



能源 AI 智能巡检 应用研究报告

Application Research Report on Energy AI
Intelligent Inspection

有云数智（河北）科技有限公司
中国信通院云计算与数字化研究所
华能吉林发电有限公司
东北电力大学

2026年9月

指导单位:

吉林省能源局

参编单位:

有云数智（河北）科技有限公司

中国信通院云计算与数字化研究所

华能吉林发电有限公司

东北电力大学

中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司

北京华能新锐控制技术有限公司

华能信息技术有限公司

前言

近年来，以大模型、多模态感知、多智能体和具身智能为代表的新一代人工智能技术加速演进，人工智能与能源产业融合不断深化。随着“人工智能+”行动深入实施和“人工智能+能源”相关政策持续落地，能源行业人工智能应用加快向生产场景延伸。国家发展改革委、国家能源局印发的《关于推进“人工智能+”能源高质量发展的实施意见》提出，到 2027 年推动 5 个以上专业大模型在电网、发电、煤炭、油气等行业深度应用，挖掘 10 个以上重点示范项目，探索百个典型应用场景赋能路径。能源人工智能正由技术能力建设向场景化、体系化应用加快演进。

智能巡检作为能源人工智能应用的重要场景，近年来在电站、变电站、输变线路等场景加速拓展，但各类巡检装备仍较多以独立运行和单点应用为主，多装备之间的任务协同以及感知、认知、决策与执行能力的系统化衔接不足。随着机器人、无人机、多模态感知和大模型等技术 AI 能力持续提升，如何将分散的单点智能能力转化为系统级巡检效能提升，如何实现智能巡检由“单机智能”向“系统协同智能”的转变，正成为能源 AI 智能巡检领域发展的核心问题。

基于此，本报告围绕能源 AI 智能巡检的发展现状、关键技术和产业应用，分析由单机智能向系统协同演进过程中存在的能力缺口及应用挑战，并结合产业实践和技术研究，提出 Y-ICF 能源智能巡检集成框架。该框架以智能体（Agent）为核心组织方式，融合多模态感知、大模型认知、多智能体协同与多智能装备联动，探索面向复杂能源场景的协同巡检模式。

报告重点围绕能源 AI 智能巡检发展概述、关键技术、产业应用、

问题挑战和发展建议五个方面展开，系统梳理行业发展与技术演进，分析典型应用实践及规模化应用制约因素，并提出相应发展路径，为能源 AI 智能巡检下一步发展路径提供参考。

目录

一、 能源 AI 智能巡检发展概述	1
(一) 政策体系持续完善，能源 AI 进入系统推进阶段	1
(二) 能源企业加快 AI 布局，智能巡检应用持续拓展	3
(三) 单点智能日趋成熟，系统协同仍存在结构性缺口	7
二、 能源 AI 智能巡检关键技术	12
(一) 感知技术持续演进，复杂环境感知能力不断增强	13
(二) 大模型赋能巡检认知，任务理解与智能决策加速升级 ..	15
(三) 具身智能拓展执行能力，巡检装备向自主作业进化	19
(四) Y-ICF 构建协同框架，推动分散能力向系统协同演进 ..	22
三、 能源 AI 智能巡检产业应用	28
(一) 智能巡检平台加快建设，支撑多类装备接入与应用	28
(二) 典型巡检场景持续深化，单机智能应用日趋成熟	30
(三) 多机协同应用加速探索，系统级智能逐步走向实践	33
四、 能源 AI 智能巡检面临挑战	37
(一) 复杂能源环境约束突出，协同智能落地难度较大	37
(二) 场景差异与接口壁垒并存，规模化复制能力不足	38
(三) 安全与数据治理约束突出，自主智能应用边界待明确 ..	40
(四) Y-ICF 为破解系统性挑战提供协同集成路径	42
五、 能源 AI 智能巡检发展建议	43
(一) 强化核心技术与协同能力，推动智能巡检体系升级	43
(二) 深化场景应用与标准建设，形成可复制推广模式	44
(三) 完善安全与数据治理机制，明确自主智能应用边界	44

图目录

图 1 能源智能巡检主要能力缺口及发展阶段	11
图 2 能源 AI 智能巡检技术路线全景	13
图 3 Y-ICF 四层架构图	23
图 4 多智能体协同调度架构	25
图 5 云边端分层架构与数据流	29

一、能源 AI 智能巡检发展概述

2025 年以来，随着“人工智能+”行动深入实施以及能源领域相关政策持续落地，我国能源行业人工智能应用由试点示范逐步迈向系统推进。能源企业加快人工智能技术布局，智能巡检等高价值场景持续拓展，机器人、无人机、大模型等技术和装备加速融入能源生产运维。与此同时，单点智能能力的快速提升尚未完全转化为系统级巡检效能的提升，多装备协同和系统集成仍存在不足。本部分从政策环境、产业发展和系统协同三个层面，梳理能源 AI 智能巡检的发展现状及主要特征，为后续关键技术与产业应用分析奠定基础。

（一）政策体系持续完善，能源 AI 进入系统推进阶段

1. 顶层战略持续深化，人工智能规模化应用导向进一步明确

2025 年以来，我国“人工智能+”政策部署进一步向规模化应用和产业深度融合延伸。2025 年 8 月，国务院印发《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》（国发〔2025〕11 号）¹，围绕科技、产业、消费、民生、治理、全球合作等六大重点领域部署“人工智能+”行动，提出到 2027 年新一代智能终端、智能体等应用普及率超过 70%，到 2030 年超过 90%。政策部署进一步强调人工智能与经济社会各行业各领域广泛深度融合，推动人工智能发展由技术能力提升向产业赋能和规模化应用延伸，为人工智能深入能源等实体产业提供顶层政策支持。

2. 能源专项政策加快落地，高价值场景成为重要抓手

在国家“人工智能+”战略引导下，能源领域政策进一步由宏观方向部署向行业实施和场景落地深化。2025 年 9 月，国家发展改革委、国家能源局印发《关于推进“人工智能+”能源高质量发展的实

¹ 国务院.《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》（国发〔2025〕11 号），2025 年 8 月.

