

DOI: 10.3901/JME.2022.04.285

面向 2035 的智能制造技术预见和路线图研究*

臧冀原¹ 刘宇飞¹ 王柏村² 苗仲桢³ 薛 塬¹ 李培根^{4,5}

- (1. 中国工程院战略咨询中心 北京 100088;
2. 浙江大学机械工程学院 杭州 310027;
3. 清华大学中国工程科技发展战略研究院 北京 100083;
4. 中国工程院 北京 100088;
5. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要: 近年来,我国围绕智能制造技术及其应用开展了大量研究工作,面对智能制造不断涌现的新技术、新理念、新模式,为更好推动后续智能制造技术相关研究的有序开展,对智能制造中的智能产品、离散型制造、流程型制造、新模式新业态、工业物联网、智能制造云等六个方向,分别通过技术体系构建与技术态势扫描、技术清单制定、问卷调查与专家研讨等方法与过程,从目标层、实施层、保障层等三个层次绘制面向 2035 年的智能制造技术路线图,并指出目前智能制造需要集中力量攻克的关键技术清单,以期为未来智能制造技术发展的政策制定、价值评价、竞争力评价、战略管理和科学研究等提供参考。

关键词: 智能制造; 技术预见; 技术路线图

中图分类号: TH16; TP2

Technology Forecasting and Roadmapping of Intelligent Manufacturing by 2035

ZANG Jiyuan¹ LIU Yufei¹ WANG Baicun² MIAO Zhongzhen³
XUE Yuan¹ LI Peigen^{4,5}

- (1. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088;
2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027;
3. Chinese Institute of Engineering Development Strategies, Tsinghua University, Beijing 100083;
4. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088;
5. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: In recent years, extensive research has been conducted on intelligent manufacturing technologies and applications. However, only technologies are not enough to continuously transform and upgrade manufacturing sectors. Increasing concepts and models in intelligent manufacturing make the prioritization of research and implementation of intelligent manufacturing technologies a critical task. In this study, we proposed an intelligent manufacturing technology roadmap based on the forecasting of the trends of new technologies, the identification of key enabling technologies, and the design of technology development roadmaps. In this work, the research on intelligent manufacturing is discussed in detail, including intelligent products, discrete manufacturing, process manufacturing, new models and new paradigms, industrial internet of things, and intelligent manufacturing cloud. Following this idea, the intelligent manufacturing technology roadmaps by 2035 are designed accordingly and built upon the procedures of technology

* 中国工程院重大咨询研究资助项目(2019-ZD-09)。20210518 收到初稿,
20220119 收到修改稿

system construction, technology situation scanning, technologies listing, questionnaire surveys, and expert discussions. Three main levels are listed in the roadmap, including target level, implementation level, and supporting level. This work is expected to fulfill the research gap and urgent needs in policy formulation, value and competitiveness evaluation, strategic management, and scientific research for the future development of intelligent manufacturing.

Key words: intelligent manufacturing; technology forecasting; technology roadmapping

0 前言

技术路线图作为一种探索组织目标、技术资源和变化环境之间动态联系的技术管理方法^[1],以其独特的框架和组织形式,通过观点的交流与整合机制,体现未来技术的发展趋势。20 世纪 70 年代末,技术路线图首次应用于产品技术规划^[2],在相关产业技术路线图制定与实践的推动下,技术路线图在企业 and 产业层面得到了广泛的应用,并逐步拓展至国家科技战略规划层面^[3]。在复杂多变的技术竞争环境下,很多国家^[4]都使用技术路线图规划技术的发展路径,例如韩国针对科技发展构想提出所需的战略产品和关键技术,日本编制了多个关键领域的战略性技术路线图。中国的科研机构针对技术路线图开展了一系列研究,有代表性的是科技部于 2007 年开展的国家技术路线图研究^[5]、中国科学院开展的中国至 2050 年重要领域科技发展路线图战略研究,以及中国工程院与国家自然科学基金委员会联合开展的中国工程科技 2035 发展战略研究^[6]。

当前,新一代信息技术与先进制造技术深度融合形成的智能制造技术,特别是新一代人工智能技术与先进制造技术,深度融合所形成的新一代智能制造技术,成为了第四次工业革命的核心技术和核心驱动力。智能制造正在引领和推动第四次工业革命,引发制造业发展理念、制造模式发生重大而深刻的变革,重塑制造业的技术体系、生产模式、发展要素及价值链,推动中国制造业获得竞争新优势,推动全球制造业发展步入新阶段,实现社会生产力的整体跃升^[7]。近年来,我国围绕智能制造的相关理论和应用技术开展了大量研究工作^[8-11],面对智能制造不断涌现的新技术、新理念、新模式,为了后续对智能制造技术开展有序研究,迫切需要研究面向 2035 年的智能制造发展趋势及需要集中力量攻克的关键技术,并编制技术发展路线图。

1 智能制造技术路线图研究方法和过程

中国工程院研究团队在“制造强国战略研究”中,持续推动智能制造理论体系的构建,提出了中国智能制造发展战略^[7,10],并于 2019 年启动“面向 2035 的智能制造技术预见和路线图”研究工作。根据本研究团队前期研究成果^[7-10],智能制造系统是由智能产品、智能生产及智能服务三大功能系统以及工业物联网和智能制造云两大支撑系统集成而成,其中,智能产品是主体,智能生产是主线,以智能服务为中心的产业模式变革是主题,智能制造云和工业物联网是支撑,如图 1 所示^[7]。因此,对智能制造技术预见和技术路线图的研究也紧紧围绕这几个方面展开,但不完全相同。根据专家研究领域分布情况,将路线图工作分为六个子方向:智能产品、离散型制造、流程型制造、新模式新业态、工业物联网、智能制造云。

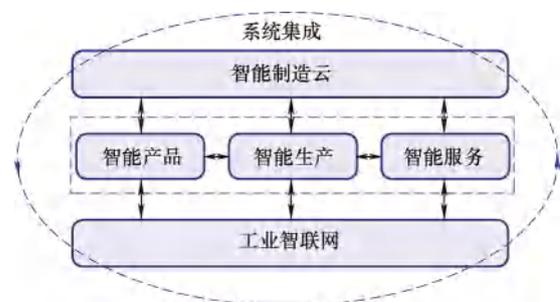


图 1 智能制造系统集成

智能制造技术路线图在研究与编制过程中,研究团队结合了通用方法和具体实践经验,采用了“定性+定量”的路线图研究与绘制方法,以专家为核心、流程为规范、数据为支撑、交互为手段,提高路线图的前瞻性、科学性和规范性。路线图研究工作由李培根、谭建荣、柴天佑、卢秉恒、李伯虎等十余位院士牵头,组织 1 600 余位专家学者、工程师,其中也包括美国、德国、日本专家,开展国内外技术最新动态和趋势的分析,以及对智能制造相关技术发展的预测和路线图的研究工作。智能制造 6 个

方向的研究人员借助工程科技战略咨询智能决策系统平台(Intelligent Supporting System, 简称 iSS, 网址: iss.ckcest.cn), 按照技术体系与态势分析、技术

清单、问卷调查与专家研讨、技术路线图绘制四个步骤开展研究工作, 如图 2 所示。



图 2 智能制造技术路线图绘制流程

在智能制造技术路线图绘制过程中, 数据分析结果与专家研讨进行多轮交互, 一方面以数据来支撑专家对问题的研判, 另一方面引导专家按照规范化的流程开展智能制造技术路线图绘制工作。同时, 根据专家意见, 修正数据分析结果。

1.1 第一步: 技术体系与技术态势分析

(1) 技术体系构建: 首先, 分别构建 6 个方向的多层级技术结构, 形成每个方向的技术体系, 用于描述智能制造各领域内技术之间的关系, 梳理技

术脉络、划分研究边界。技术体系作为体现专家知识与共识的可视化形式, 可以指导对客观数据开展技术态势扫描。

图 3 为工业互联网技术体系示例, 其中工业互联网作为一级技术, 网络智能化技术、网络连接技术、网络安全技术、网络标识解析技术等作为二级技术, 新一代光通信、网络安全认证加密技术、标识编码技术、工业网络智能管理系统等等作为三级技术。

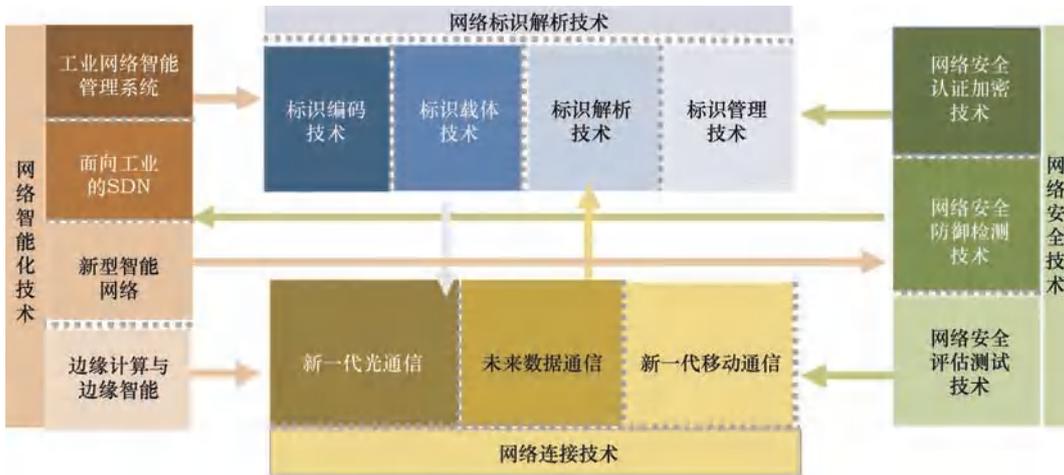


图 3 工业互联网技术体系示例

(2) 技术态势扫描: 根据技术体系中的各项技术内容, 确定检索关键词, 如表 1 所示, 为流程智能制造工厂确定的关键词表。第一层对应技术体系的二级技术, 第二层对应技术体系的三级技术, 第

三层为检索论文专利等数据的关键词。关键词确定后, 各方向通过数据库获取论文、专利、研究报告等智能制造领域客观数据, 从全球、国家、研究者、研究主题等多个维度对智能制造领域进行分析。

表 1 流程制造智能工厂检索关键词

| 第一层 | 第二层 | 第三层 |
|------|-----------------|--|
| 方法 | 智能自主控制 | 工艺参数选择, 自学习, 智能过程制造, 运行控制, 自优化校正, 人机协同增强智能, 群体集成智能, 自愈控制, 协同控制, 智能集成控制, 智能协同优化控制, 分布式协同控制, 知识型工作自动化, 生产线一键控制 |
| ... | 虚拟制造 | 三维虚拟现实技术, 网络化, 物联网, 工业互联网, 工业认知网, 数字化网络化制造, 半实物仿真, 混合智能建模, 尺度多场耦合建模, 因果关系模型, 多层次多尺度一体化建模, AspenONE 套件, gPROMS, ChemCAD |
| 行业应用 | 石化、钢铁、有色、轻工, 选矿 | 冷轧、分馏、连退, 磨矿, 焙烧, 磁选, 浮选, 铝电解, 催化加氢, 催化裂化, 催化重整, 精馏, 高炉, 回转窑 |

在整个技术体系构建和技术态势扫描过程中，由专家确定技术体系，研究人员根据技术体系确定检索关键词(或数据检索式)，并获取数据；使用 iSS 平台对数据进行分析后，专家提出关键词修改意见，

将分析结果与专家进行多轮交互，并对数据分析结果进行修正与迭代，最终完成对 6 个方向的智能制造技术态势扫描。图 4 为智能制造技术态势分析示例。

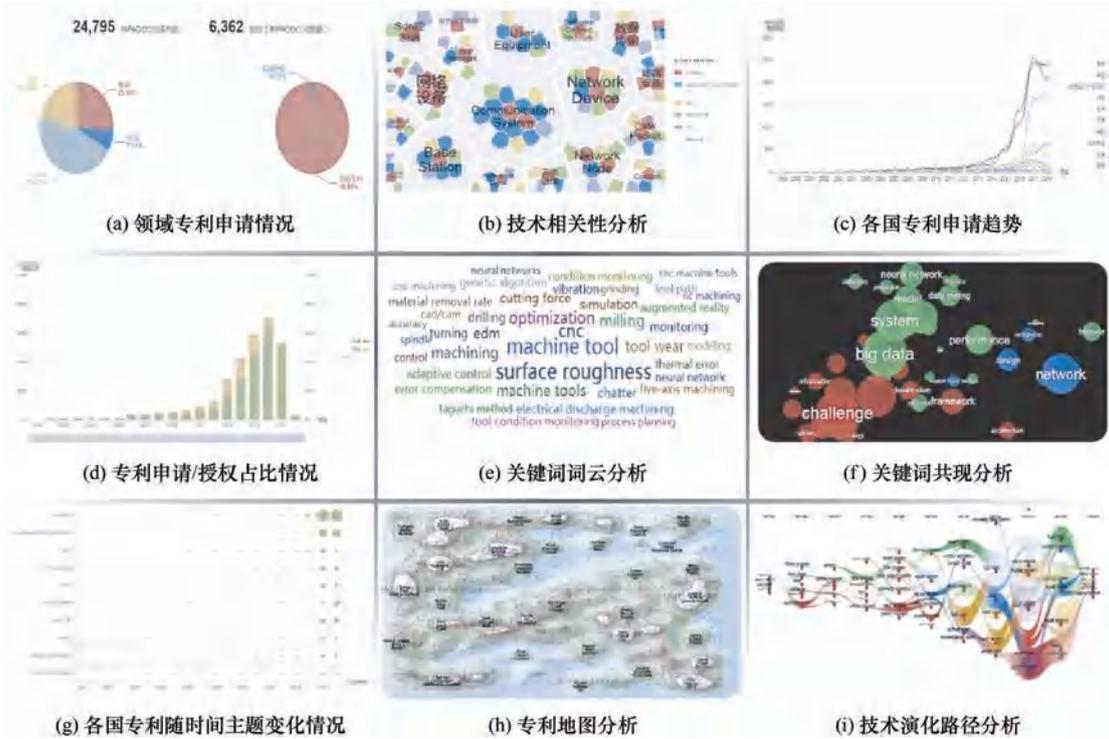


图 4 智能制造技术态势分析示例

智能制造技术态势扫描结果可以支撑专家从定量的角度厘清智能制造领域过去和当前的宏观发展态势。客观数据的引入有助于降低智能制造技术发展方向分析的偏好性，帮助专家对研究背景形成较为一致的认识。同时，以迭代交互的方式将专家意见融入数据分析的过程，可以提高智能制造技术态势扫描的准确性。

