Research  
Intelligent Manufacturing—Review

## 智能制造——比较性综述与研究进展

王柏村<sup>a,b,c</sup>, 陶飞<sup>d</sup>, 方续东<sup>e,\*</sup>, 刘超<sup>f</sup>, 刘宇飞<sup>c</sup>, Theodor Freiheit<sup>b</sup><sup>a</sup> State Key Lab of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA<sup>c</sup> Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China<sup>d</sup> School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China<sup>e</sup> School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China<sup>f</sup> School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 27 March 2020

Revised 17 July 2020

Accepted 20 July 2020

Available online 20 September 2020

## 关键词

智能制造

工业4.0

人-信息-物理系统

## 摘要

智能技术在制造业的应用对于全世界的科研人员及制造行业来说已经成为了一个热门话题。“Smart manufacturing”(SM)和“Intelligent manufacturing”(IM)这两个名词已被科研人员及制造业从业者作为专用术语广泛使用。虽然SM和IM看上去是类似的,但两者也有一定区别。从智能制造这一名词诞生发展至今,很少有文献考证SM与IM的定义、理念、内涵及技术发展是否一致。为了弥补这个漏洞,本研究通过对以往文献进行定性和定量的分析,系统地比较SM和IM的差异,并阐明两者之间的联系。通过对文献来源、年发行量、关键词频率和研究发展的主要领域进行文献计量分析,可以得出当前智能制造研究的范围和发展趋势。同时,本文对SM与IM的起源、定义、发展及关键技术进行讨论,并对实现架构、行业标准、国家/地区发展重点进行了比较分析。随着工业4.0的发展,人工智能迅速地应用在现代制造业与人-信息-物理系统,SM与IM这两个概念有合二为一的发展趋势,因此深入理解SM和IM变得越来越重要,本研究将为此提供支撑。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

信息和通信技术 (ICT) 在制造系统中发挥着重要的作用。网络系统与相关智能技术[1–4]的不断发展催生了大数据、工业4.0、物联网 (IoT)、云计算、信息-物理系统 (CPS)、数字孪生 (DT) 及新一代人工智能技术 (AI) [5–8], 同时各种先进的生产模式被提出, 基于这些理念可以改良制造工艺、促进生产系统智能化的发展。表1 [3,9–12]列出了几篇关联或比较分析这些理

念及技术的文献。

近几年, 大多数国家已经意识到了制造业改造升级的重要性, 全社会对制造业数字化、网络化、智能化的关注不断升温。学术界与相关行业的研究人员为了描述制造业与先进信息技术的深度融合提出了两种制造模式, 即“Smart manufacturing”(SM)与“Intelligent manufacturing”(IM) [4,13–15]。

学者们对SM与IM的联系已经进行了初步研究。Zhou等[4]将IM的发展划分为三个阶段: 2000年前为第

\* Corresponding author.

E-mail address: [dongfangshuo30@xjtu.edu.cn](mailto:dongfangshuo30@xjtu.edu.cn) (X. Fang).

表1 对工业4.0中新兴理念/技术进行对比分析的相关文章

| Objectives   | Reference |
|--|-----------|
| Analyze CPS and DT to highlight their relations and differences          | [3]       |
| Overview on Industry 4.0 and smart manufacturing (SM) programs           | [9]       |
| Compare cloud manufacturing and Industry 4.0 from different perspectives | [10]      |
| Review intelligent manufacturing (IM) in the context of Industry 4.0     | [11]      |
| Compare big data and DT  | [12]      |

一阶段，即数字化制造，使用计算机支持机器及系统层面的操作，并在一定程度上应用了专家决策系统；2000年之后为第二阶段，即SM阶段，在这个阶段，数字化制造通过改进数字化模型、利用网络来适应动态环境和客户需求；2020年之后为第三阶段，即新一代智能制造阶段（NGIM），使用机器学习（ML）、大数据、物联网更好地实现人机系统融合。Thoben等[9]认为SM与IM在有些时候虽然意义相同，但是相对于组织管理理念，IM更多地侧重于技术，而SM更多强调分析和控制。Yao [16]和Zhang [17]等将SM看作IM的更新版本，再加以利用物联网、信息-物理系统、云计算、大数据等智能技术可使工业4.0成为可能。

这些研究反映出关于SM与IM之间关系的一些早期观点，然而并不能确定SM与IM之间是否真正存在差异，还是仅仅因为科研人员之间缺乏沟通和共识造成的术语差异。此外，在SM与IM的发展中，各类文献也对SM与IM的定义、理念、内涵及技术发展缺乏考证。“Smart”和“Intelligent”两个含义相近的形容词经常被用于描述聪明的人，而词典中对“Intelligence”的定义在智能程度上要高于“Smartness”。在非英语国家，SM与IM经常被翻译为同一个词，如果表示不同的含义时则可能会造成混淆。例如，在中国，SM与IM被经常翻译为同一个词“智能制造”。

关于SM与IM之间关系的其他问题包括：

- SM与IM的起源与学术上的定义是什么？
- 它们与其他生产模式/范式（包括柔性制造和云制造等）的关系是什么？
- 它们的发展情况是否有所不同，特别是关键技术、框架架构等方面？
- SM与IM的发展趋势是相互融合还是相互背离？

为了对两种术语进行辨析，消除智能技术在现代制造业应用中的一些误解，本文系统地比较了SM与IM的研究领域、典型技术和架构，强调了各自的特征，并进一步提出了SM与IM融合发展的未来路径。

## 2. 研究方法

本文研究内容包括了对SM与IM概念和定义的概述和比较，对两者研究内容及架构的讨论。分析研究（图1）按照下面的步骤展开。

（1）通过对Web of Science (WoS) Core Collection和Scopus数据库的文章标题、摘要及关键词进行文献计量学分析，然后通过网络分析对高频率关键词进行定量分析。

（2）以高频率关键词为基础，从文献中回顾研究进展，并确定SM与IM的起源、发展、关键技术及实现架构等关键主题。确定SM/IM发展时间顺序并定性分析常见定义、特征与原则。

（3）评估SM、IM及其他模式/范式之间的关系，并且对SM和IM相关关键概念的共现关系进行量化。

（4）通过计算关键词频率讨论共性关键技术并综述相关案例。

（5）回顾SM和IM的实现构架和国家/地区的发展重点，并寻找其中典型的影响因素。

## 3. 文献计量学分析

文献计量学能分析评估当前文章研究的趋势，提供整个领域的框架结构和未来研究的指导方针和动机[18,19]。通过将“intelligent manufactur\*”及“smart manufactur\*”作为查询词条对标题、摘要和关键词进行检索，从WoS和Scopus中收集截至2019年的文献计量学数据。在这一部分，我们比较了SM和IM的文献数量的增长、国家地区的分析与协作、顶级期刊及会议分布和关键词的共现频率。

### 3.1. 每年文献发表量

从每年WoS（图2）和Scopus（图3）中SM与IM文献的发表量可以反映出学者们的研究兴趣。在数据库中

发现的第一篇有关SM的文章是Schaffer [20]在1986年写的，文中提出“人工智能是智能制造（SM）的一种工具”。从1985年到2008年，关于IM的文献数量增长较缓慢，从WoS及Scopus数据库中得知从1991年到2012年IM文章年发表量大约在20~60篇。在2008年，Scopus中有关SM的论文数量出现了一个小峰值，数量超过了100篇，实际他们主要来源于当年的智能制造应用国际会议（ICSMA），但这些文章只有极少数真正地讨论SM。图2和图3都显示大约从2013年开始，学者们才在SM与IM上投入了更多的关注，在2015年开始变得更热。

### 3.2. 国家 / 地区及研究机构分析

表2为在WoS数据库中不同地区的文献发表数量。

发表SM相关文献最多的国家是美国，其次是中国、德国、韩国和英国；中国在IM相关文献发表数量上领先，其次是美国、英国、加拿大和德国。总的来说，美国、中国、德国所有关于SM和IM的文章占全球总量的53%，这三个国家实际上也已经将SM与IM作为国家制造业计划或政策的核心[21–23]。其他国家或地区似乎更倾向于其中某一种术语。例如，日本、法国、加拿大、西班牙和葡萄牙总的来说在两种术语中更倾向于IM，发表关于IM和SM的文章数目比例是2：1，罗马尼亚、斯洛伐克、墨西哥和匈牙利基本只使用IM。相反地，意大利和韩国更倾向于使用SM，发表关于SM和IM的文章数目比例是1.6：1，而澳大利亚、奥地利、新西兰和芬兰基本只使用SM。英国、印度、瑞典和巴西使用两种术语的文献数目基本相同，偏差不超过15%。

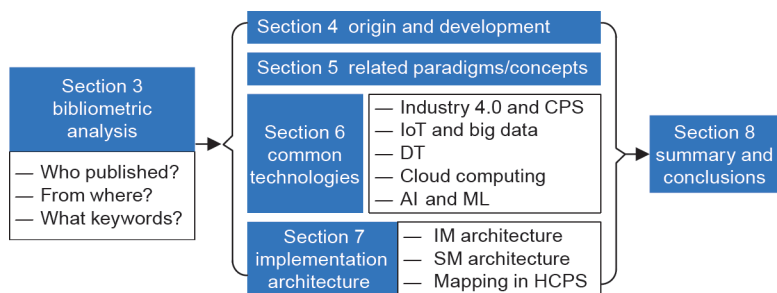


图1. 研究范畴和章节划分。

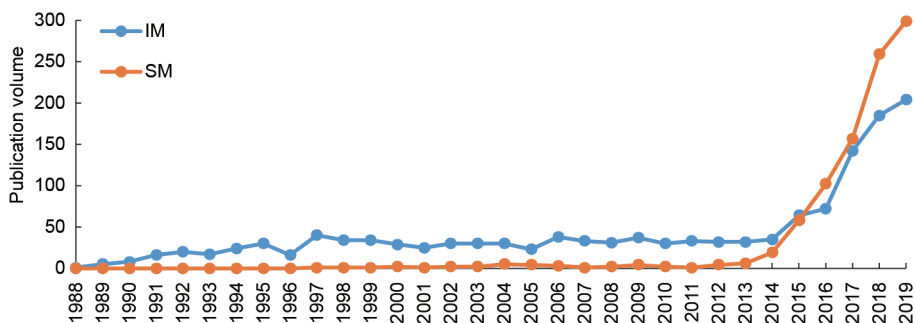


图2. 在WoS数据库中，从1988年到2019年每年关于SM与IM的文献发表量。其中，关于SM共1069篇，关于IM共1467篇。

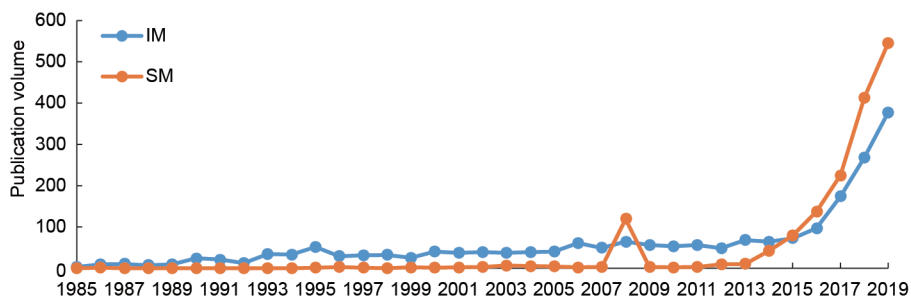


图3. 在Scopus数据库中，从1985年到2019年每年关于SM与IM的文章发表量。其中，关于SM共1968篇，关于IM共2297篇。

表2 发表SM/IM相关文章数量排名靠前的国家/地区

| Topic       | Country/region    | Count    | Topic | Country/region    | Count | Topic             | Country/region | Count         |     |
|-------------|-------------------|----------|-------|-------------------|-------|-------------------|----------------|---------------|-----|
| SM          | United States     | 239      | SM    | Finland           | 10    | IM                | Slovakia       | 21            |     |
|             | China             | 194      |       | Portugal          | 9     |                   | Mexico         | 20            |     |
|             | Germany           | 67       |       | Scotland          | 9     |                   | Brazil         | 19            |     |
|             | Republic of Korea | 57       | IM    | China             | 455   |                   | Hungary        | 19            |     |
|             | England           | 56       |       | United States     | 142   |                   | Sweden         | 18            |     |
|             | Italy             | 51       |       | England           | 55    |                   | Poland         | 18            |     |
|             | France            | 33       |       | Canada            | 54    |                   | SM or IM       | China         | 649 |
|             | Japan             | 32       |       | Germany           | 52    |                   |                | United States | 381 |
|             | Sweden            | 21       |       | Japan             | 50    |                   |                | Germany       | 119 |
|             | India             | 21       |       | France            | 48    |                   |                | England       | 111 |
|             | Spain             | 17       |       | Italy             | 37    | Italy             |                | 88            |     |
|             | Australia         | 17       |       | Spain             | 37    | Republic of Korea | 87             |               |     |
|             | Brazil            | 16       |       | Republic of Korea | 30    | Japan             | 82             |               |     |
|             | Canada            | 14       |       | Romania           | 28    | France            | 81             |               |     |
|             | Austria           | 11       |       | India             | 25    | Canada            | 68             |               |     |
| New Zealand | 11                | Portugal |       | 23                | Spain | 54                |                |               |     |

