

引用格式: 刘震, 程玉华, 陈凯, 等. 面向装备的智能测试技术内涵、发展与未来思考 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(5): 765-776.

Liu Zhen, Cheng Yuhua, Chen Kai, et al. Intelligent testing technology for equipment: Concepts, advances, and future perspectives[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(5): 765-776. (in Chinese)



面向装备的智能测试技术内涵、发展与未来思考

刘 震*, 程玉华, 陈 凯, 黄建国, 王厚军, 黄武煌, 汪静元

(电子科技大学自动化工程学院, 成都 611731)

摘要: 随着高端装备复杂度和技术密度的不断提升, 传统规则驱动的固化测试模式已难以适配现代装备高精度、全维度的测试需求, 人工智能与测试技术的深度融合, 使得装备测试领域迎来系统性变革。该文以装备智能测试技术的理论体系与技术演进为主线, 在系统调研国内外标准、政策文件及代表性研究的基础上, 对智能测试的内涵边界与适用范围进行了探讨和界定, 进而总结提炼出面向装备智能测试的 4 个“自主”核心特征, 并围绕装备测试从设计、感知、采集到分析的全流程技术链路, 对智能测试性设计、智能信息感知、智能信号捕获、状态智能分析四大关键环节的智能化技术及其发展进行剖析。最后, 提出探索前沿测试机理、拓展全域测试场景、发展轻量化测试技术、构建统一测试体系和发展跨装备通用认知能力 5 个未来研究方向, 明确了该领域从技术探索向系统化学科方向演进的关键路径, 为智能测试技术的未来发展和深入研究提供参考与借鉴。

关键词: 智能测试; 智能测试性设计; 智能感知; 智能信号捕获; 智能数据分析

中图分类号: TP274

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2026139

Intelligent testing technology for equipment: Concepts, advances, and future perspectives

LIU Zhen*, CHENG Yuhua, CHEN Kai, HUANG Jianguo, WANG Houjun,
HUANG Wuhuang, and WANG Jingyuan

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: With the continuous increase in the complexity and technological sophistication of advanced equipment, conventional rule-based and predefined testing paradigms have become increasingly inadequate for meeting the high-precision and multidimensional testing requirements of modern equipment. The deep integration of artificial intelligence with testing technologies is driving a systemic transformation in the field of equipment testing. Focusing on the theoretical framework and technological evolution of intelligent equipment testing, this paper systematically reviews relevant domestic and international standards, policy documents, and representative studies. On this basis, the conceptual boundaries and scope of application of intelligent testing are examined and defined, and four core autonomous characteristics in intelligent equipment testing are identified. Covering the entire equipment-testing workflow from design, sensing, and signal acquisition to analysis, this paper further examines the intelligent technologies and recent advances in four key areas: intelligent testability design, intelligent sensing, intelligent signal acquisition, and intelligent data analysis. Finally, five future research directions are proposed: exploring advanced testing mechanisms, expanding full-domain testing scenarios, developing lightweight testing technologies, establishing a unified testing framework, and enhancing generalizable cognitive capabilities across different types of equipment. These directions outline a critical pathway for the evolution of intelligent testing from technological exploration toward a coherent academic discipline and provide guidance for its future development and further research.

Key words: intelligent testing; intelligent testability design; intelligent sensing; intelligent signal acquisition; intelligent data analysis

收稿日期: 2026-08-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U2330206)

作者简介: 刘震, 博士, 教授, 主要从事装备可测性分析与设计、装备综合测试与故障诊断技术、瞬态信号检测及传感技术等方面的研究。

*通信作者 E-mail: scdlu@uestc.edu.cn

测试技术贯穿装备研制、生产和使用保障的全寿命周期,是装备性能验证、质量管控、健康管理与可靠性保障的关键基石,其发展水平对装备制造、电子信息产业竞争力和国家安全至关重要。

“十二五”以来,国家持续部署科学仪器、计量测试、试验验证和质量基础能力建设,有力推动了我国先进测试技术的体系化发展^[1]。与此同时,新一代人工智能的快速兴起,为测试技术变革提供了新的技术条件。2018年10月,习近平总书记在中共中央政治局第九次集体学习时强调,人工智能是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量,加快发展新一代人工智能是事关我国能否抓住新一轮科技革命和产业变革机遇的战略问题^[2]。在此背景下,人工智能与测试技术的深度融合,为复杂装备系统测试能力提升开辟了新的路径^[3]。

近年来,我国测试技术领域的相关政策,正由基础能力建设向智能化体系布局延伸。《计量发展规划(2021—2035年)》提出加强人工智能计量、智能计量仪器仪表及测量技术研究,推动计量测试向数字化、网络化和智能化方向发展^[4]。2022年发布的《军队装备试验鉴定规定》立足装备信息化智能化发展趋势,改进试验鉴定工作模式,推动试验鉴定制度向紧贴实战、策略灵活、敏捷高效的方向完善^[4]。2024年发布的《国家人工智能产业综合标准化体系建设指南(2024版)》从算力、算法、数据、模型和行业应用等方面推进人工智能与实体经济深度融合,为智能测试技术发展提供了重要支撑^[5]。

国外相关战略同样注重数字技术与测试过程的融合。2022年,美国国家科学技术委员会发布《先进制造业国家战略》,提出发展智能制造,推动先进感知、控制、机器学习和数字孪生等技术的融合应用^[6]。同年,欧盟依托“地平线欧洲”实施欧洲计量伙伴计划,将数字化转型列为重点方向,推动智能传感网络、测量数据质量、人工智能、数字孪生和虚拟计量等技术发展^[7]。2023年,美国国防部作战试验与鉴定局将近实时数据分析、测试数据共享、数字模型和动态测试能力纳入试验鉴定体系建设^[8]。

国内外政策动向表明,装备测试技术正加速向体系化、数字化与智能化方向演进。其中,智能化作为最具变革性的核心方向,当前研究仍处于探索初期。一方面,学术界与工业界对“智能测试”这一前沿交叉领域,尚未形成统一严格的界定,其概念内涵与核心特征有待深入厘清;另一方面,现有

成果大多聚焦于特定技术环节的局部突破,如智能感知算法、自适应采集架构及数据驱动诊断方法等,而贯穿装备全寿命周期的测试理论体系与系统性技术分类框架尚未建立,研究整体呈现出“技术先行、体系滞后”的分散发展态势。

针对上述发展需求,本文致力于对智能测试技术进行系统梳理:首先尝试界定智能测试的基本内涵,并提炼其与传统自动测试的区别特征;继而综述装备寿命周期各个关键测试环节的智能化研究进程;最后,基于当前发展面临的瓶颈,凝练未来亟需重点攻关的方向。希望借此工作,为尚在形成中的智能测试技术体系提供一个阶段性的总结与框架性参照,助力该领域从分散的技术探索逐步向系统化的学科方向演进。

1 智能测试技术的内涵

智能测试技术是在传统测试技术的基础上,融合机器学习与数据智能分析方法形成的新一代通用测试技术,其核心是降低对预设测试流程、固定测试参数与静态判定规则的依赖,能够根据被测信号的实时状态自适应完成信号精准捕获、测试参数动态调节、测试流程动态重构与测试结果智能研判,可依据历史测试数据自主学习并持续积累经验、迭代优化模型,实现测试能力自主进化的先进技术。

