趋势。
领导风格	领导者有广阔的视角和对未来智能化转型趋势、路线图、方法论的洞见，敢于挑战物理世界和网络世界之间的分界线，他们帮助共生组织成员构筑智能化转型的愿景蓝图，把梦想与力量传递给每位成员。领导者有能力引领组织内员工，用共生价值驱动员工，并协调员工与共生组织达成一致的价值创造。实现牵引陪伴、协同管理、协同赋能的无我领导。
变革文化	以客户为中心、扩大客户参与、提升客户满意，支持冒险行为、颠覆性思维和探索新思想的创新文化，接受新技术，愿意分享和应用新技术，开放和合作。

4.2. 智能制造能力成熟度水平

一旦给出了体系结构，成熟度级别仍然未定义；然而，它们是成熟度评估中的相关问题。事实上，为了这项工作的目标，制造公司的智能化准备程度是通过成熟度水平来定义的。这些级别描述了一组适当的公司能力，以提供其当前(智能化制造)能力的对照。这些级别是基于中国工程院关于智能制造 3 范式框架的原则。在提出的模型中，制造商的 IM 能力分为 4 个级别，即模拟制造级、数字化级、数字化网络化级、数字化网络化智能化级。

4.2.1. Level 0: 模拟制造阶段

IT 系统和办公软件均应用于价值链的主要业务流程中。IT 网络已部署，互联网/内部网。产品设计采用 CAD，但制造工艺由有经验丰富的工程师决定，并以纸质文件准备、储存、流通。生产领域采用数控机床，数控程序是手工制作的。生产计划和管理仍然依靠人力。MES 尚未应用，因此材料循环和工艺质量信息记录在现场的纸张上。定期维护和故障维护是设备管理的方式。作业车间的材料运输由手动手推车完成。专业的管理系统可以应用于关键的业务流程中，但这些系统并没有相互集成。

4.2.2. Level 1: 数字化制造阶段

通过计算、通信、控制(3C)和其他数字化技术为产品添加了“大脑”，通过对产品信息、工艺信息和资源信息进行数字化描述、集成、分析和决策，进而优化生产流程、缩短产品研发周期、降低制造成本、强化产品质量控制、提高企业劳动生产率、快速生产出满足用户要求的产品；管理信息系统位于价值链的关键业务流程中，如 ERP/PDM/CAPP/MES/SCM。3D、CAD 工具用于产品的数字化；产品设计、材料清单和技术文件采用 PDM 系统进行管理；现场的数控机床连接到 OT 网络，数控程序可下载到机床；MES 系统已实现

调度、计划、监控和维护；质量控制与质量管理标准保持一致；此外，还对与质量相关的数据进行了监测和分析。原材料和库存信息。企业信息化仍处于本地应用阶段；数据驱动的服务，通过服务支持新的运营效率和收入流(即数据驱动的服务的可用性)恶习，来自数据驱动服务的收入份额，所使用数据的份额。

4.2.3. Level 2：数字化网络化制造阶段

网络化技术允许设备和产品之间低成本且广泛的连接，制造技术和网络化技术深度融合，实现了装备、物料、人员的信息连接，进而形成跨行业、跨领域的产业链维度上的工业互联网平台方案；网络化生产环境以及集成生产计划和调度系统发挥关键作用，将制造和管理模式转变为基于灵活、敏捷和协作制造的更严格、自主和动态自适应的控制；基于网络化生产(NM)的综合生产计划和调度满足许多经常相互冲突的目标和目标，如缩短制造周期、缩短交货时间、更好的互操作性和保持生产灵活性，从而实现许多可行的流程计划，所有这些要求都可以基于适当的支持技术通过 IPPS 实现集成、互操作性和数字化，以实现必要的主要和共同的企业目标；管理信息系统(ERP、PDM、MES、SCM 等)涵盖了所有关键业务流程，产品设计、工艺设计和生产均在 IT 系统与 OT 系统实现垂直集成且支持生命周期质量跟踪；从供应商到客户以及所有关键价值链合作伙伴实现水平集成，催生了 PdM、个性化定制等新模式。