图4展示了国家地区间合作发表文章情况。不同节点大小代表国家/地区的合作强度，线的粗细代表了两个国家或地区间的合作频率。图中出现的较为清晰的国家的文章发表量均超过10篇。在图4（a）中可以看到，美国、中国、英国和瑞典在SM领域的合作最多，同时，文章发表量较少的国家（如澳大利亚、巴西和加拿大）合作频率也很高。在图4（b）中可以看到，中国、美国、英国、加拿大和德国在IM上的合作最多，同时，SM出版物较少的国家（如新西兰和芬兰），也有较高的合作频率。

表3是在WoS数据库中已发表与SM和IM有关论文的研究机构情况。美国国家标准与技术研究院（NIST）已发表SM相关论文数量最多，大约是排名2~6的机构各自发表数目的6~7倍。发表关于IM论文数目最多的都是高校，其中华中科技大学和北京航空航天大学的论文数目为后面五所大学的1.6~1.8倍。在SM与IM相关文章发表机构中，北美洲、亚洲和欧洲的大学在其中都占有一席之地。

### 3.3. 排名靠前的来源期刊

表4是在WoS数据库收录SM和IM文章最多的期刊列表。*IEEE Access*中收录SM相关文章数量最多，紧接着是*Journal of Manufacturing Systems*和*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*，排名前七的每个刊物收录SM相关文章都超过10篇。*Journal of*

*Intelligent Manufacturing*中收录IM相关文章数量最多，超过了*IFAC-PapersOnLine*的两倍，排名前十的刊物收录IM相关文章数目均超过10篇。在这些刊物列表中，*IEEE Access*、*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*和*IFAC-PapersOnLine*同时都收录了SM与IM相关文章。

### 3.4. 关键词共现频率

VOSviewer是一种广泛使用的信息可视化工具[24]，本文使用VOSviewer进行了关键词共现频率分析。通过分析发现工业4.0、CPS、设计、大数据、物联网、框架和模型占了SM的共现词的约50%。其他排名靠前的概念包括：优化、互联网、管理和智能工厂。关于IM排名前50%的共现词包括：（智能制造）系统、设计、架构、最优化、工业4.0、建模、遗传算法和仿真。其他排名靠前的概念包括：代理、大数据（分析）和（架构）神经网络。

通过分析SM与IM的共现词随时间的变化，可以观察使用倾向和发展趋势，见图5和图6（为保证图片清晰度，只有共同出现8次以上的名词才出现在网络中）。在网络中，从蓝到黄的颜色梯度代表了文献发表时间从早到晚。与IM相关的早期名词出现在2000年左右，有专家系统、模糊逻辑、神经网络、代理、柔性制造系统、计算机集成制造（CIM）和计算机辅助设计（CAD）等；与SM相关的早期名词出现在2010年左



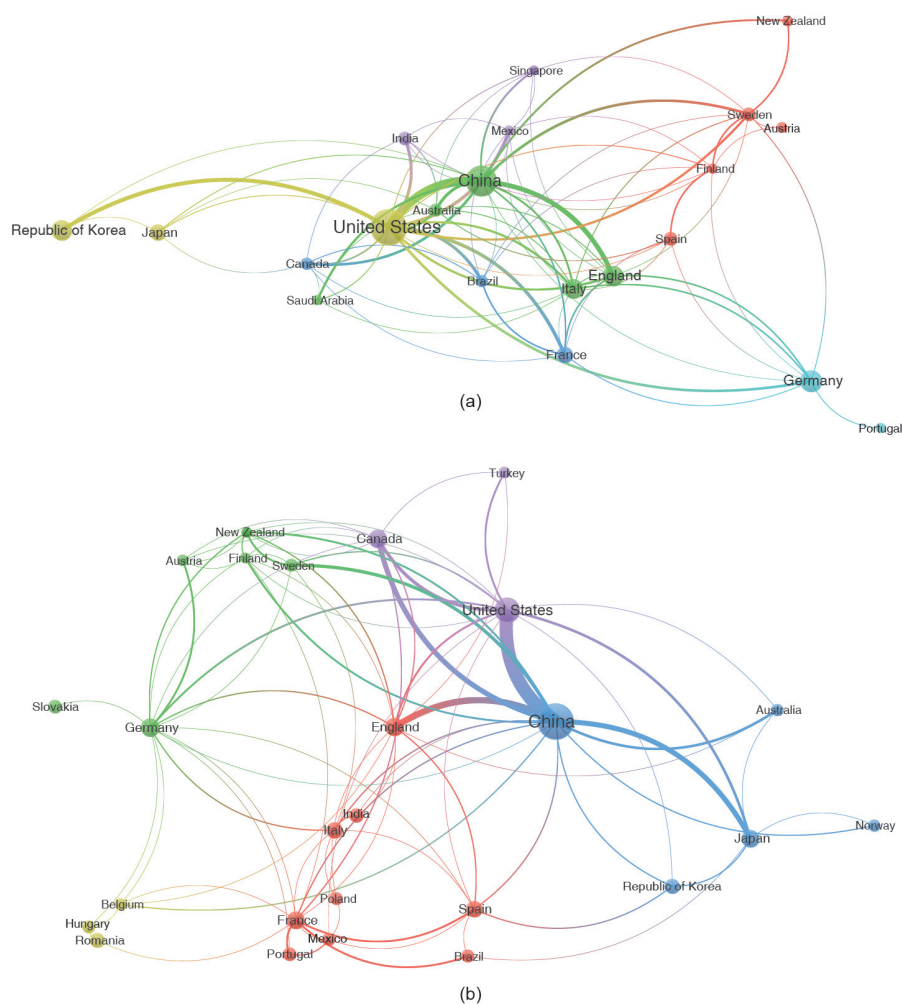


图4. SM (a) 和IM (b) 国际合作研究网络。

表3 发表SM/IM相关文章最多的机构

| Topic | Institution                              | Count | Topic                               | Institution                        | Count                                |    |
|-------|--|-------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----|
| SM    | NIST                                     | 65    | IM                                  | Chinese Academy of Sciences        | 15                                   |    |
|       | South China University of Technology     | 13    |                                     | University of Calgary              | 14                                   |    |
|       | Beihang University                       | 12    |                                     | Tsing Hua University               | 14                                   |    |
|       | University of California, Los Angeles    | 12    |                                     | Georgia Institute of Technology    | 12                                   |    |
|       | Shanghai Jiao Tong University            | 12    |                                     | Xi'an Jiaotong University          | 12                                   |    |
|       | The University of Texas at Austin        | 10    |                                     | Shanghai Jiao Tong University      | 12                                   |    |
|       | Sungkyunkwan University                  | 10    |                                     | Tsinghua University                | 11                                   |    |
|       | The University of Auckland               | 9     |                                     | Wuhan University of Technology     | 11                                   |    |
|       | Korea Institute of Industrial Technology | 8     |                                     | Hungarian Academy of Sciences      | 11                                   |    |
|       | Polytechnic University of Milan          | 7     |                                     | Polytechnic University of Valencia | 10                                   |    |
|       | Case Western Reserve University          | 6     |                                     | SM or IM                           | NIST                                 | 65 |
|       | George Mason University                  | 6     |                                     |                                    | Beihang University                   | 36 |
|       | Pennsylvania State University            | 6     |                                     |                                    | South China University of Technology | 29 |
|       | Texas A&M University                     | 6     |                                     |                                    | HUST                                 | 26 |
|       |  |       |                                     |                                    | Shanghai Jiao Tong University        | 24 |
| IM    | HUST                                     | 26    | Politehnica University of Bucharest | 15                                 |                                      |    |
|       | Beihang University                       | 24    | Chinese Academy of Sciences         | 15                                 |                                      |    |
|       | South China University of Technology     | 16    | University of Calgary               | 14                                 |                                      |    |
|       | Politehnica University of Bucharest      | 15    |                                     |                                    |                                      |    |

NIST: US National Institute of Standards and Technology; HUST: Huazhong University of Science and Technology.

表4 收录SM和IM相关文章最多的期刊

| Topic                                       | Journal   | Count |
|---|---|-------|
| SM  | <i>IEEE Access</i>  | 25    |
|   | <i>Journal of Manufacturing Systems</i>                           | 22    |
|   | <i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i> | 21    |
|   | <i>International Journal of Production Research</i>               | 19    |
|   | <i>IFAC-PapersOnLine</i>  | 17    |
|   | <i>Manufacturing Engineering</i>                                  | 13    |
|   | <i>Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing</i>    | 10    |
|   | <i>Sensors</i>  | 8     |
|   | <i>International Journal of Computer Integrated Manufacturing</i> | 8     |
| IM  | <i>Journal of Industrial Information Integration</i>              | 8     |
|   | <i>Journal of Intelligent Manufacturing</i>                       | 73    |
|   | <i>IFAC-PapersOnLine</i>  | 30    |
|   | <i>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</i>             | 28    |
|   | <i>International Journal of Production Research</i>               | 27    |
|   | <i>Computers in Industry</i>                                      | 26    |
|   | <i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i> | 22    |
|   | <i>IEEE Access</i>  | 19    |
|   | <i>Engineering</i>  | 15    |
|   | <i>Computers &amp; Industry Engineering</i>                       | 13    |
|   | <i>IEEE Transactions on Industrial Informatics</i>                | 12    |
| SM or IM                                    | <i>Journal of Intelligent Manufacturing</i>                       | 73    |
|   | <i>IFAC-PapersOnLine</i>  | 47    |
|   | <i>International Journal of Production Research</i>               | 46    |
|   | <i>IEEE Access</i>  | 44    |
|   | <i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i> | 43    |
|   | <i>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</i>             | 28    |
|   | <i>Computers in Industry</i>                                      | 26    |
|   | <i>Journal of Manufacturing Systems</i>                           | 22    |
|   | <i>Engineering</i>  | 15    |
| <i>Computers &amp; Industry Engineering</i> | 13  |       |

右，有工业4.0和自动化，这可能揭示了两个模式起源的核心。更多关于起源的细节和SM与IM的发展将会在第4部分详细阐述。与IM有关的最新关键词是工业互联网、智能工厂、云计算和信息-物理系统（图5）。与之类似的是，与SM有关的最新关键词是：信息-物理系统、智能工厂、云计算、大数据、物联网（图6）。工业4.0概念和实践的拓宽应用很可能推动了SM与IM相关关键词的使用。

关键词使用频率揭示了SM与IM共同的理念和技术，包括工业4.0、信息-物理系统、物联网、大数据、数字孪生、云计算和人工智能。第6部分将会综述和讨论这些技术。框架、架构也是SM和IM的共同关键词，第7部分将讨论相关内容。

## 4. 智能制造的起源与发展

本部分主要回顾和讨论SM和IM的起源、定义、功能和准则。

### 4.1. SM 和 IM 的起源

有种观点认为SM最早出现在20世纪80年代末，据我们所知，这个观点可以被最早的将人工智能与SM联系起来的文章——*Artificial intelligence: a tool for smart manufacturing* [20]所证明。紧接着是1987年出版的*Smart manufacturing with artificial intelligence* [25]，阐述了人工智能如何提高生产率和生产过程中的利润率。这本书包含的主题：人工智能、专家系统和计算机辅

表5 SM/IM的高频率共现词

| Topic | Keywords                  | Count | Topic | Keywords               | Count | Topic | Keywords                     | Count | Topic | Keywords                      | Count | Topic    | Keywords                  | Count |
|-------|---------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|----------|---------------------------|-------|
| SM    | SM                        | 312   | SM    | Performance            | 23    | IM    | IM                           | 258   | IM    | Internet                      | 24    | SM or IM | SM                        | 325   |
|       | Industry or Industrie 4.0 | 153   |       | Architecture           | 21    |       | IM system                    | 138   |       | Multi-agent (system)          | 20    |          | IM                        | 258   |
|       | CPS(s)                    | 84    |       | SM systems             | 18    |       | Design                       | 88    |       | Integration                   | 19    |          | Industry or Industrie 4.0 | 204   |
|       | Design                    | 77    |       | Analytics              | 17    |       | Architecture                 | 57    |       | Scheduling                    | 19    |          | Design                    | 165   |
|       | Big data                  | 70    |       | Maintenance            | 16    |       | Optimization                 | 51    |       | Classification                | 19    |          | IM system                 | 138   |
|       | Internet of thing or IoT  | 63    |       | Algorithm              | 16    |       | Industry 4.0                 | 51    |       | Prediction                    | 19    |          | Big data (analytics)      | 104   |
|       | Framework                 | 54    |       | Digital manufacturing  | 16    |       | Model                        | 49    |       | RFID                          | 18    |          | Model                     | 100   |
|       | Model                     | 51    |       | Cloud manufacturing    | 16    |       | Genetic algorithm            | 38    |       | Flexible manufacturing system | 17    |          | CPS(s)                    | 99    |
|       | Optimization              | 45    |       | Integration            | 16    |       | Simulation                   | 36    |       | Implementation                | 16    |          | Optimization              | 96    |
|       | Future                    | 42    |       | Data analytics         | 16    |       | Agent(s)                     | 34    |       | CPSs                          | 15    |          | Framework                 | 86    |
|       | Internet                  | 41    |       | Manufacturing systems  | 13    |       | Big data (analytics)         | 34    |       | IoT                           | 15    |          | Internet of thing or IoT  | 78    |
|       | Management                | 36    |       | Cloud computing        | 13    |       | (Artificial) neural networks | 32    |       | ML                            | 14    |          | Architecture              | 78    |
|       | Things                    | 28    |       | Ontology               | 12    |       | Framework                    | 32    |       | Smart factory                 | 14    |          | Internet                  | 65    |
|       | Smart factory             | 26    |       | Additive manufacturing | 11    |       | Algorithm                    | 30    |       | Smart manufacturing           | 13    |          | Simulation                | 61    |
|       | Simulation                | 25    |       | Augmented reality      | 11    |       | Manufacturing system         | 28    |       | networks                      | 13    |          | Management                | 60    |
|       | Challenge                 | 25    |       | Decision-making        | 11    |       | Management                   | 24    |       | Sustainability                | 12    |          | Algorithm                 | 46    |
|       | DT                        | 24    |       | Supply chain           | 10    |       | AI                           | 24    |       | Automation                    | 12    |          | Smart factory             | 40    |