国际电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)发布的IEEE Std 1641-2022《信号与测试定义标准》中给出的“测试”定义^[9],是一组用于评测被测单元性能参数与特性而执行的系列操作,是为获取被测对象状态信息实施的可观测试的激励—响应过程,是由标准激励、观测响应与判定准则共同构成的完整集合。“自动测试系统”则是一套包含由计算机控制,集成激励、测量与开关组件的自动测试设备(automatic test equipment, ATE)以及全部配套支撑设备、支撑软件、测试程序和接口适配器的系统。

上述定义表明,传统的自动测试技术是以计算机测量为特征,依托预设程序、固定规则完成仪器程控、数据采集,属于规则驱动的自动化测试,无自主感知、推理、决策能力,仅实现“固定流程,仪器执行”,只能按照一定的规则“自动”执行特定的测试任务^[9-11]。而现代智能测试则以“机器思维”为主要特征,融合自主感知、深度学习、自主推理,具备信号特征自主辨识、故障自主定位、测试方案自适应生成的能力,拥有类机器思维,属于

认知驱动的自主测试,可动态适配多种复杂场景的测量需求,与传统自动测试的本质区别在于能够自主学习和持续进化。

从实现层次来看,当前智能测试技术整体仍属于弱人工智能范畴^[12-13],其智能活动主要限定于装备测试这一特定领域,尚不具备跨领域的通用认知能力。在该领域内,由于装备对象明确、信号可测、故障模式具备可枚举性,绝大多数测试问题可在该框架内较为稳定地求解。

相较于传统自动测试,智能测试的优势突出体现在以下4个方面:1)测试效率更高,系统可自主调整测试策略,避免冗余测试,缩短诊断时间;2)测试准确性更优,系统能够综合多维度信息进行状态研判,降低虚警与漏检;3)诊断覆盖更广,系统具备发现未知异常的能力,弥补预设故障库的局限;4)知识积累更持续,系统可在运行中不断迭代更新,避免“一次定型、终身不变”。当前,智能测试已不是简单的流程自动化,而是使测试系统在特定领域内具备自主感知、动态调整、综合研判与持续学习的综合能力,为解决复杂装备长期存在的“测不全、测不准、测不快”等难题,提供了切实可行的技术路径。

2 智能测试技术的主要特征

本文围绕智能测试、自适应测试、测试性设计、智能感知、自适应采集、故障诊断等方向,重点调研了近十年间的国内外标准、政策文件及代表性研究。调研表明,测试技术正从“固定规则”驱动的传统自动测试向“认知决策”驱动的智能化测试方式转变,其最核心、最本质的特征是测量仪器具备“自主测试能力”。从现有研究成果来看,这种智能化特征集中体现为4个维度——自主感知、自主调整、自主分析与自主学习。

1) 自主感知——主动发现测试对象中的有效信息。传统系统通常按照预设测点、通道和信号处理方式接收数据,感知内容与感知方式在测试开始前已经基本确定。自主感知侧重于目标决策层面,解决“感知什么、为什么感知”的问题。系统可以依据对象结构、历史结果和预期信息增益选择测试项目、测点、传感通道与激励条件,并判断采集数据是否受到噪声、漂移、失步或环境干扰影响。系统可自适应切换时域、频域、时频域、小波域、调制域、阶次域等分析维度;针对高速数字、射频通信类传感信号,还可选用眼图、星座图等专用表征

形式,直观区分传感器噪声、通道失真等干扰,使微弱异常特征更容易显现。

2) 自主调整——动态配置测试过程中的软硬件测试资源。传统自动测试虽然能够按程序切换仪器和执行分支任务,但切换条件与资源组合通常仍由人工预先规定。自主调整侧重于资源执行层面,解决“怎么调、调到什么程度”的问题。系统可以根据对象状态、信号变化、数据质量和任务约束,实时调整和改变通道、量程、带宽、采样率、触发方式、记录长度、计算资源以及测试项目的串并行关系。这种调整不是对任意参数的无约束改变,而是在接口能力、测量精度、时间代价、能耗和物理安全边界内寻找更合适的配置。它既需要资源调度和策略生成算法,也需要可重构硬件、可切换适配器、统一资源描述和低时延控制链路把调整方案落实为实际测试操作。

3) 自主分析——将测试信号转化为可用于判断的信息。传统测试主要依据固定阈值、专家规则和既定故障模式分析测试数据,其判断范围受到预设知识和故障集合的限制。自主分析侧重于信息认知层面,解决“状态是什么、为什么是该状态”的问题。系统从多源测试信号中提取状态特征,完成异常检测、故障定位、健康评估和趋势预测,并给出结论的不确定性和适用范围。与按照阈值和故障表查找既有答案相比,模型驱动和数据驱动方法能够利用已经掌握的结构关系、正常行为和退化规律,对未被训练样本完整覆盖的工况及故障进行推断。分析结果还应当指导后续测试,如触发补充测量、改变采样参数或缩小重点检查范围,而不是停留在一次性分类结果。

4) 自主学习——从测试结果中持续完善模型与测试方法。传统系统在一次测试结束后,新增经验通常依靠人员整理并重新编写规则。自主学习侧重于知识演进层面,解决“学到了什么、下次怎么测更好”的问题。系统将测试过程中得到的新数据和结果用于更新对象模型、故障知识、数据质量模型和测试策略。学习既可以发生在运行过程中,也可以在任务结束后进行,前者用于修正对象状态和短期参数,后者用于总结跨任务规律、使模型适用于更多状态并改进下一次测试。这种能力尤其依赖充足且具有明确物理含义的数据,以及能够使模型不偏离物理规律的结构关系和机理知识。自主学习并不意味着模型可以不受控制地在线改变,模型更新仍需记录数据来源、版本变化、有效范围和性能

退化情况, 并经验证后投入工程使用。

上述四大特点同时贯穿面向装备的智能测试技术四大核心环节, 即测试性设计、信息感知、数据捕获和状态分析, 4 个环节分别解决装备“可

测”、信息“可感”、数据“精测”和状态“准估”的问题。自主感知、自主调整、自主分析和自主学习贯穿这些环节并分层赋能各环节。整个技术体系特点如图 1 所示。

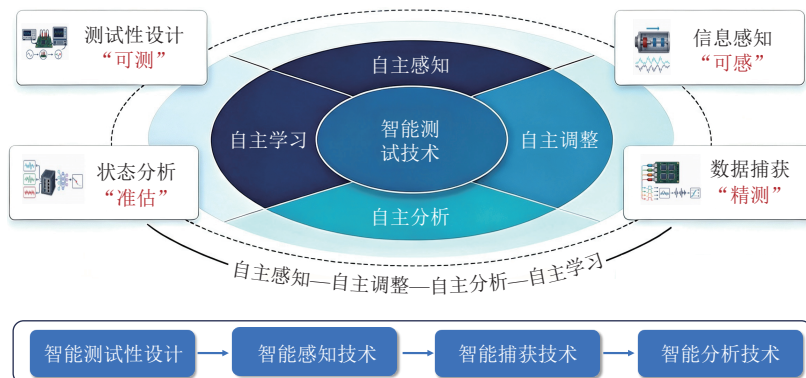


图 1 智能测试技术体系特点

3 智能测试技术的发展现状

3.1 智能测试性设计技术

测试性是产品能够及时、准确地确定其状态并隔离内部故障的一种设计特性^[14]。作为装备通用质量特性“六性”之一, 测试性决定系统状态可观测性与故障可诊断性, 是保障系统安全可靠运行的重要基础。当前装备测试性设计正经历发展转型, 整体由以“研制设计阶段+实物试验验证”为主, 向数字化虚拟建模、仿真迭代优化的全周期智能化虚拟设计模式转变。依托数字样机、数字孪生等智能

