工业芯片面向多场景的发展路径研究

刘亚珍
（清华大学自动化系，北京 100084）

摘　要：立足集成电路产业技术前沿，系统剖析工业芯片的发展现状、共性特征、技术瓶颈、优化路径与应用前景。研究厘清了国内外产业发展格局，揭示了工业芯片跨行业应用的共性规律，即各工业领域芯片品类架构与可靠性技术要求呈现高度趋同特征。在此基础上，从可靠性基础理论、EDA 工具支撑、芯片设计、流片工艺、封装技术及检测标准体系等维度，归纳了当前产业发展面临的核心技术短板与体系缺陷，并提出针对性突破路径与优化策略。同时，结合电力能源、轨道交通与汽车电子三大典型应用场景，阐释了工业芯片的落地模式与应用价值，印证了其作为底层核心硬件的支撑作用。最后，研判了工业芯片的未来演进方向，指出其可依托硬件底座优势，成为新型电力系统建设的核心支点，支撑本地、远程与卫星一体化通信体系构建，并借助人工智能技术实现全链路智能化升级。本研究可为新型电力系统、轨道交通、汽车电子等领域的工业芯片技术迭代、场景落地与产业自主化发展提供理论参考与技术借鉴。

关键词：工业芯片；新型电力；通感算一体化；专用系统级芯片
中图分类号：TP393
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.2096−3750.WLW26116

Research on the development path of industrial chips for multi-scenario applications

Liu Yazhen
Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The state-of-the-art technologies of the integrated circuit industry were adopted as the research basis, and the development status, common characteristics, technical bottlenecks, optimization approaches and application prospects of industrial chips were systematically analyzed. The domestic and global industrial development patterns were clarified in this research. The general law governing the cross-industry application of industrial chips was revealed, highly consistent requirements for chip architecture and reliability technologies were observed across various industrial sectors. On this basis, core technical shortcomings and systematic defects restricting industrial development were summarized from multiple dimensions including fundamental reliability theories, EDA tool support, chip design, tape-out processes, packaging technologies and inspection standard systems, and targeted breakthrough routes and optimization strategies were put forward. Meanwhile, combined with three typical application scenarios of electric power and energy, rail transit and automotive electronics, the implementation modes and application values of industrial chips were illustrated, and their supporting role as underlying core hardware was verified. Finally, the future evolution trends of industrial chips were predicted. It was indicated that industrial chips could be developed into the core fulcrum for the construction of new-type power systems by virtue of the advantages of hardware infrastructure, support the establishment of an integrated communication system integrating local, remote and satellite communications, and realize full-link intelligent upgrading with the assistance of artificial intelligence technologies. Theoretical references and technical references were provided by this study for the technological iteration, scenario deployment and industrial independent development of industrial chips applied in fields such as new-type power systems, rail transit and automotive electronics.

收稿日期：2026−08−19；**修回日期：**2026−09−04

Key words: industrial chips, new power system, integrated communication-sensing-computing, application-specific system-on-chip (SoC)

0 引言

工业芯片通常用于工业生产与基础设施装备的可编程逻辑控制器（programmable logic controller，PLC）、分布式控制系统（distributed control system，DCS）、伺服、变频器、机器人、电力自动化、轨道交通、仪表、光伏/储能变流器等产品，它是二类可在宽温、强电磁干扰、长寿命与功能安全约束下工作的集成电路（integrated circuit，IC）与功率器件的总称[1]。

工业和信息化部运行监测协调局公布的统计数据显示，2026年上半年，中国规模以上电子信息制造业增加值同比增长14.8%，主要产品中，集成电路产量达2 798亿块，同比增长23.1%[2]。

1 工业芯片发展现状

1.1 国际发展现状

全球工业半导体市场整体保持稳健增长态势。根据Mordor Intelligence（魔多智能）工业半导体市场分析，2025年，工业半导体市场规模为985.5亿美元，预计到2030年将达到1372.6亿美元，行业年均复合增长率（compound annual growth rate，CAGR）维持在6%～9%。从市场竞争格局来看，全球高端工业半导体市场呈现高度集中的特征，英飞凌（Infineon）、德州仪器（TI）、亚德诺（ADI）、意法半导体（ST）、恩智浦（NXP）、瑞萨（Renesas）、安森美（onsemi）、微芯科技（Microchip）、超威半导体（AMD）等企业合计占据超过60%的高端市场份额，牢牢掌控全球工业半导体高端领域的技术迭代与市场供给主导权[3]。