助工艺过程设计、机器人及展望、柔性制造系统、检测和过程控制。经过近20年较缓慢的发展，有关SM的现代理念更多地伴随着工业4.0而重新出现。今天关于SM的核心观点是基于NIST [26,27]和美国Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC) [28,29]的定义而提出的。

学者们相信IM最初的起源来自人工智能和机器智能领域[30]。早期关于IM的文章在1988年[30]、1990年[31]、1995年被发表[32]。在20世纪90年代，日本对IM率先进行了研究并发起了智能制造系统(IMS)项目[33]。也是在20世纪90年代，美国和欧盟开始了IM的研究[34,35]，并和日本的IMS项目展开合作。近几年，IM和IMS正努力向更高的智能化程度发展。

#### 4.2. SM 与 IM 的相关定义

过去几年，学术界提出了SM不同的定义。

- 从工程的角度看[29]，SM是一种先进智能技术的应用，可以提高新产品的生产速度和可靠性，对个性化的产品需求做出响应，及时对生产和供应链网络进行优化调整。SM平台可以整合设计、产品、运营及跨越车间、中心、工厂、企业和整个供应链的商务系统。
- 从网络的角度看[36]，SM是信息物理系统、物联网和工业物联网(IIoT)的应用，可以通过传感器和通信技术捕获整个生产中各个层次的数据。随着时间推移，SM会变得更智能，生产率会提高，错误和生产过程中的浪费会减少。
- 从决策的角度看[37]，SM利用可访问的大量区域数据来协助生产企业更好地预测和维持生产过程与系统，并提高生产率。基于大数据分析，SM会优化生产实践中的控制过程，包括进度规划、故障诊断、供给预测和评估。

在过去10年，学者们也提出了关于IM不同的定义。

- 从代替人类智慧的角度看，IM中自动化的生产操作就像熟练工在执行任务一样[38,39]。IM系统利用人工智能技术最大限度减少了人类在生产活动和生产系统中的介入。
- 从系统集成的角度看，IM使用不同等级的机器智能融入生产过程和系统，包括人工智能支持系统、人工智能集成系统和全智能系统[39]。
- 从智能科学的角度看[2]，IM旨在通过整合先进的信息技术、计算能力和人工智能，建立全球性

或地区性的可适应的生产车间和系统。从数据智能处理的角度看，IM依赖于实时性获取、分配、分析和利用来自人、机器以及整个车间、工厂和整个跨产品生命周期过程中的实时数据。

- 从人-信息-物理系统(HCPS)的角度看[1,4,40,41]，IM是一个为实现生产目标整合人、物理系统、信息系统的复合系统。IM是一种在不同系统层次上设计、架构和应用HCPS的组织系统。先进信息技术已促进IM从数字化制造演变为数字化网络化制造，并正走向新一代智能制造。

#### 4.3. SM/IM 的特征和准则

学者们已经提出了关于SM的特征、性能和准则[13,28,42,43]，NIST对其关键性能的总结是：敏捷性、高质量、高生产率和可持续性[44]。

- 敏捷性：在不断变化和充满竞争的环境中，通过有效反馈来实现满足客户需求的产品设计和服务，以此生存并能保持活力的能力。技术对敏捷性的实现至关重要，包括建模和仿真、供应链集成和分布式智能。
- 高质量反映了如何按设计规范很好地完成产品制造。在应用SM的情况下，质量也意味着产品的创新程度和用户定制化程度。
- 传统意义上，生产力是生产中产入和产出的比率，包括制造时间、成本、劳动力、材料和能量效率。对SM来说，生产力的衡量标准还包括对客户需求的响应，这更体现了个性化的重要性。
- 可持续性被定义为制造业对环境、社会及员工福祉的影响，以及其经济可行性。与时间、成本等驱动传统产业的因素相比，可持续性已经变得更加重要。然而，在热门的研究领域，可持续性还不是十分成熟。

Kusiak [38]、Oztemel [39]和Rzevski [45]提出IM系统应该有如下特征：

- 适应性是最重要的特征之一，是在不影响目标结果的情况下适应不断变化环境的能力。
- 自维护是一种无需人为干预便可检测故障并进行校正的能力，IM系统可利用该特征进行重新配置。
- 学习和自我进步是IM系统的一个重要特征，可以通过不断更新知识库或通过现有知识进行试验并评估其性能来升级系统。

- 自主性表示一种独立程度，没有它，智能性会受到限制。
- 通信通过生成报告、下达命令和开始运行使子系统和组件展开合作。
- 预测能力是一种预测变化以及该变化对系统性能所产生的影响的能力。
- 目标搜寻是一种根据系统当前状态和任务制定、提炼和升级目标的能力。
- 创造性是希望IM系统可以创造新理论、新原则及预测等。这个能力需要与系统组件进行交互，和更高等级的自主性一样，这也是当前IM系统想要达到的效果。

在IM系统的前期设计中，人类起着十分重要的作用，“以人为中心”可以处理不断出现的未知问题，使人类可以保持对生产过程的控制，但目前对人机协作原则的关注较为缺乏[40,41]。与20世纪90年代的IM不同的是，周济[1,4]和王柏村[46]等在人-信息-物理系统(HCPS)理念的基础上，将数字化网络化智能化制造定义为新一代智能制造(NGIM)。受AI2.0 [8,47–51]的启发，新一代智能制造反映了最新人工智能技术与先进制造技术的深度融合。新一代智能制造系统最基本的特征是在信息系统增加了强大的认知及学习能力，去不断提高系统学习能力、扩大其知识储量。

#### 4.4. SM/IM的发展比较

第3部分总结的文献计量数据可以用来分析和比较SM和IM的演变发展，仔细观察它们的发展轨迹可以更好地理解它们的相关性和一致性。从图2中展示的每年文献数量增长情况看，SM/IM的发展可以被分为4个阶段：1990—2000年为第一阶段，2001—2010年为第二阶段，2011—2015年到第三阶段，2016年到2020年5月(文章投稿时)为第四阶段，见表6 [11,28,52–58]。尽管其他的划分方法也是可能的，但是我们相信这种划分方法可以更好地帮助理清SM和IM相关研究的发展情况。

**第一阶段(1990—2000年)：**这个阶段发表了约270篇文章。出现次数最多的关键词按顺序分别是：IM(系统)、神经网络/人工智能、专家系统、自动代理、计算机集成制造、并行工程、模糊控制和柔性制造系统。在这一阶段，SM/IM最基础的特征包括了专家系统、灵活性和神经网络的应用。在这个阶段，最多被提起的术语是IM、计算机集成制造、并行工程和柔性制造。

**第二阶段(2001—2010年)：**这个阶段约有327篇文章被发表。这些文章中使用最多的关键词包括：IM(系统)、(遗传)算法、(多)代理、最优化、建模/仿真、合弄制造、人工智能、集成、知识、模糊逻辑、神经网络、射频识别技术(RFID)、SM等。这一阶段最

表6 从文献分析角度看SM/IM的发展

| Topic                                 | Phase I<br>1990–2000  | Phase II<br>2001–2010  | Phase III<br>2011–2015   | Phase IV<br>2016–May 2020  |
|---------------------------------------|---|--|--|--|
| Primary features                      | Expert systems, flexibility, and neural network   | Agent application, integration, and knowledge engineering  | Optimization, networking, and management   | Big data, IoT, and ML  |
| Keywords (from high to low frequency) | IM (system), neural network, AI, expert system, autonomous agents, manufacturing system, architecture, CIM, design, concurrent engineering, fuzzy control, and flexible manufacturing systems | IM (system), architecture/framework, design, (genetic) algorithm, (multi-) agents, optimization, model/simulation, holonic manufacturing, AI, integration, knowledge, fuzzy logic, neural networks, RFID, and SM | IM (system), SM, optimization, design, architecture, model/simulation, multi-agent, management, Industry 4.0, framework, RFID, big data, Internet, and sustainable manufacturing | SM (system), Industry 4.0, IM(system), design, big data (analytics), model, Internet, CPS, framework, optimization, IoT, management, DT, smart factory, (genetic) algorithm, ML, cloud computing, deep learning, IIoT, and Industrial Internet |
| Most related paradigms                | IM, CIM, concurrent engineering, and flexible manufacturing   | IM and holonic manufacturing   | IM, SM, and Industry 4.0   | SM, Industry 4.0, and IM   |
| Paper number in WoS                   | 270 papers  | 327 papers   | 276 papers   | 1570 papers  |
| High citation papers                  | Tomiyama [52]<br>Zhang and Huang [53]   | Shen et al. [54]<br>Leitão [55]  | Davis et al. [28]<br>Jardim-Goncalves et al. [56]  | Kang et al. [57]<br>Zhong et al. [11]<br>Hofmann and Rüsçh [58]  |

基础的特征包括代理应用、集成化和知识工程。在这个阶段被提到最多的术语按顺序分别是：IM、合弄制造，一小部分文章提到了SM。

**第三阶段 (2011—2015年)：**在这个阶段约有276篇文章被发表。在这些文章中使用最多的关键词包括：IM（系统）、SM、最优化、建模/仿真、多代理、管理、工业4.0、框架、射频识别技术、大数据、互联网和可持续制造。在这一阶段，SM/IM最基础的特征包括：优化、网络和管理。在这个阶段，最常被提起的术语按顺序分别是：IM、SM和工业4.0。

**第四阶段 (2016年至2020年5月)：**在这个阶段大约有1570篇文章被发表，显示了对SM/IM的研究快速增长的现象。这些文章中被使用最多的关键词包括：SM（系统）、工业4.0、IM（系统）、大数据（分析）、互联网、信息-物理系统、最优化、物联网、数字孪生、智慧工厂、（遗传）算法、机器语言、云计算、深度学习、工业物联网和工业网络。在这个阶段SM/IM主要特征包括：物联网、大数据、云计算和机器学习。最常被提起的术语按顺序分别是：SM、工业4.0和IM。

通过对SM/IM的发展轨迹进行文献计量学比较，我们发现随着技术研究和热点的改变，关键词也发生了改变。从国家层面技术发展的战略和计划看，模式/范式上的改变可能已经越来越多。最新相关研究包括：在SM/IM语义下的信息链接[59]、人类的角色[1,60]、制造系统数据[61]、智能科学[2]、算法学习[62]和成熟指数[63]。通过对SM和IM发展进行分析，可以得出一个观点：SM/IM发展水平相对较低的企业和地区，可以在以往的文献中找到范式转化、制定发展战略、选择合适技术、评估成熟度阶段的指南。

## 5. 智能制造与其他制造模式 / 范式的关系

在SM与IM的发展的同时，也诞生了许多其他生产模式/范式，包括计算机集成制造、数字化制造、云制造、网络化制造、信息-物理生产和社群化制造等。表7 [6,64–84]对这些模式以及它们的相关技术进行了总结。一般来说，这些模式都是相似的，都有诸如更智能决策和对制造资源优化利用的目标要求，除此之外，它们也有各自的多元性和差异性。

每个模式的研究都基于其技术和理念。例如，数字化制造使用计算机提高生产效率并减少成本；云制造利用分散管理、网络化制造和服务型架构（SOA）；信息-

物理制造系统在工业4.0中扮演了一个重要的角色。在特定区域或特定时间，制造业部门进行升级时，相关生产模式都发挥了一定的作用。

这些模式和SM/IM都展现了一个或多个共同原则，为现代SM和IM建立基础做出了贡献。为了帮助理解SM和IM的研究热点，我们根据WoS数据库中文章标题、摘要和关键词数据研究了SM或IM的共现词频率，见表7 [6,64–84]。除了先进制造外，与SM共同出现频率最高的术语为：信息-物理制造系统、云制造、数字制造和可持续制造。相应地，与IM共同出现频率最高的四个术语是：柔性制造、合弄制造、计算机集成制造和敏捷制造。SM和IM有不同的优先标准，但都利用当前最好的技术，对制造规模、成本、质量、服务和智能化进行转型升级。特别是计算机模拟、监控、信息/数据分析都在这些模式/范式中应用。在下一部分，将会更多地讨论SM和IM的共性技术。

## 6. 共性关键技术和研究领域

SM与IM的共性技术包括工业4.0、信息-物理系统、物联网、工业互联网、大数据、云计算与雾计算、人工智能和机器学习，在一定程度上，这些技术可以被认为是新一代信息技术（New-IT）[85]。表8 [2,9,11,36,46,61,62,86–96]列出了通过研究标题、摘要或关键词的共现频率得出的与SM和IM有关的共性关键技术。在文献中被提到的其他关键技术包括无线传感器网络（WSN）、增强现实（AR）、移动网络和第五代蜂窝网络技术（5G）[97–99]。