数字化载体, 测试性分析工作不再局限于物理样机成型之后, 在方案论证阶段即可完成故障关联建模、测点布局规划、测试方案仿真验证, 利用智能化手段真正实现测试性设计与装备自主研发流程深度并行融合。

近年来, 面向复杂装备的智能测试性设计围绕模型前置化、仿真虚拟化、算法智能化、架构动态化持续推进, 现有研究成果可以归纳为智能建模、智能优化、智能验证、智能重构四大技术方向。其技术体系如图 2 所示。

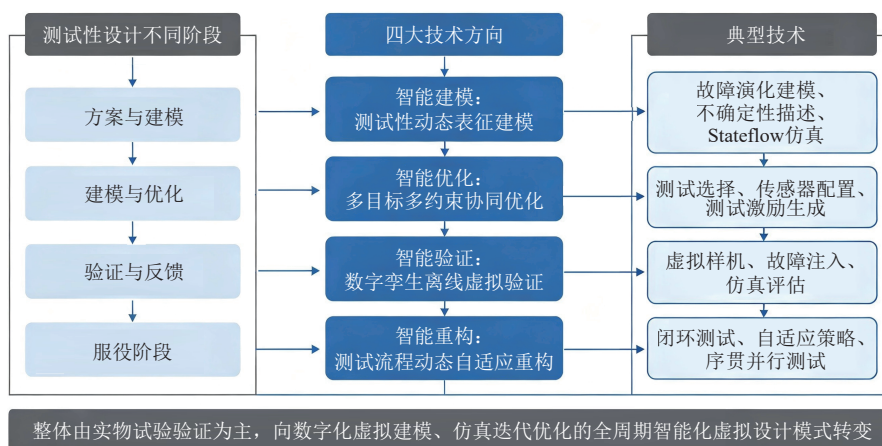


图 2 智能测试性技术体系

1) 智能建模——考虑状态演化的测试性动态表征建模技术。传统模型主要描述故障与测试在系统出厂阶段的对应关系, 难以表征产品在全生命周期不同运行阶段的动态演变。为此, 文献^[15]提出基于

故障演化机理的测试性模型, 将故障模式、演化过程、故障征兆和测试响应相联系。文献^[16]提出量化不确定性分层模型, 以概率、模糊性和不确定性描述故障、测试及传播关系。文献^[17]提出分层混

合测试性模型,融合系统结构信息与贝叶斯推理。文献[18]提出基于Stateflow的机内测试(built-in-test, BIT)仿真模型,将故障注入、状态迁移、BIT动作和虚警过程纳入动态仿真。文献[19]提出考虑故障-测试支撑关系的测试性模型,描述测试信息传输、测试失效以及故障与测试之间的使能和阻断关系。上述方法将建模对象从静态系统拓展至考虑故障演化 and 运行过程的动态系统,增强了对复杂系统运行的描述能力。

2) 智能优化——多目标、多约束协同智能优化技术。传统方案多围绕检测率、隔离率或测试成本等单项指标展开,难以兼顾复杂任务中的多项性能要求与多重约束。为此,文献[20]提出面向多工作模式的分组遗传测试选择方法,实现不同运行状态下测试项目的联合优化。文献[21]将模型不确定性、测量噪声、诊断性能和配置成本纳入传感器选择,在保证故障检测与隔离能力的同时降低资源代价。文献[22]融合支持向量机、聚类搜索和蒙特卡罗仿真,同时降低测试策略的生成时间和执行代价。文献[23]提出基于主动深度学习的测试激励设计方法,以减小激励代价为目标,将故障可分性和系统状态安全性作为约束,实现了不确定条件下测试激励生成。上述方法综合考虑诊断性能、资源成本、计算效率和激励安全,使测试方案能够在多目标、多约束条件下自动权衡与生成,提升了测试方案对复杂任务的适配能力。

3) 智能验证——基于数字孪生的离线测试性虚拟验证技术。数字孪生样机作为装备设计阶段的离线虚拟载体,成为智能测试性方案验证的重要工具,该方式依托虚拟仿真完成测试性方案迭代,无需依赖实物样机。文献[24]基于智能体虚拟样机搭建雷达装备测试性虚拟验证平台,可动态复现故障传播路径,完成测试性方案有效性评估;文献[25]构建虚拟化故障注入框架,能够在数字样机环境下持续注入永久故障和瞬态故障,为安全关键装备的测试性评估提供支撑;文献[26]利用仿真技术建立装备的数字孪生模型,在数字化模型上开展测试性验证试验;文献[27]利用虚拟现实技术将五性分析数据转化为可视化三维影像,初步构建五性一体化虚拟设计系统;文献[28]将虚拟配件与实际装备相匹配,增强测试性验证试验的可视性、可达性和可操作性,提高验证试验的效率和正确性。

4) 智能重构——测试策略流程动态自适应重

构技术。传统流程通常事先确定,难以适应实际运行中繁杂的工况变化。文献[29]提出闭环输入设计方法,根据已有测量结果生成后续测试激励,加快不确定条件下的故障辨识。文献[30]将安全关键系统的测试调度建模为马尔可夫决策过程,根据测试结果动态调整测试强度和资源分配。文献[31]提出多状态系统自适应测试策略,根据当前测试揭示的退化状态调整后继续测试时机,在保持系统性能的同时减少测试次数。文献[32]提出资源约束下的分批序贯测试方法,将可并行项目组合为测试批次,兼顾测试成本、执行次序和资源容量。文献[33]提出了一种新的序贯——并行测试模式,使系统可以基于前序测试的分析结果,自动重组后续测试项目。上述方法使测试项目、执行时机、测试激励和资源配置能够依据实时结果自主调整,打破了传统流程固定不变的运行模式。