施意见》（国能发科技〔2025〕73号）²，明确以能源应用场景为重要依托，系统部署“人工智能+电网”“人工智能+新能源”“人工智能+火电”等八大类应用场景，并进一步细化形成37项重点任务、百余项具体应用³。

此后，系列政策进一步由路径部署向试点验证和工程应用延伸。2025年11月，国家能源局组织开展“人工智能+”能源试点工作，面向能源企业征集高价值应用场景需求，推动能源场景需求方与人工智能技术供给方加强对接。2026年4月，国家发展改革委、国家能源局、工业和信息化部、国家数据局联合印发《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》（国能发科技〔2026〕34号）⁴，围绕能源、算力、场景、数据和模型等要素协同部署29项重点任务。2026年5月，国家能源局进一步发布首批51个“人工智能+”能源高价值场景并组织开展试点申报⁵，推动人工智能技术与能源真实场景加快融合。

总体来看，从专项实施意见、试点工作到高价值场景遴选，政策部署不断细化，实施方式由方向引导逐步向场景开放、供需对接、工程验证和产业化推广延伸。

3. 标准治理体系逐步完善，规范化发展基础持续夯实

随着人工智能、机器人、无人机等技术加快进入能源生产运行环节，能源AI发展的政策关注点也逐步由“推动应用”向“应用与治

² 国家发展改革委、国家能源局.《关于推进“人工智能+”能源高质量发展的实施意见》（国能发科技〔2025〕73号），2025年9月。

³ 国家能源局综合司.《关于组织开展“人工智能+”能源试点工作的通知》（国能综通科技〔2025〕168号），2025年11月。

⁴ 国家发展改革委、国家能源局、工业和信息化部、国家数据局.《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》（国能发科技〔2026〕34号），2026年4月。

⁵ 国家能源局综合司.《关于发布“人工智能+”能源高价值场景清单和组织开展试点申报工作的通知》（国能综通科技〔2026〕50号），2026年5月。

理并重”延伸。

在加快场景应用的同时，相关政策进一步将标准化和安全治理纳入能源 AI 发展体系。《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》提出开展“人工智能+”能源标准化提升行动，加强标准化顶层设计，建立健全人工智能与能源双向赋能标准体系，并探索覆盖数据、模型和应用的能源领域人工智能安全治理体系。总体来看，能源 AI 正在由应用探索逐步向应用、标准与安全治理协同推进转变，现有电力安全生产、巡检装备、网络安全等相关标准规范为智能装备和 AI 系统进入能源生产环境提供了基础约束，但面向智能体、多装备协同和系统级智能的新型规范仍需进一步完善。

综合来看，我国能源 AI 正在形成“国家战略引导—能源专项部署—高价值场景牵引—标准治理支撑”的多层次推进体系，政策重心由方向引导逐步向场景落地、试点验证和规模推广深化，为能源 AI 智能巡检进一步发展提供了较为系统的政策与制度基础。

(二) 能源企业加快 AI 布局，智能巡检应用持续拓展

1. 能源央企加快 AI 基础能力建设，大模型部署由点及面展开

随着国家“人工智能+”战略深入实施，能源央企加快人工智能基础能力建设，大模型、算力基础设施、企业数据和 AI 平台逐步成为能源企业数智化建设的重要内容。2025 年以来，以中国华能集团、国家能源集团等为代表的能源央企相继推进 DeepSeek 等大模型本地化部署，并结合企业数据、业务系统和生产场景探索人工智能应用，能源企业 AI 建设正在由大模型接入逐步向平台化、场景化应用延伸。中国华能集团于 2025 年 2 月完成 DeepSeek 等大模型的本地化部署⁶，并在“iHN+”移动门户上线“睿智小能”AI 助手，为办公协同、知

⁶中国华能集团有限公司.我们的历史

[EB/OL].(2025)[2026-08-30].<https://www.chng.com.cn/us-history.html?>

识检索及业务管理提供智能化支撑。与此同时，中国华能集团制定人工智能顶层规划，围绕算力、数据、模型、场景和人才等要素构建人工智能发展体系，并提出建设集团级人工智能平台和行业大模型底座。按照相关规划⁷，到 2027 年，中国华能集团计划开发 180 余个智能应用，实现人工智能技术对集团各业务板块的进一步赋能。

表 1 主要能源央企人工智能应用布局及代表性实践（根据企业公开资料及相关公开报道整理）

企业	部署策略与应用侧重	标志性实践
国家电网	推进电力人工智能体系建设，围绕输变电设备巡检、智能调度、设备状态分析等方向开展 AI 应用探索。	电力 AI 平台建设、输变电智能巡检、智能调度相关应用
南方电网	推动大模型与电网业务融合，围绕知识服务、智能问答、调度辅助等场景探索人工智能应用。	“南网智搜”、电网大模型、智能调度辅助等应用
中国华能集团	较早开展大模型部署，推动人工智能能力向业务场景拓展。围绕算力、数据、模型和应用场景开展人工智能体系建设，并探索 AI 在能源生产、经营管理等领域的应用。	“睿智小能”AI 助手、大模型本地化部署、智慧电厂与智能运维相关应用
国家能源集团	面向煤炭、电力、运输、化工等业务板块推进人工智能应用布局，在智能采掘、智慧运输等场景开展相关实践。	智能采掘、智慧运输、智能矿山等应用
国家电投	面向新能源、火电等业务领域推进人工智能应用探索，结合业务数据开展智能分析和辅助决策。	“融智”平台、新能源功率预测、虚拟电厂智能助手等应用
华电集团	建设人工智能平台和相关数字化能力底座，推动 AI 能力在集团业务场景中的应用探索，并加强与生产管理系统结合。	“华电 AI”平台、设备诊断、智慧工地等应用

⁷ 中国华能集团有限公司. “两会热词”：人工智能
+[EB/OL].(2025-03-12)[2026-08-30].https://www.chng.com.cn/detail_25ztlh/-/article/yYvxbPBXkHvr/v/1249547.html?

大唐集团	聚焦生产运行场景开展人工智能应用探索，推动 AI 能力与岗位业务结合，在智慧燃料管理等领域开展智能化应用实践。	AI 值长、智慧燃料管理等应用
------	---	-----------------

国家能源集团也在推进大模型本地化部署和人工智能基础能力建设。2025 年 2 月，国能云平台完成 DeepSeek-R1 系列大模型本地化部署并上线，通过集团内网环境提供模型应用和应用程序编程接口（Application Programming Interface，API）调用能力，为后续内部数据训练、模型优化及业务应用提供基础支撑。

总体来看，能源央企人工智能建设已开始由通用模型部署向算力、数据、模型、平台和业务场景协同建设延伸。随着企业级 AI 基础能力逐步完善，人工智能应用也在由办公协同、知识检索等通用场景向生产运行、设备运维等业务环节拓展，为智能巡检等生产场景进一步应用提供基础条件。主要能源央企人工智能部署策略及代表性实践见表 1。