### 6.1. 工业 4.0 与信息 - 物理系统

工业4.0是德国提出的一项倡议，强调传统制造系统与新一代IT系统的全面集成[22,100]，并引起了SM和IM相关研究人员的关注。工业4.0强调通过价值网络进行横向集成、纵向集成和贯穿整条价值链的端到端集成。它与SM、IM、信息-物理系统和信息通信技术有密切关系[9,66,101–103]。Thoben等[9]对工业4.0和SM进行了概述，并且分析了信息-物理系统的潜在应用，包括产品设计、生产、物流、维护和开发。Zheng等[36]对工业4.0中的SM系统进行了分析，包括SM系统的框架、脚本说明、关键技术和潜在应用。研究工业4.0背景下IM的学者将信息-物理系统、物联网、云计算和数字工厂作为关键技术[11]。Cheng等[104]对工业4.0未来

表7 与SM和IM相关的其他制造模式

| Manufacturing paradigm       | Enabling technologies  | Co-SM | Co-IM | Reference |
|------------------------------|--|-------|-------|-----------|
| Advanced manufacturing       | The production of advanced products and the adoption of advanced information and communication technologies-based production processes | 28    | 16    | [64,65]   |
| Cyber-physical production    | Acquisition and process data, self-control tasks, and interact with humans via interfaces  | 26    | 10    | [66,67]   |
| Cloud manufacturing          | Cloud computing, IoT, virtualization, service-oriented technologies, and advanced data analytics                                       | 24    | 18    | [6, 68]   |
| Digital manufacturing        | Three-dimensional (3D) modeling, model based engineering, and product lifecycle management   | 24    | 14    | [69,70]   |
| Sustainable manufacturing    | Advanced materials, sustainable process metrics and measurement, and monitoring and control  | 13    | 15    | [71]      |
| Flexible manufacturing       | Modularized design, interoperability, and service oriented architecture  | 10    | 65    | [72]      |
| Holonic manufacturing        | Multi-agent systems, model based reasoning and planning, and decentralized control   | 1     | 44    | [73]      |
| CIM                          | Flexible manufacturing, automated guided vehicle, robotics, and automated storage and retrieval system                                 | 4     | 29    | [74]      |
| Agile manufacturing          | Collaborative engineering, supply chain management, and product life cycle management  | 0     | 19    | [75,76]   |
| Reconfigurable manufacturing | Measurement and control, process and tooling, design and configuration, and sensor   | 3     | 11    | [77]      |
| Networked manufacturing      | Network, data analysis, control, and optimization  | 1     | 7     | [78]      |
| IoT-based manufacturing      | Resource modeling, information encoding, information interaction, and data fusion and optimization                                     | 2     | 4     | [79,80]   |
| E-manufacturing              | Transformation, synchronization, prediction, and optimization of information and data  | 1     | 3     | [81]      |
| Lean manufacturing           | Process leveling, workflow optimization, and real-time monitoring and visualization  | 4     | 2     | [82]      |
| Social manufacturing         | CPS, social networking, cloud computing, XaaS, and big data  | 3     | 1     | [83,84]   |

Co-SM: co-occurrence frequency with SM; co-IM: co-occurrence frequency with IM. Source: WoS database; timespan: 1998–2018.

表8 与SM和IM有关的关键技术

| Topic | Technology                             | Co-occurrence frequency | Description  | Reference |
|-------|--|-------------------------|--|-----------|
| SM    | Industry 4.0                           | 235                     | SM systems for Industry 4.0 were examined to advance research on Industry 4.0 implementation                         | [36]      |
|       | IoT                                    | 192                     | IoT technologies and systems were as drivers of data-driven innovations in SM  | [86]      |
|       | CPS                                    | 151                     | Application potential of CPS were analyzed in context of SM  | [9]       |
|       | Big data                               | 89                      | SM must embrace big data   | [61, 87]  |
|       | AI and ML                              | 82                      | Deep learning for SM was reviewed based on the overview of evolution of data-driven AI                               | [62]      |
|       | Cloud computing                        | 49                      | A hierarchy architecture for SM based on cloud, fog, and edge computing was introduced                               | [88]      |
|       | DT                                     | 33                      | DT shop-floor towards SM was defined with its four key components  | [89]      |
| IM    | Additive manufacturing and 3D printing | 21                      | An SM based on 3D printing provided 3D objects of interest to customer   | [90, 91]  |
|       | AI and ML                              | 98                      | IM depends extensively on AI; human-robot collaboration and brain robotics are two examples of AI contributing to IM | [2]       |
|       | Industry 4.0                           | 95                      | The application of Industry 4.0 in IM through digital factory to intelligent factory was discussed                   | [11]      |
|       | IoT                                    | 70                      | IoT in the context of IM was investigated  | [92]      |
|       | Big data                               | 65                      | Big data processing methods for IM were introduced   | [93, 94]  |



(续表)

| Topic | Technology                             | Co-occurrence frequency | Description  | Reference |
|-------|--|-------------------------|--|-----------|
|       | CPS                                    | 54                      | Key technologies used in IM were investigated, including CPS   | [11, 46]  |
|       | Cloud computing                        | 26                      | Cloud computing application in IM was reviewed   | [11]      |
|       | Additive manufacturing and 3D printing | 7                       | Application of Industry 4.0 technologies with additive manufacturing in IM in food processing sector was discussed | [95]      |
|       | DT                                     | 4                       | Framework for DT manufacturing cell towards IM was proposed  | [96]      |

Source: WoS database; timespan: 1998–30 September 2019.

发展方向也进行了分析,为IM的应用提供了一定参考。与IM相关的内容还包括人-信息-物理系统、人在回路的信息-物理系统和信息-物理-社会系统[1,105–109]。

## 6.2. 物联网和大数据分析

物联网是一个将计算机、机器和人连接在一起的网路,可以被识别并进行数据共享[7,80,110,111]。大数据是指新的数据处理程序需要分析在生产环境中收集到的数据的理念,然而大数据的实现传统模式来说过于庞大和复杂。物联网和大数据分析(BDA)是SM和IM中的热门话题。Yang [86]等回顾了物联网技术在SM中数据驱动上的创新,并提出了制造业物联网(IoMT)。Kusiak [87]提出SM必须与大数据相融合,并指出SM创新中需要填补的空白:战略旋转、数据收集和共享的升级、模型预测、工厂网络和过程控制。Tao [61]等对生产数据周期和大数据在SM中的作用进行了讨论,并提出大数据能将现在的生产制造模式转化为SM模式。Bai [90]对IM中的工业物联网技术进行了研究,并对它的基础设施和交互设备进行了概述。Zhu等[112]认为IM的成功依赖于及时的获取、分配和使用大量数据;Xiao和Liu [93]将大数据处理应用在IM环境下的机械工具;Zhong等[94]介绍了利用物联网和无线技术的IM车间的大数据分析。

## 6.3. 云计算与雾计算

云计算提供可拓展的、请求式计算机资源,包括数据存储和计算能力,用户可以通过网络进行远程访问[10,68,113–115]。基于云计算可以实现云制造,这是一种服务型的制造模式,可减少资源浪费,提高资源利用率[114,116]。雾计算和边缘计算是一种与之相关的概念,其将分布式计算拓展到网络边缘的设备上,可支持新的应用和服务[117]。Park和Tran [118]研究了一种基于云技术的SM系统,该系统使用了先进的信息技术,如认知智能、云计算和群体智能。Qi和Tao [88]为SM引

入了一种层次性参考架构,将计算和网络功能部署到云的边缘。Zhong等[11]回顾了云计算在IM中的应用,与周济等[4]观点一致,将云计算看作IM的关键使能技术。

## 6.4. 工业互联网

工业互联网被认为是自18世纪中叶的工业革命以及20世纪50年代[5]的计算机革命之后的新工业革命的推动力。工业互联网的未来很大程度上取决于先进信息和通信技术在传统工业的应用,包括射频识别技术、传感网络、物联网、信息物理系统、云计算、大数据和人工智能。工业互联网相对SM/IM是一种重要且独立的研究,典型的工业互联网构架对发展早期SM/IM构架[119]产生了重要影响。Zhou等[4]提出工业互联网的特征是以智能网络、平台和安全系统的支持作为基础。Wang等[120]阐述了工业互联网平台可通过整合制造设备来完成复杂任务,这是实现SM的一件关键技术。此外,研究工业4.0和CPS应用的学者对工业互联网的理解是类似的。近期,学者们将工业互联网和物联网[98,121]结合起来,并提出了工业物联网,本文对此不作展开讨论。

## 6.5. 数字孪生

数字孪生描述的是一种多层次生产过程或系统的虚拟表现方法。数字孪生在广义上说是一个可以实现仿真、计算、监控、过程控制与系统监视[122–127]的集成系统。虽然它对SM和IM来说都是标志性技术,但是数据显示更多的文章倾向将数字孪生与SM联系在一起。Tao和Zhang [89]等将数字孪生车间定义为SM模式的一部分,讨论了物理和虚拟车间、服务系统和四个关键数字孪生组件的数据。Qi等[128]研究比较了SM服务与数字孪生相结合后从根本上改变设计、生产、使用和其他过程。Lu等[129]讨论了由数字孪生驱动的SM模型、应用和研究问题。Zheng等[130]提出随着虚拟技术和数据采集技术的迅速发展,数字孪生逐渐成为IM一种关键

研究。Zhou等[96]提出了一种由知识驱动的数字孪生制造单元IM框架，通过结合认知智能、仿真、优化、预测和控制可实现自动化制造。

## 6.6. 人工智能和机器学习

人工智能是一种通过应用逻辑、if-then规则、专家系统、决策树和机器学习等使计算机可模仿、加强或者代替人类大脑的技术[8,131,132]。人工智能早期的应用使用代理和通用算法。机器学习是人工智能的子集，包括统计技术，使机器根据经验改进任务。深度学习是机器学习的子集，它使用的软件算法是通过将大量数据导入到多层神经网络实现的。Schaffer [20]将AI视为SM的一种重要的工具，Wang等[62]回顾了SM中由数据驱动的人工智能演化中的深度学习部分，讨论了SM中典型深度学习的构架，包括卷积神经网络、自动编译和递归神经网络。Ozteme [39]阐述了为实现制造系统智能化，必须使用多重人工智能技术，而且它们必须展示出如学习、推理和决策制定的特征。Wang [2]从智能科学的角度提出IM的未来在很多方面将会依赖于人工智能。他提出了人机协作和大脑机器人这两个在IM模式下人工智能发展的典型例子。

总的来说，如今的SM和IM都使用了大量类似的技术和理念，同时，SM和IM细微的差异和偏向决定了它们的探索方向和实施方法会有所不同。例如，人工智能和机器学习被更多的应用到IM研究中，同时工业4.0和数字孪生更多的被应用到SM研究中。不过，随着SM和IM使用很多相似的关键技术，它们的边界开始变得模糊。

## 7. 智能制造的参考架构和实施

SM和IM中经常出现的两个关键词是框架（framework）和架构（architecture），这表明这两个词对智能制造的重要性。框架和架构被广泛地应用在复杂系统中，用于描述通用框架及其内部关系。框架描述了系统中的基础原理、知识表征和信息流；架构是子系统功能分配和子系统间接口的规范[133,134]。

### 7.1. 智能制造的参考架构和规范

在关于智能制造技术的系统实现与标准的文献中，有几种典型的与SM和IM相关的框架或体系架构[135]：

- 美国国家标准技术研究所提出的SME（智能制造

生态）[26,27]；

- 德国工业4.0标准和参考架构平台提出的工业4.0参考架构模型[136]；
- 中国国家标准化管理委员会（SAC）提出的IMSA架构[137]；
- 美国国家标准技术研究所提出的一种制造智能系统架构（ISAM）[134]。

图7是这四种典型框架或参考架构的示意图[27,134,136,137]。其他被提出的框架/架构还包括CPSs（F-CPSs）框架[138]、工业价值链参考体系结构（IVRA）[139]、工业互联网参考体系结构（IIRA）[119]和物联网体系结构参考模型（IoT-ARM）[140]等。尽管有多种SM相关的参考架构被提出[135,141,142]，但在本小节中，只对SME和RAMI 4.0着重进行讨论。同样，有关IM的各种参考体系也已被提出[11,45,134,143]，但在本部分只着重讨论IMSA和ISAM。

2016年，NIST为使SM系统实现标准化提出了SME [26,27]。SME由产品、生产系统和企业（商业）系统构成的金字塔结构组成（图7、表9）。NIST基于分级控制模型提出了一种系统架构模式，覆盖了SM的所有领域。在*Current standards landscape for smart manufacturing systems* [26]报告中，从生产开发周期、生产系统周期、供应链管理中的商业循环和金字塔式制造模式的角度分析了SME系统的标准。产品生命周期的标准内容包括模型建立（如ISO/TC213全球定位系统）、生产模型和数据交换（如初始图形交换规范、图纸交换格式）、制造模型数据（如ISO 14649）、产品目录数据（如ISO 13584）和产品生命周期数据管理（如产品生命周期管理可扩展标记语言）。制造业生命周期的内容标准包括生产系统模型和实践（如IEC 62832）、生产系统工程（如系统建模语言和建模）、生产生命周期数据管理（ISO 10303-239）和生产系统维护（GEIA 927）。通用业务模型标准用于生产厂家、供应商、消费者、合作伙伴和竞争对手之间的交流，包括供应链操作参考（SCOR）、开发应用程序组集成规范（OAGIS）和制造企业解决方案协会的B2MML。基于ISA 95的集成化标准，可将制造金字塔分为设备级（IEC 61784, MT Connect）、SCADA级（Modbus, ISA 88）、生产操作管理级（ISO 22400）和企业级（ISO 19440, OAGIS）。关于SM系统标准的分析结果表明当前的制造标准是不足以完全支持SM系统的[27]，还需要网络安全、云基制造业服务、供应链集成和数据分析等方面的标准。此外，还有两个因素限制