3.2 智能感知技术

智能感知是装备测试链路的前端核心基础,承担被测对象状态信息获取、信号转换与特征提取的核心功能。依据被测信号属性与频段特征,装备智能感知技术可分为“非电参量感知”与“电参量感知”两大类,其中后者又可进一步划分为低频感知与射频微波感知。“非电参量感知”以低频感知为主,针对温度、压力、振动、形变等非电物理量实现稳态与缓变状态监测;“电参量感知”中的低频感知面向常规电参量信号采集(如工频电压、电流信号);射频微波感知依托各类高频电磁感知探头,如线圈类电磁探头、天线类电磁探头、光纤类电磁探头等专用探头,完成电力瞬态高频脉冲、空中电磁频谱、高速光信号等高频瞬态信息的感知,覆盖装备全维度状态感知需求。随着复杂装备测试场景日趋复杂、测试任务动态多变,传统固定模式、单一功能、单维尺度的感知方式难以适配智能化测试需求,当前感知技术正朝着自适应感知、智能节点感知(感知处理一体化)、多模态融合感知三大核心方向迭代升级。其核心构成如图3所示。

1) 自适应感知——传感方式正由固定感知向按需感知发展。传统传感单元通常按照预设方式持续工作,难以根据测试任务和对象状态调整感知范围,易产生无效感知与资源浪费。文献[34]将传感器调度建模为部分可观测马尔可夫决策过程,根据目标状态选择不同时刻需开启的传感器,兼顾跟踪精度与能量消耗。文献[35]提出时间、能量和通信约束下的传感器调度方法,在保证估计精度的

同时优化传感器启停次序。文献 [36] 以 Fisher 信息为依据确定扫描传感器的激活时序, 增加了参数辨识所获取的有效信息量。文献 [37] 提出一种认知雷达波形选择方法, 能够根据目标运动状态与环境反馈动态调整发射波形; 文献 [38] 利用在线学习对可重构天线的辐射状态进行优化, 使其随信道

变化自适应切换; 文献 [39] 则依据通道质量对分布式光纤传感测点进行筛选, 剔除受噪声和失真影响较大的通道。以上方法将按需感知的实现方式, 从传统的传感器启停控制, 拓展至感知波形、天线状态和传感通道的自主调整, 从而提升了系统的灵活性与适应性。

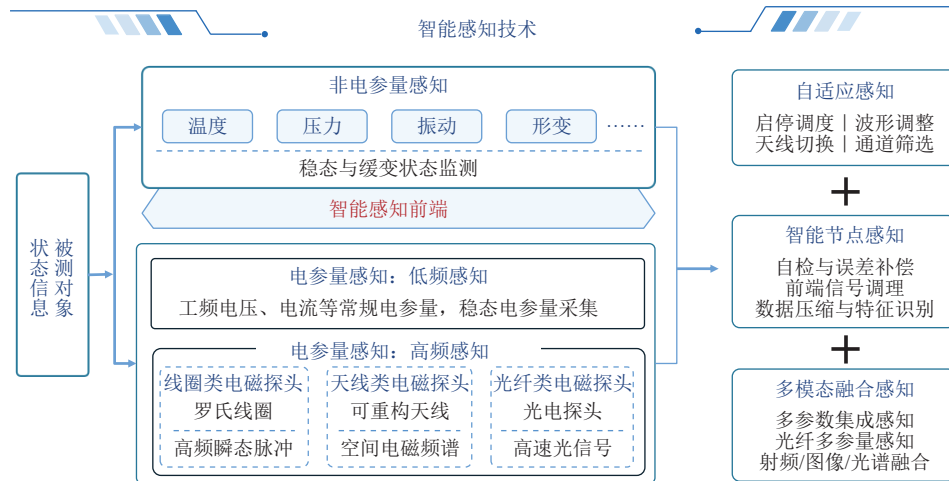


图3 智能感知技术核心构成

2) 智能节点感知——传感功能正由单纯的信号输出向感知处理一体化发展。传统传感器主要完成物理量转换并输出原始信号, 而状态自检、误差补偿和信息筛选则完全依赖后端系统。文献 [40] 提出融合感知、处理、时钟同步和通信功能的智能传感器模型, 使传感节点具备自描述、自诊断和双向通信能力。文献 [41] 研究近传感器计算与传感器内计算, 将部分处理任务部署于敏感单元附近乃至器件内部, 减少原始数据传输与系统能耗。文献 [42] 利用可编程硅光电二极管阵列在传感器内部完成卷积运算, 实现感知与处理的一体化。文献 [43] 提出面向微机电系统 (micro electromechanical systems, MEMS) 气体传感器阵列的轻量化自检测与自校准方法, 实现故障识别、数据恢复和漂移补偿。文献 [44] 将故障电流识别与量程调节功能集成于罗氏线圈传感器端, 可根据输入电流变化实时调整信号调理电路, 有效避免大电流波形出现饱和和失真; 文献 [45] 将机器学习与可编程微波成像相结合, 在感知过程中同步完成数据压缩, 并实现目标成像与识别的一体化处理。上述研究将信号调节、数据压缩和特征识别等关键功能迁移至感知前端, 赋予传感节点较强的自主处理能力, 为智能感知系统的前端化发展提供了有力支撑。

3) 多模态融合感知——传感维度正由单一物理量向多模态感知扩展。传统传感器通常围绕一种敏感材料或换能机理设计, 单器件获取的物理信息有限, 多类状态测量需分别配置不同传感器。文献 [46] 提出垂直有机电化学晶体管结构, 在低驱动电压下实现高跨导、快速响应和稳定切换, 为生化与柔性传感器件的高密度集成提供了基础。文献 [47] 将压力与温度感知集成于透明柔性阵列, 实现触觉压力和皮肤温度的同步测量。文献 [48] 利用三维螺旋热电薄膜的热电与压阻效应, 在单一材料上实现温度与压力双参数感知。文献 [49] 通过机械-电学混合网络抑制温度与压力之间的交叉干扰, 实现大面积、柔性可解耦的双参数测量。这种集成感知能力正进一步向光纤传感与光子芯片领域延伸。文献 [50] 在同一根光纤上联合测量应变、温度和振动, 并结合深度学习完成信号处理与事件识别; 文献 [51] 则将图像、光谱和射频信号统一转换为光谱形式, 在光子芯片上实现多模态感知与识别。新型材料、器件结构与换能机理的不断涌现, 正推动声、光、电、磁、热、力等物理信息走向集成化感知; 与此同时, 光纤传感与光子计算进一步拓展了多参量信息的获取和处理手段, 显著提升了测试系统对目标状态的综合观测能力。

3.3 智能捕获技术

智能捕获技术是承接前端感知输出、实现被测信号数字化的关键环节,依托智能化算法与硬件架构对传感信号实施精细化调理、高精度模数转换、多通道同步采集、智能触发判定、高速缓存与持久化存储。随着复杂装备测试信号带宽持续拓展、幅

值动态范围提升、瞬态随机信号占比显著增加,传统固定参数采集模式已难以适配高精度测试需求,智能捕获技术通过动态重构、自适应采样、自适应校准三大核心方向持续演进,为后续智能分析环节提供高质量原始数据支撑。其核心技术如图4所示。