2. AI 能力加快向生产环节延伸，智能巡检成为重要落地场景

相较于大模型基础能力部署，更值得关注的是人工智能正在由办公问答、知识检索等通用场景向生产运行环节延伸。中国华能集团公开信息显示，其人工智能技术已应用于电力生产、煤炭开采、燃料运输、营销决策和供应链等业务领域，并在火电运行优化、炉管安全监测、燃烧优化控制、故障诊断以及新能源智慧运维等场景开展实践，同时，企业正在推进大模型赋能场站一线生产运行和经营管理。

目前，设备状态识别、故障诊断、智能巡检和智能运维是人工智能与智能装备融合的重要应用场景。国家能源局《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》⁸明确提出，推动特种智能机器人、

⁸ 国家能源局.《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》（国能发科技〔2023〕27 号），2023 年 3 月 28 日.,

无人机等技术装备研发，并服务于远程设备操控、智能巡检、智能运维、故障诊断和应急救援等典型业务场景，同时推进基于人工智能的能源装备状态识别、可靠性评估和故障诊断技术发展。

随着视觉识别、多源感知、无人机、巡检机器人以及大模型等技术持续进入生产现场，智能巡检的应用内容正在由自动采集、缺陷识别向设备状态综合感知、辅助诊断和巡操一体化方向拓展。能源企业 AI 建设的关注点也正在由“是否具备大模型能力”，逐步转向“如何将 AI 能力嵌入实际生产流程并形成业务价值”。

3. 企业实践呈现差异化特征，AI 应用由能力建设向场景深化演进

不同能源企业受业务结构、设备类型和生产环境影响，人工智能应用呈现不同的场景侧重。发电企业逐步将人工智能应用向生产运行、设备状态诊断和新能源运维等业务环节延伸。例如，中国华能集团已形成设备状态预警诊断、智能安防、功率预测、电力交易、燃料调运等系列应用，并构建覆盖火电机组运行、新能源气象预报、设备巡检等领域的多模态数据集。

新能源领域则更加关注场站智慧运营和智能运维。以东北地区为代表的高寒偏远能源场景，受极端气候与地理条件影响，智能巡检面临显著的差异化挑战。一是极端低温与大温差影响：冬季长期低温及昼夜剧烈温差易导致巡检机器人电池续航大幅衰减、机械结构润滑性能下降、光学镜头起雾结霜，同时电子元器件可靠性降低，直接影响装备作业时长与识别精度。二是风雪、结冰与强风影响：强降雪与路面结冰会阻碍轮式、轨道式机器人的通行能力，增加设备打滑、脱轨风险；强风环境下无人机巡检姿态控制难度加大，飞行稳定性与成像质量下降；设备表面积冰覆雪还会遮挡视觉识别目标，提升缺陷检测

难度。三是偏远场站弱网制约：省内大量风电、光伏及变电站位于偏远山区或边境区域，通信网络覆盖薄弱、带宽有限，巡检机器人与无人机的高清视频回传、远程操控、云端 AI 推理等能力受限，难以支撑实时协同巡检与集中管控。上述地域特性决定了东北地区智能巡检需在装备耐候性设计、边缘智能计算、离线自主作业等方面形成针对性技术方案，也构成了区域能源 AI 应用的重要特色方向。国家能源局《关于推进“人工智能+”能源高质量发展的实施意见》明确提出促进偏远地区新能源场站智能运维，利用大模型、声纹检测、遥感、机器人、智能穿戴设备等技术装备实时监测环境和设备运行状态，并推动无人机、无人车、无人船和智能控制等多系统智能联动，提升设备巡检和场站综合运营效率。

整体来看，能源企业人工智能建设正在由模型部署和基础能力建设逐步向平台化、专业化和场景化应用延伸，智能巡检正在成为人工智能能力进入能源现场生产运维的重要应用场景。随着多类装备、模型和业务系统持续接入生产场景，如何进一步实现不同能力之间的协同，也为智能巡检由单点应用向系统级能力演进提出了新的要求。

(三) 单点智能日趋成熟，系统协同仍存在结构性缺口

1. 巡检装备加快智能化升级，单机自主作业能力日趋成熟

随着机器视觉、自主导航、机器人和无人机等技术持续发展，能源智能巡检装备形态不断丰富，轮式机器人、轨道式机器人、无人机等装备已在输变电、发电及新能源等场景开展应用，四足及六足机器人等新型装备也开始进入复杂环境巡检场景。不同装备根据作业空间、设备类型和环境条件承担差异化任务，智能巡检正在由人工辅助和固定监测逐步向自主移动、自动采集和智能识别等方向拓展。

从工程应用和标准建设情况看，部分智能巡检装备已经形成较好

的应用基础。以电网场景为例，国家能源局公布的案例显示，220 千伏港东变电站已部署室内无人机、智能巡检机器人、轨道巡检机器人等设备，并集成高清视频、数字化表计和在线监测等手段开展联合巡检，实现远程智能巡视。国家能源局发布的能源行业标准公告中，已经包括《变电站巡检机器人与人工协同巡检规范》(DL/T 2694—2023)⁹、《架空输电线路无人机巡检数据自动采集及处理规范》(DL/T 2697—2023)¹⁰等标准，表明机器人、无人机等巡检装备的应用正在逐步走向规范化。

中国华能集团在新能源领域也已开展无人化智能装备应用，其公开技术成果¹¹包括风电机组动态无人机巡检、光伏电站双光融合诊断、升压站一体化无人巡检和电站倒闸操作机器人等，通过无人机、机器人、物联网与人工智能技术融合，实现多类场景全自动智能巡检作业。

2. 多装备应用不断增多，协同巡检仍处于探索阶段

单机能力提升并不意味着系统级巡检能力同步形成。虽然不同巡检装备在移动方式、感知范围、载荷能力和环境适应性等方面存在差异，但通过固定监测设备、轮式机器人、轨道机器人、无人机等装备数据共享与组合应用，可以实现复杂能源场景下多装备能力互补。

目前，部分能源项目已经由单一装备应用向多装备联合巡检拓展。国家电网公开实践显示¹²，1000 千伏特高压海河变电站已融合无人机、高清视频、机器人、在线监测和数字化表计等多种智能手段，构建“空

⁹ 国家能源局.科技赋能变电站 智慧点亮达沃斯

[EB/OL].(2024-06-28)[2026-08-30].https://www.nea.gov.cn/2024-06/28/c_1212375942.htm

¹⁰ 国家能源局.国家能源局公告 2023 年第 8 号

[EB/OL].(2023-12-28)[2026-08-30].https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-12/28/c_1310759283.htm

¹¹ 中国华能集团有限公司.新能源无人化智能装备技术

[EB/OL].(2025)[2026-08-30].https://www.chng.com.cn/detail_zdgjjs/-/article/jXCQ2CQLyPh3/v/1210558.html