1.2 第二步：技术清单

基于智能制造技术态势扫描的结果，6 个方向分别使用聚类分析与自然语言处理等方法，挖掘智能制造领域核心研究主题，经过人工整理后，总结出若干关键技术条目，形成初始技术清单。然后检索并筛选各个国家地区开展的智能制造领域面向未

来的关键技术项对初始技术清单进行补充，得到候选技术清单。最后，召开三轮专家研讨会，第一轮研究会上，专家对候选技术清单进行补充，增加分析中遗漏的技术项；第二轮研讨会，删除内容不合适或颗粒度过小的技术项、合并内容相似技术项；第三轮研讨会，专家调整清单中技术项的颗粒度，使清单中的所有技术项保持颗粒度基本一致，并撰写每个技术项的范畴与内涵，最终形成 6 个方向的面向 2035 的智能制造关键技术清单。

表 2 为智能制造关键技术清单示例，第一列为技术编号，第二列为遴选出的关键技术，第三列为技术范畴与内涵，主要描述该技术的主要内容与边界，主要实现的功能与应用场景等。

表 2 智能制造关键技术清单示例

| 序号 | 关键技术 | 技术范畴与内涵 |
|----|--------------------|---|
| 1 | 多视角多源信息融合与协同状态感知技术 | 现有流程工业状态感知技术是将过程传感器数据、视频、音频和图像等状态数据分别进行处理，无法有效融合。本项技术针对流程工业生产过程环境恶劣、机理复杂、数据量庞大、数据类型复杂等特点，将采用大数据与人工智能方法，实时感知各类过程状态数据(传感器数据、视频、音频等)和运行工况数据，进行分析处理，自适应调整感知策略和优化工况参数的检测质量，并可以对实时工况感知数据进行智能识别，实现产品产量、质量、能耗、排放等目标与生产全流程各工序相关机理知识、经验知识和数据知识的协同关联、深度融合。 |

1.3 第三步：问卷调查与专家研讨

基于遴选的智能制造领域关键技术清单，面向国际范围内智能制造领域高校、科研院所、企业专家广泛发放问卷或组织召开研讨会，围绕技术的重要性、核心性、带动性、颠覆性、成熟度、领先国家、技术实现时间等方面征求专家意见，汇总专家意见并进行分析，梳理确定技术发展的重要里程碑时间节点。

通过两轮问卷调查与专家研讨的结果，依据专家对技术领域的熟悉程度和投票数量，计算单因素指标得分。表3为本次调查问卷指标计算示例。根据得分进行排序，6个方向提出本领域内的关键技术，形成86项的关键技术池。围绕关键技术池，开展两轮6个课题组专家集体研讨，对关键技术清单进行再次遴选和合并，最终形成27项面向2035年智能制造技术预见清单。

表3 智能制造技术路线图调查问卷指标计算示例

| 技术名称 | 通用性 | | 核心性 | | 带动性 | | 颠覆性 | | 成熟度 | | 经济发展 | | 社会发展 | |
|-------------|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| | 指数 | 排序 |
| 基于语义的智能识别 | 85.97 | 16 | 85.56 | 13 | 84.6 | 6 | 82.13 | 6 | 70.58 | 9 | 85.47 | 25 | 84.63 | 10 |
| 智能视觉传感技术 | 93.77 | 1 | 88.61 | 7 | 87.38 | 3 | 79.22 | 9 | 68.3 | 16 | 92.18 | 1 | 89.16 | 1 |
| 仿生传感器 | 83.93 | 24 | 84.94 | 17 | 83.75 | 11 | 87.72 | 2 | 66.4 | 19 | 88.91 | 7 | 87.64 | 5 |
| 量子加密通信 | 87.78 | 9 | 91.13 | 1 | 90.87 | 1 | 95.46 | 1 | 69.31 | 14 | 88.37 | 9 | 88.94 | 2 |
| 容器技术 | 85.56 | 17 | 84.89 | 18 | 83.52 | 15 | 67.39 | 32 | 72.33 | 5 | 80.51 | 30 | 84.01 | 12 |
| PLC虚拟化 | 86.1 | 14 | 89.94 | 5 | 83.59 | 13 | 79.08 | 10 | 76.28 | 1 | 88 | 11 | 88.22 | 4 |
| 基于问题理解的按需云 | 86.89 | 12 | 80.21 | 26 | 75.43 | 31 | 73.41 | 22 | 64.57 | 27 | 86.62 | 21 | 81.83 | 22 |
| 函数计算/无服务器计算 | 80.99 | 28 | 81.38 | 25 | 79.22 | 26 | 76.92 | 13 | 62.47 | 30 | 83.38 | 26 | 82.96 | 15 |
| 突变负载均衡 | 82.29 | 27 | 75.86 | 32 | 82.2 | 17 | 71.4 | 26 | 69.39 | 13 | 82 | 29 | 78.12 | 30 |
| 深度报文检测/状态检测 | 79.5 | 32 | 79.35 | 30 | 75.85 | 30 | 71.03 | 27 | 65.82 | 22 | 79.22 | 32 | 71.91 | 32 |
| 统计入侵检测 | 83.88 | 25 | 79.98 | 28 | 75.05 | 32 | 77.03 | 12 | 66.65 | 18 | 79.28 | 31 | 82.88 | 16 |
| 实用拜占庭容错算法 | 79.93 | 31 | 86.51 | 11 | 77.47 | 29 | 74.15 | 20 | 67.03 | 17 | 88.24 | 10 | 77.42 | 31 |
| 智能合约 | 82.89 | 26 | 85.06 | 16 | 82.12 | 18 | 85.25 | 3 | 70.67 | 8 | 82.22 | 28 | 82.97 | 14 |
| 全链路流式计算 | 85.08 | 19 | 84.1 | 19 | 80.36 | 23 | 78.19 | 11 | 57.28 | 32 | 82.69 | 27 | 82.87 | 17 |
| 数据质量评价与清洗 | 91.54 | 3 | 90 | 4 | 85.85 | 4 | 72.98 | 25 | 75.32 | 2 | 91.51 | 2 | 85.92 | 8 |
| 知识图谱 | 92.46 | 2 | 85.7 | 12 | 80.17 | 24 | 68.98 | 31 | 65.66 | 23 | 87.94 | 12 | 85.46 | 9 |
| 工业知识获取 | 86.16 | 13 | 89.79 | 6 | 77.58 | 28 | 76.45 | 15 | 65.54 | 24 | 90.45 | 4 | 84.44 | 11 |
| 可视化编程 | 88.95 | 6 | 83.26 | 23 | 84.42 | 8 | 81.35 | 8 | 64.35 | 28 | 86.73 | 19 | 83.54 | 13 |
| 工业中间件 | 85.48 | 18 | 83.73 | 22 | 82.37 | 16 | 70.93 | 28 | 69.26 | 15 | 88.77 | 8 | 87.26 | 6 |
| 边缘仿真 | 80.62 | 29 | 87.61 | 9 | 83.59 | 14 | 81.66 | 7 | 72.18 | 6 | 85.75 | 24 | 80.35 | 26 |
| 分布交互仿真 | 87.37 | 10 | 85.38 | 14 | 78.84 | 27 | 73.49 | 21 | 69.63 | 12 | 87.74 | 13 | 82.6 | 19 |
| 分布式人工智能 | 88.06 | 8 | 88.11 | 8 | 83.7 | 12 | 74.82 | 18 | 64.64 | 26 | 90.39 | 5 | 87.02 | 7 |
| 跨媒体知识学习 | 90.45 | 5 | 90.24 | 3 | 85.39 | 5 | 75.24 | 16 | 66.27 | 20 | 87.54 | 16 | 80.21 | 27 |
| 智能增强技术 | 87.11 | 11 | 87.61 | 10 | 89.36 | 2 | 83.56 | 4 | 64.91 | 25 | 86.41 | 22 | 81.75 | 23 |
| 微服务/SOA | 90.94 | 4 | 85.29 | 15 | 81.38 | 21 | 75.11 | 17 | 63.05 | 29 | 86.96 | 18 | 79.28 | 29 |
| 硬件抽象架构 | 80 | 30 | 78.09 | 31 | 84.55 | 7 | 74.68 | 19 | 60.92 | 31 | 86.64 | 20 | 82.79 | 18 |
| 去中心化架构 | 83.94 | 23 | 79.44 | 29 | 81.91 | 19 | 83.24 | 5 | 72.51 | 4 | 87.29 | 17 | 80.53 | 25 |
| 制造对象标识/接入 | 84.06 | 22 | 90.63 | 2 | 84.01 | 10 | 73.01 | 24 | 74.56 | 3 | 89.69 | 6 | 88.71 | 3 |
| 制造数据集成/融合 | 88.32 | 7 | 83.86 | 21 | 84.3 | 9 | 70.24 | 30 | 66.25 | 21 | 86.09 | 13 | 82.38 | 20 |
| 制造应用封装/协同 | 84.94 | 20 | 80.05 | 27 | 81.62 | 20 | 70.59 | 29 | 69.86 | 10 | 87.61 | 15 | 81.72 | 24 |
| 服务型制造 | 86.06 | 15 | 84.04 | 20 | 80.6 | 22 | 76.83 | 14 | 72.01 | 7 | 87.63 | 14 | 79.53 | 28 |
| 云排产 | 84.1 | 21 | 82.75 | 24 | 79.36 | 25 | 73.33 | 23 | 69.82 | 11 | 91.48 | 3 | 82.13 | 21 |

1.4 第四步：技术路线图绘制

智能制造技术路线图主要包括目标层、实施层、保障层等层次。目标层由6个方向的专家根据智能制造发展愿景、未来经济社会需求、领域战略目标

与任务等方面讨论制定。实施层主要根据遴选的关键技术清单和通过专家意见收集到的重要时间节点绘制。保障层由专家根据政策、人才、资金支撑方面的需求讨论得出。

在绘制路线图初稿的基础上,由6个方向的院士牵头组织,对路线图中目标层、实施层、保障层各条目进行调整,如添加、删除、时间调整等,以专家意见为核心,经过多轮专家研讨,使专家意见

基本收敛,达成共识后,确定最终的技术路线图。图5为本次路线图的基本框架,路线图具有四项基本要素:基于时间序列;分层展现;有明确的里程碑节点;各层之间有联系的。

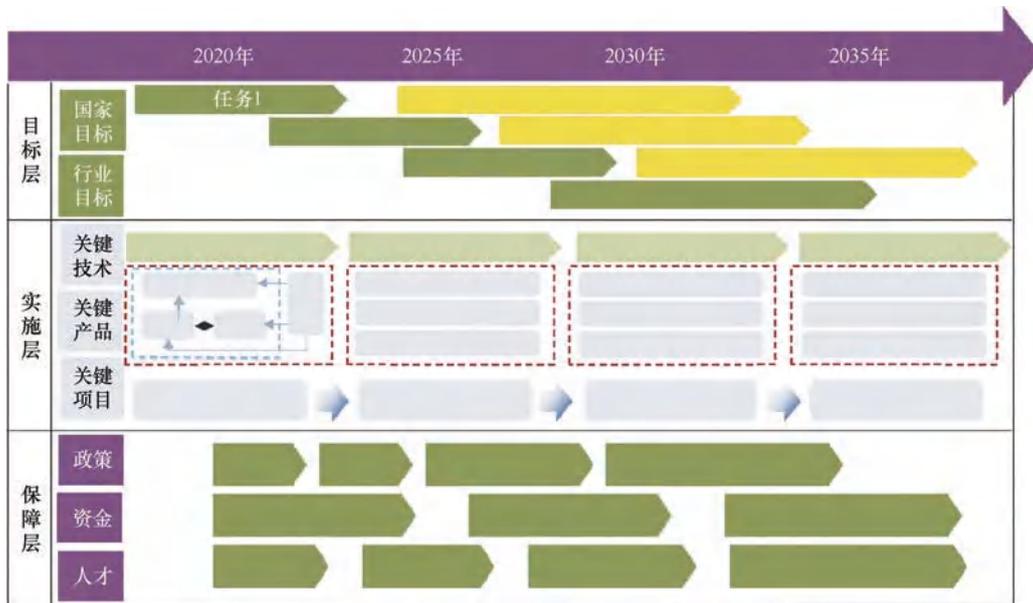


图5 智能制造技术路线图基本框架示意图

2 智能制造技术清单

如第1.2小节与第1.3小节所述,经过技术态势扫描、人工整理、问卷调查以及三轮专家研讨等环节,最终形成了6个方向的面向2035的智能制造关键技术清单,如表4所示。