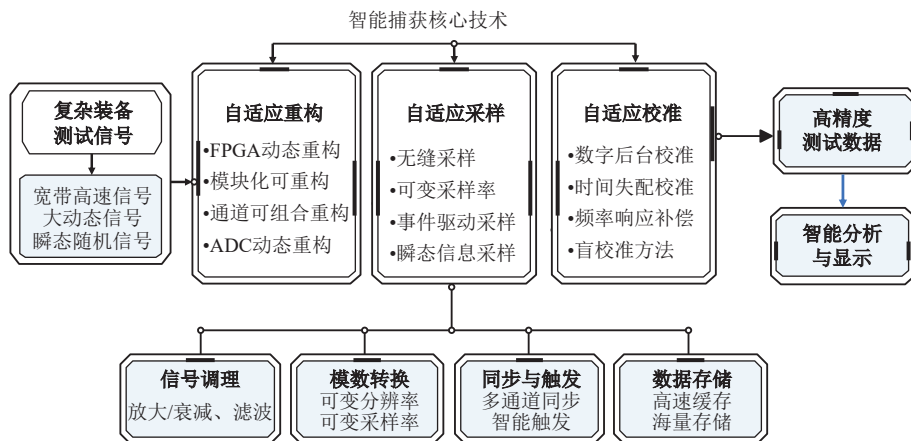


图4 智能捕获核心技术

1) 自适应重构——采集系统动态自适应可重构技术。传统采集系统的接口、采集通道和数据通路通常由硬件预先设定,测试任务变化后往往需要重新配置系统。文献[52]提出基于现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)的可重构采集系统,通过静态与动态重构适配不同传感器及其读取方式。文献[53]采用模块化节点和串行总线构建可扩展采集系统,使传感器类型、通道数量和系统规模能够根据测量任务灵活调整。文献[54]提出面向20 GSPS(即每秒200亿次采样)采集系统的多分辨率结构,通过重新组合多片模数转换器(analog-to-digital converter, ADC),将系统的采样率和分辨率进行动态配置。上述方法使采集接口、通道资源和数据通路能够根据测试需要进行重构,为采集系统自主调整提供了硬件基础。

2) 自适应采样——采样参数灵活可变的自适应采样技术。传统采集系统通常采用固定采样率和分辨率,长期进行高速、高精度采样会产生大量冗余数据,而降低采样率或分辨率又容易遗漏瞬态信号。文献[55]根据输入信号带宽确定不同数据块的有效采样率,在保留信号信息的同时减少数据量。文献[56]提出事件驱动的电平穿越采样方法,使采样时刻和平均采样率随信号变化,并根据输入状态调整量化分辨率。文献[57]根据信号斜

率变化自适应调整瞬态信号的采样区间,提高了瞬态信息的获取能力。上述方法使采集系统能够根据信号带宽、变化速度和事件状态调整采样率与分辨率,在平稳阶段降低数据量,在异常或瞬态出现时提高采样能力。

3) 自适应校准——自适应数字补偿校准技术。传统校正通常利用标准信号预先确定误差参数,此后长期采用固定补偿系数,难以适应温度、器件老化和工况变化引起的性能变化。文献[58]提出流水线ADC的自适应数字校准方法,直接从转换结果中估计器件误差并更新数字滤波参数。文献[59]提出时间交织ADC采样时刻失配的自适应校准方法,并在10 GSPS采集系统中完成硬件实现。文献[60]利用频移和微分运算重构时间失配产生的杂散,实现了任意通道时间交织ADC的自适应盲校正。文献[61]采用最小均方自适应策略校正通道频率响应失配,使校正参数能够跟踪采集系统和环境变化。上述方法利用参考通道、内部校准源或输入信号计算采集误差并更新补偿参数,推动采集系统由离线标定、固定补偿向在线辨识、自适应校正发展。

3.4 智能数据分析技术

智能数据分析是综合利用测试数据与对象机理,提取有效特征并开展状态识别和退化预测,进

而判断装备当前状态与未来性能的技术。传统分析分别依赖人工特征、已知故障模式和单器件模型,其能力提升主要通过增加处理方法、补充故障类型和扩展预测模型实现,属于预设范围内的“增量补充”。随着装备集成程度和系统复杂度不断提升,这种逐项扩充的方式已难以适应复杂装备的分析需

求。智能分析则融合数据学习与机理约束,推动分析能力由“增量补充”走向“自主泛化”、由“预设范围”走向“开放推演”,并沿着自主特征发现、未知状态研判和系统级融合预测 3 个方向发展。其总体框架如图 5 所示。

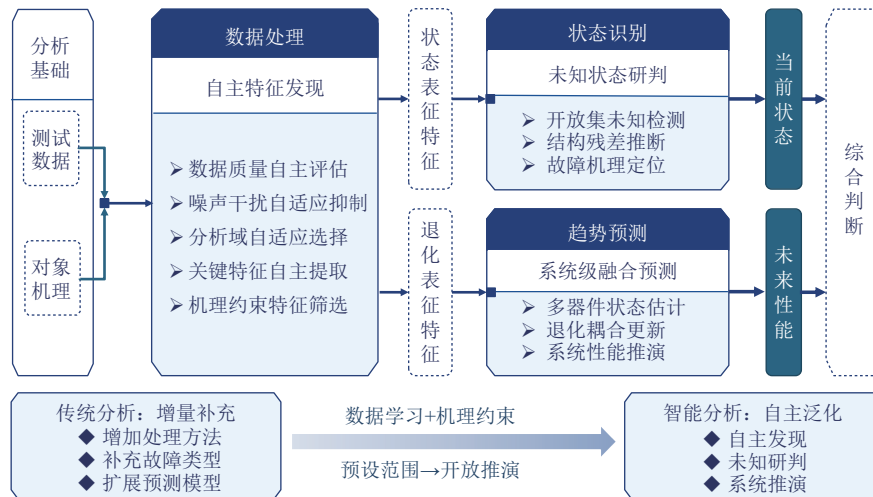


图 5 智能数据分析技术框架

1) 自主特征发现——信号处理正由人工设计向自主学习发展。传统信号处理依赖人工设定滤波、变换和特征提取方法,并需预先选择时域、频域、时频域等分析路径,难以适应信号特征和测试任务的变化。文献[62]利用稀疏自编码网络直接从整流电路原始信号中学习故障特征,减少了对人工特征设计的依赖。文献[63]提出时频 Transformer,通过自注意力机制提取时频信号中的关键特征。文献[64]将可训练的时频变换嵌入神经网络,在自主提取特征的同时保留物理含义。文献[65]利用贝叶斯优化自动选择时频表示形式及其参数,使分析域能够根据数据特点自适应调整。这些方法使特征获取逐步由人工设计转向模型自主学习,降低了对人工经验和固定流程的依赖。

2) 未知状态研判——状态识别正由已知故障识别向未知状态研判发展。传统故障诊断主要依据故障模式、影响及危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)、故障字典和已知故障样本建立诊断规则,诊断范围受限于已知故障集合。文献[66]提出开放集故障诊断方法,在识别已知状态的同时发现训练阶段未出现的故障(即样本未见故障)。文献[67]通过原型学习和距离匹配建立开放集诊断模型,提高了已知故障分类与

样本未见故障的识别能力。文献[68]将系统结构分析与数据辨识相结合,利用系统模型生成残差关系,减少了对完整故障样本的依赖。文献[69]结合电路结构、元器件故障机理和残差方程,对电力电子电路中的多元件参数故障进行定位和辨识。开放集识别可以判断异常是否超出已有知识范围,系统结构和故障机理则可进一步解释异常的传播路径并缩小故障位置,使状态识别由“从故障库中查找答案”转向“根据对象规律研判样本未见状态”。