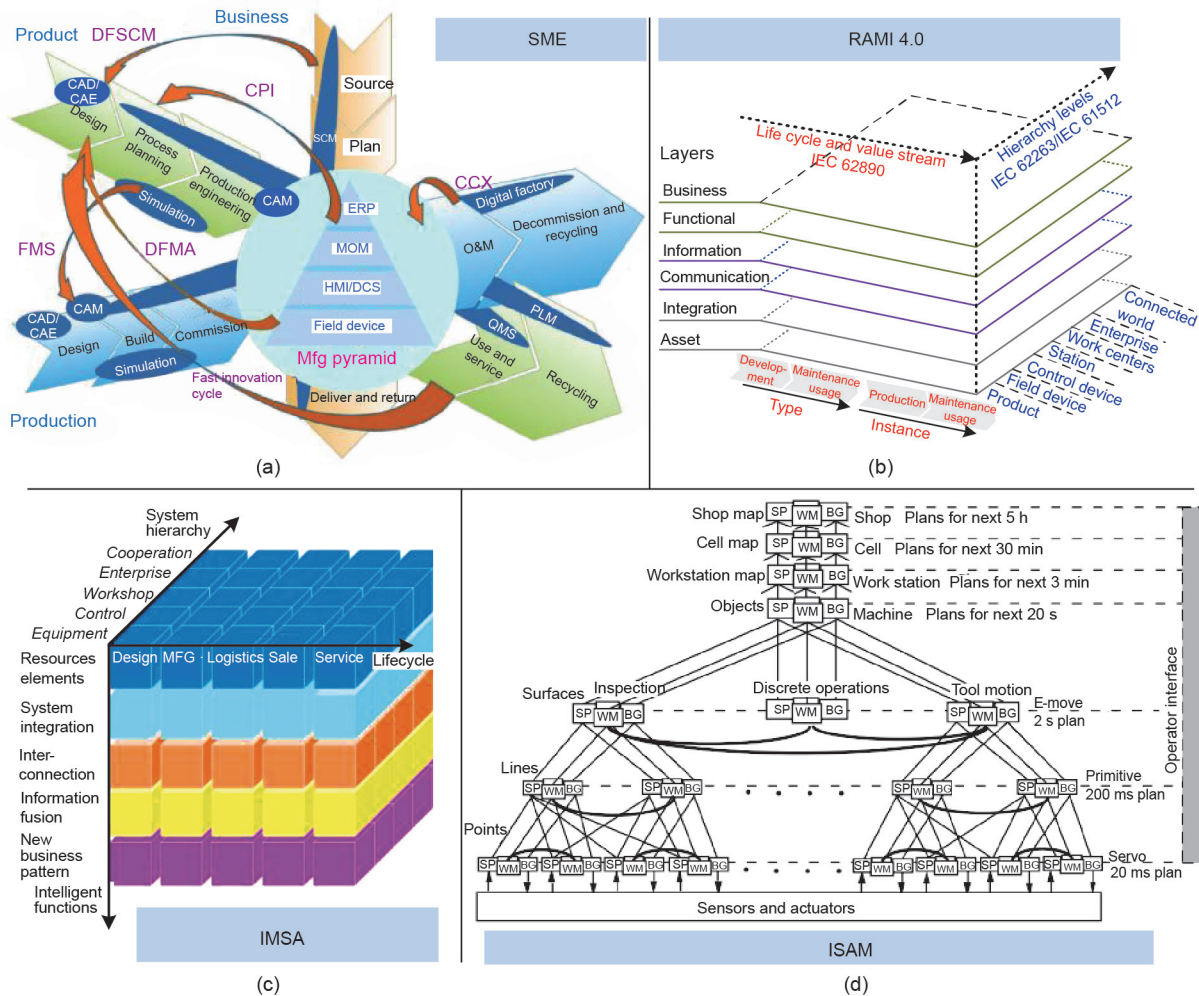


图7. SM的典型框架/架构: (a) SME [27]; (b) RAMI4.0 [136]; IM的典型框架/架构: (c) IMSA [137]; (d) ISAM [134]。CAE: 计算机辅助工程; CAM: 计算机辅助制造; CCX: 连续调试; CPI: 持续过程改进; DCS: 分散控制系统; DFMA: 面向制造和装配的产品设计; DFSCM: 基于产品协调开发的供应链设计; ERP: 企业资源计划; FMS: 柔性制造系统; HMI: 人机接口; MFG: 制造业; MOM: 生产运营管理; O&M: 使用和维护; PLM: 产品生命周期管理; QMS: 质量管理体系; SCM: 供应链关系管理; BG: 行为生成; SP: 感知处理; WM: 世界模型。

表9 美国制定的SM系统的架构SM [27]

| Dimension             | Content  | Note   |
|-----------------------|--|--|
| Manufacturing Pyramid | The vertical integration of machines, plants, and enterprise systems                                       | Manufacturing Pyramid is the core of the SM Ecosystem  |
| Product               | Design→process planning→production engineering<br>→manufacturing→use and service→End of Life and recycling | Product lifecycle data management, modeling practice, product model and data exchange, and product catalog data                      |
| Production system     | Design→build→commission→operation and maintenance→decommission and recycling                               | Production system model data, production system engineering, production lifecycle data management, and production system maintenance |
| Business              | Plan→source→make→deliver→return  | Suppliers, competitor, customers, supply channels, and strategic partners and distributors   |

了SM系统的发展, 分别是缺乏标准有效跟踪、实际使用标准的缺乏和标准之间的重叠冗余。因此, 标准发展组织之间的协调合作是必要的。

工业4.0参考架构(RAMI 4.0)中定义的领域包括了图层、生命周期价值链和层次结构, 详见图8(b) [144]

和表10 [136]。RAMI 4.0的目标是弹性制造、易于拓展或与其他SM构架连接。理论上说, 任何级别的SM企业都可以在这三级架构中找到自己的定位。RAMI 4.0一些重要的标准包括关于生命周期情况的IEC 62890、企业控制系统集成的ISO/IEC 62264和批量控制的IEC



61512。其他有关的标准还包括IEC 62541、IEC61784、VDMA 24582、IEC 61987和ISO/IEC20140。

文献[134,143]定义的系统构架可作为IM系统的参考模型，见图8（d）[144]。它为不同制造领域的IM标准和工程指导方针提供了框架。ISAM将智能过程节点组织为一个有嵌入式控制回路的多层次结构。IMSA为IM提供了模型、术语、模型评估和技术标准[137]，见图8（c）[144]和表11 [137]。此外，IMSA指出智能元素的生命周期、系统层级和功能决定了每一项IM相关技术的范围。为理清标准，IMSA提供了一个IM标准系统结构的图表，见图8 [144]。IM标准体系的结构图包括：A.基础要求；B.关键技术；C.工业应用，它们反映了不同标准体系之间的关系。截至2018年11月，中国出台或审理了大约300项IM标准，主要覆盖基础要求和关键技术。

近期，为更好地理解SM和IM之间的关系，一种作为通用参考架构的HCPS模型被提出。由于HCPS有定义明确的维度，因此HCPS很适合用于做这种比较分析[1]。表12 [1,135]映射了典型的SM与IM架构，并得出以下结论：

（1）SME、RAMI 4.0和IMSA从不同角度考虑系统集成和管理。这些结构分别描述了产品、生产周期和供应链。然而，所有的参考架构对于当前人工智能/机器语言技术、能源、材料和制造模式发展缺乏综合的考虑，这对智能制造的进一步深入实施是很重要的。

（2）在相关架构中，对人的因素的关注以及对企业

文化和人力资源的提升工作在变化。例如，RAMI 4.0中，工业4.0的参考架构、企业文化和人力资源是体现不出来的。但是事实上，工业4.0的成熟度指数[63]和日本SM/IM参考架构[139]包括这些内容。

（3）SME构架不能完全描述企业基础设施、物联网、云计算、信息物理系统、大数据和数字孪生等主要要素。例如，智能机器人、3D打印、新材料等物理系统（工业技术的）也没有在SM中被着重强调。RAMI 4.0也没有提出一个SM实现的具体方案，因为它没有覆盖到SM的所有领域并连接所有有关标准。

（4）参考架构和标准是有时效性的。标准需要根据智能制造的发展及新问题的出现和解决再去跟进修订。此外，很多发展中国家的工业仍处于半自动化阶段或在数字化或网络化的初级阶段，所以标准还要考虑到工业的复杂性。

## 7.2. 各国聚焦重点和典型实际案例

在SM/IM或工业4.0的大背景下，许多国家都启动了国家级计划，见表13 [4,11,28,64,145,146]。下面分析这些典型计划项目及具体实施中的模式选择、投资水平、聚焦重点，及其发展道路的相似之处或区别：

自2011年以来，美国已经启动了一系列制造业国家性计划和举措，包括先进制造伙伴计划和确保美国领导力的先进制造战略。先进制造中与SM/IM有关的许多政策和项目已经启动，所以它选择的模式或者首选的SM/IM术语是先进制造。在SM/IM方面，美国着重强调IT

表10 德国提出的工业4.0参考架构模型[136]

| Dimension                  | Content  | Note   |
|----------------------------|--|--|
| Layers                     | Business, functional, information, communication, integration, and asset                         | Including asset layer representing the physical world and also a virtual map |
| Life cycle and value chain | Development, production, and maintenance/usage   | Defined by IEC 62890   |
| Hierarchy levels           | Product, field device, control device, station, work centers, and enterprise and connected world | Defined by ISO/IEC 62264 and IEC 61512                                       |

表11 中国提出的IMSA构架[137]

| Dimension             | Content   | Note   |
|-----------------------|---|--|
| Lifecycle             | Design→production→logistics→sales→service   | All activities in lifecycle are associated and influenced mutually                             |
| System hierarchy      | Equipment level→control level→workshop level→enterprise level→cooperation level                       | Representing the intelligence and internet protocol of equipment as well as network flattening |
| Intelligent functions | Resources elements, system integration, interconnection, information fusion, and new business pattern | —  |



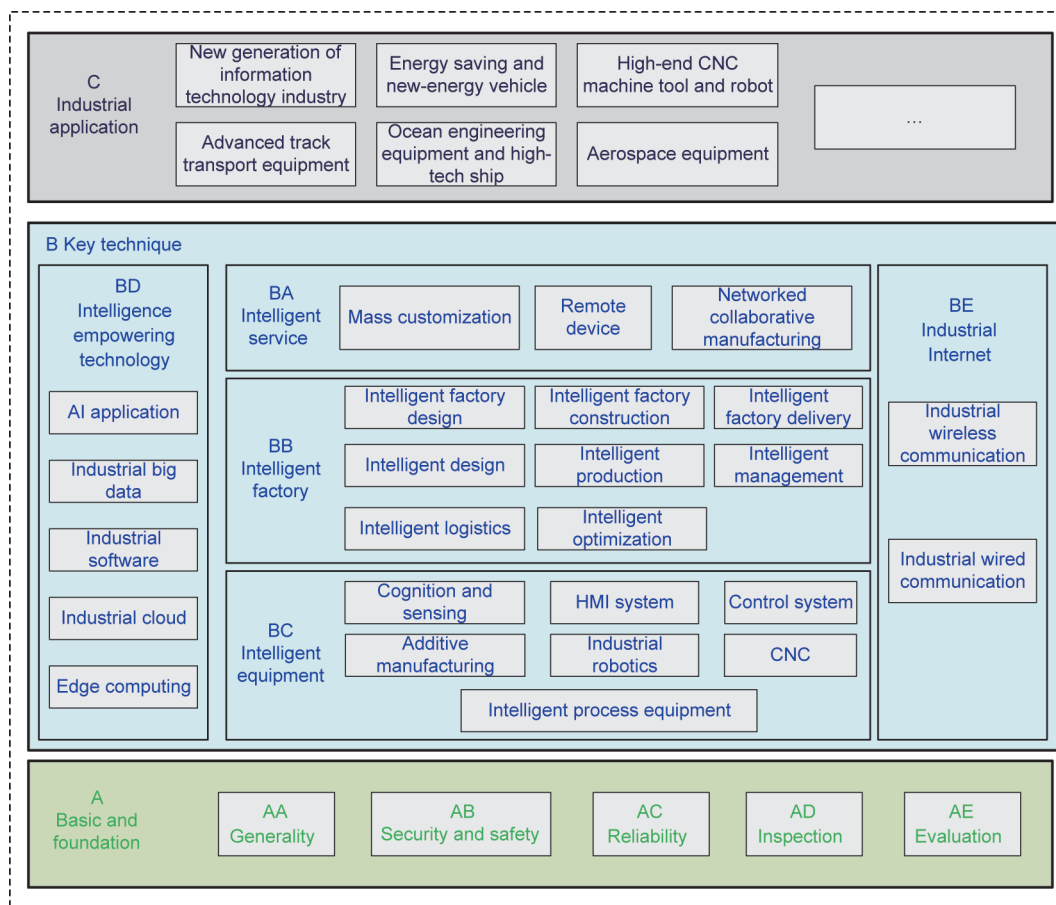


图8. IM标准体系的结构图[144]。HMI: 人机接口; A~E是IMSA的模块。

表12 映射到HCPS的SM/IM参考架构[1,135]