表4 面向2035的智能制造技术清单(2020版)

| 序号 | 关键技术名称 | 序号 | 关键技术名称 |
|----|---------------|----|-----------------|
| 1 | 面向产品设计和工艺的知识库 | 15 | 设备健康评估和故障预示技术 |
| 2 | 数据采集、处理和分析技术 | 16 | 共享制造(协同与共享) |
| 3 | 分布式智能控制技术 | 17 | 个性化规模定制 |
| 4 | 人机共融机器人 | 18 | 知识工程和工业知识软件化 |
| 5 | 智能传感器技术 | 19 | 智能工业网络 |
| 6 | 企业智能决策系统 | 20 | 新一代移动和数据通信技术 |
| 7 | 智能数控加工技术与装备 | 21 | 边缘智能技术 |
| 8 | 增材制造技术与装备 | 22 | 标识解析与管理技术 |
| 9 | 离散智能工厂 | 23 | 网络安全技术 |
| 10 | 智能建模与仿真技术 | 24 | 基于语义的智能识别技术 |
| 11 | 智能制造标准体系 | 25 | 混合增强技术 |
| 12 | 智能优化决策技术与系统 | 26 | 人-信息-物理系统(HCPS) |
| 13 | 流程智能工厂 | 27 | 工业电子商务 |
| 14 | 数字孪生技术 | | |

2.1 面向产品设计和工艺的知识库

面向产品设计和工艺的知识库涉及产品全生命周期的各方面知识,包括材料、结构、设计、制造、服务(销售、维护)和报废等方面的数据与知识。主要内容和核心技术包括知识的获取技术、知识的管理技术、知识的运用技术等。面向产品设计和工艺的知识库可在虚拟的数字环境里并行、协同实现产品的全数字化设计,结构、性能、功能的模拟与仿真优化。

2.2 数据采集、处理和分析技术

数据采集、处理和分析技术是针对在多种访问终端和多种网络类型的场景下,用户数据实时、高效采集的技术。主要解决异构通讯协议数据源的集成与访问、实时数据接口的统一、多源异构数据融合、实时数据的海量存储、实时数据读写操作和历史数据的高效查询、数据质量评价与清洗、实时计算和分析处理、实时数据的组织和访问权限管理等问题。

2.3 分布式智能控制技术

分布式智能控制技术是人工智能和分布式计算结合的技术,主要应用于较大规模的区域、多异构平台协作作业、多个智能机器(高可靠性智能机器)协同工作的场景。研究不同智能体之间的行为协调和工作任务协同,同时每个智能体具有其本身的目的。

标和意愿。通过分布式人工智能，将复杂系统的多目标求解问题逐层划分为复杂程度相对较低的子问题，再由不同智能体经过沟通协作和自主决策完成，能克服单个智能机器资源和能力缺乏以及功能单一等局限性。需要重点突破云计算环境下的集群机器分布式控制架构，在此基础上，研究边缘控制器的实时资源调度与控制一体化方法，面向任务的语义编程及自动生成机制，面向快速高精协作的多智能机器系统的观测模型，以及多智能机器的任务分配、协同机制和分布式控制。

2.4 人机共融机器人

人机共融机器人是把生命系统的优点与机电系统的优势相结合的智能机器人。通过对生命系统和机电系统深度融合技术和方法、生物-机电系统融合的调控机理和相关效能优化模型的研究，形成基于生命系统和机电系统相融合的新型感知、驱动和能量供给的智能生物功能器件单元，并通过系统集成实现同生共体、互生共融的新一代人机共融机器人。微机电系统、微纳加工技术、生命科学等众多学科领域的发展都正在促进类生命机器人领域的研究。

2.5 智能传感器技术

智能传感器技术的发展方向包含多源传感器融合技术与仿生传感器技术等。多源传感器融合技术是指利用不同的时间和空间的多传感器信息资源，对按时序获得的观测信息在一定的准则下加以自动分析、综合、支配和使用，获得被测对象的一致性解释与描述，以完成所需的决策和任务，使系统获得比其各组成部分更优越的性能。其主要研究内容包括数据关联、多传感器 ID/轨迹估计、采集管理等。仿生传感器是采用固定化的细胞、酶或者其他生物活性物质与换能器相配合组成的新型传感器，是生物医学和电子学、工程学相互渗透而发展起来的一种新型感知技术。

2.6 企业智能决策系统

企业智能决策系统包括企业战略智能决策系统、产品图谱智能决策系统、供应链管理智能决策系统和工艺选择智能决策系统，以实现企业目标、计划调度、运行指标、生产指令与控制指令一体化优化决策。企业战略智能决策系统对企业竞争优势、技术创新体系、创新绩效、环境不确定性、行业与技术发展趋势进行分析决策。产品图谱智能决策系统对产品寿命周期与竞争优势进行全流程、多要素分析，进行产品的族群、发展图谱以及实现路径规

划，实现产品的价值最大化。供应链管理智能决策系统对供应链进行全要素分析，实现高效率、零库存的智能供应链管理。工艺选择智能决策系统进行产品设计与工艺流程智能规划，对产品制造模式进行战略选择。

2.7 智能数控加工技术与装备

智能数控加工技术包括人、计算机、机器一体化融合理论与技术；多源信息的感知理论与技术；热变形溯源、温度场理论以及传感器布点和补偿技术；几何误差建模与补偿技术；振动建模与抑制技术；刀具加工模型与加工状态感知技术；在机质量检测方法技术；基于数控系统的工件加工进度提取技术；故障在线识别理论与技术；加工过程能量流模型与能效检测技术；智能决策理论与技术；智能执行理论与技术；智能维护理论与技术；智能机床综合能力评价理论与技术等。智能数控加工装备，如智能数控加工中心、智能机床等，在数字化控制技术的基础上增强了加工状态的感知能力，通过网络化技术实现设备间互联互通，并应用大数据及人工智能技术，具有自感知、自分析、自适应、自维护、自学习等能力，能够实现加工优化、实时补偿、智能测量、远程监控和诊断等功能。

2.8 增材制造技术与装备

增材制造技术与装备包括金属增材制造技术与装备、功能梯度材料及结构增材制造技术与装备、生物增材制造技术与装备等方向，以及增材、减材、等材一体化智能混合制造技术等工艺方向。金属增材制造技术与装备通过对能束发生装置及多重能场进行建模与仿真，实现多重能量场对构件制备性能的耦合影响的精确控制、变形开裂预防及构件制造过程中的精准控形、控性，同时能够实现包含非晶态合金、高熵合金等特殊性能材料的大型复杂构件控形控性制造。功能梯度材料及结构增材制造技术与装备能进行金属、非金属、复合材料、陶瓷等多材料混合的3D打印，实现多类别增材制造工艺结合、增材制造与其他制造工艺结合，并可在构件的不同部位用不同的材质，以及不同材质的渐进过渡，实现材料性能优势互补或独特组合，使构件具有超常规的优异性能。生物增材制造技术与装备能够实现非活性器械和生物活性组织与器官的匹配性设计；通过对多尺度、多材料、多细胞、多组织液通道的智能控制，实现非活性器械与生物活性组织与器官的精准打印；与微纳生物传感、神经元再生相结合

实现与宿主组织及神经系统相融相生。

2.9 离散智能工厂

离散智能工厂能根据产品性能需求进行产品设计与制造的智能选择,实现个性化定制和柔性制造混流生产。通过设计与仿真软件实现产品的仿生、创成、拓扑优化设计。能够通过智能制造装备,对制造过程进行全流程仿真、工艺参数决策,实现制造模式选择及多类别、多模式混合加工制造,实现产品性能和制造效率的综合提升。基于全流程信息的协同优化技术,实现包括研发设计、工艺与设备、物流、质量、仓储、销售等工厂全流程的实时管控和协同优化。离散智能工厂重点面向 3C 产品小批量、多品种、快速迭代的生产需求;面向航空、航天、船舶零部件超大型、结构复杂、轻量化、高质量的生产需求;面向对大型燃气轮机、电推进发动机等高性能发动机的制造需求;面向汽车产品多系统、多部件及个性化定制需求。

2.10 智能建模与仿真技术

智能建模与仿真将来自多传感器、多尺度的信息和数据,在一定的准则下加以自动分析和综合,并进行异构数据与结构性数据的融合,将机理模型和数据模型相结合,实现全流程多层次多尺度多场耦合的一体化建模,将不同领域的仿真模型软件通过统一的接口,软件总线、数据共享或网络等技术,组装成具备多种功能的综合仿真软件系统。在进行大规模复杂系统的仿真时,可通过采用协调一致的结构、标准和协议,利用网络设备将分散在各地的仿真设备进行互联,形成综合性仿真环境。

2.11 智能制造标准体系

智能制造标准的对象是信息技术与制造技术融合所需要的标准。标准体系的研究包括对标准体系架构的研究,明确标准体系的范围和描述维度。根据架构,展开为标准体系结构,明确标准体系中的标准分类、层次结构和标准的主要研制方向。智能工厂的标准体系建设,包括基础、安全、管理、检测评价和可靠性等基础共性标准和智能装备、智能工厂、智能服务、工业软件和大数据以及工业互联网等关键技术标准,如制造流程标准、数据标准、通信协议与标准、技术应用标准。

2.12 智能优化决策技术与系统

智能优化决策技术与系统是快速地从全部可行性方案中选出能实现目标最优方案的技术和系统。智能优化决策技术包括最优性条件、凸优化、线性

优化、无约束优化的求解方法、约束优化的求解方法、动态规划、求解优化问题的智能算法、决策论、对策论、图与网络分析、排队论、存储论等。智能化决策系统采用工况协议智能解析技术、多源异构数据融合技术、信息深度感知为特征的高维非线性强耦合过程统计学习理论、多质量指标逆映射建模方法、以及基于数据的知识学习与规则提取方法,实现自愈控制和自优化。

2.13 流程智能工厂

流程智能工厂以优化运行指标为目标,自适应决策控制系统的设定值,实现运行指标的优化控制、自主控制。能及时预测与诊断异常工况,当异常工况出现时,通过自愈控制,排除异常工况,实现安全优化运行;将机理模型与数据模型深度融合,建立有效的动态智能模型,实现生产装置的动态自主学习与基于数据驱动的自主控制。实现全流程质量管理 and 数据自由流通。重点满足钢铁、石化、选矿、有色等流程智能工厂的技术和系统需求。

2.14 数字孪生技术

数字孪生在数字化的环境下,将人机物等物理实体映射形成信息虚体。它通过对来自物理实体的实时数据,“理解”对应的物理实体的变化并对变化做出响应。借助信息空间对数据综合分析处理的能力,应对外部复杂环境的变化,进行有效决策,并作用到物理实体。在这一过程中,物理实体与信息虚体之间交互动、虚实映射,通过数据融合分析、决策迭代优化等手段共同作用,实现制造活动的持续优化,为生产制造活动提供新的时空维度。

2.15 设备健康评估和故障预示技术

设备健康评估和故障预示通过故障机理分析与损伤演化建模,以及衰退分析和预测等技术,建立基于失效机理的全寿命设计、预测性维护的理论模型。以设备运行数据、数据挖掘、特征学习、信息共享、安全与隐私保护等技术为基础,融合设备原理、专家知识和数据模型,对装备基本零部件早期微弱故障或者极其微弱异常信息,进行强相关故障特征有效分离、早期微弱故障特征增强与提取、多维空间特征映射与提取,从而有效识别早期微弱故障与复合故障,推动远程监测、诊断、健康管理 with 预测维护等领域的技术进步,提供设备维护的预测性建议。

2.16 共享制造

共享制造具体可分为:① 制造能力共享。聚焦

加工制造能力的共享创新,重点发展汇聚生产设备、专用工具、生产线等制造资源的共享平台,发展多工厂协同的共享制造服务,发展集聚中小企业共性制造需求的共享工厂,发展以租代售、按需使用的设备共享服务;②创新能力共享。围绕中小企业、创业企业灵活多样且低成本的创新需求,发展汇聚社会多元化智力资源的产品设计与开发能力共享,扩展科研仪器设备与试验能力共享;③服务能力共享。围绕物流仓储、产品检测、设备维护、验货验厂、供应链管理、数据存储与分析等企业普遍存在的共性服务需求,整合海量社会服务资源,探索发展集约化、智能化、个性化的服务能力共享。

2.17 个性化规模定制

个性化规模定制将人工智能和决策支持系统相结合,通过专家系统,使决策支持系统能够更充分地应用人类的知识,包括对问题的描述性知识,决策过程的过程性知识,求解问题的推理性知识等,通过逻辑推理来帮助解决个性化定制问题中的复杂决策问题。