3) 系统级融合预测——退化分析正由单器件预测向系统性能推演发展。传统研究多针对单个器件的退化状态进行独立预测,难以反映局部退化对系统整体性能的共同影响。当前研究借助人工智能技术,通过融合多器件运行数据、退化模型和系统结构关系,并结合在线状态更新,推演系统性能的整体演变趋势。文献[70]将多个退化部件的状态估计、退化速率和系统剩余寿命纳入统一预测框架。文献[71]面向电力电子系统建立系统级预测方法,根据在线测量结果更新多个器件的退化状态。文献[72]进一步考虑部件相互作用和任务工况对系统退化的影响,实现系统参数的在线估计与状态预测。文献[73]建立考虑元器件退化的电路级联失效模型,描述局部参数变化引起电流重分配

和故障传播的过程。文献[74]利用数字孪生融合任务载荷、器件退化和系统功能模型,分析复杂电子系统的整体性能变化。

4 未来发展的思考

当前,智能测试技术已在测试性设计、信息感知、信号捕获和数据分析等方面形成一定基础,但发展瓶颈日益显现:传统测量手段的性能提升空间趋于饱和,复杂未知场景下的适应能力不足,智能模型难以在装备端部署,相关技术也缺少统一标准。上述问题正成为制约智能测试进一步发展的关键因素,未来可重点从以下5个方面开展研究。

一是探索前沿测试机理,拓展信息感知边界。传统测试长期以电子测量技术为主导,经过多年发展,在既有器件和测量原理下继续提升精度、带宽和灵敏度的难度不断增大。随着基础科学与人工智能交叉技术的持续突破,新的信息载体、物理效应与智能认知机制不断涌现,为突破传统测量的能力极限提供了新的可能。如光子测量具有响应速度快、测量带宽高、抗电磁干扰等优势,量子测量则在微弱信号探测和高精度测量方面展现出独特潜力。未来应持续探索并引入各类前沿测试机理,结合智能特征挖掘、自主感知融合技术,推动测试技术从传统机理下的性能改良,走向“新机理+智能”的全方位能力跃升。

二是拓展全域测试场景,覆盖复杂未知工况。随着无人平台、无人集群以及有人-无人协同的应用日益增多,装备面临的环境、任务和状态日趋复杂且难以事先预知。同时,航空航天、深海探测、核电等战略领域的发展,也使装备越来越多地暴露于高低温剧变、强冲击振动、强电离辐射、真空高压、强电磁脉冲等极端复杂条件。当前智能测试多在常规环境、固定工况和已知状态下开展,难以有效应对持续变化且信息不完备的实际场景。未来应着力提升测试系统在环境变化、工况突变和未知状态出现时的自主适应能力,推动智能测试从预设场景下的验证测试,向复杂未知条件下的自主测试演进。

三是发展轻量化测试技术,推动智能模型工程部署。尖端装备往往对空间、重量、功耗和散热有着严格限制,能够分配给测试系统的算力、存储空间等测试资源极为有限,而复杂环境和突发状态又要求模型具备较强的实时分析与推理能力,由此形成了有限测试资源与高性能智能模型之间的突出矛

盾。现有方法大多在实验室和高算力平台上完成训练与验证,距离装备部署仍有较大差距。未来应在保持模型分析与推理能力的前提下,有效降低计算、存储和能耗开销,实现仪器端和装备端实时、可靠运行,推动智能化测试技术由实验室验证转化为可工程落地、可装备搭载的实用化测试能力。

四是构建统一测试体系,推动技术标准化和复用。目前,国际上已发布信号与测试定义、自动测试信息交换等标准,国内外也已形成面向人工智能管理和系统质量评价的相关标准^[9-10, 75-76]。但现有标准主要面向传统自动测试或通用人工智能,尚未形成贯通测试性设计、信息感知、信号捕获和数据分析全过程的智能测试统一标准体系。各研究在术语定义、数据格式、设备接口、模型表达和评价指标等方面缺乏一致规范,导致测试数据难以共享、模型难以移植、结果难以比较,相关技术也难以复用。此外,如何量化评价一套测试系统是否真正具备智能能力,即系统能否依托机理与实测数据实现自主调整与迭代优化,目前仍缺乏可操作的工程标准。未来应加快建立智能测试的参考架构、数据与接口规范、模型评价和系统验证标准,并将智能能力评价指标纳入标准体系,为不同设备、模型和方法之间的互联互通、复用推广及工程应用提供统一基础。

五是发展跨装备通用认知能力,推动测试系统智能水平迭代演进。当前智能测试整体尚处于弱人工智能阶段,系统在特定测试任务中表现出一定自主性,但面对跨型号、跨装备、跨平台时,仍难以实现知识迁移与自主推理;对于机理完全陌生、缺乏任何先验知识的极端情况,系统尚不具备从零开始自主建模与动态决策的能力。这些局限表明,从弱人工智能向强人工智能演进,是智能测试技术长远发展的必然方向。未来,应着力突破跨领域测试知识迁移、可解释推理机制、自主决策闭环验证等关键技术瓶颈,推动测试系统从专用智能走向通用智能,最终实现开放环境下的完全自主。

5 结束语

本文围绕智能测试的内涵、关键技术与发展趋势展开梳理与研究。这种智能化测试的本质变革,并非将人工智能算法简单植入测试流程,而是推动测试资源与测试方法从预设规则驱动的自动化模式,向面向被测对象与复杂测试场景的自主适配模式转变。智能测试系统融合装备先验模型与实时测

试数据, 动态逼近被测对象的内在运行规律, 自主完成测试策略选择、测量方法自主调节、测试对象状态判断以及测试流程自主优化。因此, 智能测试体现了测试系统具备基于历史测试数据进行持续学习、持续优化、自主调整、可迭代进化的能力。当前, 智能测试技术整体尚处于局部技术突破的发展阶段, 各项技术成熟度参差不齐, 大量研究成果仍局限于单一技术环节与特定被测对象, 数据体系、模型架构、硬件接口和测试流程之间未能实现深度贯通, 缺少统一规范, 面向工程应用的系统化落地能力仍有待提升。面向未来, 依托测试技术与人工智能的深度交叉融合, 智能测试将围绕前沿测试机理探索、复杂未知场景拓展、轻量化工程部署、标准化体系构建和跨装备通用认知能力提升 5 个方面持续取得突破, 推动测试能力从局部环节的有限自适应逐步迈向全流程自感知、自决策、自迭代、自验证的高阶智能化测试体系。