4.2.4. Level 3：数字化网络化智能化制造阶段

制造技术和数字化网络化智能化技术的深度融合，数字孪生模拟物理系统实现了对不同场景的实时优化，智能化技术(AI 和大数据)使产品具有“感知和学习”的能力，从而引发产品功能和性能的根本性变化；管理人员的决策完全依赖于客观的数据和事实，信息系统可以对未来的事件进行预测，生产系统的自适应性得到了大大的提高，生产领域的生产单位可以实现一定程度的自主性，制造模式从面向生产模式转变为面向服务模式；个性化、网络协作和远程维护已成为主要的业务模式。

4.3. 智能制造能力成熟度模型架构评价指标说明

综合智能制造能力成熟度维度以及成熟度水平层次，本研究构建的智能制造能力成熟度框架体系及其评价说明见表 6。

Table 6. Intelligent manufacturing capability maturity architecture and its indicator description

表 6. 智能制造能力成熟度架构及其指标说明

智能制造能力成熟度模型框架评价指标	
TI (Technical Index)指标：智能制造能力成熟度模型-技术环节指标	
评级	评价说明
L0 模拟制造	不使用传感器，产品没有通信连接接口，产品无监控，公司不符合智能制造的任何要求，有些要求处于较低的水平。 没有建立面向智能制造的物理平台。
L1 数字化制造	传感器/执行器已集成、物理产品(产品、设备)使用 ICT 组件(例如传感器，RFID，通信接口)能够收集有关环境和自身状况的信息； 数据可视化，过程数字化和自动化，数字安全和合规性； 数字化制造包含数字化技术，如数控技术、企业资源规划(ERP)、制造执行系统(MES)、供应链管理(SCM)； 产品/平台、机器和外部系统以及收集数据产品可以在制造和公司内部之间移动时进行跟踪； 能从产品中获得的数据为其业务提供服务/见解，系统维护、诊断控制基于数据。 车间资源如自主机器、机器人、增材制造系统等物理平台健全，通过负责数据采集、存储和通信的通信网关(Http、Mqtt、Mt)将数据通信到网络物理层； 制造过程中的大数据分析受到越来越多的关注，在质量和过程控制、能源和环境效率、主动诊断和维护、安全和风险分析应用广泛；

Continued

		传感器读取由产品处理, 公司的产品能够与其他系统进行通信, 产品、设备具有现场总线接口, 可以连接网络交换数据;
L2	数字化网络化制造	系统自动化、集成和控制 Systems automation, integration, and control, 推动制造技术和网络化技术融合(如电子商务、物联网、在线协作); 企业内部各个部门和下属单位所有的信息系统全部连在一个网上, 企业的外部联系, 全部通过互联网进行, 把企业内部网的一部分向外部合作单位开放, 求得横向打通; 网络物理平台作为制造系统的虚拟化界面, 主要用于可视化多个功能或操作;
L3	数字化网络化智能制造	智能设备 Smart devices: 包括机器人、输送机和其他基本的控制平台; 过程智能化技术: 智慧连接技术(产品计算/信息系统、物联网), 数据信息转换技术(大数据、云计算、计算科学), 网络化自动控制技术(智慧控制和自主修复); 自主决策技术(边缘计算、计算机与信息科学、建模与模拟软件、计算的基础设施模型、算法、软件和数据); 云平台将传统制造的根源扩展到面向服务的制造, 使者如数字孪生、增强现实、CPS 等技术。