2.18 知识工程和工业知识软件化

工业技术软件化是工业技术中的经验与知识的显性化、模型化、数字化、系统化和智能化的过程,既是利用软件技术实现工业技术知识沉淀、转化与应用的技术和方法,也是在工业各领域促进机器自动使用知识、人类高效使用知识的技术和方法。工业技术软件化包含平台技术和关联的各种工业APP;它的成熟度反映了一个国家工业化和信息化融合的深度和水平。可以被软件化的工业技术对象包括:工业产品、形成工业产品的过程、对经验的抽象结果、过程中包含的各种独立算法工具与知识,甚至是多个工业APP的组合。工业技术软件化本质上是知识工程方法与技术。

2.19 智能工业网络

智能工业网络是具有网络状态自感知、网络数据可视化、故障自定位与自恢复、网络自优化等智能功能的网络管理系统,具备网络状态的察觉、精确诊断以及动态优化和补救的能力。

2.20 新一代移动和数据通信技术

新一代移动通信具有灵活可配置的新型网络架构,融合大规模天线、新型双工、先进编码等演进技术以及新载体、新维度等创新技术,具有更大容量、更高速率、满足更加多样化应用场景和业务需求等特点。该网络的网络节点能实现高性能路由与

转发,网络资源的虚拟化管理与高效调度、各类标识间的动态绑定与高效解析等功能,在一定覆盖范围内以一定数量规模传输以IP为代表的分组数据和以内容为代表的服务信息。对于新一代移动和数据通信系统,5G增强技术以及6G将成为后续的研究重点。5G增强技术在持续推动增强移动宽带场景技术演进的基础上,将重点针对低时延高可靠和海量机器类通信场景的关键技术和系统设计进行标准化。研究面向更高速率、大容量和低时延的新一代光传输技术,并积极推动太赫兹、可见光通信等新的频谱资源使用技术;二是推动与大数据、人工智能等融合技术;三是要探索与卫星通信等非蜂窝网络融合架构和关键技术。当前未来数据网络的技术方向众多,呈现碎片化发展态势。

2.21 边缘智能技术

边缘智能是边缘计算发展的更高阶段,通过边缘计算与人工智能相结合,让每个边缘计算的节点都具有深度计算和智能决策的能力,并与产业应用深度融合。边缘智能是在靠近物或数据源头一侧设置的开放平台,将网络通信、高性能计算、大容量数据存储和应用核心能力融为一体,就近提供最近端服务,产生更快的网络服务响应,并能满足实时性、安全与隐私保护等方面的要求。该平台还能够充分利用边缘侧的海量现场数据与终端计算能力,配合工业云中心大规模仿真解算能力,高效实现工业应用中仿真数据融合分析、虚实交互反馈与决策迭代优化。

利用人工智能技术与边缘计算的结合,提供面向智能数据感知、语义标记、基于工业运行机理的实时处理的边缘智能是未来发展重点方向。主要聚焦边缘计算与边缘智能的相关支撑技术,包括两大类,一类是应用于边缘计算与边缘智能的软件、平台、系统层面的新型信息技术;另一类是支持移动通信的网络层面的新型通信技术。

2.22 标识解析与管理技术

标识解析与管理技术是工业互联网的重要技术。标识解析是指能够根据标识编码查询目标对象网络位置或者相关信息的技术服务;主要技术路径,一是可脱离互联网域名系统独立运行的标识解析技术,二是需要依赖于互联网域名系统运行的标识解析技术。标识管理是指标识相关的注册、分配、核验、检查所必需的支撑性技术手段。

2.23 网络安全技术

网络安全技术是工业互联网的重要技术,包含防止消息被篡改、删除、重放和伪造,使发送的消息具有被验证的能力,使接收者或第三者能够识别和确认消息的真伪的技术,以及通过伪装信息使非法接入者无法了解信息真正含义的技术。通过对收集到的数据进行处理来判断网络的安全状况,反映网络和信息系统的的变化趋势,提前做好网络安全防护工作,降低网络安全事件所带来的潜在损失。根据系统安全情况和可能面临的攻击,进行网络元素的动态重构和变迁,以攻为守,通过主动探测网络安全态势和攻击态势,预测攻击形态,在不断的自学习过程中提高目标系统的防御水平。

2.24 基于语义的智能识别技术

基于语义的智能识别,其关键技术是对自然语言处理与语义的理解。自然语言处理(NLP)研究涉及计算机科学、人工智能、语言学,关注计算机和人类(自然)语言之间的相互作用的领域。通过建立高质量数据库、常见领域的理解、可扩展的算法框架以及数据驱动的闭环流程,实现人与计算机之间用自然语言进行有效通信,做到在语义上的理解、逻辑的正确推断和具体知识的应用,促进在应用场景下的理解。

2.25 混合增强技术

混合增强技术是将人的作用或人的认知模型引入人工智能系统,形成“混合增强智能”的形态。这种形态是人工智能可行的、重要的成长模式。智能增强技术可以增强以人为核心的人机交互,人与生物神经网络交互,增强人脑加工、储存和提取信息的能力。深度强化学习结合了深度学习的表征能力和强化学习的学习模型,利用强化学习驱动代理以快速探索各类架构、节点类型、连接、超参数设置以及深度学习、机器学习乃至其他 AI 模型。

2.26 人-信息-物理系统(HCPS)

智能制造系统是由人、信息系统和物理系统有机组成的智能系统,即人-信息-物理系统(HCPS),其中物理系统是制造活动的执行者和完成者;信息系统是制造活动信息流的核心,帮助人类对物理系统进行感知、认知、分析决策与控制,使物理系统尽可能以最优的方式运行。人始终是 HCPS 的主宰,人是物理系统和信息系统的创造者,也是物理系统和信息系统的使用者和管理者。HCPS 突出人在智能系统中的中心地位,更

加强调智能系统中人的智慧与机器智能各自优势的融合与协同。

2.27 工业电子商务

工业电子商务通过工业企业交易方式与经营模式的网络化、协同化和智能化,推动企业在研发创新、生产管控、供应链管理、经营管控、财务管控和客户服务等方面传统能力的改造升级,帮助工业企业加快培育基于需求精准识别和定义、资源动态整合、产品或服务快速交付和全生命周期动态服务等方面的新型能力,形成个性化定制、服务化转型、网络化协同等新模式新业态。

3 智能制造技术发展路线图

本研究中技术路线图以时间为主轴,面向 2035 中长期,分阶段、分层次的呈现出智能制造技术和产品、离散型智能工厂、流程型智能工厂、智能制造新模式、智能制造云、工业互联网技术等六大技术领域的发展目标、需求趋势、关键技术、重点任务、辅助支撑资源等五大方面的未来发展方向,以及主要升级路径和关键时间节点(图 6~11)。

具体而言,在发展目标方面,分析了对领域或跨领域重大工程愿景。在需求趋势方面,梳理了面向经济社会与产业发展的重大工程科技需求。在关键技术方面,指出了领域优先发展主题及跨领域的发展方向,识别出了领域所需的核心技术,发现了需要突破的技术群。在重点任务方面,明确了未来重大科技攻关项目、关键科学问题和基础研究重要方向。在辅助支撑资源方面,提出了所需的政策、科研环境和保障条件,以及政策工具及管理措施。

图 6 展示了面向 2035 年的智能产品技术路线图。其中,在需求方面,2035 年之前主要体现在以下方面。

- (1) 国际信息领域竞争加剧对于高性能计算技术、网络安全技术和传感感知技术的需求。
- (2) 国民经济重点领域的复杂、高性能、高精密零部件生产对高效智能化加工技术与装备的需求。
- (3) 未来社会向智能制造和智慧生活转型发展对于新一代智能机器人的需求。
- (4) 构建主动控制型交通系统运载工具智能化,交通设施智慧化、管理服务协同化的需求。
- (5) 医疗服务模式逐步向个性化和智能化转变,对建设数字化、网络化、智能化医疗服务信息

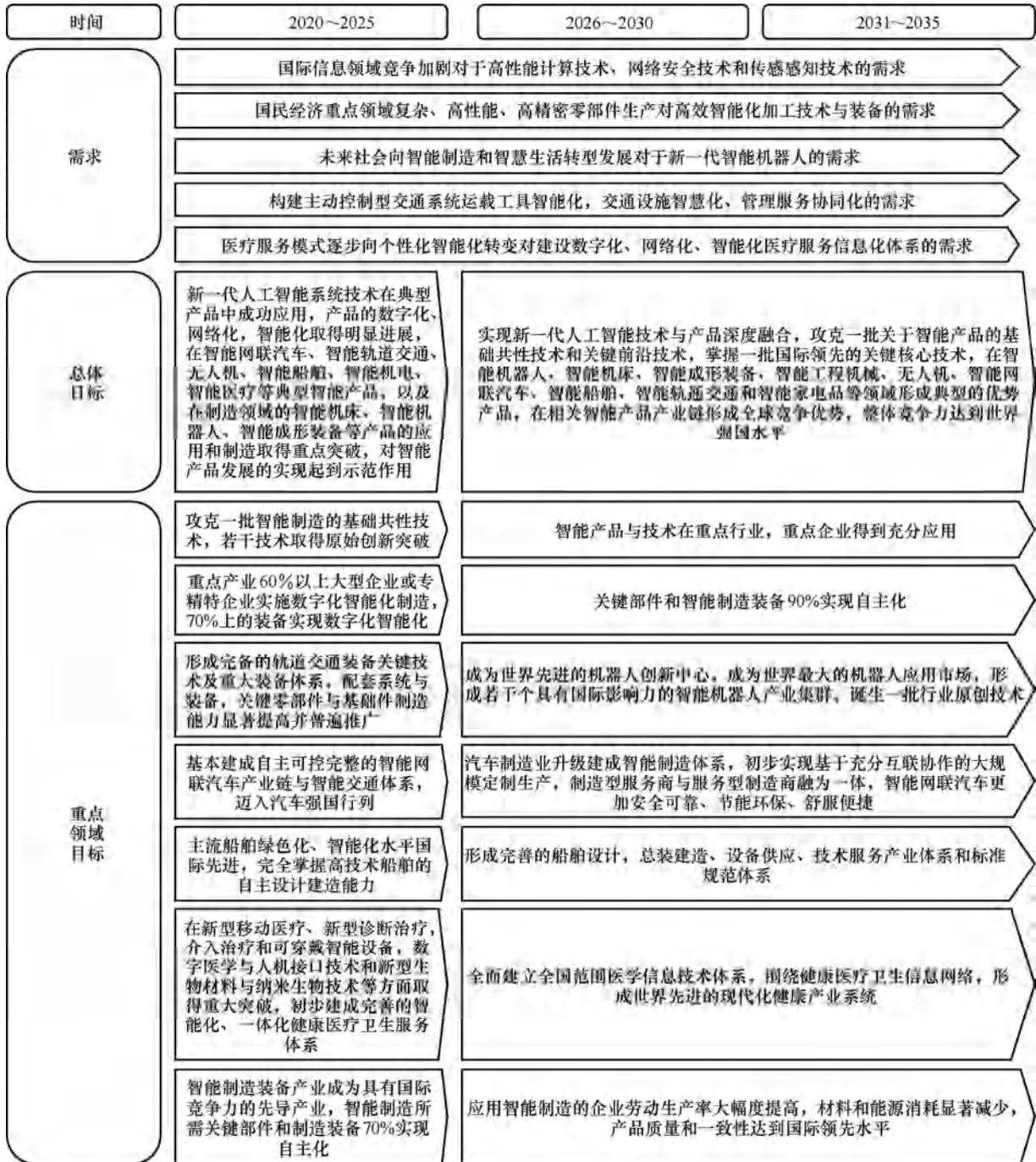
化体系的需求。

智能产品发展的总体目标分两步。

(1) 到2025年，新一代人工智能系统技术在典型产品中成功应用，产品的数字化、网络化，智能化取得明显进展，在智能网联汽车、智能轨道交通、无人机、智能船舶、智能机电、智能医疗等典型智能产品，以及在制造领域的智能机床、智能机器人、智能成形装备等产品的应用和制造取得重点突破，对智能产品发展的实现起到示范

作用。

(2) 到2035年，实现新一代人工智能技术与产品深度融合，攻克一批关于智能产品的基础共性技术和关键前沿技术，掌握一批国际领先的关键核心技术，在智能机器人、智能机床、智能成形装备、智能工程机械、无人机、智能网联汽车、智能船舶、智能轨道交通和智能家电品等领域形成典型的优势产品，在相关智能产品产业链形成全球竞争优势，整体竞争力达到世界强国水平。