参考文献

- [1] 国务院. 国务院关于印发计量发展规划 (2021—2035 年) 的通知[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm. The State Council of the People's Republic of China. Notice of the state council on issuing the metrology development plan (2021—2035)[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm. (in Chinese)
- [2] 习近平. 在中共中央政治局第九次集体学习时的讲话[N]. 人民日报, 2018-11-01(1). Xi Jinping. Speech at the ninth group study session of the Political Bureau of the CPC Central Committee[N]. People's Daily, 2018-11-01(1). (in Chinese)
- [3] 工业和信息化部, 教育部, 科学技术部, 等. 制造业可靠性提升实施意见[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_5cb0990349f149668490f50742da22f2.html. Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Education, Ministry of Science and Technology, et al. Implementation opinions on improving manufacturing reliability[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_5cb0990349f149668490f50742da22f2.html. (in Chinese)
- [4] 中央军委主席习近平签署命令发布《军队装备试验鉴定规定》[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-02/12/content_5673276.htm. Xi Signs Order to Promulgate Regulations on Military Equipment Experiment and Assessment[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-02/12/content_5673276.htm.
- [5] 工业和信息化部, 中央网络安全和信息化委员会办公室, 国家发展和改革委员会, 等. 国家人工智能产业综合标准化体系建设指南 (2024 版)[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.cac.gov.cn/2024-07/03/c_1721686809220407.htm. Ministry of Industry and Information Technology, Office of the Central Cyberspace Affairs Commission, National Development and Reform Commission, et al. Guidelines for the construction of the national comprehensive standardization system for the artificial intelligence industry (2024 edition)[EB/OL]. [2026-07-01]. https://www.cac.gov.cn/2024-07/03/c_1721686809220407.htm. (in Chinese)
- [6] National Science and Technology Council. National strategy for advanced manufacturing[R]. Washington: National Science and Technology Council, 2022.
- [7] EURAMET. European partnership on metrology[EB/OL]. [2026-07-01]. <https://oeil.europarl.europa.eu/oeil/en/procedure-document-summary/pdf?id=1651796>.
- [8] DOT&E. Director, operational test and evaluation strategy implementation plan[R]. Washington: Department of Defense, 2023.
- [9] 1641-2022 IEEE standard for signal and test definition[S].
- [10] 1671.1-2017 IEEE standard for automatic test markup language (ATML) test descriptions[S].
- [11] MIL-PRF-32070A performance specification: Test program sets[S].
- [12] Searle J R. Minds, brains, and programs[J]. *Behavioral and Brain Sciences*, 1980, 3(3): 417-424.
- [13] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书 (2018 版)[R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2018. China Electronics Standardization Institute. Artificial intelligence standardization white paper (2018 edition)[R]. Beijing: China Electronics Standardization Institute, 2018.
- [14] GJB 2547A-2012 装备测试性工作通用要求[S]. GJB 2547A-2012 General requirement for materiel testability program[S]. (in Chinese)
- [15] Tan Xiaodong, Qiu Jing, Liu Guanjuan, et al. A novel approach of testability modeling and analysis for PHM systems based on failure evolution mechanism[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(3): 766-776.
- [16] Yang Shuming, Qiu Jing, Liu Guanjuan. Hierarchical model-based approach to testability modeling and analysis for PHM of aerospace systems[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 27(1): 131-139.
- [17] Zhang Xishan, Huang Kaoli, Yan Pengcheng, et al. Hierarchical hybrid testability modeling and evaluation method based on information fusion[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(3): 523-532.
- [18] Shi Junyou, He Qingjie, Wang Zili. Integrated Stateflow-based simulation modelling and testability evaluation for electronic built-in-test (BIT) systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 202: 107066.
- [19] Shi Junyou, Deng Yi, Wang Zili. Novel testability modelling and diagnosis method considering the supporting relation between faults and tests[J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 129: 114463.
- [20] Yang Chenglin, Chen Fang, Tian Shulin. Grouped genetic algorithm based optimal tests selection for system with multiple operation modes[J]. *Journal of Electronic Testing*, 2017, 33(4): 415-429.
- [21] Jung D, Dong Yi, Frisk E, et al. Sensor selection for fault

- diagnosis in uncertain systems[J]. *International Journal of Control*, 2020, 93(3): 629-639.
- [22] Wang Jingyuan, Liu Zhen, Wang Jiahong, et al. A general enhancement method for test strategy generation for the sequential fault diagnosis of complex systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 228: 108754.
- [23] Massa N, Paulson J A. Optimal input design for guaranteed fault diagnosis of nonlinear systems: An active deep learning approach[J]. *Control Engineering Practice*, 2024, 153: 106118.
- [24] 文昌俊, 陈立, 张金良, 等. 基于智能体的雷达测试性虚拟验证系统研究[J]. *现代雷达*, 2020, 42(10): 1-6.
Wen Changjun, Chen Li, Zhang Jinliang, et al. A study on radar testability virtual verification system based on agent[J]. *Modern Radar*, 2020, 42(10): 1-6. (in Chinese)
- [25] Almeida R, Silva V, Cabral J. Virtualized fault injection framework for ISO 26262-compliant digital component hardware faults[J]. *Electronics*, 2024, 13(14): 2787.
- [26] 张寒钰. 基于数字孪生的装备测试性验证关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
Zhang Hanyu. Research on key technologies of equipment testability verification based on digital twinning[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023. (in Chinese)
- [27] 刘琳, 龚晨, 李滕滕, 等. 基于虚拟现实技术的可靠性、测试性、维修性、安全性、保障性设计[J]. *兵工学报*, 2022, 43(增刊1): 208-213.
Liu Lin, Gong Chen, Li Mengmeng, et al. RMSST design based on virtual reality[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(S1): 208-213. (in Chinese)
- [28] 张宇, 程中华, 连光耀, 等. AR技术在装备测试性验证试验中的应用研究[J]. *计算机测量与控制*, 2023, 31(12): 49-56.
Zhang Yu, Cheng Zhonghua, Lian Guangyao, et al. Application and research of AR technology in equipment testability verification test[J]. *Computer Measurement & Control*, 2023, 31(12): 49-56. (in Chinese)
- [29] Raimondo D M, Marseglia G R, Braatz R D, et al. Closed-loop input design for guaranteed fault diagnosis using set-valued observers[J]. *Automatica*, 2016, 74: 107-117.
- [30] Morton J, Wheeler T A, Kochenderfer M J. Closed-loop policies for operational tests of safety-critical systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018, 3(3): 317-328.
- [31] Zhang Aibo, Wu Shengnan, Fan Dongming, et al. Adaptive testing policy for multi-state systems with application to the degrading final elements in safety-instrumented systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 221: 108360.
- [32] Yang Fan, Hermans B, Zufferey N, et al. Sequential testing in batches with resource constraints[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 256: 124858.
- [33] Wang Jingyuan, Liu Zhen, Wang Jiahong, et al. Optimal sequential-parallel test strategy generation method for complex systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2025, 55(7): 5054-5068.
- [34] Atia G K, Veeravalli V V, Fuemmeler J A. Sensor scheduling for energy-efficient target tracking in sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(10): 4923-4937.
- [35] Rusu C, Thompson J, Robertson N M. Sensor scheduling with time, energy, and communication constraints[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(2): 528-539.
- [36] Patan M. Distributed scheduling of sensor networks for identification of spatio-temporal processes[J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2012, 22(2): 299-311.
- [37] Zhu Peikun, Liang Jing, Luo Zihan, et al. Cognitive radar target tracking using intelligent waveforms based on reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5107315.
- [38] Gulati N, Dandekar K R. Learning state selection for reconfigurable antennas: A multi-armed bandit approach[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(3): 1027-1038.
- [39] Muñoz F, Soto M A. Enhancing fibre-optic distributed acoustic sensing capabilities with blind near-field array signal processing[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4019.
- [40] Song E Y, Fitzpatrick G J, Lee K B. Smart sensors and standard-based interoperability in smart grids[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(23): 7723-7730.
- [41] Zhou Feichi, Chai Yang. Near-sensor and in-sensor computing[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(11): 664-671.
- [42] Jang H, Hinton H, Jung W B, et al. In-sensor optoelectronic computing using electrostatically doped silicon[J]. *Nature Electronics*, 2022, 5(8): 519-525.
- [43] Liu Bing, Zhou Yanzhen, Fu Hongshuo, et al. Lightweight self-detection and self-calibration strategy for MEMS gas sensor arrays[J]. *Sensors*, 2022, 22(12): 4315.
- [44] Kulkarni S, Divan D. An edge-intelligent, clip-on Rogowski current sensor with wide dynamic range[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1059-1071.
- [45] Li Lianlin, Ruan Hengxin, Liu Che, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1082.
- [46] Huang Wei, Chen Jianhua, Yao Yao, et al. Vertical organic electrochemical transistors for complementary circuits[J]. *Nature*, 2023, 613(7944): 496-502.
- [47] An B W, Heo S, Ji S, et al. Transparent and flexible fingerprint sensor array with multiplexed detection of tactile pressure and skin temperature[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2458.
- [48] Yu Hailong, Hu Zhenqing, He Juan, et al. Flexible temperature-pressure dual sensor based on 3D spiral thermoelectric Bi₂Te₃ films[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2521.
- [49] Zhu Jia, Liu Xionghao, Li Jiaying, et al. Flexible, large-area, recyclable, decoupled dual sensing of temperature and pressure enabled by mechanically-electrically hybrid networks[J]. *Nature Communications*, 2026, 17(1): 5043.
- [50] Lalam N, Bukka S, Bhatta H, et al. Achieving precise multiparameter measurements with distributed optical fiber sensor using wavelength diversity and deep neural