¹² 国家电网有限公司.春节我在岗·守护万家灯火 | 坚守运维一线 保障可靠供电

[EB/OL].(2025-02-05)[2026-08-30].http://www.ne.sgcc.com.cn/yw_72/202502/t20250205_5774.html

天地”立体智能巡检系统；相关变电站同时开展无人机、轮式机器人与轨道机器人巡检任务。

在新能源场景，中国华能集团“可再生能源基础设施 AI 监控与机器人安全干预技术”进一步融合无人机自主巡检和随动机器人控制，并具备装备集中管控、多源数据融合、多网融合传输和智能诊断预警等功能，实现由环境及设备感知向智能诊断、机器人干预延伸，形成“感知—决策—执行”运维闭环。

上述实践表明，能源智能巡检已经出现由单装备应用向多装备联合、由独立巡检向系统联动发展的工程探索。但从现有公开案例看，多装备应用仍较多围绕具体场站和特定任务展开，不同装备之间如何进一步实现统一任务组织、状态共享和动态协同，仍是系统级巡检能力建设需要解决的问题。

因此，智能巡检需要解决的问题正在由“提升单台装备智能化水平”，进一步转向“如何组织多类装备和智能能力协同完成巡检任务”。

3. 系统级能力仍存在缺口，智能巡检亟待由单点智能迈向协同智能

综合上述工程实践可以看出，随着单机自主能力持续提升和多装备联合应用不断拓展，能源智能巡检面临的问题正在由单项装备能力提升进一步转向装备、智能能力和业务系统之间的协同。结合现有应用特征，本报告将系统级能力缺口归纳为三个方面。

一是多装备协同能力仍待提升。当前无人机、轮式机器人、轨道机器人等不同装备已经开始在同一场景联合应用，但联合应用并不等同于任务协同。面向复杂场站和动态任务，不同装备之间仍需要进一步提升任务分配、状态共享、路径协调以及异常情况下的动态调整能力。特别是当巡检范围由单一区域向复杂场站拓展时，需要进一步发

挥不同装备在移动能力、感知范围和作业能力等方面的互补优势。

二是自主认知与任务决策能力仍处于发展阶段。当前智能巡检已具备自动采集、目标识别、状态监测、缺陷识别和辅助诊断等能力，部分项目进一步开始形成从感知、诊断到装备执行的闭环。随着大模型和智能体技术发展，巡检系统具备进一步向任务理解、任务规划和自主决策延伸的技术条件，但能源生产具有较高的安全性和可靠性要求，自主决策仍需充分考虑安全规程、权限边界、模型可靠性和人工接管等要求。因此，现阶段更适合在明确安全边界的基础上推进人机协同模式下的辅助决策、有限自主决策。

三是跨系统联动和业务闭环能力仍需加强。智能巡检的系统级价值不仅体现在完成设备巡视和异常识别，还在于能否将巡检结果进一步转化为设备诊断、检修处置和生产管理等后续业务动作。随着巡检装备、智能识别平台与企业生产管理系统持续融合，系统接口、数据标准、任务状态和业务流程之间的衔接成为影响闭环运行的重要因素。相较于单项装备能力提升，跨系统联动更多涉及既有系统改造和业务流程协同，需要结合具体企业的信息化基础持续推进。

总体来看，能源智能巡检正在由单机自主和单点应用向多装备、多模型和多系统协同演进。如何进一步打通感知、认知、协同和执行环节，并在安全约束下形成完整任务闭环，成为提升系统级巡检能力需要解决的关键问题。

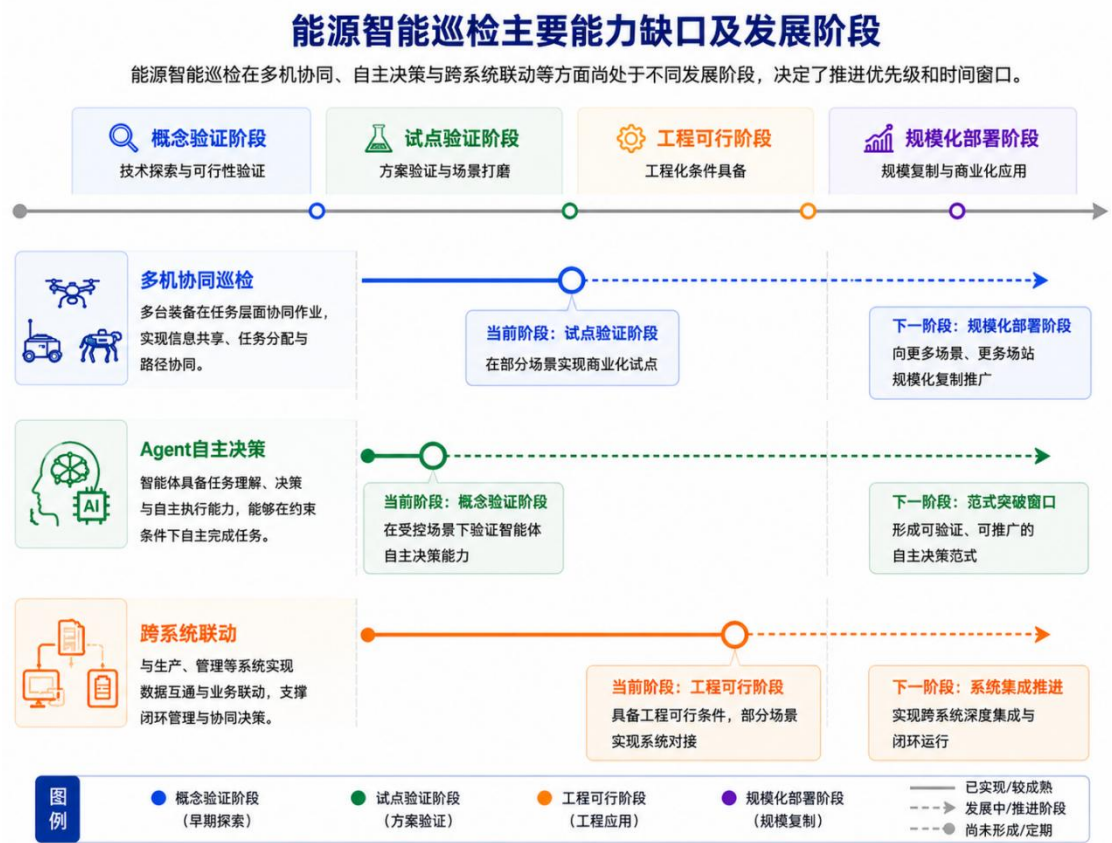


图 1 能源智能巡检主要能力缺口及发展阶段

基于行业案例梳理，当前能源智能巡检的系统级能力缺口主要集中在多机协同巡检、自主认知与任务决策、跨系统联动三个方面。三类能力所处的发展阶段并不相同，整体成熟度关系如图 1 所示，具体能力表现及阶段判断见表 2。