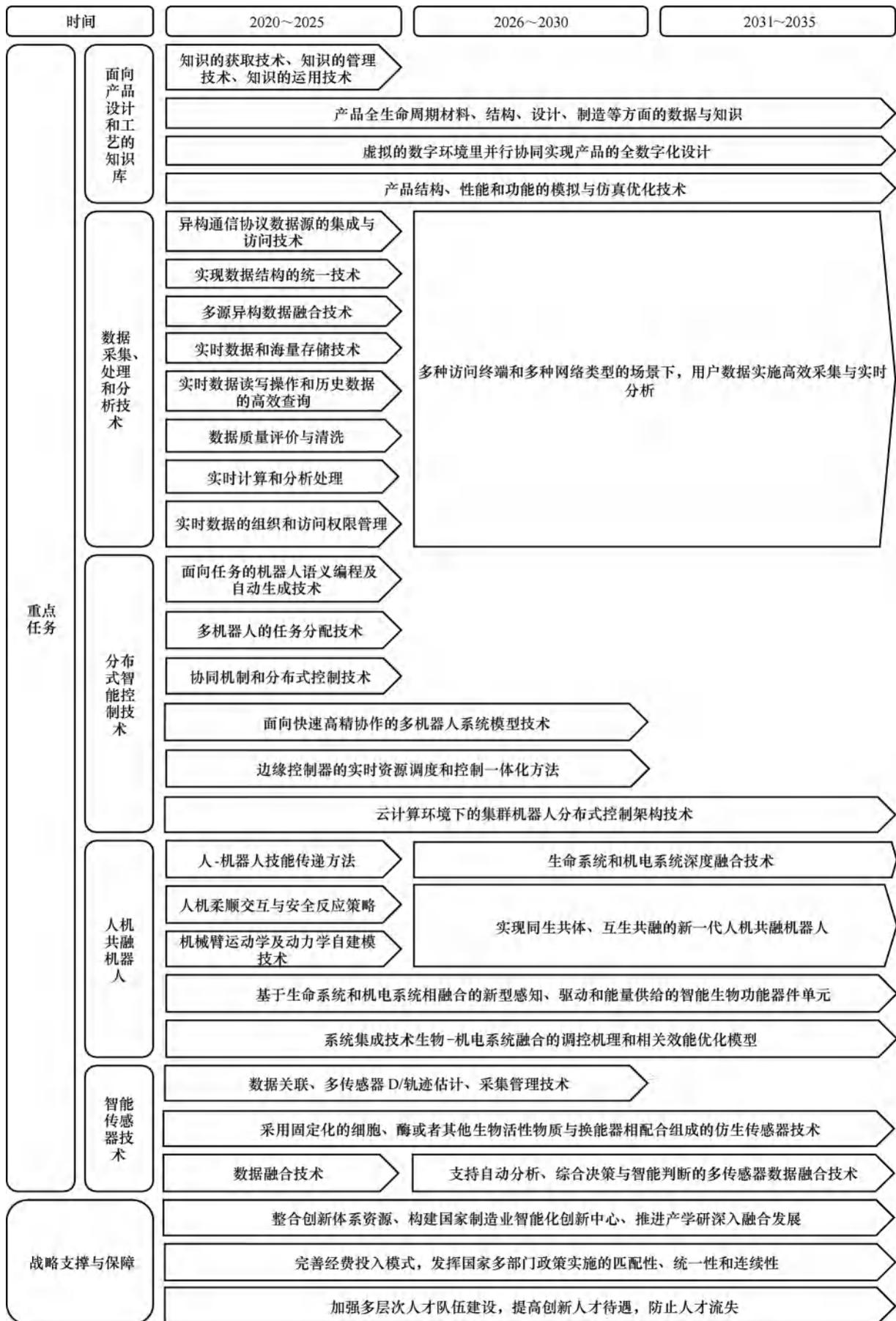


图 6 智能产品技术路线图

智能产品重点领域的目标包括以下内容。

(1) 到2025年左右,攻克一批智能制造的基础共性技术,若干技术取得原始创新突破,到2035年左右,智能产品与技术重点行业,重点企业得到充分应用。

(2) 到2025年左右,重点产业60%以上大型企业或专精特新企业实施数字化智能化制造,70%上的装备实现数字化智能化,到2035年左右,关键部件和智能制造装备90%实现自主化。

(3) 到2025年左右,形成完备的轨道交通装备关键技术及重大装备体系,配套系统与装备,关键零部件与基础件制造能力显著提高并普遍推广,到2035年左右,成为世界先进的机器人创新中心,成为世界最大的机器人应用市场,形成若干个具有国际影响力的智能机器人产业集群,诞生一批行业原创技术。

(4) 到2025年左右,基本建成自主可控完整的智能网联汽车产业链与智能交通体系,迈入汽车强国行列,到2035年左右,汽车制造业升级建成智能制造体系,初步实现基于充分互联协作的大规模定制生产,制造型服务商与服务型制造商融为一体,智能网联汽车更加安全可靠、节能环保、舒服便捷。

(5) 到2025年左右,主流船舶绿色化、智能化水平国际先进,完全掌握高技术船舶的自主设计建造能力,到2035年左右,形成完善的船舶设计,总装建造、设备供应、技术服务产业体系和标准规范体系。

(6) 到2025年左右,在新型移动医疗、新型诊断治疗,介入治疗和可穿戴智能设备,数字医学与人机接口技术和新型生物材料与纳米生物技术等方面取得重大突破,初步建成完善的智能化、一体化健康医疗卫生服务体系;全面建立全国范围医学信息技术体系,围绕健康医疗卫生信息网络,形成世界先进的现代化健康产业系统。

(7) 到2025年左右,智能制造装备产业成为具有国际竞争力的先导产业,智能制造所需关键部件和制造装备70%实现自主化,到2035年左右,应用智能制造的企业劳动生产率大幅度提高,材料和能源消耗显著减少,产品质量和一致性达到国际领先水平。

智能产品重点任务包括面向产品设计和工艺的知识库、数据采集与处理分析技术、分布式智能控

制技术、人机共融机器人、智能传感器技术、等方面,其发展路线图如图6对应位置所示,每个重点任务对应着若干子任务。

面向2035年,发展智能产品的战略支撑与保障包括以下内容。

(1) 整合创新体系资源、构建国家制造业智能化创新中心、推进产学研深度融合。

(2) 完善经费投入模式,发挥国家多部门政策实施的匹配性、统一性和连续性。

(3) 加强多层次人才队伍建设,提高创新人才待遇,防止人才流失。

图7展示了面向2035年的离散型智能工厂技术路线图。在需求方面,2035年之前主要体现在以下方面。

(1) ICT技术飞速发展,数字化技术、互联网、物联网技术、人工智能技术、大数据技术、虚拟现实技术迅猛发展。

(2) 国防、工业、民用等领域消费者对于产品的多样化、个性化、高质量、高时效、低成本、服务型的需求。

(3) 3D打印、激光加工、微纳制造、生物制造、机器人、智能制造等新制造技术革命发展的需求。

(4) 制造型企业与社会转型升级需求,绿色经济、服务型经济发展需求,新一轮技术革命促进产业转型升级、产生新业态、新动能发展的需求。

(5) 新时期国际环境对企业竞争需求、国际国内双循环新发展格局对制造业变革的需求。

离散型智能工厂发展目标包括以下内容。

(1) 到2025年左右,数字化网络化制造在全国普及并得到深度应用,典型智能制造装备、工业互联网与大数据技术、智能工厂使能技术等智能制造关键技术取得突破并成功应用,到2032年左右,新一代智能制造技术及智能工厂在制造业实现大规模推广应用,实现中国制造业的转型升级。

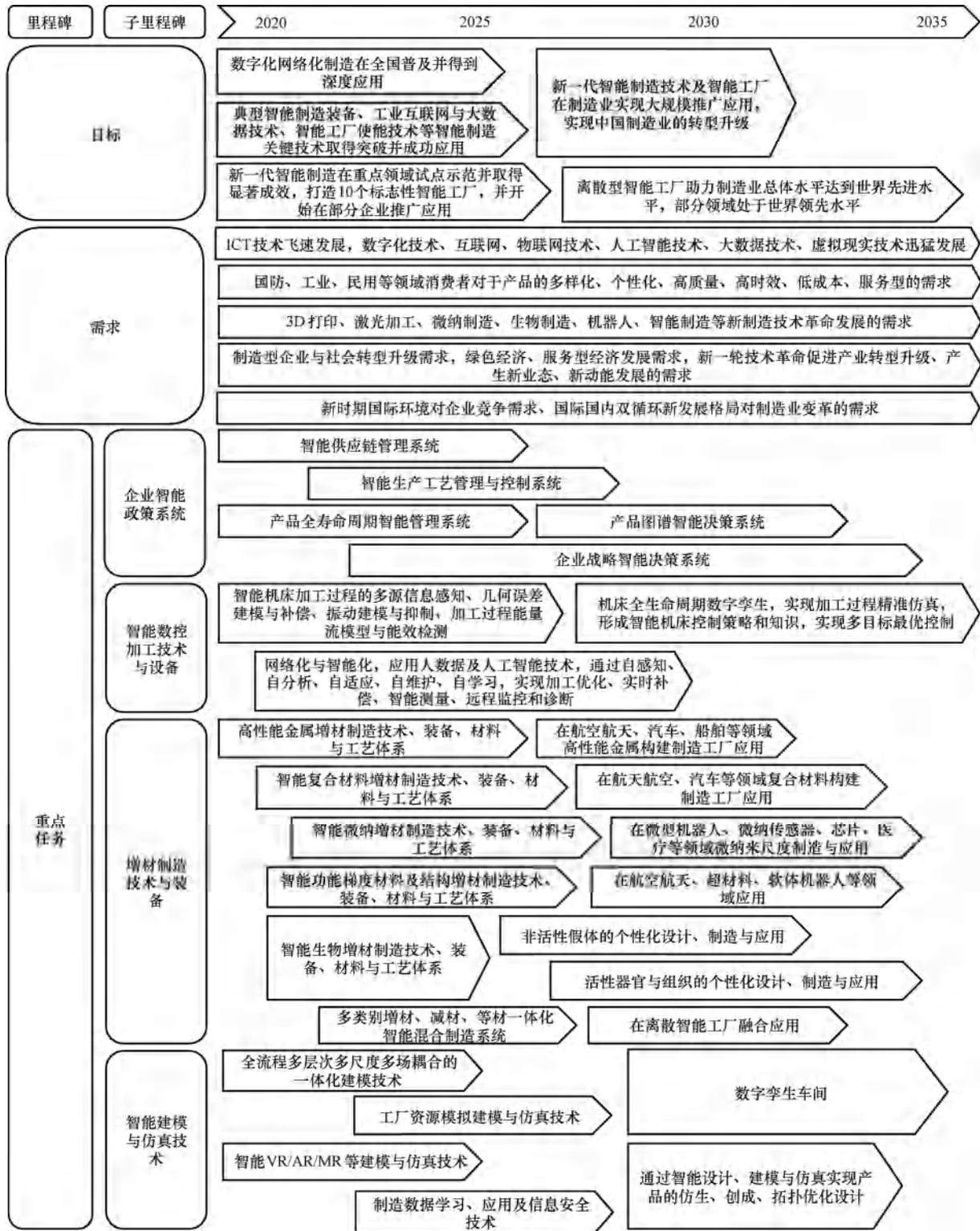
(2) 到2027年左右,新一代智能制造在重点领域试点示范并取得显著成效,打造10个标志性智能工厂,并开始有部分企业推广应用,到2035年左右,离散型智能工厂助力制造业总体水平达到世界先进水平,部分领域处于世界领先水平。

面向2035年,离散型智能工厂发展的重点任务包括企业智能决策系统、智能数控加工技术与装备、增材制造技术与装备、智能建模与仿真技术、离散

型智能工厂、智能制造标准体系等方面，图 7 中展示了对应的子任务及其路线图。

面向 2035 年，离散型智能工厂发展的战略支撑与保障包括以下内容。

(1) 结合中国制造业实际情况支持企业转型发展，快速弥补工业 2.0 和 3.0 所缺失的内容，积极探索工业 4.0 中智能制造的前沿技术，二者有机衔接，坚持“并行推进、融合发展”的技术路线。