美国在全球高端工业半导体领域具备显著的技术垄断优势，其中，德州仪器（TI）与亚德诺（ADI）是全球高性能模拟/信号链领域的双寡头，在精密数据转换器（ADC/DAC）等子赛道几乎垄断了精密模拟芯片与工业边缘感知芯片的核心市场；超威半导体（AMD）成为掌控工业现场可编程门阵列（field-programmable gate array，FPGA）的头部供应商。在政策层面，美国依托《芯片与科学法案》的补贴扶持机制，持续推动本土成熟制程产能扩容，加速工业级与车规级半导体技术、产能的协同布局。根据Gartner的预测数据，全球工业场景半导体营收将由2025年的640亿美元增至2029年的990亿美元，充分体现出工业半导体赛道长期扩容的发展趋势[4]。

欧洲工业半导体产业形成了产业链深度绑定的发展模式，德国英飞凌、法意合资的意法半导体（ST）、荷兰恩智浦（NXP）等区域核心企业，依托功率半导体、工业微控制单元（microcontroller unit，MCU）与功能安全技术的一体化产品体系，与西门子、施耐德、阿西布朗勃法瑞（ABB）等头部工业装备企业构建了稳定的配套合作生态。与此同时，《欧洲芯片法案》通过专项产业保障政策，重点稳固工业与汽车跨界应用领域的半导体本土产能供给，大力推进碳化硅（silicon carbide，SiC）、氮化镓（gallium nitride，GaN）等宽禁带功率半导体技术的产业化，助力区域工业半导体绿色化、高端化升级。

日本工业半导体产业秉持差异化高端可靠的发展定位，瑞萨、罗姆、三菱、东芝等本土骨干企业聚焦高可靠性、长寿命工业MCU与功率模块的研发制造，其产品已深度适配工业机器人、高端数控机床、轨道交通等高端装备核心场景。为持续巩固产业竞争优势，日本通过经济安全专项财政预算引导功率半导体产能回流至本土，进一步强化其在高可靠工业半导体细分领域的核心竞争力。

韩国正从法律制度、研发投入与产业集群3个维度构建系统性的产业支撑体系。2026年1月通过的《关于加强半导体产业竞争力和扶持力度的特别法》（简称《半导体特别法》）首次为产业扶持提供了法定框架。《半导体特别法》规定，每五年制定“半导体产业竞争力强化基本计划”，将分散的研发、供应链、人才政策纳入统一管理。根据《华尔街见闻》2026年8月10日相关报道，同年8月，韩国政府设立5万亿韩元半导体专项基金，重点投向材料、零部件及无晶圆厂设计等薄弱环节，配套等额贸易融资及为期十年、总额1万亿韩元的产业链协同项目，旨在打通大企业与中小供应商的协作通道。区域布局上，三星电子与SK海力士联合计划在湖南（Honam）地区投资800万亿韩元建设四座晶圆厂，计划于2030年前保障每天65万吨工业用

水，形成覆盖材料、制造、封装的区域集群产业网络。研发层面，2026—2030年韩国国家研发中期战略规划投入逾200万亿韩元，目标将半导体材料、零部件及设备的自给率由30%提升至50%，并推动下一代高带宽存储器（high bandwidth memory，HBM）、存内计算（processing-in-memory，PIM）及化合物半导体的技术攻关[5]。

从产业前沿技术演进趋势分析，当前全球工业半导体领域呈现多技术协同革新的发展特征，核心发展方向集中体现为：边缘人工智能（artificial intelligence，AI）技术赋能工业设备预测性维护、时间敏感网络与工业以太网实现技术融合迭代、碳化硅与氮化镓宽禁带器件在伺服系统与电能变流器领域规模化渗透、第5代精简指令集计算机（reduced instruction set computer-V，RISC-V）架构逐步实现工业控制场景的规模化应用，以及集成实时处理内核、FPGA、神经网络处理单元（neural-network processing unit，NPU）与安全隔离模块的Chiplet异构集成技术成为工业芯片架构创新的重要方向。

1.2 中国发展现状

在市场规模与国产化供给层面，中国工业级芯片市场呈现“规模体量庞大、自给能力不足、对外依赖突出”的典型特征。根据专业世界网《全球及中国工业芯片产业咨询报告》，2025年中国工业级芯片市场规模达267.8亿美元，占全球市场份额的34.1%，是全球工业芯片的核心消费市场。然而，中国在该领域的国产化自给率在18.3%左右，年度进口金额为200多亿美元，出口金额不到50亿美元，形成显著的贸易逆差，充分反映出中国工业芯片供需结构失衡的产业现状[6]。

为了提高供应链韧性，中国工业芯片行业呈现显著的结构性替代分化格局，国产化进度呈现明显的层级差异。其中，中低端工业MCU、电源管理IC、接口隔离芯片、中低压金属氧化物半导体场效应晶体管（metal-oxide-semiconductor field-effect transistor，MOSFET）等标准化、中低端器件的国产化替代进程提速、产业化落地成效显著。相较之下，中大型PLC控制核心、高端FPGA、高性能数字信号处理器（digital signal processor，DSP）、精密模拟前端、时间敏感网络（time-sensitive networking，TSN）以太网物理层（physical layer，PHY）芯片，以及车规与工规跨界高安全核心器件等高端核心产品，目前尚未实现规模化自主可控，市场供给仍高度依赖英飞凌、德州仪器、亚德诺、恩智浦、瑞萨等国际主流半导体企业，这是当前产业替代的核心短板领域[7]。