表 2 能源智能巡检能力缺口分析

能力缺口	现状描述	发展阶段
多机协同巡检	当前多数巡检装备仍以单机独立作业为主，多装备之间的信息共享、任务分配和协同执行能力仍有限，部分能源场景已开展多机协同应用探索	试点验证阶段
智能体（Agent）驱动自主决策	当前系统主要依据人工配置、预设程序或规则执行任务，基于智能体实现任务理解、规划、决策与执行	探索阶段

	闭环仍处于探索阶段	
跨系统联动与数据 闭环	巡检系统与设备管理、生产管理等 业务系统之间仍存在数据接口和 流程衔接问题，巡检结果向工单、 检修等业务流程自动流转的能力 仍需提升	工程集成阶段

由此来看，能源智能巡检当前面临的关键问题，已不再只是提升单台机器人、单个算法或单一模型的性能，而是如何将已有的感知、认知和执行能力有效组织起来，并进一步实现装备之间、智能能力之间以及巡检系统与生产业务之间的协同。这也意味着，能源智能巡检的技术重心正在由单点能力提升逐步转向系统级协同能力建设。

二、能源 AI 智能巡检关键技术

随着多模态感知、大模型、多智能体和具身智能等技术加速演进，能源智能巡检的技术能力正由感知识别向任务理解、协同调度和自主执行拓展，为多装备、多模型协同完成复杂巡检任务提供了新的技术条件。本部分围绕感知、认知、协同和执行四类关键能力，梳理能源 AI 智能巡检的主要技术路线、应用现状及演进趋势，分析不同技术能力之间的衔接关系与集成需求。在此基础上，针对第一章所分析的系统协同能力缺口，进一步提出 Y-ICF (Yocloud Intelligent Inspection Collaboration Framework) 能源智能巡检集成框架，探索面向复杂能源场景的系统协同路径。

从能力链条看，感知层负责获取环境与设备状态信息，认知层负责信息理解与辅助研判，协同层负责任务组织与多装备协调，执行层负责具体巡检与作业任务实施。四类能力相互衔接，共同构成能源智能巡检由信息获取、分析研判到任务组织和现场执行的基本技术链条，整体技术路线见图 2。

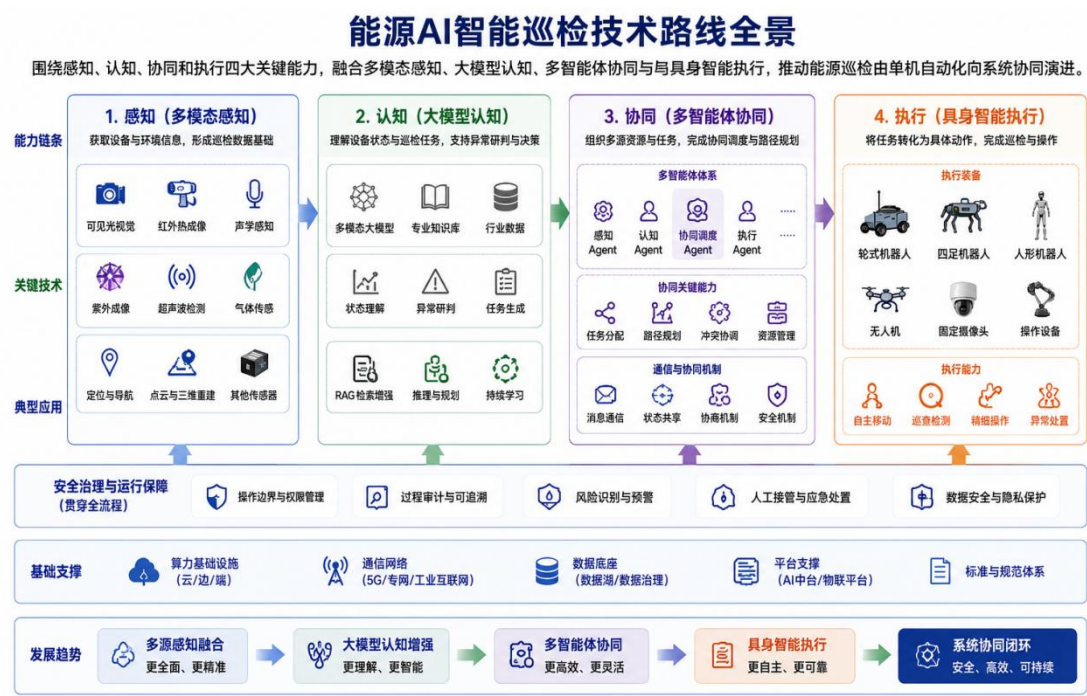


图 2 能源 AI 智能巡检技术路线全景

（一）感知技术持续演进，复杂环境感知能力不断增强

1. 视觉识别由规则检测向智能识别演进，设备状态感知能力持续提升

视觉感知是能源智能巡检应用较为广泛的技术方向。随着机器视觉和深度学习技术发展，目标检测、图像分类、语义分割等视觉算法逐步应用于设备状态识别和缺陷检测，可对仪表读数、开关状态、设备外观及异常目标等进行自动识别。实际应用中，智能巡检机器人已能够结合可见光、红外等感知手段完成设备状态采集、识别和异常告警，视觉感知正在由信息采集和人工判读向自动识别与异常检测演进。

随着巡检任务进一步向机器人、无人机及边缘设备延伸，视觉识别还需要兼顾实时性、计算资源和复杂环境适应能力。强弱光变化、遮挡、目标尺度较小和复杂背景等因素仍可能影响现场识别效果，复杂生产环境下的识别稳定性、泛化能力、部署效率和识别准确率仍是视觉感知持续优化的重要方向。

2. 定位导航由预设路线向自主导航演进，复杂环境适应能力逐步增强

自主定位与导航是移动巡检装备实现自主作业的重要基础。传统巡检机器人较多依赖轨道、磁条或预设路径完成巡检任务，对固定路线和现场基础设施存在一定依赖。随着同步定位与地图构建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)、激光雷达、机器视觉和惯性测量等技术发展，巡检机器人逐步具备自主定位、地图构建、路径规划和动态避障能力，作业方式由固定路线巡检向自主移动拓展。

面向复杂生产环境，激光、视觉和惯性测量等多源信息进一步融合，通过不同感知方式之间的优势互补，提高弱光、纹理不足、临时障碍等条件下的定位和导航稳定性。定位导航能力的提升不仅扩大了单机自主巡检的作业范围，也为后续多装备之间的位置共享、路径协调和任务调度提供了空间信息基础。