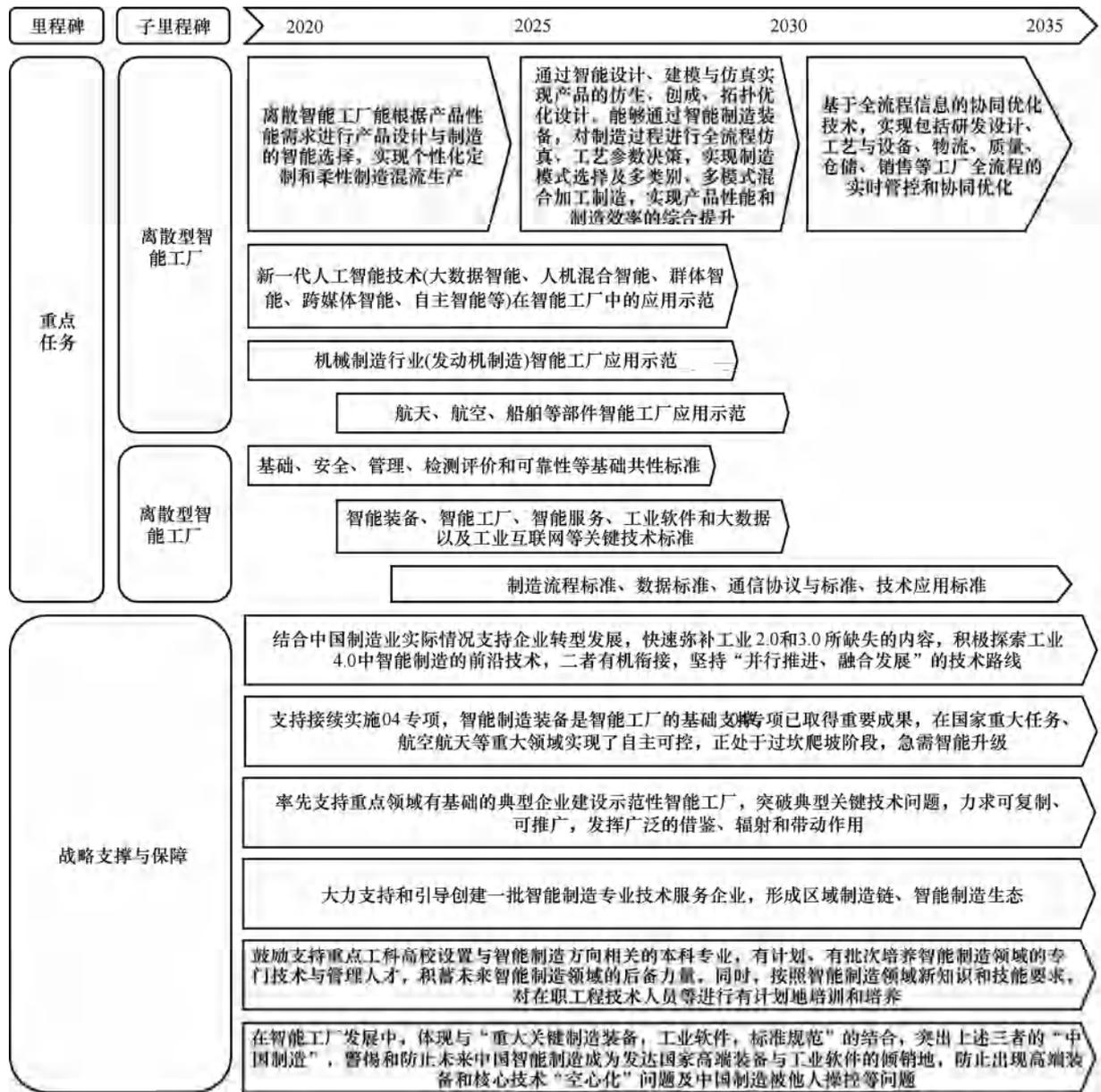


图 7 离散型智能工厂技术路线图

(2) 支持接续实施 04 专项, 智能制造装备是智能工厂的基础支撑, 04 专项已取得重要成果, 在国家重大任务、航空航天等重大领域实现了自主可控, 正处于过坎爬坡阶段, 急需智能升级。

(3) 率先支持重点领域有基础的典型企业建设示范性智能工厂, 突破典型关键技术问题, 力求可复制、可推广, 发挥广泛的借鉴、辐射和带动作用。

(4) 大力支持和引导创建一批智能制造专业技术服务企业, 形成区域制造链、智能制造生态。

(5) 鼓励支持重点工科高校设置与智能制造方向相关的本科专业, 有计划、有批次培养智能制造领域的专门技术与管理人才, 积蓄未来智能制造领

域的后备力量, 同时, 按照智能制造领域新知识和技能要求, 对在职工程技术人员等进行有计划地培训和培养。

(6) 在智能工厂发展中, 体现与“重大关键制造装备, 工业软件, 标准规范”的结合, 突出上述三者的“中国制造”, 警惕和防止未来中国智能制造成为发达国家高端装备与工业软件的倾销地, 防止出现高端装备和核心技术“空心化”问题及中国制造被他人操控等问题。

图 8 展示了面向 2035 年的流程制造智能工厂技术路线图。在需求方面, 2035 年之前主要体现在以下方面。

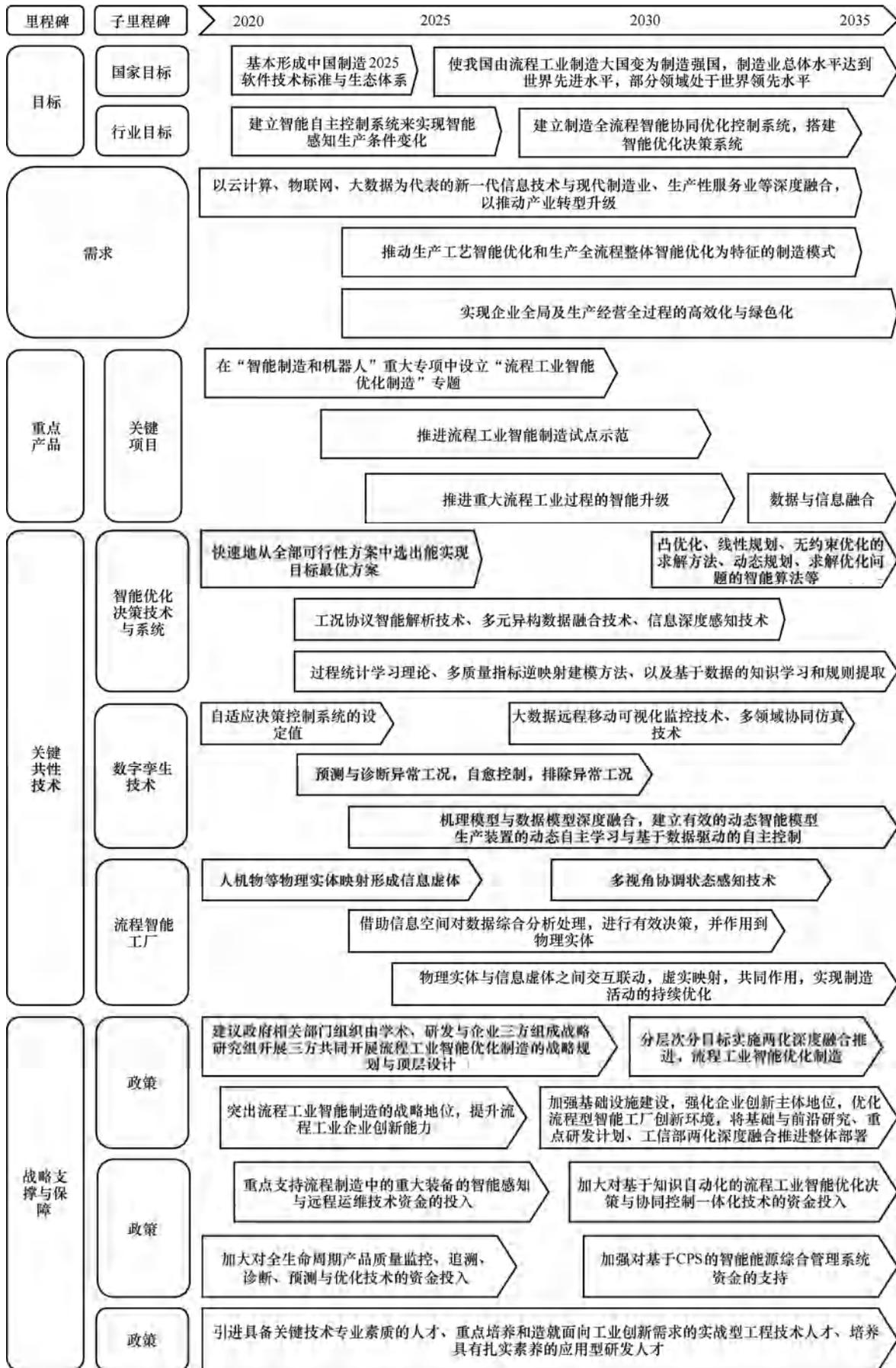


图 8 流程制造智能工厂技术路线图

(1) 以云计算、物联网、大数据为代表的新一代信息技术与现代制造业、生产性服务业等深度融合，以推动产业转型升级。

(2) 推动生产工艺智能优化和生产全流程整体智能优化为特征的制造模式。

(3) 实现企业全局及生产经营全过程的高效化与绿色化。

流程制造智能工厂的目标包括以下内容。

(1) 国家目标：到2025年，基本形成中国制造2025软件技术标准与生态体系，到2035年，使我国由流程工业制造大国变为制造强国，制造业总体水平达到世界先进水平，部分领域处于世界领先水平。

(2) 行业目标：到2025年左右，建立智能自主控制系统来实现智能感知生产条件变化，到2035年左右，建立制造全流程智能协同优化控制系统，搭建智能优化决策系统。

重点产品(关键项目)路线图包括：在“智能制造和机器人”重大专项中设立“流程工业智能优化制造”专题、推进流程工业智能制造试点示范、推进重大流程工业过程的智能升级、)数据与信息融合、推进形成流程工业智能化创新体系。

关键共性技术包括智能优化决策技术与系统、数字孪生技术、流程智能工厂等方面。图8中展示了对应的子任务及其路线图。

流程制造智能工厂发展的战略支撑与保障包括以下内容。

(1) 政策：建议政府相关部门组织由学术、研发与企业三方组成战略研究组开展三方共同开展流程工业智能优化制造的战略规划与顶层设计；分层次分目标实施两化深度融合推进，流程工业智能优化制造；突出流程工业智能制造的战略地位，提升流程工业企业创新能力；加强基础设施建设，强化企业创新主体地位，优化流程型智能工厂创新环境，将基础与前沿研究、重点研发计划、工信部两化深度融合推进整体部署。

(2) 资金：重点支持流程制造中的重大装备的智能感知与远程运维技术资金的投入；加大对基于知识自动化的流程工业智能优化决策与协同控制一体化技术的资金投入；加大对全生命周期产品质量监控、追溯、诊断、预测与优化技术的资金投入；加强对基于CPS的智能能源综合管理系统资金的支

持。

(3) 人才：引进具备关键技术专业素质的人才、重点培养和造就面向工业创新需求的实战型工程技术人才、培养具有扎实素养的应用型研发人才。

图9展示了面向2035年的制造业新业态新模式的技术预见及路线图，到2035年，需求来自于以下几个方面。

(1) 制造业向协同化、定制化、平台化与服务化发展的需求。

(2) 以数据为基础，网络化、智能化为支撑开展服务型制造的需求。

(3) 企业围绕客户的需求开展个性化定制、大规模生产。

(4) 整存存量资源、发挥专业优势，优化资源配置，弹性匹配、动态共享，实现客户增值的新模式新业态需求。

(5) 提升设备健康评估和故障预示能力，构建全产业链、全领域覆盖的健康分析及故障预示平台的需求。

面向2035年，制造业新业态新模式的具体目标包括以下两个方面。

(1) 国家目标：到2025年，形成专项工程引领、典型企业示范、企业积极探索的格局。到2030年，制造业整体竞争力大幅提升，在全球产业分工和价值链中地位明显提升，新模式新业态不断发展壮大。到2035年，产业基础高级化，产业链现代化，制造业整体竞争力达到世界制造强国阵营同类中上水平。

(2) 行业目标：企业积极探索新业态新模式，形成专项工程引领、典型企业示范的发展格局(2024年左右)。新业态新模式收入占企业主营业务收入比不断提高，整体竞争力提升(2029年左右)。成为新的竞争优势与重要利润来源(2032年左右)。新模式新业态收入占企业主营业务收入比达45%(2035年左右)。

制造业新业态新模式发展的重点任务包括设备健康评估和故障预示、共享制造(协同与共享)、个性化规模定制、工业电子商务、知识工程和工业知识软件化等方面。图9中展示了对应的子任务及其路线图。