PI (Process Indicators)指标: 智能制造能力成熟度模型-流程环节指标

评级	评价说明
L0	模拟制造 在装配自动化方面, 已经增加了制造生产能力, 该控制包括序列控制、安全监控和质量控制; 研发信息化、产品信息化、生产信息化、管理信息化以及业务流程和组织再造; 对流程控制不力, 操作效率低下, 管理具有反应性, 显示出不当的组织技能, 技术工具与基础设施不一致; 数字化和自动化的子流程部分集成, 包括生产集成或与内部和外部合作伙伴的集成, 部分实施协作的标准流程。
L1	数字化制造 通过计算、通信、控制(3C)和其他数字化技术, 使制造方式从模拟模式转为数字模式, 数字化解决方案正在进行中或实现于内部数据交换的通信, 准确可靠的提高制造质量、效率; 实现了数字化对传统工业的改造: 多样化的计算机辅助系统(从辅助制图 CAD、到计算机辅助工程仿真 CAE、到计算机辅助制造 CAM), 全流程完全依赖计算机软件(ERP、CRM、SCM、SRM、PDM、MES)的控制和支撑; 数字化技术的基础设施安装和操作完备, 生产系统在机器层面上完全自动化, 或在生产线/单元层面上部分自动化; 垂直数字化、标准化和协调公司内部流程和数据流, 与外部合作伙伴的有限集成; 流程定义明确, 已经为分散做好了准备, 在数字技术支持下实现了互操作性原则, 组织展示管理能力, 但有一些局限性, 允许更改业务、流程、管理和技术, 以实现环境的可持续性;
L2	数字化网络化制造 在数字环境中, 在工厂级提供操作过程可追溯性, 端到端可见性以及生产定制级较高, 几乎所有的流程都能够分散, 在先进数字技术的支持下实现了互操作性原则; 工厂不断适应新的条件(如订单情况和材料可用性), 并独立优化生产流程, 它与价值链中的供应商和客户建立了网络; 实现制造业产品、生产、服务各环节的低成本连通, 实现了设备和设备, 设备和系统, 以致万物互联(IoE), 从设计、材料管理到生产线和分销的工厂级的计算机集成制造系统产生, 出现了 PdM、个性化定制等新模式; 有价值的操作和流程向标准化转变: 垂直集成包括传感器和与已建立的 ERP 系统的连接, 管理在外部协助下应用最新的概念来改进标准, 标准化处于所期望的水平, 建立 EMS(电子制造服务)和 GSCM(绿色供应链管理)的标准流程; 水平集成和互操作性包括供应链和机器网络, 并对新技术进行了评估, 通过跨网络的完全集成进行密集的数据使用; 过程被自动化, 应用高级分析(SCM 和 CRM), 管理变得独立;
L3	数字化网络化智能制造 集成的合作伙伴生态系统, 端到端数字集成可以跨越价值链进行; 提供高级的数据驱动的服务, 在分析和数据共享的帮助下对于所有的运营流程, 组织都会适应不断变化的技术, 以改善业务, 实施环境的可持续性, 并引导改善自然环境; 认知计算、数字孪生、人工智能、机器状态感知、实时数据分析基础上的自我优化、虚拟化流程和自主决策; 智能系统的监控, 使其更动态和高效;

Continued

SOI (Strategic and Organizational Indicators) 指标: 智能制造能力成熟度模型-战略与组织指标

评级	评价说明
L0	<p>模拟制造</p> <p>单一功能聚焦, 数字化、网络化、智能化制造没有推行; 组织结构还不合适转型, 现有的产品和服务与低级资源支持的数字商业模式不兼容; 公司将低预算分配给技术, 并计划对一些职能运营进行投资;</p>
L1	<p>数字化制造</p> <p>正在实施数字化战略, 并在一些领域进行投资, 有产生商业模式或改变当前商业模式的试点举措; 组织结构适合于数字化转型, 数字化在公司职能部门和公司内部已经开展, 但各部门之间的互动也很有限、跨功能、部门的协作没有结构化和一致地执行; 公司的产品能够实时进行数据管理, 并通过不同的站点进行跟踪, 此外, 数据驱动的服务产品处于中等水平; 以技术为中心的领域拥有数字技能的员工, 在业务的大多数领域, 有良好的数字技能和正确的 数字心态与数字文化, 现有的产品和服务与由中等级别资源支持的数字商业模式兼容; OT/IT 组织正在成立, 以便在运营和业务系统之间提供安全、适应性强的连接;</p>
L2	<p>数字化网络 化制造</p> <p>制定了面向数字化网络化的协同化战略并在实施中, 领导在广泛业务中对数字化 网络化协同制造的广泛支持, 组织结构良好, 便于转型; 现有的产品和服务与由高级资源支持的数字商业模式兼容; 在整个业务中, 前沿的数字和分析技能很普遍, 公司存在中央 IT 部门, OT/IT 部门一起工作, 基于数字信任的合作, 各部门开放接受跨职能的合作, 形成了高度协作, 跨越公司边界, 面向合作伙伴和客户的文化; 公司与许多利益相关者有合作伙伴关系, 通过与供应商、合作伙伴和客户的接口, 产品嵌入 一个生态系统, 以便共同创造和额外/新的价值捕获, 跨职能的专家团队、跨不同渠道实现 一致的用户体验, 跨公司边界、文化和鼓励共享; 有组织的团队可以确保设置新的工作流程、图表和职责, 从而使他们不会因为工作数据 资本而被公司数据池淹没; 员工对新技术的开放度较高、员工的自主权较强、知识产权保护较好, 能较好的实现知识共享; 组织结构适合于初始智能化转型项目, 并且正在生成新的商业模式。</p>
L3	<p>数字化网络 化智能制造</p> <p>有足够的资源投入智能化转型, 针对智能制造的劳动规范, 技术标准的适用性好, 有实施智能化转型的路线图; 协同是关键的价值驱动因素, 业务模式具有自适应性, 不受传统组织影响的孵化器、 无任何正式层次结构的跨学科团队设置、创造性无层次的创意实验室; 领导团队为智能化转型提供了广泛的支持, 并为几乎所有部门进行了投资, 组织结构适合管理 整个公司的转型, 智能制造转型委员会保证了智能制造环境下的坚强领导力。</p>