从产业主体格局来看，中国工业芯片产业链已形成设计、制造、封测、应用终端等全环节的本土企业布局体系，产业支撑主体日趋完善。在芯片设计领域，有兆易创新、先楫半导体、匠芯创、龙芯、飞腾等核心研发主体；在芯片制造领域，以圣邦股份、思瑞浦、纳芯微、荣湃半导体为核心产业化力量；在功率半导体领域，集聚了斯达半导、士兰微、比亚迪半导体、三安光电等骨干企业；在终端应用端，汇川技术、中控技术、和利时等工业整机企业创新采用“PLC/DCS设备+国产芯片”捆绑验证的落地模式，有效打通了国产工业芯片的场景适配与市场化导入通道，加速了芯片国产化落地进程[8]。

在政策支持层面，我国工业芯片产业发展已具备完善的政策与资本赋能体系。“十四五”智能制造产业规划、工业和信息化部工业芯片标准体系、国家集成电路产业投资基金二期等顶层设计与资本投入，有效助推了中国特色芯片工艺升级与RISC-V架构技术的产业化发展。

在产业瓶颈方面，产业高端化发展仍面临多重瓶颈，核心短板集中表现为：工业芯片功能安全认证样本存量不足，长期工况下的失效率实测数据积累欠缺。且电子设计自动化（electronic design automation，EDA）工具、核心IP、车规与工规交叉应用等关键产业生态有待进一步完善，成为制约中国高端工业芯片自主化、规范化、规模化发展的主要问题[9]。

工业级芯片国内外现状对比见表1。

1.3 工业芯片的共性

（1）各工业行业芯片种类相近

工业领域芯片需求呈现显著的同质化特征。在电力、轨道交通及汽车电子等典型应用场景中，所需芯片产品主要涵盖主控芯片、安全芯片、通信芯片、存储芯片、人工智能芯片、传感芯片、模拟芯片及射频识别（radio frequency identification，RFID）芯片八大类别。该分类体系基本能够覆盖工业领域对芯片功能的共性需求。

表1　工业级芯片国内外现状对比

对比维度	国内现状	国际现状
市场规模与格局	2025年中国工业级芯片市场规模约为267.8亿美元，占全球市场份额的34.1%；国产芯片自给率仅为18.3%～27.4%；进口额约为420亿～430亿美元，贸易逆差显著	2025年全球工业半导体市场规模786亿～1200亿美元（口径差异来自是否纳入功率/分立器件），CAGR 6%～9%；英飞凌、德州仪器、亚德诺等企业占据高端市场60%以上份额
核心技术与产品结构	中低端工控MCU、电源管理IC，接口/隔离，中低压MOSFET国产化进程较快；中大型PLC控制核、高端FPGA、高性能DSP、精密模拟前端、TSN以太网PHY、车规交叉高安全器件仍高度依赖进口	美国：德州仪器与亚德诺主导精密模拟与边缘感知，超威半导体（赛灵思）把持工业FPGA； 欧洲：英飞凌、法意合资的意法半导体、荷兰恩智浦以“功率+MCU+功能安全”为核心技术组合； 日本：瑞萨、罗姆、三菱、东芝走“高可靠长寿命MCU＋功率模块”路线； 韩国：覆盖材料、制造、封装的区域集群产业网络建设，提升半导体材料、零部件及设备的自给率
主要产业主体	设计端：兆易创新、先楫半导体、匠芯创、龙芯、飞腾等； 模拟端：圣邦股份、思瑞浦、纳芯微、荣湃半导体； 功率半导体：斯达半导、士兰微、比亚迪半导体、三安光电； 整机厂：汇川技术、中控技术、和利时等以“PLC/DCS＋国产芯”捆绑验证拉动导入	美国：德州仪器、亚德诺、超威半导体（赛灵思）； 欧洲：英飞凌(德国)、意法半导体(法国/意大利)、恩智浦(荷兰)，深度绑定西门子/施耐德/ABB； 日本：瑞萨、罗姆、三菱、东芝，深度嵌入机器人、高端数控机床、轨道交通领域； 韩国：三星电子、SK海力士
政策导向	“十四五”智能制造发展规划、工业和信息化部工业芯片标准体系建设、国家集成电路产业投资基金二期（大基金二期）重点推动特色工艺与RISC-V架构发展	美国：《芯片与科学法案》补贴推动本土成熟节点产能建设+工业/车规协同发展； 欧洲：《欧洲芯片法案》保障工业与汽车交叉产能，强推SiC/GaN与绿色制造； 日本：经济安全预算补贴功率半导体产能回流； 韩国：《半导体特别法》
技术发展趋势	RISC-V架构工控化应用加速，特色工艺路线持续推进；国产芯片与PLC/DCS等整机系统捆绑验证逐步深入	边缘AI下沉（预测性维护等场景）；TSN/工业以太网融合；SiC/GaN在伺服与变流器领域放量；RISC-V工控化趋势明显；Chiplet异构集成（实时核FPGA+NPU+安全岛）成为重要方向
产业生态与短板	功能安全认证样本不足；长期现场失效率数据积累欠缺；EDA工具、核心IP及车规工规交叉生态较为薄弱；高端产品对外依存度高	高端市场集中度高，头部企业主导技术标准与生态体系；美欧日均通过产业政策强化本土供应链安全与技术优势；国际巨头通过“芯片+系统+生态”深度绑定下游应用