3. 多源感知加速融合，巡检能力由单一识别向综合状态感知拓展

能源设备运行状态具有多维特征，仅依靠可见光信息难以完整反映设备状态。随着传感技术和人工智能技术持续发展，智能巡检的信息来源逐步由单一视觉向可见光、红外、声学、紫外、超声、气体等多源感知拓展。不同感知方式可分别获取设备外观、温度、声音、放电特征及环境状态等信息，为设备状态综合研判提供更加丰富的数据基础。

多源感知进一步发展的重点，正在由多类传感信息的独立采集向多模态信息关联与融合拓展。由于不同传感器在采样频率、空间位置、数据结构和信息尺度等方面存在差异，时间同步、空间标定、特征关

联和联合分析成为多源感知融合的重要环节。通过对不同来源信息进行关联分析，巡检系统能够由单一目标或异常识别进一步向设备与环境综合状态感知拓展，为后续智能研判和任务决策提供更加完整的信息基础。

总体来看，能源智能巡检感知技术正在由人工判读向智能识别、固定路线向自主导航、单一信息向多源融合持续演进，设备和环境状态信息获取能力不断增强。但“感知到异常”并不等同于“理解异常”。如何进一步结合设备知识、运行状态和巡检任务，对多源感知信息进行综合理解、分析和推理，是能源智能巡检由感知能力向认知能力演进需要解决的关键问题。

(二) 大模型赋能巡检认知，任务理解与智能决策加速升级

1. 认知能力由规则驱动向大模型驱动演进，复杂任务理解能力不断增强

认知层是能源智能巡检实现状态理解、异常研判和任务决策的重要环节。传统巡检系统主要依据阈值和预设规则对设备状态进行判断，例如根据温度、仪表读数等指标触发异常告警，具有逻辑明确、结果可控等特点，但在多源信息关联、复杂故障分析和非结构化知识利用等方面存在一定局限。随着知识库、专家系统和知识图谱等技术应用，巡检系统能够进一步结合设备知识、故障规则和历史信息开展辅助诊断，但仍面临知识构建与维护成本较高、复杂场景适应能力有限等问题。

随着大模型技术发展，能源智能巡检的认知能力开始由单一规则判断向自然语言理解、知识检索、信息关联和辅助推理拓展。大模型能够对巡检记录、设备资料、运行规程等非结构化信息进行统一理解，并结合专业知识库和检索增强等技术，为异常分析、故障诊断和任务

辅助决策提供新的技术路径。与此同时，以 DeepSeek 等为代表的开源模型进一步丰富了能源企业开展模型本地化部署和专业场景适配的技术选择。

从产业实践看，中国华能集团已完成 DeepSeek 系列模型本地化部署，并围绕大模型赋能场站一线生产运行开展相关研究与应用探索。这表明大模型在能源领域的应用正在由通用问答和知识服务向生产运行等专业场景延伸，认知能力也开始由“识别异常”进一步向“理解异常、关联知识和辅助研判”拓展。

2. 专业知识与大模型加速融合，巡检认知由信息查询向辅助研判拓展

能源巡检具有较强的专业性和知识密集特征，设备说明、巡检规程、历史缺陷、检修记录和安全规范等信息大量存在于文档及业务系统中。通用大模型自身难以持续覆盖企业内部知识和动态业务信息，因此，将大模型与企业知识库、检索增强生成 (Retrieval-Augmented Generation, RAG)、知识图谱等技术结合，成为增强能源专业知识理解与应用能力的重要技术路径。

表 3 模型在能源智能巡检认知环节中的典型应用方向（注：根据企业公开资料、行业案例及相关研究整理）

应用方向	技术实现	代表实践
规程理解与查询	大模型+RAG (检索增强生成)，将巡检规程、安全规范等专业知识进行结构化管理和检索，支持自然语言查询和知识辅助分析，提高模型回答的专业性和可靠性。	中国华能集团“睿智小能”、大唐“AI 值长”等智能问答应用探索
故障根因分析	大模型推理+知识图谱，通过知识关联和多步推理能力辅助设备状态分析和故障原因研判。结合工具调用机制，可根据巡检结果进一步关联设备信息、历史记录和专业知识。	华电设备诊断、国家电投新能源设备健康分析等应用探索

报告自动生成	大模型+模板引擎，根据巡检数据自动撰写结构化报告，辅助报告编制和结果整理。	智慧电厂项目中的巡检报告自动生成等应用
设备健康预测	时序模型 (Transformer/GRU) 结合大模型分析能力，基于历史运行数据和设备状态趋势开展健康评估和故障预测辅助分析。	国家电网设备状态评价相关应用、南方电网知识图谱相关探索

巡检系统可根据任务指令和现场感知信息，结合设备资料、运行状态、历史记录及巡检规程，对异常情况进行综合分析，并为后续任务安排和处置提供参考。大模型与外部工具及业务系统的连接，进一步增强了对专业数据和复杂任务的处理能力，使其逐步具备由信息交互工具向任务认知与辅助决策能力拓展的技术条件，主要应用方向见表 3。

在巡检场景中，通过引入设备资料、巡检规程、历史缺陷和检修记录等专业知识，利用大模型支持自然语言查询、规程检索和设备知识问答的技术特点，可进一步结合现场感知结果和历史信息开展异常关联分析。例如，当感知层发现设备温度、声音或外观状态异常后，认知层可进一步关联设备类型、运行状态、历史缺陷和相关规程，为异常原因分析和后续处置提供辅助信息。

专业知识与大模型的融合，使巡检认知能力开始由“获取信息”向“关联信息、理解异常和辅助研判”拓展，为感知结果进一步转化为具有业务含义的状态判断提供技术支撑。

3. 大模型应用由智能辅助向任务决策延伸，安全可信仍是关键约束

随着大模型推理、工具调用和任务规划等能力发展，其在能源智

能巡检中的作用开始由知识获取和信息辅助向任务理解、状态分析和辅助决策拓展。

但能源生产属于安全要求较高的工业场景，大模型输出具有一定不确定性，仍存在模型幻觉、复杂场景推理稳定性不足以及专业知识时效性等问题。因此，现阶段大模型更适合作为任务理解、信息分析和辅助决策能力嵌入既有生产体系，而非直接替代涉及生产安全的关键决策和控制环节。