| Dimension    | Factor                    | Content   | Architectures |      |     |          |
|--------------|---------------------------|---|---------------|------|-----|----------|
|              |                           |   | IM            |      | SM  |          |
|              |                           |   | IMSA          | ISAM | SME | RAMI 4.0 |
| Humans       | Organization scope        | Individual, department, enterprise, and enterprise alliance and networks  |               |      | √   | √        |
|              | Human talent level        | General staff, professional and technical personal, knowledge and skills personal, versatile talent, and innovative talent                            |               |      |     |          |
| Cyber system | Sensing                   | Acoustic, thermal, electric current, magnetic, vibration, optical, imaging, force, pressure, speed, etc.  |               | √    |     |          |
|              | Communication             | Telegram, phone, optical fiber, wireless, and mobile  | √             | √    |     | √        |
|              | Network                   | Local area network, wide area network, Internet, mobile Internet, and IoT   | √             | √    |     | √        |
|              | Storage                   | Print, micro, magnetic medium, laser, and semi-conductor  |               |      |     |          |
|              | Database                  | Local, distributed, online, cloud, and big data   | √             | √    |     | √        |
|              | IT infrastructure         | Terminal, C/S, B/S, SOA, and cloud-computing  | √             |      |     | √        |
|              | Computer-aided simulation | Computer-aided design, computer-aided engineering, computer-aided manufacturing, computer aided process planning, and digital mock-up                 |               |      | √   | √        |
|              | Control                   | Open-loop and close-loop; proportional–integral–derivative controller, proportional–sum–derivative controller, adaptive and intelligent control, etc. |               | √    |     | √        |
|              | AI/ML                     | Fuzzy logic, expert system, neural network, and deep learning   |               |      |     |          |

| Dimension          | Factor                             | Content   | Architectures |      |     |          |
|--------------------|------------------------------------|---|---------------|------|-----|----------|
|                    |                                    |   | IM            |      | SM  |          |
|                    |                                    |   | IMSA          | ISAM | SME | RAMI 4.0 |
| Physical system    | Energy                             | Hydraulic power, coal, oil and gas, electricity, nuclear energy, and clean energy                         |               |      |     |          |
|                    | Materials                          | Wood, metal, composite, semi-conductor, nano-materials, and smart materials                               |               |      |     |          |
|                    | Process technique                  | Mechanical engineering, electro-processing, numerical control, machining center, robots, and 3D printing  | √             |      |     | √        |
|                    | Equipment                          | Handcraft, machine tool, numerical control, machining center, robots, and smart factory                   | √             | √    |     | √        |
| System integration | System hierarchy                   | Field equipment, shop floor, plant, and enterprise and global business network                            | √             | √    | √   | √        |
|                    | Product life cycle                 | Product design, process design, production engineering, manufacturing, use and service, and recycling     | √             |      | √   | √        |
|                    | Business life cycle                | Plan, source, make, deliver, and return   | √             |      | √   | √        |
|                    | Production life cycle              | Design, build, commission, operation and maintenance, and decommission and recycling                      | √             |      | √   | √        |
|                    | Manufacturing paradigm development | Handcraft, lean, flexible, agile, reconfigurable, digital, networked, sustainable, smart, and intelligent |               |      |     |          |

的顶层位置，如大数据、云计算、深度学习及虚拟现实和能源效率。举一个清洁能源智能制造协会和SMLC [28]的例子，他们通过识别数据作为新资源，力图解决能源消耗和环境可持续性的问题。另一个例子是通用电气Predix平台和工业互联网[11]。

2012年前后，德国出台了与智能制造有相同愿景的国家性战略。德国将工业4.0首选为SM/IM的术语。德国聚焦于智能车间/工厂和相关的潜在研究，如智能传感、无线网络和信息物理系统。工业4.0国家计划的一个重要特征是基于设备提供增值服务的各层级集成化。例如，西门子名为“Sinalytics”的数字化云服务平台[11]。

在20世纪90年代，日本学者发起了关于IM的国际项目。近年来，日本开启了基于SM/IM的社会5.0和工业价值链倡议（IVI）。日本注重通过精益管理和面向服务的信息物理生产系统来提高每个企业的价值，同时解决社会老龄化问题。一个例子就是在医疗保健方面，他们加强服务机器人的研究和应用。另一个就是他们在精益生产中持续改进和尊重员工的原则，这是影响日本智能制造发展愿景的关键因素[145]。

2015年，中国出台了一系列关于智能制造的国家级项目和计划。中国更倾向于使用IM。由于中国发展不平衡的现实，中国关于制造业升级的战略是并行推进，而不是依次进行（从数字化到网络化再到智能化）。中

国智能制造的另一个特征是用户导向型。例如，三一重工的数字预测维护平台和海尔的CosmoPlat平台[4,146]。

总的来说，智能制造（SM/IM）是信息技术、工业制造或操作技术（OT）和人的聪明才智及创造性融合发展的结果，引导了制造系统的迅速发展。然而，SM/IM仅仅是一个实现制造业终极目标的工具，最终目标还是减小缺陷、提高质量、提高生产率、减小成本、预测故障并在发生前停机和减少浪费的同时增强可持续性，以及通过理解、积累和应用制造过程及系统知识库维持竞争优势[64]。

众所周知，每个国家、地区或企业会面临不同的问题，同时，每个国家、地区或企业都有自己独特的优势。因此，在整合先进IT和OT技术时，会有不同的技术道路，发展不同的技术，对SM和IM的选择也会有所不同。从哲学以及文化的角度看，这些差异随着知识在制造过程、系统和部门中的理解、积累及应用而变得更明显。例如，一家典型的日本制造企业希望通过组织文化和个人培训来持续不断的改进，他们的知识获取严重依赖个人。一家典型的美国公司会通过数据和知识迁移获取知识，他们善于颠覆和重新定义问题。德国制造公司则善于通过嵌入新知识到设备来持续升级设备和生产系统，给他们自己和消费者创造新的价值。通过对比分析不同国家的聚焦重点和SM/IM的实际案例，可以得出这些制

表13 关于SM或IM的国家级政策和项目[64]

| Country/region | SM or IM policy/program  | Investment level   | Content/focus   | Typical cases  |
|----------------|--|--|---|--|
| United States  | Advanced Manufacturing Partnership, SMLC, and Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing       | Public investment of 240 million USD, matched by 460 million USD from nonfederal sources across related institutes | Related institutes: Digital Manufacturing and Design Innovation Institute (DMDII), Clean Energy Smart Manufacturing Institute, and America Makes (additive manufacturing) | SMLC [28] and GE's Predix [11]                           |
| China          | Implementation Plan for the 2016 Intelligent Manufacturing Pilots Special Project and China Manufacturing 2025 | Specific funding line is unavailable   | Accelerating the adoption of digital technologies and advanced production approaches, integration of information technologies and operation of technologies               | Haier CosmoPlat and Sany predictive maintenance [4, 146] |
| Germany        | Industry 4.0   | Approximately 550 million USD  | Refers to SM by the term Industry 4.0, focusing on smart/intelligent workshop/factory and integration in various levels   | Siemens' digital cloud service platform [11]             |
| Japan          | Society 5.0 and IVI  | —  | To design a new society by combining manufacturing and information technologies and to create a space in which enterprises can collaborate                                | Service robots and lean production [145]                 |

造理念与哲学上的不同，对于不同国家、地区和企业制定自身发展战略时，这些比较分析可能有参考价值。

## 8. 小结

SM和IM对于新工业革命（工业4.0）来说是重要的模式/范式。SM和IM理念和技术发展的特征以及研究焦点是有重叠的，两者都利用了先进信息和通信技术来促进制造技术的发展。学术界、制造业部门和政府都对SM和IM展示了强烈的兴趣，从SM和IM被提出的第一天起，它们的理念一直在发展。然而，在文献中它们的定义、理念、内涵和技术发展是否有区别或相似则很少被考虑到。为弥补这个漏洞，本研究从多个角度回顾和比较联系了SM和IM，总结在表14中[1,2,4,11,26–28,30,31,33,38,39,42,83,90,93,134,136,137,141,147–150]。

SM和IM的早期理念几乎在同一时间被提出，并且都因为人工智能在20世纪80年代的兴起而发展。然而，SM和IM似乎是两个并行发展的独立模式/范式，并在2014年前后吸引了不同群体的关注。本文综述揭示了SM与工业4.0、数据驱动和大数据等概念共同出现的频率更高，IM与人工智能算法、优化、代理和架构等概念的共现频率更高，它们各自引起了相应领域学者的研究兴趣。在不同的定义下，不同的理念和研究主题与SM或IM不同的发展时期有关联，其中制造业数字化、网络化和智能化发展趋势是这两种模式的共同特点。

从SM和IM发展分析的角度看，关键词和最相关模式的改变反映了技术的应用和国家战略层面SM与IM的研究重点。参考架构和标准的比较指明了全球学术界和相关产业得益于SM和IM团体的国际合作。制造业协会和组织应该努力达成共识，在共同的问题上进行合作研究（如统一的标准和参考架构、劳动力培训等）。国家计划和项目在SM和IM模式/概念选择、投资水平、聚焦重点和发展道路等方面表现出鲜明的特点。此外，对持续获取知识的追求和实现减少缺陷、提高生产率、节约成本、减少停机次数、浪费最小化、提高持久性和维持竞争性优势的目标，已经被不同国家的制造业发展计划共同确立。

有关SM和IM发展的研究为如何在落后地区和企业理解和实施SM和IM提供了指引。当制定决策时，例如，选择合适的升级模式和发展战略以及评估和选择合适的技术，其制造理念及其一致性可能会有所帮助。由于制造企业为智能制造的主要实施者，所以无论应用哪种模式，都应结合实际情况，将更多的注意力放在关键技术，如CPS、大数据、云计算和人工智能以及员工教育等。

为进一步理解和应用SM/IM，未来的研究包括：

- **关键技术发展**：为提高制造系统的智能化，应同时发展如传感、数字孪生、信息-物理系统、知识工程和深度学习等关键技术，使他们的应用更加可靠，有更强的适应性、经济性和可持续性。
- **人机共生**：当今SM和IM的要求人机共生发挥更

表14 SM和IM的多角度比较与联系

| Item                   | SM  | IM  | References        |
|------------------------|---|---|-------------------|
| Origin                 | First coined in 1980s, but fully presented by Jim Davis around 2012   | Coined by Wright, Yoshikawa, and Andrew in 1980s  | [27,30,31, 147]   |
| Focus                  | Respond in real time to meet changing demands and conditions in factories, supply network, and customer needs | Minimize human involvement in manufacturing, arrange material and production compositions automatically, and control production processes               | [4,26,27, 39]     |
| Development            | Not much attention paid to SM until 2014  | Consistent developing about 30 years  | [148]             |
| Category               | Predicted as Industry 4.0 or the next industrial revolution   | In industrial engineering and management, new-generation IM is predicted as the core driving force of next industrial revolution                        | [38,87]           |
| Components             | Physical, smart interconnection and communication, and application levels                                     | Robot, personal computer, vision system, and voice system<br>Human, cyber system, and physical system   | [4,42]            |
| Core concepts          | CPS, IoT, and big data  | Expert system, intelligent agent, neural network, knowledge engineering, and AI   | [2,11,92]         |
| Hierarchy              | Three perspectives: products, manufacturing systems, and business   | One architecture proposed by Andrew Kusiak and James S. Albus<br>One three-level architecture including unit, system, and system-of-system (SoS) levels | [1,26,31,134]     |
| Geographic             | United States and Europe  | Japan, USA, Europe, and China   | [4,28,33]         |
| Reference architecture | SMS and RAMI4.0   | ISAM, IMSA, and HCPS  | [27,134, 136,137] |
| Related standards      | ISA-95 and ISO 6983   | ISO/TR 10623–1992, IEC 61987, GZNCPT0114–2016, and GZNCPT0117–2016  | [141,149]         |
| Related concepts       | ▲   | ▲   | [83,150]          |

▲: Flexible manufacturing, CIM, intelligent design, intelligent products, intelligent production, industrial internet; Industry 4.0, CPPS, smart factory, etc.