（2）可靠性要求类似

上述芯片在广泛部署于各类地理区域时，需具备抵御高/低温、高湿、高海拔及低气压等复杂气候环境的能力，并需满足抗雷击、抗电磁干扰（涵盖高压设备及装置内部环境）以及使用寿命超过15年的严苛指标。鉴于此，工业芯片技术具有显著的跨行业通用属性，一旦在特定领域实现关键技术突破，即可通过标准化推广策略，有效辐射至各类工业细分行业。

工业芯片的共性特征进一步体现为可量化的技术等级与标准体系。在工作温度范围方面，工业级芯片通常需适应−40℃～85℃的工作环境，而汽车级和军用级则分别扩展至−40℃～125 ℃与−55 ℃～125 ℃。这一温度分级构成了芯片选型的基础门槛，直接决定了其在电力、轨道交通等严苛场景下的适用性。在电磁兼容性（electromagnetic compatibility，EMC）方面，工业芯片需遵循国际电工委员会（International Electrotechnical Commission，IEC）61000系列及国际无线电干扰特别委员会（International Special Committee on Radio Interference，CISPR）标准体系：辐射抗扰度须通过IEC 61000-4-3规定的20 V/m等级测试，传导抗扰度须满足IEC 61000-4-6的15 Vrms要求，静电放电（electrostatic discharge，ESD）防护则须达到人体模型±2 kV乃至±4 kV的工业级指标。中国电子学会（Chinese Institute of Electronics，CIE）发布的“工业级高可靠集成电路评价”系列标准（T/CIE 067～081-2020），覆盖交流/直流（alternating current/direct current，AC/DC）电路、MCU、传感器等16类产品维度，明确了工业芯片的稳定性、可

靠性与一致性评价规范。上述量化指标与标准体系共同表明，工业芯片的“共性”并非抽象概念，而是建立在统一的分级测试框架和可复用的技术规范之上，为跨行业推广提供了可验证的技术依据。

2　工业芯片面临的问题与应对措施

当前，中国工业芯片在可靠性设计方法上整体基础薄弱，主要表现为：可靠性基础理论及仿真手段不足、高可靠定制化工艺缺失、高可靠封装结构与材料体系不完善，以及动态检测平台与相关标准体系尚未建立。上述问题具体体现在可靠性基础理论与电子设计自动化（electronic design automation，EDA）工具、芯片设计技术、流片工艺、芯片封装技术、检测平台与标准体系5个方面，如图1所示。



图1　工业芯片面临的5个问题

（1）可靠性基础理论与EDA工具

国外已针对多物理场耦合环境下的芯片可靠性退化机理与模型开展系统研究。相比之下，中国现有研究多集中于单一温度场条件下的可靠性退化机制，传统模型难以覆盖工业现场中电磁–热等多物理场共存的复杂工况。为突破这一局限，亟须开展多物理场条件下芯片可靠性退化机理的修正研究，揭示电磁、热及应力等多场耦合作用下的可靠性演化规律。在此基础上，针对芯片内部各类器件，构建融合多物理场、材料属性、工艺参数及结构特征的高精度可靠性模型，从而为复杂工业环境下芯片性能与可靠性的仿真设计提供理论支撑。

（2）芯片设计技术

在芯片架构与可靠性设计方法上，国外普遍采用专用架构或可重构计算架构，并结合模块自诊断、运行监测等技术以提升可靠性；中国则仍以多核同构或多核异构通用架构为主，可靠性设计多依赖传统故障检测机制，动态运行监测能力明显不足。

一方面，在高可靠数字设计层面，工业芯片常工作于高温环境，同时受多业务并发驱动，呈现高集成度、多核并行与高频运行等特征，导致功耗显著上升，进而引发性能退化等热可靠性问题。此外，工业通信环境拓扑复杂、噪声多样，亦严重影响芯片通信稳定性。因此，亟须发展多层次协同可靠性设计技术，系统解决数字芯片在恶劣工况下的运行可靠性难题。