与此同时，大模型进入电力生产相关环境还需要满足网络安全、数据安全和系统边界等要求。2025 年 1 月 1 日起施行的新版《电力监控系统安全防护规定》（国家发展改革委 2024 年第 27 号令）¹³明确要求电力监控系统坚持“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的结构安全原则，并进一步强化安全接入、监测预警及供应链安全管理等要求。这意味着大模型等人工智能能力接入电力监控相关环境时，需要充分考虑系统部署位置、网络边界、数据交互和权限控制等安全约束。

总体来看，大模型正在增强能源智能巡检对专业知识、现场状态和复杂任务的理解与辅助研判能力，但由辅助决策进一步向更高程度自主决策演进，仍需解决模型可靠性、安全边界、权限控制和过程可审计等问题。进一步看，当认知层完成任务理解和辅助研判后，如何在确保数据安全、网络安全、信息安全的前提下将任务进一步分解，并在不同智能体、巡检装备和业务系统之间进行合理分配与协调，成为能源智能巡检由认知智能迈向系统协同需要解决的下一层问题。

¹³ 国家发展改革委《电力监控系统安全防护规定》（2024 年第 27 号令）

(三) 具身智能拓展执行能力，巡检装备向自主作业进化

1. 多形态巡检装备持续发展，复杂场景覆盖能力不断增强

执行能力是能源智能巡检系统将任务规划转化为现场作业的重要环节。随着自主导航、环境感知、运动控制和机器人等技术持续发展，能源智能巡检逐步形成轨道式机器人、轮式机器人、四足机器人及无人机等多种执行载体。不同装备在移动方式、作业范围、环境适应性、载荷能力和操作能力等方面各具特点，为不同能源场景提供差异化的现场执行手段，各类装备主要技术特征见表 4：

表 4 能源智能巡检主要装备技术路线对比（注：根据企业公开资料、行业案例及相关技术资料整理）

技术路线	成熟度	主要参与者	适用场景与局限
轨道式巡检	技术成熟，已在部分固定场景规模化应用	国自机器人、朗驰欣创、亿嘉和等	适用于变电站等设备布局固定的场景；需预装轨道，灵活性低，无法覆盖无轨区域
轮式巡检	技术较成熟，应用较为广泛	国自机器人、朗驰欣创等	适用于室内平整通道和厂区道路；越障能力有限，无法进入楼梯、格栅等复杂地形
四足机器人	快速发展，处于规模化应用探索阶段	宇树科技、云深处、Boston Dynamics 等	适用于楼梯、坡道等复杂地形环境；负载能力和持续作业能力仍存在限制
无人机巡检	技术成熟，已在输电线路等场景规模化应用	大疆、纵横股份、Skydio 等	适用于输电线路、风电叶片、光伏组件等高空/大面积场景；受天气和空域限制，室内场景不适用

其中，轨道式和轮式机器人技术相对成熟，适用于设备布局相对

固定、通行条件较好的变电站、发电厂等场景；四足机器人、人形机器人具有较强的越障和复杂地形适应能力，可进入台阶、坡道及部分轮式装备难以覆盖的区域；无人机具有覆盖范围广、机动性强等特点，适用于输电线路、风电设备及光伏场站等高处或大范围巡检任务。

不同装备形态的发展扩大了智能巡检的场景覆盖范围，但其能力边界和技术成熟度存在差异。轨道式、轮式装备运行相对稳定，但作业空间受到一定限制；四足机器人和无人机能够拓展复杂地形和大范围巡检能力，但在精细操作等方面仍存在局限；人形机器人具备进一步参与复杂操作任务的潜力，但其可靠性、续航能力和工程适应性仍需持续验证。因此，不同装备并非简单的替代关系，而是根据作业环境和任务需求形成长期并存、能力互补的执行体系。

2. 具身智能推动巡检装备由“移动感知”向“现场作业”延伸

传统巡检机器人主要承担移动巡视、图像采集、红外测温 and 状态监测等任务，整体上以现场信息获取为主。随着视觉感知、环境理解、运动控制以及力觉、触觉等技术发展，机器人与物理环境交互的能力不断增强，巡检装备的功能边界开始由“感知现场”向“参与现场作业”拓展。

在移动作业方面，自主定位、路径规划和动态避障等能力使机器人能够根据现场环境完成自主移动；在操作任务方面，视觉和三维感知可用于识别操作对象及其位置、姿态，力觉和触觉等信息可用于感知机器人与设备之间的接触状态，为阀门旋转、开关操作、按钮按压等任务提供技术基础。由此，巡检机器人的角色开始由信息采集终端进一步向具备一定物理交互和作业能力的执行终端拓展。

但能源生产环境对设备可靠性和作业安全具有较高要求，机器人具备操作能力并不意味着可以直接获得生产操作权限。具身智能装备

进入实际生产环节，还需要综合考虑环境适应性、操作可靠性、安全防护、权限控制以及异常情况下的人工接管等要求。因此，现阶段具身智能在能源巡检中的应用更适合围绕任务明确、边界清晰、风险可控的作业场景逐步开展工程验证。

3. 执行能力多样化对系统组织提出新的要求

随着多形态装备持续进入能源生产现场，执行层能够承担的任务类型不断丰富，但装备能力的多样化也对系统级任务组织提出了更高要求。不同装备在位置、电量、载荷、环境适应能力和任务能力等方面存在差异，同一巡检任务可能需要根据现场状态选择不同执行载体，复杂任务还可能多需要多类装备共同参与。

因此，执行层的关键问题已不仅是“装备能否完成某项任务”，还包括系统能否准确描述装备能力、合理匹配任务需求，并将上层形成的任务规划转化为具体装备能够执行的指令。例如，大范围巡视、高处检测、复杂地形巡检和设备操作分别需要不同类型的执行能力，系统需要结合任务目标、装备状态和现场环境进行合理匹配。

从系统能力链条看，感知层提供设备与环境状态信息，认知层完成信息理解与辅助研判，协同层负责任务分解、能力匹配和资源协调，执行层则将任务转化为具体现场动作。执行装备越多样，对统一能力描述、标准化任务接口、实时状态反馈和异常处置机制的要求越高。这也进一步说明，单纯提升某一类装备的自主能力难以形成完整的系统级巡检能力，需要通过不同层级能力之间的有效衔接形成完整任务闭环。

(四) Y-ICF 构建协同框架，推动分散能力向系统协同演进

1. 面向系统协同需求，构建感知、认知、协同与执行一体化架构

前述分析表明，多模态感知、大模型、多智能体和具身智能等技术正在持续提升能源智能巡检的单项能力，但单项能力提升并不等同于系统级巡检能力形成。面向复杂能源场景，需要进一步将分散的感知、认知、协同和执行能力围绕巡检任务进行组织与衔接，使不同模型、装备和业务系统能够在统一任务链条下协同运行。