到2035年，制造业新业态新模式发展的战略支撑与保障包括以下几个方面。

(1) 把握趋势变化, 前瞻布局谋划, 新工程与现行专项有机衔接。

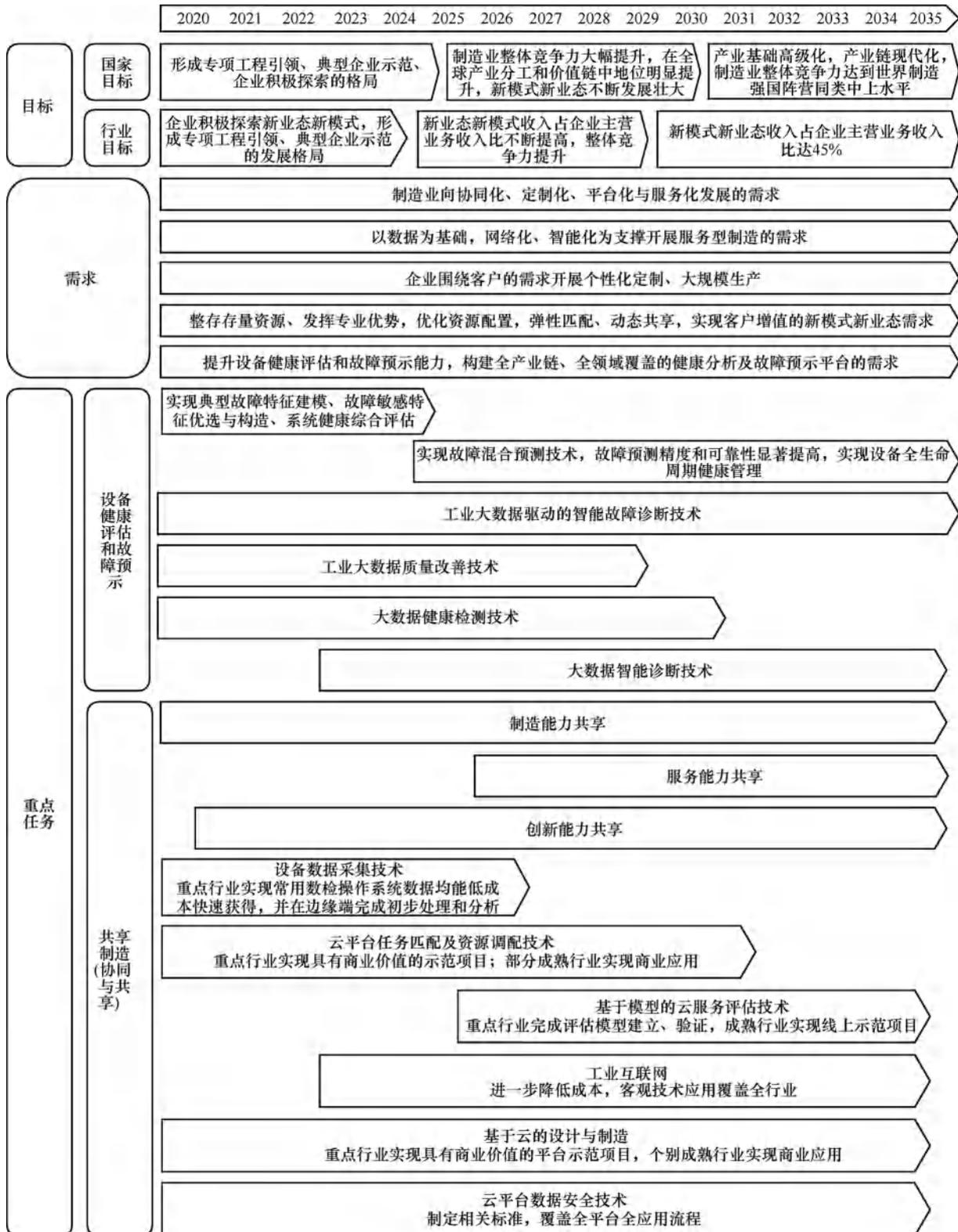
(2) 统筹协调, 资源共享, 分层指导, 协同推进。

(3) 加强产业分类指导, 分阶段、有重点、长期性推动发展。

(4) 加强应用示范, 实行动态评估, 建立跟踪研究、评估、示范常态机制。

(5) 建立创新交流平台, 构建长效合作机制。

(6) 优化政策环境, 建设和完善多渠道多层次的政策体系与机制。



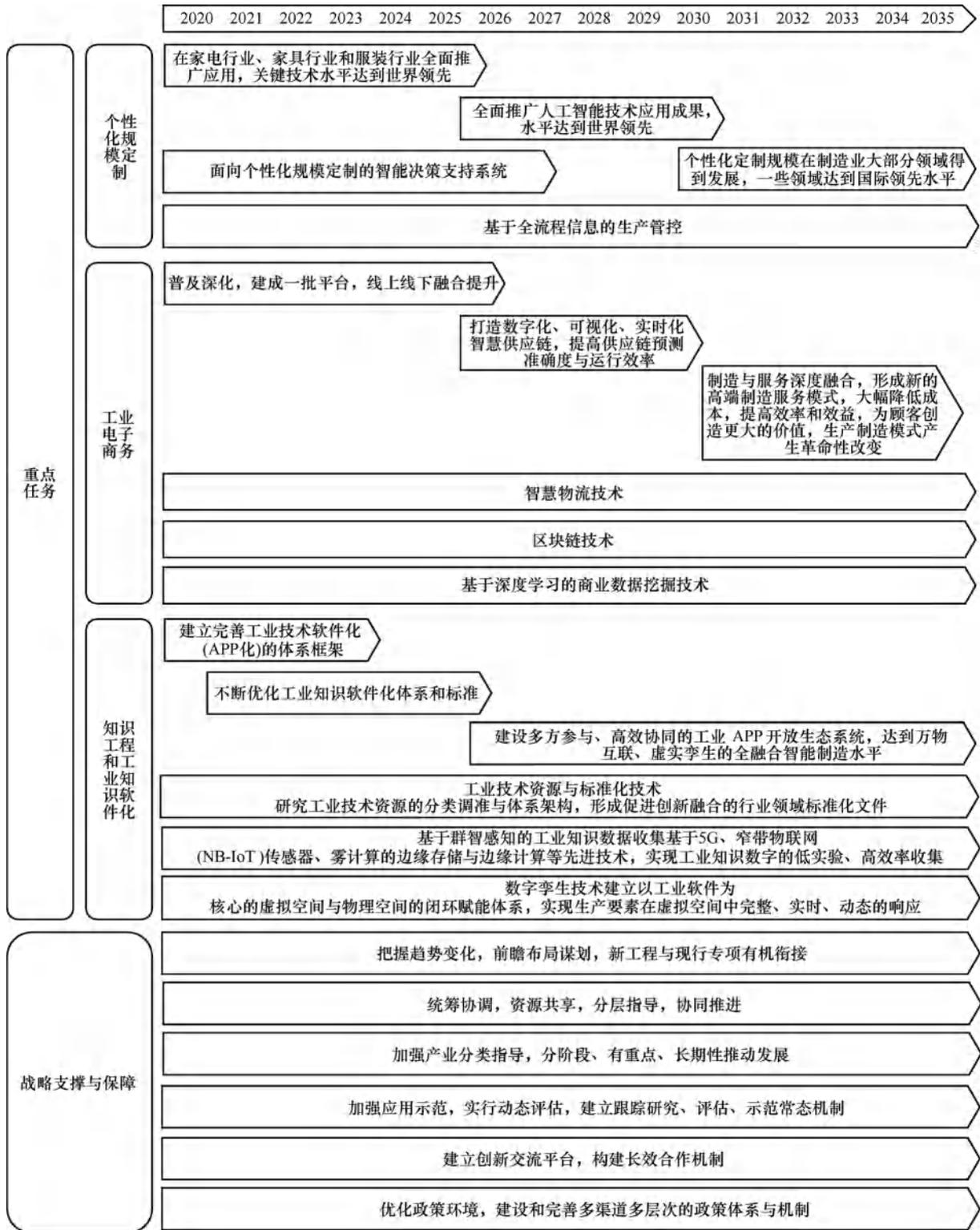


图 9 新模式新业态路线图

图 10 展示了面向 2035 年的智能制造云的技术预见及路线图, 到 2035 年, 需求主要来自于: 通过虚拟化、服务化、容器技术、云计算、大数据分析 & 挖掘技术等技术, 将海量多源异构数据

集成到云平台, 并基于云平台所提供的大数据引擎服务、人工智能引擎服务、仿真引擎服务等实现基于大数据的建模与优化, 进而支撑云端应用服务功能。

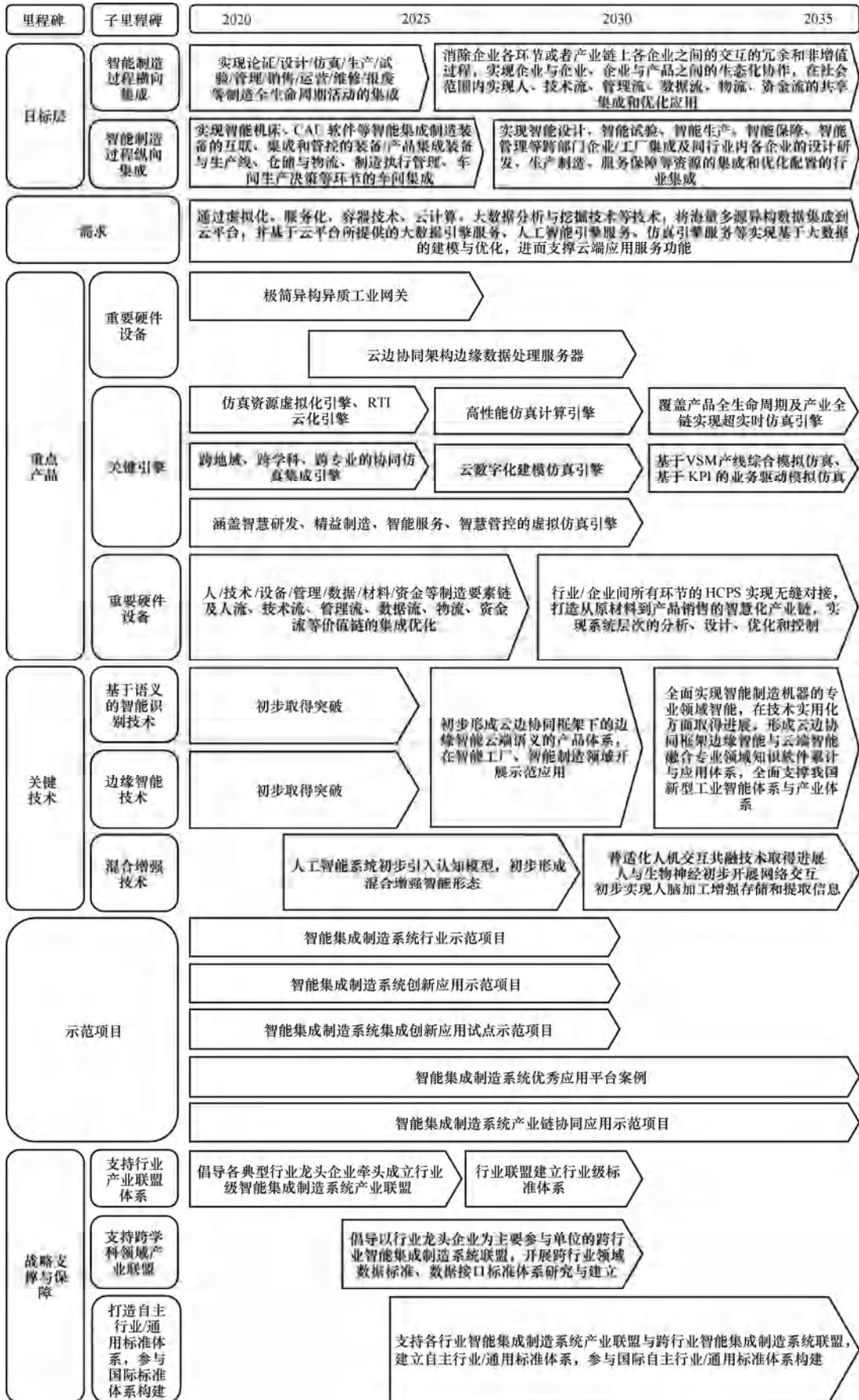


图 10 智能制造云技术路线图

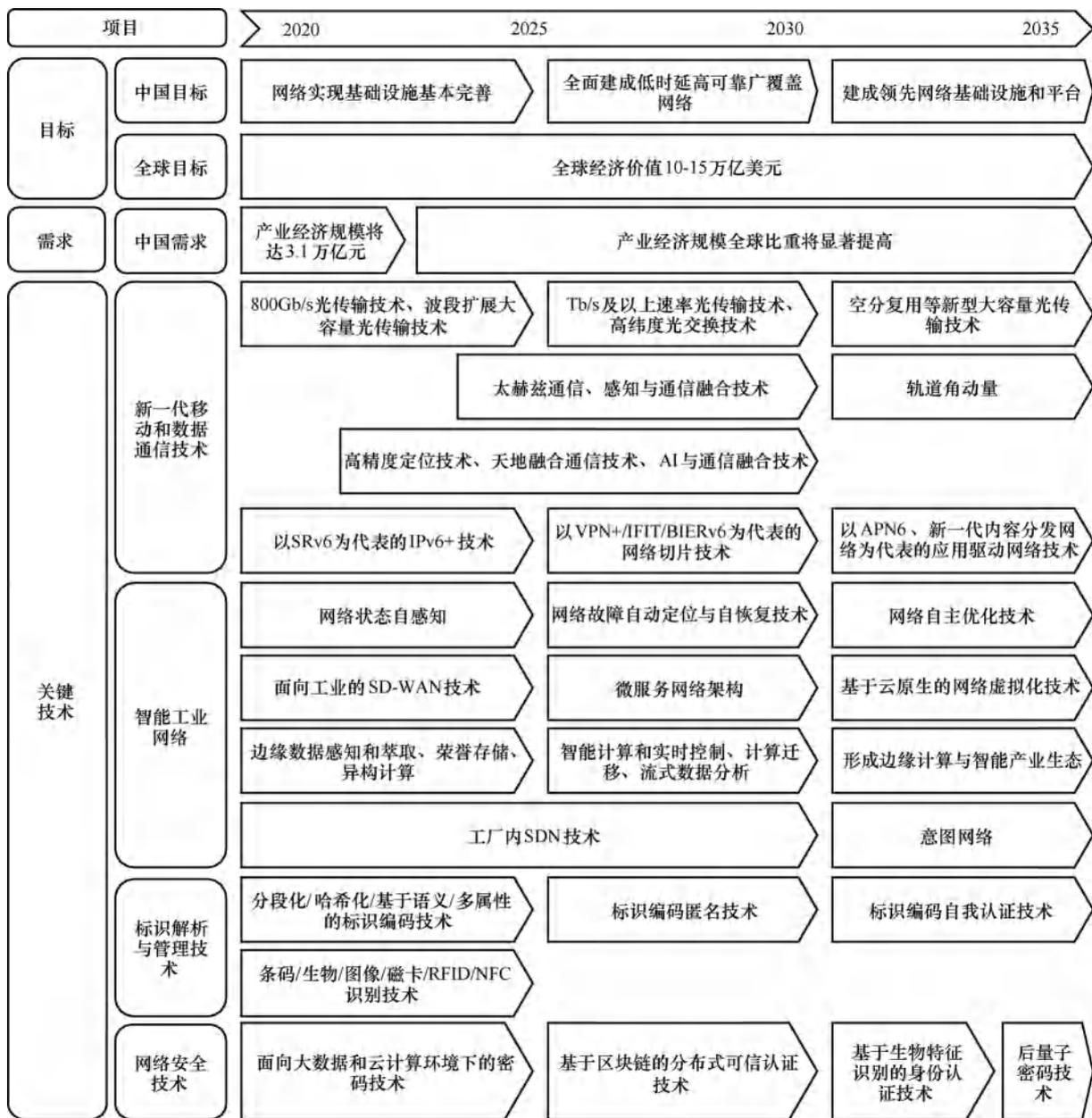
面向2035年，智能制造云的具体目标包括两个方面。

(1) 智能制造过程横向集成：到2025年，实现论证/设计/仿真/生产/试验/管理/销售/运营/维修/报废等制造全生命周期活动的集成；到2035年，消除企业各环节或者产业链上各企业之间的交互的冗余和非增值过程，实现企业与企业、企业与产品之间的生态化协作，在社会范围内实现人、技术流、管理流、数据流、物流、资金流的共享集成和优化应用。