5. 结论

本文分析比较了现有智能制造能力成熟度模型的不同特征, 基于研究缺口, 开发了适合中国制造业企业智能化能力评估的智能制造能力成熟度模型(IMMM)。根据研究结果, 已开发的智能制造能力成熟度包括技术、流程、战略与组织 3 个领域、12 个评估维度和 128 个可操作性实践。模型开发使用多混合方法进行, 从系统的文献研究开始, 通过跟踪之前开发的行业成熟度和准备就绪模型的出版数据, 进而与专家一起完成对半结构化访谈模型的理解和开发, 对制造业行业进行了深入调查, 开发了该模型。

作为与中国工程院提出的数字化、网络化、智能化三范式相匹配的概念化和操作化双外部性发展的 IMMM 模型, IMMM 具有理论和管理意义。我们研究的理论意义有两方面: 首先, 我们的研究提供了根据三个能力领域结构的 128 个 AP, 扩展了 IM 的描述性知识。定义为与实施相关的明确行动, 反映了研究和实践的见解。此外, 用于分组 AP 的三个能力领域确保了 IM 被整体考虑。最后, 将 APs 分配到 IM 类型中, 阐明了不同的 IM 类型是如何相互关联的。其次, 我们通过将 APs 分配到成熟度阶段, 扩展了关于 IM 的描述性和说明性知识。研究结果首次说明了实施 AP 所需的经验水平。因此, IMMM 可用于

评估组织的 IM 成熟度，并作为确定合适的 IM 成熟度的基础。

至于管理影响，IMMM 回应了在面对智能制造转型挑战时的指导需求。一方面，IMMM 可以评估组织智能制造能力的现状和成熟度水平；另一方面，可以帮助制造业企业在实践中应用 IMMM，根据组织的背景和战略选择智能化转型路径。

基金项目

国家自然科学基金面上项目“大数据能力驱动大规模个性化定制的实现机理与影响效应研究”（项目编号：72072171）；江苏省社科基金规划项目“中国制造 2025 背景下江苏传统制造企业智能化转型升级研究”（项目编号：17GLB011）；教育部人文社会科学研究规划项目“制造业企业与互联网融合发展的水平测度、影响因素和提升路径研究”（项目编号：17YJA630033）。