另一方面，在高可靠模拟设计层面，工业现场强电磁干扰对芯片构成致命威胁，加之极端温度、内部噪声与供电不稳定等长期作用，对模拟电路形成严峻挑战。因此，需要构建从算法、电路、版图到芯片级与系统级的多级协同可靠性设计体系，实现模拟芯片在宽温区、强电磁环境下的高耐压、高精度与长期稳定运行。

（3）流片工艺

国外工业芯片普遍采用面向高耐压、抗电磁、宽温区应用的长寿命、高可靠流片工艺，而我国现有工艺主要服务于消费类芯片，难以满足工业级应用对抗电磁干扰、宽温适应性与高精度性能的严格要求。因此，工业芯片必须依托定制化流片工艺，才能有效支撑其在复杂工业环境中的长期可靠运行。

（4）芯片封装技术

在封装材料与结构方面，国外广泛采用具备优异耐候性的封装材料，可抵御阳光辐射、温湿度变化等环境影响，并设计具有高屏蔽效能的抗电磁封装结构；中国通用封装材料耐候性较差，使用寿命通常仅为3～5年，尚缺乏适用于工业芯片的成熟封装方案。长期处于高温、高湿及强电磁干扰环境中时，通用封装材料易出现表面龟裂、老化与性能退化，进而导致芯片功能衰减，甚至失效。为此，亟须突破高耐候封装材料与环境干扰屏蔽封装结构关键技术，从根本上提升工业芯片的封装级可靠性。

（5）检测平台与标准体系

国外已建成可模拟多物理场环境及工业终端运行特征的动模应用测试平台，并形成覆盖芯片设计、制造与检测全流程的企业内部标准体系；中国目前尚缺乏此类动模测试平台，检测工作主要参照国际电工委员会（International Electrotechnical Commis-

sion，IEC）、联合电子器件工程委员会（Joint Electron Device Engineering Council，JEDEC，也称固态技术协会）等通用标准，且在模型构建、设计方法与制造工艺等关键环节缺乏针对性标准，几乎未覆盖典型工业应用场景。为此，亟须建立能够模拟多物理场环境与工业设备运行特征的动模检测平台，并配套建设野外试验场，以实现真实工况下芯片稳定性与一致性的系统验证。同时，应加快构建覆盖工业芯片设计、制造与检测全过程的体系化标准规范，破解检测平台与标准体系缺失所致的国产芯片“不敢用、不愿用”困局。

3　工业芯片典型应用场景

工业芯片的典型应用场景主要包括电力能源、轨道交通与汽车电子三大领域，各场景对芯片的功能需求与技术指标存在显著差异。

电力能源场景以继电保护装置、智能融合终端和分布式测控设备为代表，需要在高压、强电磁干扰及宽温环境下实现毫秒级故障响应。该场景的核心技术包括：（1）高实时性控制，如电力专用RISC-V芯片通过定制计算指令，将分支预测准确率优化至90%，计算性能较通用方案提升14倍；（2）高可靠隔离技术，毫米波隔离驱动芯片可实现20 kV隔离耐压与＞200 kV/μs的共模瞬态抗扰度，满足功率器件驱动对安全隔离的严苛要求；（3）硬件可重构能力，集成中央处理器（central processing unit，CPU）与FPGA的可重构系统级芯片（system-on-chip，SoC）可在数毫秒内完成数据采集、故障判断与保护动作，已通过海拔3 200 m高原变电站的实战验证。

轨道交通场景涵盖轨旁信号控制、车载处理与信号服务器等系统，对芯片的宽温工作范围与电磁兼容性要求极为严格。具体技术要求为：处理器须符合《轨道交通电磁兼容 第4部分 信号和电信设备的发射和抗干扰》（EN50121-4：2016），支持−40℃～85 ℃无风扇宽温设计，并集成错误校验码（error-correction code，ECC）内存纠错与看门狗功能，以保障系统长时间稳定运行。此外，标准化CompactPCI板卡架构与中国国产操作系统的深度适配，也是该场景下实现系统级可靠性的关键技术路径。

汽车电子场景涉及动力总成控制、安全气囊点火、域控制器及智能座舱等领域，其核心技术壁垒在于功能安全等级与高可靠通信。芯片设计须遵循《道路车辆 功能安全》（ISO 26262），支持汽车安全完整性等级（automotive safety integrity level，ASIL）B至D，并采用双核锁步等硬件冗余机制实现故障容错。在通信接口层面，车载芯片需要集成灵活数据速率控制器局域网（controller area network with flexible data-rate，CAN-FD）、千兆以太网等协议，支持高带宽数据传输与低延迟实时响应。当前，中国车规级MCU已在安全气囊控制器（airbag control unit，ACU）等单点实现累计超530万颗装车应用，标志着该场景下的国产芯片正从可靠性验证迈向规模化商用阶段。