- networks[J]. *Communications Engineering*, 2024, 3(1): 121.
- [51] Zhang Shiji, Jiang Xueyi, Wu Bo, et al. Photonic edge intelligence chip for multi-modal sensing, inference and learning[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 10136.
- [52] Bao Shuang, Yan Hairong, Chi Qingping, et al. FPGA-based reconfigurable data acquisition system for industrial sensors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(4): 1503-1512.
- [53] Toscani A, Immovilli F, Pinardi D, et al. A novel scalable digital data acquisition system for industrial condition monitoring[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(7): 7975-7985.
- [54] Huang Wuhuang, Gao Jian, Ye Peng, et al. General analysis of resolution enhancement on time-synchronized sampling and its multi-resolution solution in 20GSPS acquisition system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 81321-81332.
- [55] De Arcas G, López J M, Ruiz M, et al. Self-adaptive sampling rate data acquisition in JET's correlation reflectometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 10F336.
- [56] Wang Hongying, Schembari F, Staszewski R B. An event-driven quasi-level-crossing delta modulator based on residue quantization[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(2): 298-311.
- [57] Di Massa D, Florio G, Viezzoli A. Adaptive sampling of AEM transients[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 125: 45-55.
- [58] Chiu Y, Tsang C W, Nikolić B, et al. Least mean square adaptive digital background calibration of pipelined analog-to-digital converters[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2004, 51(1): 38-46.
- [59] Gao Jian, Ye Peng, Zeng Hao, et al. An adaptive calibration technique of timing skew mismatch in time-interleaved analog-to-digital converters[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 025102.
- [60] Qiu Yongtao, Zhou Jie, Liu Youjiang, et al. Novel adaptive blind calibration technique of time-skew mismatches for any channel time-interleaved analogue-to-digital converters[J]. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2019, 13(6): 830-835.
- [61] Xiang Jingrui, Tian Shulin, Pan Huiqing. Calibration of frequency response mismatches in time-interleaved analog-to-digital converter based on adaptive method[J]. *IET Communications*, 2023, 17(7): 807-814.
- [62] Xu Lin, Cao Maoyong, Song Baoye, et al. Open-circuit fault diagnosis of power rectifier using sparse autoencoder based deep neural network[J]. *Neurocomputing*, 2018, 311: 1-10.
- [63] Ding Yifei, Jia Minping, Miao Qiuhua, et al. A novel time-frequency Transformer based on self-attention mechanism and its application in fault diagnosis of rolling bearings[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 168: 108616.
- [64] Chen Qian, Dong Xingjian, Tu Guowei, et al. TFN: An interpretable neural network with time-frequency transform embedded for intelligent fault diagnosis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 207: 110952.
- [65] Devol N, Saldaña C, Fu K. Methodology for the automated selection of time-frequency representations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, 596: 118788.
- [66] Tian Ye, Wang Zili, Zhang Lipin, et al. A subspace learning-based feature fusion and open-set fault diagnosis approach for machinery components[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 36: 194-206.
- [67] Li Jiangkuan, Lin Meng, Wang Bo, et al. Open set recognition fault diagnosis framework based on convolutional prototype learning network for nuclear power plants[J]. *Energy*, 2024, 290: 130101.
- [68] Oromi A, Puig V, Galve S, et al. Robust fault diagnosis using a data-based approach and structural analysis[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55(6): 211-216.
- [69] Wu Yi, Wang Youren, Jiang Yuanyuan, et al. Multiple parametric faults diagnosis for power electronic circuits based on hybrid bond graph and genetic algorithm[J]. *Measurement*, 2016, 92: 365-381.
- [70] Khorasgani H, Biswas G, Sankararaman S. Methodologies for system-level remaining useful life prediction[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 154: 8-18.
- [71] Al-Mohamad A, Hoblos G, Puig V. A hybrid system-level prognostics approach with online RUL forecasting for electronics-rich systems with unknown degradation behaviors[J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 111: 113676.
- [72] Tamssaouet F, Nguyen K T P, Medjaher K, et al. Online joint estimation and prediction for system-level prognostics under component interactions and mission profile effects[J]. *ISA Transactions*, 2021, 113: 52-63.
- [73] Jin Yi, Zhang Qingyuan, Chen Yunxia, et al. Cascading failures modeling of electronic circuits with degradation using impedance network[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 233: 109101.
- [74] Elsothy M, Jaeschke J, Sehr F, et al. Mission profile-based digital twin framework using functional mock-up interfaces for assessing system's degradation behaviour[J]. *Microelectronics Reliability*, 2023, 150: 115086.
- [75] GB/T 45081-2024 人工智能 管理体系[S]. GB/T 45081-2024 Artificial intelligence-Management system[S]. (in Chinese)
- [76] ISO/IEC 25059: 2023 Software engineering-Systems and software quality requirements and evaluation (SQuARE)-Quality model for AI systems[S].

责任编辑 刘飞阳