参考文献

- [1] Thames, L. and Schaefer, D. (2017) *Industry 4.0: An Overview of Key Benefits, Technologies, and Challenges*. Springer International Publishing, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9_1
- [2] Esmaeilian, B., Behdad, S. and Wang, B. (2016) The Evolution and Future of Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing Systems*, **39**, 79-100. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>
- [3] Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., et al. (2015) IMPULS Industrie 4.0-Readiness. Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-köln. <http://www.impuls-stiftung.de/documents/3581372/4875835/Industrie+4.0+Readiness+IMPULS+Studie+Oktober+2015.pdf/447a6187-9759-4f25-b186-b0f5eac69974>
- [4] Geissbauer, R., Vedso, J. and Schrauf, S. (2016) *Industry 4.0: Building the Digital Enterprise: 2016 Global Industry 4.0 Survey*. Price Water House Coopers, Munich. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
- [5] Schumacher, A., Erol, S. and Sihni, W. (2016) A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, **52**, 161-166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- [6] Becker, J., Knackstedt, R. and Poppelbu, J. (2009) Developing Maturity Models for IT Management. *Business & Information Systems Engineering*, **1**, 213-222. <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>
- [7] dos Santos-Neto, J.B.S. and Costa, A. (2019) Enterprise Maturity Models: A Systematic Literature Review. *Enterprise Information Systems*, **13**, 1-51.
- [8] Kagermann, H. (2015) *Change through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0*. Springer Fachmedien Gabler, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_2
- [9] Tao, F., Zhang, L., Nee, A., et al. (2016) Editorial for the Special Issue on Big Data and Cloud Technology for Manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **84**, 1-3. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8495-6>
- [10] Fei, T., Qi, Q., Liu, A., et al. (2018) Data-Driven Smart Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, **48**, 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- [11] Wan, X.J., Liu, L., Xu, Z., et al. (2018) Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Optimized Soft Competitive Learning Fuzzy ART and Similarity Evaluation Technique. *Advanced Engineering Informatics*, **38**, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.06.006>
- [12] Shafiq, I.S., Toro, C. et al. (2016) Virtual Engineering Factory: Creating Experience Base for Industry 4.0. *Cybernetics and Systems: An International Journal*, **47**, 32-47. <https://doi.org/10.1080/01969722.2016.1128762>
- [13] Lee, J. (2020) Integration of Digital Twin and Deep Learning in Cyber-Physical Systems: Towards Smart Manufacturing. *The Institution of Engineering and Technology*, **38**, 901-910.
- [14] Ghobakhloo, M., Azar, A. et al. (2018) Lean-Green Manufacturing: The Enabling Role of Information Technology Resource. *Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics*, **47**, 1752-1777. <https://doi.org/10.1108/K-09-2017-0343>
- [15] Kusiak, A. (2017) Smart Manufacturing Must Embrace Big Data. *Nature*, **544**, 23-25. <https://doi.org/10.1038/544023a>
- [16] Kusiak, A. (2019) Service Manufacturing: Basic Concepts and Technologies. *Journal of Manufacturing Systems*, **52**, 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.07.002>

-
- [17] 周济, 李培根, 周艳红, 等. 走向新一代智能制造[J]. *Engineering*, 2018(1): 11-20.
- [18] Rojas, R.A. and Rauch, E. (2019) From a Literature Review to a Conceptual Framework of Enablers for Smart Manufacturing Control. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **104**, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03854-4>
- [19] Fraser, P., Moultrie, J. and Gregory, M. (2002) The Use of Maturity Models/Grids as a Tool in Assessing Product Development Capability. *IEEE International Engineering Management Conference*, Cambridge, 18-20 August 2002.
- [20] Mettler, T., Rohner, P. and Winter, R. (2009) Towards a Classification of Maturity Models in Information Systems. Physica-Verlag HD, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2404-9_39
- [21] Forstner, E., Kamprath, N. and Roeglinger, M. (2014) Capability Development with Process Maturity Models—Decision Framework and Economic Analysis. *Journal of Decision Systems*, **23**, 127-150. <https://doi.org/10.1080/12460125.2014.865310>
- [22] Cleven, A.K., Winter, R., Wortmann, F. and Mettler, T. (2014) Process Management in Hospitals: An empirically Grounded Maturity Model. *Business Research*, **7**, 191-216. <https://doi.org/10.1007/s40685-014-0012-x>
- [23] Jung, K., Kulvatunyou, B., Choi, S. and Brundage, M.P. (2016) An Overview of a Smart Manufacturing System Readiness Assessment. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, Springer, Cham, 705-712. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7_83
- [24] Singapore Economic Development Board (2019) The Singapore Smart Industry Readiness Index: Catalysing the Transformation of Manufacturing. <https://www.edb.gov.sg/content/dam/edb-en/about-edb/media-releases/news/the-smart-industry-readiness-index/SIRI%20Manufacturing%20Transformation%20Insights%20Report%202019.pdf>
- [25] 中国电子技术标准化研究院. 智能制造能力成熟度模型[EB/OL]. <http://manager.cechina.cn/UpLoad/article/f8f929f4-c531-4943-95db-3310285e84ca/5156e9bb-fc26-48e0-b595-59058656a0ed.pdf>, 2016.