4　工业芯片未来发展趋势

工业芯片未来发展主要包括三大趋势：一是工业芯片作为新型电力系统的核心支点；二是工业芯片支撑本地、远程与卫星通信体系；三是实现从芯片设计到系统运维的全链路渗透。工业芯片未来发展三大趋势如图2所示。

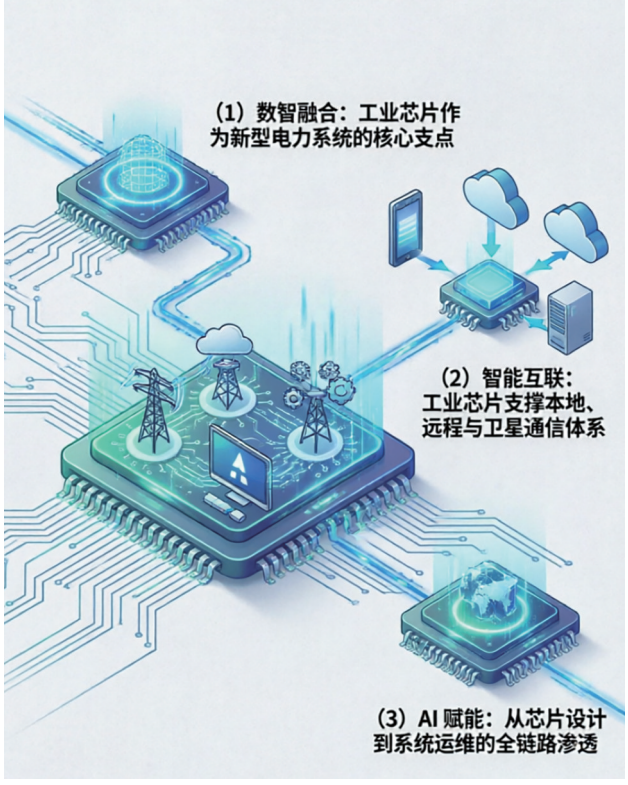

图2　工业芯片未来发展三大趋势

（1）数智融合：工业芯片作为新型电力系统的核心支点

功率半导体、嵌入式控制与多参量传感芯片的异构协同，将重构新型电力系统的底层硬件算力底座与全域感知范式。在能源体系向数智融合架构演进中，这三类核心工业芯片已构成保障系统高效运

转的硬件支点：功率半导体通过优化电能变换拓扑提升全域转换效率；嵌入式控制芯片承载全局调度与自主诊断算法；高精度传感芯片则完成海量设备状态数据的实时采集，为数字孪生模型提供底层数据源，共同搭建起智慧能源枢纽的算力与感知网络[10]。

具备边缘预处理能力的专用传感芯片，将作为“神经末梢”主导电力物理与数字网络的深度交互。尽管现有磁、温、光电等传感芯片谱系已初具规模，但通用商用芯片在复杂电力工况下仍面临功能单一、接口协议割裂、功耗偏高，以及微能量取能受限等瓶颈。因此，未来电力专用传感芯片的产业化迭代，必须将高可靠性、超低静态功耗、微型化集成，以及通信协议标准化确立为硬性技术指标，以适配多物理场耦合环境下的互联互通需求。

多模态数据融合架构与新型半导体材料的交叉突破，将驱动电力传感技术由单一物理量检测向全景智能解译跃迁。在硬件层面，系统级封装（system in package，SiP）工艺通过高密度集成不同功能的传感裸片与边缘微处理器，在物理底层消除了感知盲区与时序错位[11]；在材料层面，以石墨烯为代表的二维纳米材料与微型环境能量采集技术的融合，正从器件物理特性上推动微弱信号灵敏度与极端工况适应性的根本性突破，为无源自取能、多参量一体化传感终端的大规模部署提供了双重支撑[12]。

（2）智能互联：工业芯片支撑本地、远程与卫星通信体系

全IP化协议架构与多模态融合通信芯片将主导新型电力系统本地通信链路的下一代技术演进。作为支撑数字化感知与智能化调控的底层硬件载体，电力线载波、微功率无线与蓝牙通信芯片正呈现小型化、高度集成化与低功耗特征。面向源网荷储协同需求，具备全IP化协议的高速载波芯片、适配分布式节点的超低功耗自组网芯片、双模融合通信芯片，以及内置硬件级安全加密的高可靠蓝牙芯片，将成为本地通信链路规模化落地的核心方向。

通感算一体化原生架构的6G工业SoC，将重构电力远程通信与全域泛在感知的技术底座。当前，4G/5G蜂窝芯片、光纤芯片及LTE230芯片已筑牢远程交互根基。其中，经功能裁剪优化的轻量化5G芯片可覆盖常规业务，而增强型5G芯片则为安稳控制等强实时业务提供保障。面向未来，6G凭借亚毫秒级时延、太赫兹带宽与原生AI算力，推动电力通信进入新时期。定制化的6G工业SoC深度融合通信、毫米波感知与边缘算力卸载，不仅能解决无公网覆盖区域的通信盲区，还能实现设备非接触式感知与线路隐患探测，并通过分布式算力单元大幅削减云端传输压力。