大的作用，人类和智能机器（如CPS）应该有更深的融合和合作，而不是仅仅使用机器代替人。

- **跨学科、跨领域及社会整合：**如果与智能交通、智能能源/电网、智能建筑、智能医疗、智能城市和智能社会等技术融合，SM和IM将释放出更大的潜力。研究领域可能还包括：多物理建模、社交网络、数据储存、隐私和安全、标准和伦理。
- **其他方面的比较分析：**为了比较标准和应用，以及解决中小型企业实施SM/IM面临的独特问题，可通过专利分析、预测技术发展轨迹和专家采访对SM和IM相关的问题进行调查，这可能会得出进一步的见解。另一个值得系统研究的潜在课题是智能制造相关文化的比较。

## 致谢

感谢博士后国际交流计划（20180025）、国家自然科学基金（51703180）、中国博士后科学基金（2018M630191和2017M610634）、陕西省博士后科学基金（2017BSHEDZZ73）及中央高校基本科研业务费（xpt012020006和xjj2017024）的支持。

## Compliance with ethics guidelines

Baicun Wang, Fei Tao, Xudong Fang, Chao Liu, Yufei Liu, and Theodor Freiheit declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Zhou J, Zhou Y, Wang B, Zang J. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. *Engineering* 2019;5(4):624–36.
- [2] Wang L. From intelligence science to intelligent manufacturing. *Engineering* 2019;5(4):615–8.
- [3] Tao F, Qi Q, Wang L, Nee AYC. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: correlation and comparison. *Engineering* 2019;5(4):653–61.
- [4] Zhou J, Li P, Zhou Y, Wang B, Zang J, Meng L. Toward new-generation intelligent manufacturing. *Engineering* 2018;4(1):11–20.
- [5] Evans PC, Annunziata M. Industrial Internet: pushing the boundaries of minds and machines. Report. Boston: General Electric Company; 2021 Nov.
- [6] Tao F, Cheng Y, Xu DL, Zhang L, Li BH. CCIoT-CMfg: cloud computing and Internet of Things-based cloud manufacturing service system. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(2):1435–42.
- [7] Lee I, Lee K. The Internet of Things (IoT): applications, investments, and challenges for enterprises. *Bus Horiz* 2015;58(4):431–40.
- [8] Pan Y. Heading toward Artificial Intelligence 2.0. *Engineering* 2016;2(4):409–13.
- [9] Thoben KD, Wiesner S, Wuest T. "Industrie 4.0" and smart manufacturing—a review of research issues and application examples. *Int J Autom Technol* 2017;11(1):4–16.
- [10] Liu Y, Xu X. Industry 4.0 and cloud manufacturing: a comparative analysis. *J Manuf Sci Eng* 2017;139(3):034701.
- [11] Zhong RY, Xu X, Klotz E, Newman ST. Intelligent manufacturing in the



- context of Industry 4.0: a review. *Engineering* 2017;3(5):616–30.
- [12] Qi Q, Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access* 2018;6:3585–93.
- [13] Kusiak A. Smart manufacturing. *Int J Prod Res* 2018;56(1–2):508–17.
- [14] Liang S, Rajora M, Liu X, Yue C, Zou P, Wang L. Intelligent manufacturing systems: a review. *Int J Mech Eng Robot Res* 2018;7(3):324–30.
- [15] Tao Y, Zhao G, Li Q, Zhao W. Reflections on facilitating the development of “Internet Plus” intelligent manufacturing in China. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*; 2018 Apr 26–28; Singapore; 2018. p. 150–7.
- [16] Yao X, Zhou J, Zhang J, Boër CR. From intelligent manufacturing to smart manufacturing for Industry 4.0 driven by next generation artificial intelligence and further on. In: *Proceedings of the 5th international conference on enterprise systems (ES)*; 2017 Sep 22–24; Beijing, China; 2017. p. 311–8.
- [17] Zhang YF, Zhang D, Ren S. Survey on current research and future trends of smart manufacturing and its key technologies. *Mech Sci Technol Aersp Eng* 2019;38:329–38.
- [18] Wang B, Liu Y, Zhou Y, Wen Z. Emerging nanogenerator technology in China: a review and forecast using integrating bibliometrics, patent analysis and technology roadmapping methods. *Nano Energy* 2018;46:322–30.
- [19] Muhuri PK, Shukla AK, Abraham A. Industry 4.0: a bibliometric analysis and detailed overview. *Eng Appl Artif Intell* 2019;78:218–35.
- [20] Schaffer GH. Artificial intelligence: a tool for smart manufacturing. *Am Mach Autom Manuf* 1986;130(8):83.
- [21] National Science and Technology Council. *Strategy for American leadership in advanced manufacturing*. Report. Washington, DC: White House; 2020 Aug.
- [22] Kagermann H, Wahlster W, Helbig J. *Securing the future of German manufacturing industry: recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* [Internet]. National Academy of Science and Engineering; 2013 Apr [cited 2020 Mar 20]. Available from: [https://www.academia.edu/36867338/Securing\\_the\\_future\\_of\\_German\\_manufacturing\\_industry\\_Recommendations\\_for\\_implementing\\_the\\_strategic\\_initiative\\_INDUSTRIE\\_4\\_0\\_Final\\_report\\_of\\_the\\_Industrie\\_4\\_0\\_Working\\_Group](https://www.academia.edu/36867338/Securing_the_future_of_German_manufacturing_industry_Recommendations_for_implementing_the_strategic_initiative_INDUSTRIE_4_0_Final_report_of_the_Industrie_4_0_Working_Group).
- [23] Li L. China's manufacturing locus in 2025: with a comparison of “Made-in-China 2025” and “Industry 4.0”. *Technol Forecast Soc Chang* 2018;135:66–74.
- [24] van Eck NJ, Waltman L. *VOSviewer manual*. Leiden: Univeriteit Leiden; 2013.
- [25] Krakauer J. *Smart manufacturing with artificial*. Dearborn: Computer and Automated Systems Association of the Society of Manufacturing Engineers; 1987.
- [26] Lu Y, Morris KC, Frechette S. Current standards landscape for smart manufacturing systems. Technical paper. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2016.
- [27] Lu Y, Morris KC, Frechette S. Standards landscape and directions for smart manufacturing systems. In: *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*; 2015 Aug 23–28; Gothenburg, Sweden; 2015. p. 998–1005.
- [28] Davis J, Edgar T, Porter J, Bernaden J, Sarli M. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Comput Chem Eng* 2012;47:145–56.
- [29] Smart Manufacturing Leadership Coalition. *Implementing 21st century smart manufacturing* [Internet]. Schaumburg: Control Global; c2004–2020 [cited 2020 Aug 22]. Available from: <https://www.controlglobal.com/whitepapers/2011/110621-smc-smart-manufacturing/>.
- [30] Wright PK, Bourne DA. *Manufacturing intelligence*. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.; 1988.
- [31] Kusiak A. *Intelligent manufacturing systems*. Upper Saddle River: Prentice Hall; 1990.
- [32] Yoshikawa H. Manufacturing and the 21st century—intelligent manufacturing systems and the renaissance of the manufacturing industry. *Technol Forecast Soc Chang* 1995;49(2):195–213.
- [33] Okabe T, Bunce P, Limoges R. Next generation manufacturing systems (NGMS) in the IMS program. In: Okino N, Tamura H, Fujii S, editors. *Advances in production management systems: perspectives and future challenges*. Boston: Spring Nature; 2013.
- [34] Anderson C, Bunce P. Next generation manufacturing systems (NGMS) [Internet]. c2000 [cited 2020 Mar 20]. Available from: <https://docplayer.net/13669727-Ngms-next-generation-manufacturing-systems-cam-i-nextgeneration-manufacturing-systems-program-white-paper.html>.
- [35] Groumpos PP. The challenge of intelligent manufacturing systems (IMS): the European IMS information event. *J Intel Manuf* 1995;6(1):67–77.
- [36] Zheng P, Wang H, Sang Z, Zhong RY, Liu Y, Liu C, et al. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Front Mech Eng* 2018;13(2):137–50.
- [37] Lee J, Lapira E, Bagheri B, Kao H. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf Lett* 2013;1(1):38–41.
- [38] Kusiak A. *Computational intelligence in design and manufacturing*. New York: John Wiley & Sons; 2000.
- [39] Oztemel E. Intelligent manufacturing systems. In: Benyoucef L, Grabot B, editors. *Artificial intelligence techniques for networked manufacturing enterprises management*. London: Springer; 2010. p. 1–41.
- [40] Trentesaux D, Millot P. A human-centred design to break the myth of the “magic human” in intelligent manufacturing systems. In: Borangiu T, Thomas A, Trentesaux D, editors. *Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing*. Cham: Springer; 2016. p. 103–13.
- [41] Pacaux-Lemoine MP, Trentesaux D, Rey GZ, Millot P. Designing intelligent manufacturing systems through human-machine Cooperation principles: a human-centered approach. *Comput Ind Eng* 2017;111:581–95.
- [42] Qu YJ, Ming XG, Liu ZW, Zhang XY, Hou ZT. Smart manufacturing systems: state of the art and future trends. *Int J Adv Manuf Technol* 2019;103(9–12):3751–68.
- [43] Mittal S, Khan MA, Romero D, Wuest T. Smart manufacturing: characteristics, technologies and enabling factors. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2019;233(5):1342–61.
- [44] Kibira D, Morris KC, Kumaraguru S. Methods and tools for performance assurance of smart manufacturing systems. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2016;121:282–313.
- [45] Rzevski G. A framework for designing intelligent manufacturing systems. *Comput Ind* 1997;34(2):211–9.
- [46] Wang B, Zang J, Qu X, Dong J, Zhou Y. Research on new-generation intelligent manufacturing based on human-cyber-physical systems. *Chin Acad Eng* 2018;20(4):29–34.
- [47] Tan J, Liu Z, Xu J. Intelligent products and equipment led by new-generation artificial intelligence. *Chin Acad Eng* 2018;20(4):35–43.
- [48] Yuan X, Gui W, Chen X, Huang K, Yang C. Transforming and upgrading nonferrous metal industry with artificial intelligence. *Chin Acad Eng* 2018;20(4):59–65.
- [49] Li B, Chai X, Zhang L, Hou B, Liu Y. Accelerate the development of intelligent manufacturing technologies, industries, and application under the guidance of a new-generation of artificial intelligence technology. *Chin Acad Eng* 2018;20(4):73–8.
- [50] Lu B, Shao X, Zhang J, Wang L. Development strategy for intelligent factory in discrete manufacturing. *Chin Acad Eng* 2018;20(4):44–50.
- [51] Yu X, Zhang H, Peng Y, Li D. Networking architecture and development trend of Industrial Internet. *Chin Acad Eng* 2018;20(4):79–84.
- [52] Tomiyama T. A manufacturing paradigm toward the 21st century. *Integr Comput Aided Eng* 1997;4(3):159–78.
- [53] Zhang HC, Huang SH. Applications of neural networks in manufacturing: a state-of-the-art survey. *Int J Prod Res* 1995;33(3):705–28.
- [54] Shen W, Hao Q, Yoon HJ, Norrie DH. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: an updated review. *Adv Eng Inf* 2006;20(4):415–31.
- [55] Leitão P. Agent-based distributed manufacturing control: a state-of-the-art survey. *Eng Appl Artif Intel* 2009;22(7):979–91.
- [56] Jardim-Goncalves R, Sarraipa J, Agostinho C, Panetto H. Knowledge framework for intelligent manufacturing systems. *J Intel Manuf* 2011;22(5):725–35.
- [57] Kang HS, Lee JY, Choi S, Kim H, Park JH, Son JY, et al. Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions. *Int J Precis Eng Manuf Green Technol* 2016;3:111–28.
- [58] Hofmann E, Rüsch M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Comput Ind* 2017;89:23–34.
- [59] Kusiak A. Fundamentals of smart manufacturing: a multi-thread perspective. *Annu Rev Control* 2019;47:214–20.
- [60] Romero D, Stahre J, Wuest T, Noran O, Bernus P, Fast-Berglund Å, et al. Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies. In: *Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46)*; 2016 Oct 29–31; Tianjin, China; 2016. p. 29–31.
- [61] Tao F, Qi Q, Liu A, Kusiak A. Data-driven smart manufacturing. *J Manuf Syst* 2018;48:157–69.
- [62] Wang J, Ma Y, Zhang L, Gao RX, Wu D. Deep learning for smart manufacturing: methods and applications. *J Manuf Syst* 2018;48:144–56.
- [63] Schuh G, Anderl R, Gausemeier J, ten Hompel M, Wahlster W. *Industrie 4.0 maturity index: managing the digital transformation of companies*. Munich: Herbert Utz Verlag; 2017.
- [64] Stephen J. *A policymaker's guide to smart manufacturing*. Washington, DC: Information Technology and Innovation Foundation; 2016.
- [65] Bonvillian WB. Advanced manufacturing policies and paradigms for innovation. *Science* 2013;342(6163):1173–5.
- [66] Monostori L, Kádár B, Bauernhansl T, Kondoh S, Kumara S, Reinhart G, et al. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Ann* 2016;65(2):621–41.
- [67] Monostori L. Cyber-physical production systems: roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP* 2014;17:9–13.
- [68] Zhang L, Luo Y, Tao F, Li BH, Ren L, Zhang X, et al. Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm. *Enterp Inf Syst* 2014;8(2):167–87.
- [69] Chen D, Heyer S, Ibbotson S, Saloniis K, Steingrímsson JG, Thiede S. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *J Clean Prod* 2015;107:615–25.
- [70] Chryssoulouris G, Mavrikios D, Papakostas N, Mourtzis D, Michalos G, Georgoulas K. Digital manufacturing: history, perspectives, and outlook. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2009;223(5):451–62.
- [71] Jayal AD, Badurdeen F, Dillon OW Jr, Jawahir IS. Sustainable manufacturing: modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP J Manuf Sci Technol* 2010;2(3):144–52.
- [72] Browne J, Dubois D, Rathmill K, Sethi SP, Stecke KE. Classification of flexible