(2) 智能制造过程纵向集成：到2025年左右，实现智能机床、CAE软件等智能集成制造装备的互

联、集成和管控的装备/产品集成装备与生产线、仓储与物流、制造执行管理、车间生产决策等环节的车间集成；到2035年左右，实现智能设计、智能试验、智能生产、智能保障、智能管理等跨部门企业/工厂集成及同行业内各企业的设计研发、生产制造、服务保障等资源的集成和优化配置的行业集成。

智能制造云的相关重点产品包括：重要硬件设备、关键引擎、HCPS集成系统。关键技术包括基于语义的智能识别技术、边缘智能技术、混合增强技术等。图10中展示了对应的重点产品和关键技术的实施路线图。同时，图10还包括了示范项目的实施路线图。



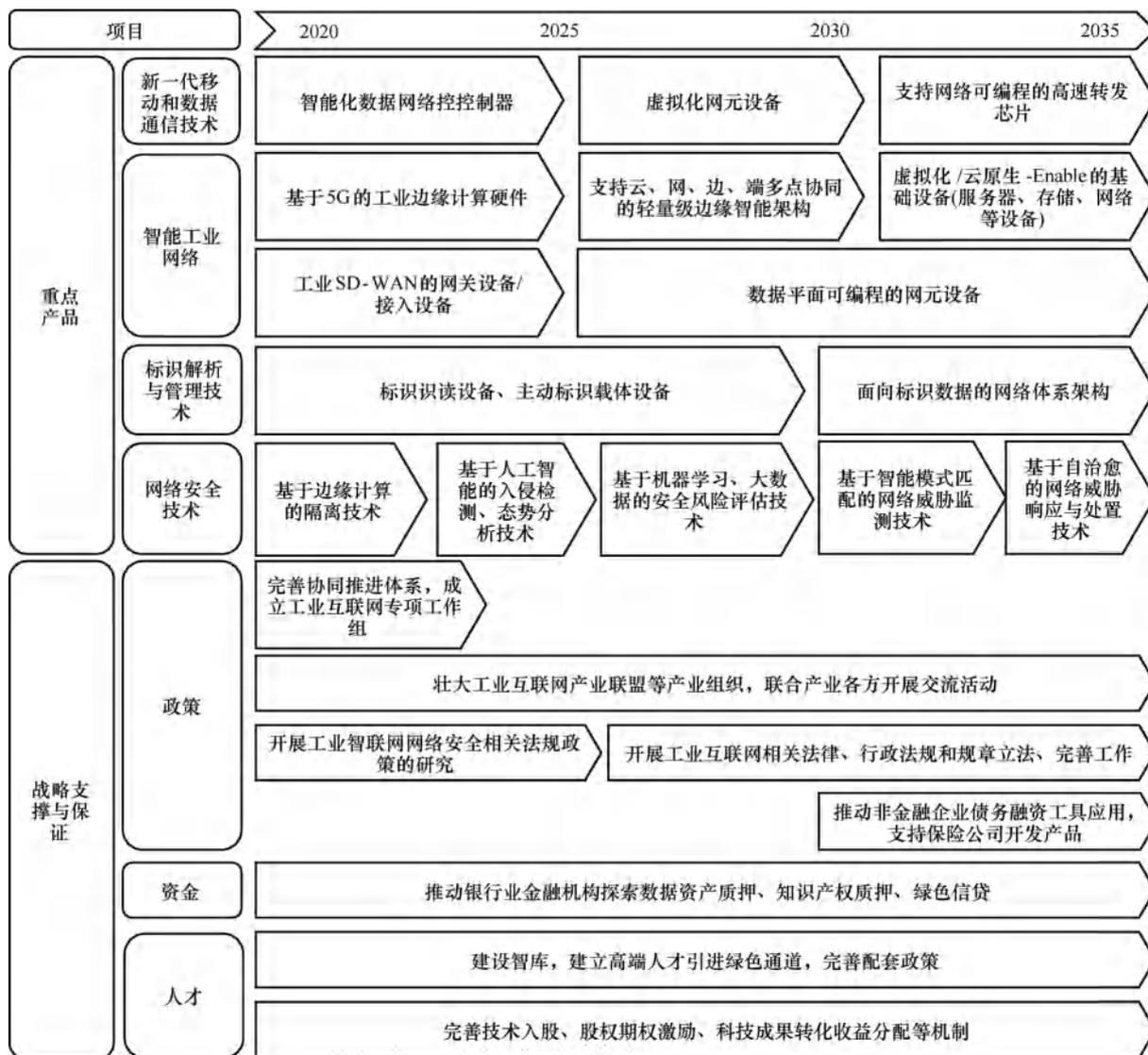


图 11 工业互联网技术路线图

智能制造云的战略支撑与保障如下所述。

(1) 支持行业产业联盟体系：到 2025 年，倡导各典型行业龙头企业牵头成立行业级智能集成制造系统产业联盟；到 2030 年，行业联盟建立行业级标准体系。

(2) 支持跨学科领域产业联盟：到 2030 年，倡导以行业龙头企业为主要参与单位的跨行业智能集成制造系统联盟，开展跨行业领域数据标准、数据接口标准体系研究与建立。

(3) 打造自主行业 / 通用标准体系，参与国际标准体系构建。到 2035 年，支持各行业智能集成制造系统产业联盟与跨行业智能集成制造系统联盟，建立自主行业 / 通用标准体系，参与国际自主行业 / 通用标准体系构建。

图 11 展示了面向 2035 年的工业互联网的技术预见及路线图，预计到 2022 年左右，工业互联网的产业经济规模将达 3.1 万亿元，到 2035 年左右，工

业互联网的产业经济规模全球比重将显著提高。

面向 2035 年，工业互联网的具体目标包括以下两方面内容。

(1) 中国目标：到 2025 年，网络实现基础设施基本完善；到 2030 年，全面建成低时延高可靠广覆盖网络，到 2035 年，建成领先网络基础设施和平台。

(2) 全球目标：到 2035 年左右，全球经济价值 10~15 万亿美元。

工业互联网的关键技术包括：新一代移动和数据通信技术、智能工业网络、标识解析与管理技术、网络安全技术等。重点产品包括新一代移动和数据通信技术、智能工业网络、标识解析与管理技术、基于自愈的网等。图 11 中展示了对应的关键技术和重点产品的重要时间点和实施路线图。

工业互联网的战略支撑与保障如下所述。

(1) 政策：完善协同推进体系，成立工业互联

网专项工作组；壮大工业互联网产业联盟等产业组织，联合产业各方开展交流活动；开展工业互联网网络安全相关法规政策的研究；开展工业互联网相关法律、行政法规和规章立法、完善工作；推动非金融企业债务融资工具应用，支持保险公司开发产品。

(2) 资金：推动银行业金融机构探索数据资产质押、知识产权质押、绿色信贷。

(3) 人才：建设智库，建立高端人才引进绿色通道，完善配套政策；完善技术入股、股权期权激励、科技成果转化收益分配等机制。

4 结论

智能制造技术预见和路线图是智能制造的发展蓝图，是关于智能制造发展的技术方向、关键技术和技术路线的共识性框架，可为智能制造技术有序发展提供参考，在支撑科学决策和明确发展路径中具有重要的应用价值，主要包括三个方面。

第一，助力制造业实现跨越式发展。目前信息技术开始大量涌入智能产品、智能生产、智能服务等各个领域，在这种情况下，提出适合我国国情的智能制造发展技术路线图、明确智能制造技术发展的方针和优先行动，对我国广大企业制定智能制造升级路径具有借鉴意义。

第二，为“十四五”制定智能制造规划提供了参考。本研究通过科学严谨的方法，提出了面向2035的智能制造发展的关键技术清单，具有科学性、前瞻性和战略性。研究对关键技术的技术内容作了清晰的描述，并且明确了发展方向，已作为制定“十四五”期间我国智能制造发展规划的参考依据之一。

第三，可为今后的技术开发指明发展方向。本研究所制定的路线图具有行动导向作用，可以使不同主体的科研和投资活动在一个系统框架下形成协调的、长期的、稳定的合作，减少技术发展的盲目性和重复性，进而提高科研工作有效性。

未来，中国工程院智能制造技术路线图项目组，将以本次智能制造技术路线图为基础，2年一个周期对智能制造技术路线图进行迭代更新；并深入智能制造的应用和支撑行业，推动制定我国细分领域的智能制造技术路线图，如智能机床技术路线图等，以期为我国智能制造发展提供理论建议，为我国制造强国建设提供战略支撑。

5 致谢

感谢周济、李伯虎、卢秉恒、谭建荣、柴天佑、邵新宇、余晓晖、屈贤明、董景辰、朱森第、蔡惟慈、张纲、黄群慧、吕薇、丁进良、惠明等各位院士、专家所作的贡献。感谢张应刚、刘强、梁吉祥、邢然、周洁、王磊、张俊、李潭、张丹威等各位同事所作的贡献。

参 考 文 献

- [1] PHAAL R, FARRUKH C J P, PROBERT D R. Technology roadmapping-A planning framework for evolution and revolution[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2004, 71(1-2): 5-26.
- [2] WILLYARD C H, MCCLEES C W. Motorola's technology roadmap process[J]. *Research Management*, 1987, 30(5): 13-19.
- [3] 李栋, 张志强, 安培浚. 技术路线图的发展与应用分析[J]. *图书与情报*, 2009(3): 14-19.
LI Li, ZHANG Zhiqiang, AN Peijun. The development and application of the technology roadmap[J]. *Library & Information*, 2009(3): 14-19.
- [4] 李万, 吴颖颖, 汤琦, 等. 日本战略性技术路线图的编制对我国的经验启示[J]. *创新科技*, 2013(1): 8-11.
LI Wan, WU Yingying, TANG Qi, et al. The enlightenment of Japanese strategic technology roadmap to China[J]. *Innovation Science and Technology*, 2013(1): 8-11.
- [5] 程家瑜. 关于编制国家技术路线图推进《规划纲要》实施的建议[J]. *中国科技论坛*, 2008(5): 3-6.
CHENG Jiayu. Suggestions on compiling a national technology roadmap to promote the implementation of the "Planning Outline"[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2008(5): 3-6.
- [6] 孙粒, 龚旭. 中国工程科技2035发展战略研究正式启动[J]. *中国科学基金*, 2015, 29(3): 235.
SUN Li, GONG Xu. China engineering technology 2035 development strategy research formally launched[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2015, 29(3): 235.
- [7] ZHOU J, LI P, ZHOU Y, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*. 2018, 4(1): 11-20.
- [8] ZHOU J, ZHOU Y, WANG B, et al. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 624-636.
- [9] WANG B, TAO F, FANG X, et al. Smart manufacturing

- and intelligent manufacturing: A comparative review[J]. *Engineering*, 2021, 7(6): 738-757.
- [10] ZHOU Y, ZANG J, MIAO Z, et al. Upgrading pathways of intelligent manufacturing in China: Transitioning across technological paradigms[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 691-601.
- [11] 王柏村, 黄思翰, 易兵, 等. 面向智能制造的人因工程研究与发展[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(16): 240-253.
WANG Baicun, HUANG Sihan, YI Bing, et al. State-of-art of human factors/ergonomics in intelligent manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(16): 240-253.
-
- 作者简介: 臧冀原, 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为制造强国、智能制造、产业基础等。
E-mail: zangjy@cae.cn
- 王柏村(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为智能制造、人-信息-物理系统、工业工程等。
E-mail: baicunw@zju.edu.cn
- 李培根, 男, 1948 年出生, 中国工程院院士, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械制造及其自动化、智能制造等。
E-mail: pgli@mail.hust.edu.cn