6G与人工智能的深度耦合，将打破传统通信芯片的功能边界并重塑电力系统的分布式智能决策模式。搭载轻量化联邦学习与边缘推理模块的6G智能工业芯片，可利用超低时延通道完成异构终端数据的分布式模型训练，在保障数据隐私的前提下实现故障预判与链路干扰抑制。同时，基于空天地一体化非地面网络（non-terrestrial network，NTN）架构的AI算力协同调度机制，能够动态分配卫星端、边缘端与终端侧算力，为数字孪生电网仿真与新能源集群调控提供双重支撑，有效破解传统芯片算力不足的短板[13]。

软硬件深度协同的SoC架构与NTN协议体系的标准化，将全面驱动电力卫星通信技术迈向工程化与规模化商用。在硬件层面，SoC架构凭借性能与经济性的最优平衡，已全面替代FPGA成为商业航天与电力应急通信终端的主流选型。在协议层面，3GPP R17/R18标准确立了NTN技术规范，解决了跨星座兼容与无缝融合组网难题，使终端直连低轨卫星技术趋于成熟。3GPP R19针对6G NTN完成的再生载荷、星间链路与星上算力卸载等标准升级，进一步为下一代星地融合电力通信芯片定义了硬性技术指标，奠定了顶层规则基础[14]。

（3）AI赋能：从芯片设计到系统运维的全链路渗透

人工智能驱动的电子设计自动化与数字孪生闭环仿真，将重构电力芯片从设计优化到系统运维的全生命周期技术范式。在芯片研发阶段，依托强化学习与深度神经网络的智能算法可实现性能、功耗与面积（performance-power-area，PPA）的多目标协同优化，通过自动化迭代布局布线与时序收敛，将设计周期压缩约50%，有效解决超大规模集成电路的寻优效率瓶颈[15]。在系统运维阶段，数字孪生技术为电力空天地通信网络提供高精度虚拟映射，通过虚实交互的闭环迭代，显著提升极端故障场

景下的应急响应能力与硬件系统长期运行的可靠性[16]。

融合轻量化推理能力的异构 AI MCU，将确立新型电力系统源网荷储协同互动的底层算力架构。这类芯片通过硬件深度融合嵌入式控制与人工智能计算，精准匹配分布式协同调控与故障自主研判需求[17]。其中，端侧 AI MCU 具备模型量化压缩与数据就地预处理能力，可实现对异常量的实时甄别；边缘级 AI MCU 则突破传统架构的算力瓶颈，为电力物联网提供低时延、高可靠的分布式边缘算力支撑，确保业务处理的高效执行[18]。

集成微型机器学习内核的智能传感技术，将推动电力感知由被动数据采集向主动式边缘决策发生根本性范式跃迁[19]。通过将轻量化算法固化于传感芯片，设备可在毫秒级时延内完成波形特征提取与故障阈值自主决策[20]。这一路径不仅大幅削减了通信带宽占用并降低了数据隐私泄露风险[21]，更驱动产业商业模式由单一硬件销售向搭载边缘智能算法的高附加值解决方案转型，为电力装备产业链开辟了全新的价值增长路径。

5　结束语

本文立足集成电路产业技术前沿，围绕工业芯片领域的发展现状、共性特征、技术瓶颈、优化路径，以及应用前景展开系统性梳理与剖析。首先，厘清了工业芯片国内外产业发展格局，明确了工业芯片跨行业应用的共性规律，即各工业领域芯片品类架构与可靠性技术要求具备高度趋同性。在此基础上，从可靠性基础理论、EDA 工具支撑、芯片设计、流片工艺、封装技术及检测标准体系等多个维度，系统归纳了当前工业芯片产业发展面临的核心技术与体系短板，并针对性梳理了对应的突破路径与优化策略。同时，结合电力能源、轨道交通与汽车电子三大典型应用场景，阐释了工业芯片在这三类典型应用场景中的落地模式与应用价值，印证了工业芯片作为底层核心硬件的支撑作用。最后，结合数智化技术迭代趋势，总结了工业芯片的未来演进方向，明确其可依托硬件底座优势，成为新型电力系统建设的核心支点，支撑本地、远程与卫星一体化通信体系构建，并借助人工智能技术实现从芯片研发设计到系统运维管控的全链路智能化升级。

综上，本文研究成果可为新型电力系统、轨道交通、汽车电子领域工业芯片的技术迭代、场景落地与产业自主化发展提供一定的理论参考与技术借鉴。

参考文献：

[1] 赵东艳 . 工业芯片可靠性设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2023.
Zhao D Y. Reliability design of industrial chips[M].Xi’an: Xidian University Press, 2023.