- manufacturing systems. *FMS Mag* 1984;2(2):114–7.
- [73] Babiceanu RF, Chen FF. Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey. *J Intel Manuf* 2006;17:111–31.
- [74] Groover MP. Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2007.
- [75] Yusuf YY, Sarhadi M, Gunasekaran A. Agile manufacturing: the drivers, concepts and attributes. *Int J Prod Econ* 1999;62(1–2):33–43.
- [76] Gunasekaran A. Agile manufacturing: enablers and an implementation framework. *Int J Prod Res* 1998;36(5):1223–47.
- [77] Mehrabi MG, Ulsoy AG, Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. *IEEE Trans Technol Manag* 2000;1(1):114–31.
- [78] D'Amours S, Montreuil B, Lefrançois P, Soumis F. Networked manufacturing: the impact of information sharing. *Int J Prod Econ* 1999;58(1):63–79.
- [79] Liu M, Ma J, Lin L, Ge M, Wang Q, Liu C. Intelligent assembly system for mechanical products and key technology based on Internet of Things. *J Intel Manuf* 2017;28(2):271–99.
- [80] Wan J, Chen B, Imran M, Tao F, Li D, Liu C, et al. Toward dynamic resources management for IoT-based manufacturing. *IEEE Commun Mag* 2018;56(2):52–9.
- [81] Lee J. E-manufacturing—fundamental, tools, and transformation. *Robot Comput Integr Manuf* 2003;19(6):501–7.
- [82] Shah R, Ward PT. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. *J Oper Manag* 2003;21(2):129–49.
- [83] Tao F, Cheng Y, Zhang L, Nee AYC. Advanced manufacturing systems: socialization characteristics and trends. *J Intel Manuf* 2017;28(5):1079–94.
- [84] Jiang P, Ding K, Leng J. Towards a cyber-physical-social-connected and service-oriented manufacturing paradigm: social manufacturing. *Manuf Lett* 2016;7:15–21.
- [85] Tao F, Qi Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst* 2017;49(1):81–91.
- [86] Yang H, Kumara S, Bukkapatnam STS, Tsung F. The Internet of Things for smart manufacturing: a review. *IIEE Trans* 2019;51(11):1190–216.
- [87] Kusiak A. Smart manufacturing must embrace big data. *Nature* 2017;544(7648):23–5.
- [88] Qi Q, Tao F. A smart manufacturing service system based on edge computing, fog computing, and cloud computing. *IEEE Access* 2019;7:86769–77.
- [89] Tao F, Zhang M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access* 2017;5:20418–27.
- [90] Chen T, Lin YC. Feasibility evaluation and optimization of a smart manufacturing system based on 3D printing: a review. *Int J Intel Syst* 2017;32(4):394–413.
- [91] Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manuf* 2017;11:545–54.
- [92] Bai Y. Industrial Internet of Things over tactile Internet in the context of intelligent manufacturing. *Clust Comput* 2018;21(1):869–77.
- [93] Xiao Y, Liu Q. Application of big data processing method in intelligent manufacturing. In: Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA); 2019 Aug 4–7; Tianjin, China; 2019. p. 1895–900.
- [94] Zhong RY, Xu C, Chen C, Huang GQ. Big data analytics for physical Internet-based intelligent manufacturing shop floors. *Int J Prod Res* 2017;55(9):2610–21.
- [95] Hasnan NZN, Yusoff YM. Short review: application areas of Industry 4.0 technologies in food processing sector. In: Proceedings of IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED); 2018 Nov 26–28; Bangi, Negeri Selangor, Malaysia; 2018. p. 1–6.
- [96] Zhou G, Zhang C, Li Z, Ding K, Wang C. Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing. *Int J Prod Res* 2020;58(4):1034–51.
- [97] Nee AYC, Ong SK, Chryssolouris G, Mourtzis D. Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Ann* 2012;61(2):657–79.
- [98] Cheng J, Chen W, Tao F, Lin CL. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing. *J Ind Inf Integr* 2018;10:10–9.
- [99] Li W, Kara S. Methodology for monitoring manufacturing environment by using wireless sensor networks (WSN) and the Internet of Things (IoT). *Procedia CIRP* 2017;61:323–8.
- [100] Wang L, Törngren M, Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *J Manuf Syst* 2015;37:517–27.
- [101] Lu Y. Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. *J Ind Inf Integr* 2017;6:1–10.
- [102] Yao X, Zhou J, Lin Y, Li Y, Yu H, Liu Y. Smart manufacturing based on cyber-physical systems and beyond. *J Intel Manuf* 2019;30(8):2805–17.
- [103] Gill H. From vision to reality: cyber-physical systems [presentation]. In: HCSS National Workshop on New Research Directions for High Confidence Transportation CPS: Automotive, Aviation, and Rail; 2008 Nov 18–20; Austin, TX, USA; 2008. p. 18–20.
- [104] Cheng GJ, Liu LT, Qiang XJ, Liu Y. Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing. In: 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI); 2016 Jun 24–26; Hong Kong, China; 2016. p. 407–10.
- [105] Sowe SK, Simmon E, Zetsu K, de Vaulx F, Bojanova I. Cyber-physical-human systems: putting people in the loop. *IT Prof* 2016;18(1):10–3.
- [106] Munir S, Stankovic JA, Liang CJM, Lin S. Cyber physical system challenges for human-in-the-loop control. In: Proceedings of 8th International Workshop on Feedback Computing; 2013 Jun 25; San Jose, CA, USA; 2013.
- [107] Gil M, Albert M, Fons J, Pelechano V. Designing human-in-the-loop autonomous cyber-physical systems. *Int J Hum Comput Stud* 2019;130:21–39.
- [108] Romero D, Bernus P, Noran O, Stahre J, Fast-Berglund Å. The Operator 4.0: human cyber-physical systems & adaptive automation towards humanautomation symbiosis work systems. In: Proceedings of IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems; 2016 Sep 3–7; Iguassu Falls, Brazil; 2016. p. 677–86.
- [109] Xiong G, Zhu F, Liu X, Dong X, Huang W, Chen S, et al. Cyber-physical-social system in intelligent transportation. *IEEE/CAA J Autom Sin* 2015;2(3):320–33.
- [110] Xu DL, He W, Li S. Internet of Things in industries: a survey. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(4):2233–43.
- [111] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, Palaniswami M. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Future Gener Comp Syst* 2013;29(7):1645–60.
- [112] Zhu K, Joshi S, Wang QG, Hsi JFY. Guest editorial special section on big data analytics in intelligent manufacturing. *IEEE Trans Ind Inform* 2019;15(4):2382–5.
- [113] Wu D, Rosen DW, Wang L, Schaefer D. Cloud-based design and manufacturing: a new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Comput Aided Des* 2015;59:1–14.
- [114] Xu X. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robot Comput Integr Manuf* 2012;28(1):75–86.
- [115] Li BH, Zhang L, Wang SL, Tao F, Cao JW, Jiang XD, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model. *Comput Integr Manuf Sys* 2010;16(1):1–7.
- [116] Tao F, Zhang L, Venkatesh VC, Luo Y, Cheng Y. Cloud manufacturing: a computing and service-oriented manufacturing model. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2011;225(10):1969–76.
- [117] Bonomi F, Milito R, Zhu J, Addepalli S. Fog computing and its role in the Internet of Things. In: Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing; 2012 Aug 17; Helsinki, Finland; 2012. p. 13–6.
- [118] Park HS, Tran NH. Development of a cloud based smart manufacturing system. *J Adv Mech Des Syst Manuf* 2015;9(3):JAMDSM0030.
- [119] Lin SW, Miller B, Durand J, Joshi R, Didier P, Chigani A, et al. Industrial Internet Reference Architecture [Internet]. Milford: Industrial Internet Consortium (IIC); 2015 Jun 4 [cited 2020 Mar 20]. Available from: <https://www.iiconsortium.org/IIRA-1.7.htm>.
- [120] Wang Y, Zhang Y, Tao F, Chen T, Cheng Y, Yang S. Logistics-aware manufacturing service collaboration optimisation towards industrial internet platform. *Int J Prod Res* 2019;57(12):4007–26.
- [121] Jeschke S, Brecher C, Meisen T, Özdemir D, Eschert T. Industrial internet of things and cyber manufacturing systems. In: Jeschke S, Brecher C, Song H, Rawat DB, editors. Industrial Internet of Things. Cham: Springer; 2017. p. 3–19.
- [122] Tao F, Cheng J, Qi Q, Zhang M, Zhang H, Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int J Adv Manuf Technol* 2018;94(9–12):3563–76.
- [123] Tao F, Zhang M, Cheng J, Qi Q. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop. *Comput Integr Manuf Sys* 2017;23(1):1–9.
- [124] Uhlemann THJ, Lehmann C, Steinhilper R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP* 2017;61:335–40.
- [125] Glaessgen EH, Stargel DS. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In: Proceedings of 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference; 2012 Apr 23–26; Honolulu, HI, USA; 2012.
- [126] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [Internet]. 2015 Apr 20 [cited 2020 Mar 20]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication).
- [127] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Ann* 2017;66(1):141–4.
- [128] Qi Q, Tao F, Zuo Y, Zhao D. Digital twin service towards smart manufacturing. *Procedia CIRP* 2018;72:237–42.
- [129] Lu Y, Liu C, Wang K, Huang H, Xu X. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues. *Robot Comput Integr Manuf* 2020;61:101837.
- [130] Zheng Y, Yang S, Cheng H. An application framework of digital twin and its case study. *Ambient Intel Hum Comput* 2019;10(3):1141–53.
- [131] Zhuang YT, Wu F, Chen C, Pan Y. Challenges and opportunities: from big data to knowledge in AI 2.0. *Front Inf Technol Electron Eng* 2017;18(1):3–14.
- [132] Li W, Wu W, Wang H, Cheng X, Chen H, Zhou Z, et al. Crowd intelligence in AI 2.0 era. *Front Inf Technol Electron Eng* 2017;18(1):15–43.
- [133] ISO 15704–2000: Industrial automation systems—requirements for enterprise-reference architectures and methodologies. ISO standard. Geneva: International Organization for Standardization; 2000.
- [134] Albus JS, Horst JA, Huang HM, Kramer TR, Messina ER, Meystel A, et al. An intelligent systems architecture for manufacturing (ISAM): a reference model architecture for intelligent manufacturing systems. NIST technical paper. Gaithersburg: NIST; 2002.
- [135] Li Q, Tang Q, Chan I, Wei H, Pu Y, Jiang H, et al. Smart manufacturing standardization: architectures, reference models and standards framework. *Comput Ind* 2018;101:91–106.

- [136] Hankel M, Rexroth B. The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [Internet]. Frankfurt: ZVEI; c2015 [cited 2020 Mar 20]. Available from: <https://www.zvei.org/en/subjects/industrie-4-0/the-reference-architecturalmodel-rami-40-and-the-industrie-40-component/>.
- [137] Wei S, Hu J, Cheng Y, Ma Y, Yu Y. The essential elements of intelligent manufacturing system architecture. In: Proceedings of the 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE); 2017 Aug 20–23; Xi'an, China; 2017. p. 1006–11.
- [138] Cyber-Physical Systems Public Working Group. Framework for cyber-physical systems release 1.0 [Internet]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; [cited 2020 Aug 9]. Available from: <https://pages.nist.gov/cpspwg/library>.
- [139] Industrial Value Chain Reference Architecture (IVRA). Tokyo: Industrial Value Chain Initiative; 2016.
- [140] Carrez F, Bauer M, Boussad M, Bui N, Jardak C, De Loof J, et al. Internet of Things—architecture IoT-A deliverable d1.5—final architectural reference model for the IoT v3.0 [Internet]. Berlin: Internet of Things Architecture (IoTA); 2013 [cited 2020 Mar 20]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/272814818\\_Internet\\_of\\_Things\\_-\\_Architecture\\_IoT-A\\_Deliverable\\_D15\\_-\\_Final\\_architectural\\_reference\\_model\\_for\\_the\\_IoT\\_v30](https://www.researchgate.net/publication/272814818_Internet_of_Things_-_Architecture_IoT-A_Deliverable_D15_-_Final_architectural_reference_model_for_the_IoT_v30).
- [141] Moghaddam M, Cadavid MN, Kenley CR, Deshmukh AV. Reference architectures for smart manufacturing: a critical review. *J Manuf Sys* 2018;49:215–25.
- [142] Mittal S, Romero D, Wuest T. Towards a smart manufacturing maturity model for SMEs (SM3E). In: Proceedings of IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems; 2018 Aug 26–20; Seoul, Republic of Korea; 2018. p. 155–63.
- [143] Albus JS. A reference model architecture for intelligent systems design. In: Proceedings of the US/ROC Joint Workshop on Automation and Productivity for Small to Medium Scale Manufacturing; 1993 Jul 4–10; Taipei, China; 1993. p. 27–56.
- [144] National intelligent manufacturing standard system construction guidelines 2018 [Internet]. Beijing: National Intelligent Manufacturing Standardization Administration Group (IMSG); c2015–2017 [cited 2020 Aug 9]. Available from: <http://www.imsa.org.cn/public/wr/info/20>. Chinese.
- [145] Mrugalska B, Wyrwicka MK. Towards lean production in Industry 4.0. *Procedia Eng* 2017;182:466–73.
- [146] Zhou Y, Zang J, Miao Z, Minshall T. Upgrading pathways of intelligent manufacturing in China: transitioning across technological paradigms. *Engineering* 2019;5(4):691–701.
- [147] Piddington C, Pegram M. An IMS test case-global manufacturing. In: Proceedings of the IFIP TC5/WG5.7 Fifth International Conference on Advances in Production Management Systems; 1993 Sep 28–30; Athens, Greece; 1993. p. 11–20.
- [148] Kusiak A. Intelligent manufacturing: bridging two centuries. *J Intell Manuf* 2019;30:1–2.
- [149] 12 intelligent manufacturing standards announced [Internet]. Campbell: United States Information Technology Office; [cited 2020 Aug 9]. Available from: <http://www.usito.org/news/12-intelligent-manufacturing-standardsannounced>.
- [150] Esmailian B, Behdad S, Wang B. The evolution and future of manufacturing: a review. *J Manuf Sys* 2016;39:79–100.