[2] 运行监测协调局 . 2026 年 1—6 月电子信息制造业运行情况[EB]. 2026.
Operation Monitoring and Coordination Bureau. Operation status of electronic information manufacturing industry from January to June 2026[EB]. 2026.

[3] Mordor Intelligence. Industrial semiconductor market size, share & global forecast 2025-2030[R]. 2026.

[4] IIM. 工业级芯片市场深度调研报告（IIM 信息 2025 GFHRU5）[R]. 2025.
IIM. In depth research report on industrial chip market (IIM Information 2025 GFHRU5)[R]. 2025.

[5] 华尔街见闻 . 韩国宣布设立规模达 5 万亿韩元的新基金 重点投资半导体材料、零部件和设备领域[EB]. 2026.
Wall Street observations. South Korea announces the establishment of a new fund with a scale of KRW 5 trillion, focusing on investing in the fields of semiconductor materials, components, and equipment[EB]. 2026.

[6] IIM. 全球及中国工业级芯片行业发展研究报告（2025-2030 年版）[R]. 2025.
IIM. Research report on the development of global and Chinese industrial chip industry (2025-2030 Edition)[R]. 2025.

[7] IIM. 全球及中国工业芯片设备材料产业咨询报告（2026 IIML1R7）[R]. 2026.
IIM. Global and chinese industrial chip equipment materials industry consulting report（2026 IIML1R7）[R]. 2026.

[8] 朱晶 . 全球工业芯片产业现状及对我国工业芯片发展的建议[J]. 中国集成电路, 2021, 30(Z1): 15-19, 48.
Zhu J. The current status of the global industrial chip industry and suggestions for the development of China industrial chips[J]. China lntegrated Circuit, 2021, 30(Z1): 15-19, 48.

[9] Gartner. Semiconductor revenue by application forecast (2025-2029)[R]. 2025.

[10] IEEE Power&Energy. Digital twin for power equipment[R]. 2024.

[11] 辛艺扬 . 基于 SiP 技术的石墨烯压力传感微系统设计及仿真分析[D]. 太原：中北大学, 2025.
Xin Y Y. Design and simulation analysis of graphene pressure sensing microsystem based on SiP technology[D]. Taiyuan: North University of China, 2025.

[12] Zhang Z, Liu Q, Si F C, et al. Electromechanical pressure sensing of suspended graphene membranes with different atomic

layers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(44): 61123-61132.

[13] Sanjalawe Y, Al-E'Mari S,Fraihat S, et al. AI-powered smart grids in the 6G era: a comprehensive survey on security and intelligent energy systems[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2026, 6: 7677-7719.

[14] 3GPP. Non-terrestrial networks official specification overview (NTN)[EB]. 2024.

[15] Guven I, Parlak M, Lederer D, et al. AI-driven integrated circuit design: a survey of techniques, challenges, and opportunities[J]. IEEE Access, 2025, 13: 167364-167689.

[16] Mutar H A, ALRubeei I R N, Yahya O H, et al. Auto-PPA: an adaptive deep RL agent for VLSI physical design optimization [J]. Journal of VLSI Circuits and Systems, 2026, 8(1): 9-19.

[17] 包云岗. 关于人工智能对芯片设计领域技术发展的影响分析[J]. 微电子学与计算机, 2025, 42(10): 1-8.
Bao Y G. Analysis of the impact of artificial intelligence on technological development in the chip design field[J]. Microelectronics & Computer, 2025, 42(10): 1-8.

[18] Khute M, Biradar V. Integrating AI models into low-power microcontrollers for edge computing[J]. Journal of Computational Analysis and Applications, 2024, 33(5): 3703-3710.

[19] Cui H, Tang T, Liu H. A review of intelligent self-powered sensing systems enabling autonomous AIoT[J]. AI Sensors, 2026, 2(1): 1.

[20] 张成国, 徐荣鹏, 王超, 等. 风力发电机中变频器的毫秒级故障告警系统研究与应用[J]. 电力设备管理, 2025(12): 141-143.
Zhang C G, Xu R P, Wang C, et al. Research and application of millisecond-level fault alarm system for frequency converter in wind turbine generator[J]. Electric Power Equipment Management, 2025(12): 141-143.

[21] 余涛,梁敏航,罗庆全,等. 新型电力系统专用传感与边缘智能关键技术及其展望[J]. 高电压技术,2024,50(8):3324-3338. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240676.
Yu T, Liang M H, Luo Q Q, et al. Key technologies and prospects of dedicated sensing and edge intelligence for new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3324-3338. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240676.

[作者简介]



刘亚珍(1987–),女,清华大学自动化系硕士生,主要研究方向为集成电路先进技术、人工智能、大数据、大模型、云计算、区块链、5G应用、6G发展以及标准等通信行业的前沿科技、最新研究成果与产业成果分析。