基于上述需求，有云数智（河北）科技有限公司联合中国信通院云计算与数字化研究所、华能吉林发电有限公司、东北电力大学等编制单位提出 Y-ICF（Yocloud Intelligent Inspection Collaboration Framework）能源智能巡检集成框架。Y-ICF 面向能源巡检系统协同需求，将系统能力划分为感知、认知、协同和执行四个层次，以智能体作为任务组织和能力连接的重要载体，并设置贯穿各层的安全治理机制，形成从信息获取、状态理解、任务组织到物理执行的完整能力链路，整体架构如图 3 所示：

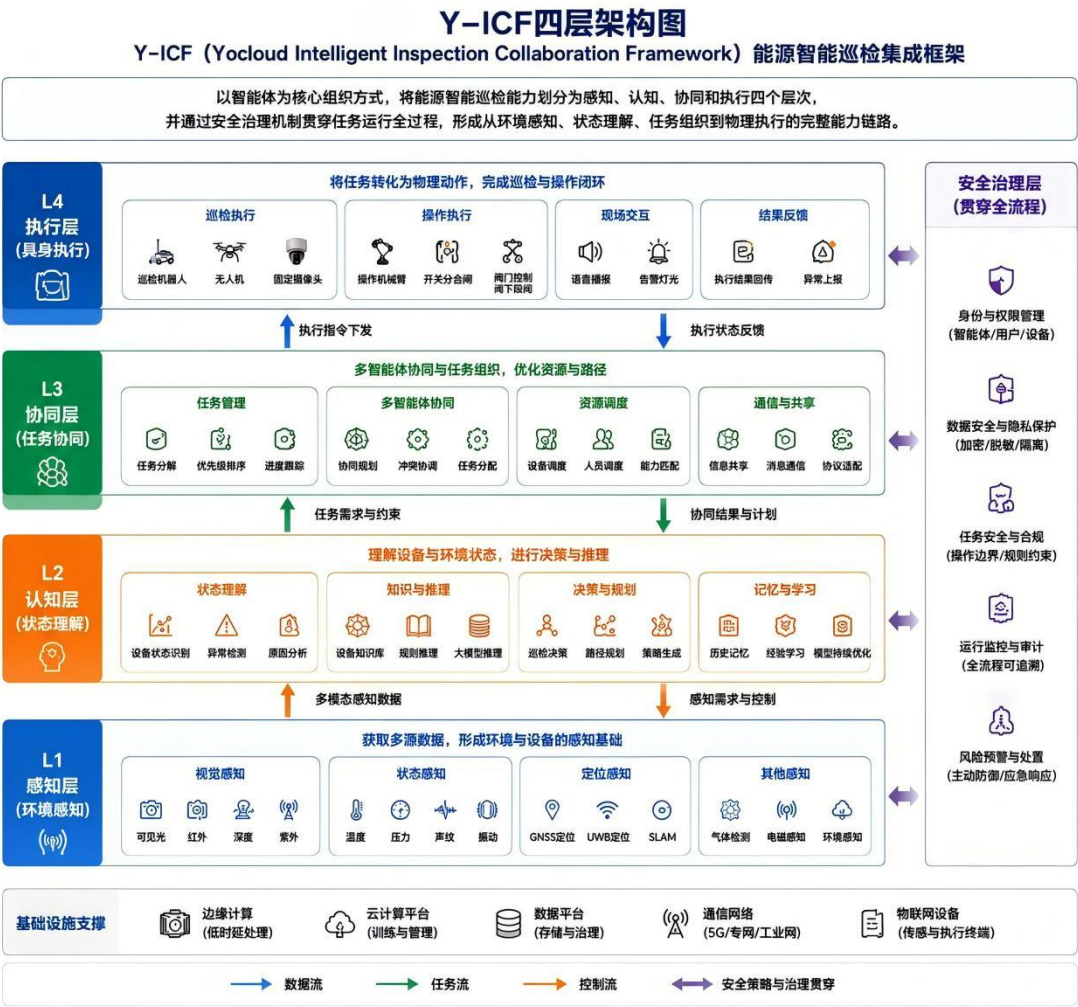


图 3 Y-ICF 四层架构图

其中，感知层负责获取设备与环境状态信息，通过可见光、红外、声学、紫外、超声、气体等多源感知手段形成任务输入；认知层结合大模型、专业知识库等能力，对感知信息进行理解、关联和分析，形成异常研判及任务处理所需的认知结果；协同层面向巡检目标进行任务分解、能力匹配和资源协调，根据任务需求、装备能力和运行状态组织不同智能体及执行装备；执行层连接轮式、四足、人形机器人及无人机等物理装备，将任务指令转化为移动、巡查、检测和操作等现场动作。任务执行结果和设备状态进一步反馈至系统，为后续任务调整和异常处置提供依据。

Y-ICF 的核心并非替代现有感知算法、大模型或巡检装备，而是

建立不同智能能力之间的组织与协同关系。通过智能体连接认知能力、任务流程和执行资源，使原本相对独立的模型、装备和业务能力能够围绕统一巡检目标形成“感知—认知—协同—执行—反馈”闭环，并在安全治理机制约束下实现系统化运行。

2. 以智能体组织任务链路，推动多装备协同向系统级协作延伸

Y-ICF 的核心在于通过协同层将分散的感知、认知和执行能力组织为完整任务链路。传统智能巡检系统较多以设备或功能模块为中心，不同机器人、算法和业务系统按照预设任务分别运行，任务之间的状态共享和动态协同能力相对有限。Y-ICF 进一步以巡检任务为中心，引入智能体作为任务组织和能力连接的重要载体，根据任务目标、现场状态和装备能力，对感知、认知及执行资源进行统一组织和动态调用。

在这一框架下，智能体可根据任务需求承担不同功能角色。感知类智能体负责汇集和处理设备、环境及装备状态信息，为任务运行提供实时状态输入；认知类智能体结合大模型、专业知识和业务规则，对感知结果进行理解、异常研判和任务分析；协同调度智能体围绕巡检目标开展任务分解、能力匹配、资源选择和任务分配，并根据装备状态和任务进展进行动态调整；执行类智能体负责将任务指令与机器人、无人机等物理装备的具体能力进行连接，驱动相应装备完成巡查、检测和操作等现场任务。

不同智能体之间通过任务、状态和结果信息持续交互，形成“任务下发—能力调用—装备执行—状态反馈—动态调整”的运行链路。当现场状态、装备可用性或任务优先级发生变化时，协同层可根据反馈信息重新进行任务匹配和资源调整，使多装备协同由固定流程下的联合运行进一步向面向任务的动态协作拓展，整体协同机制如图 4 所

示:

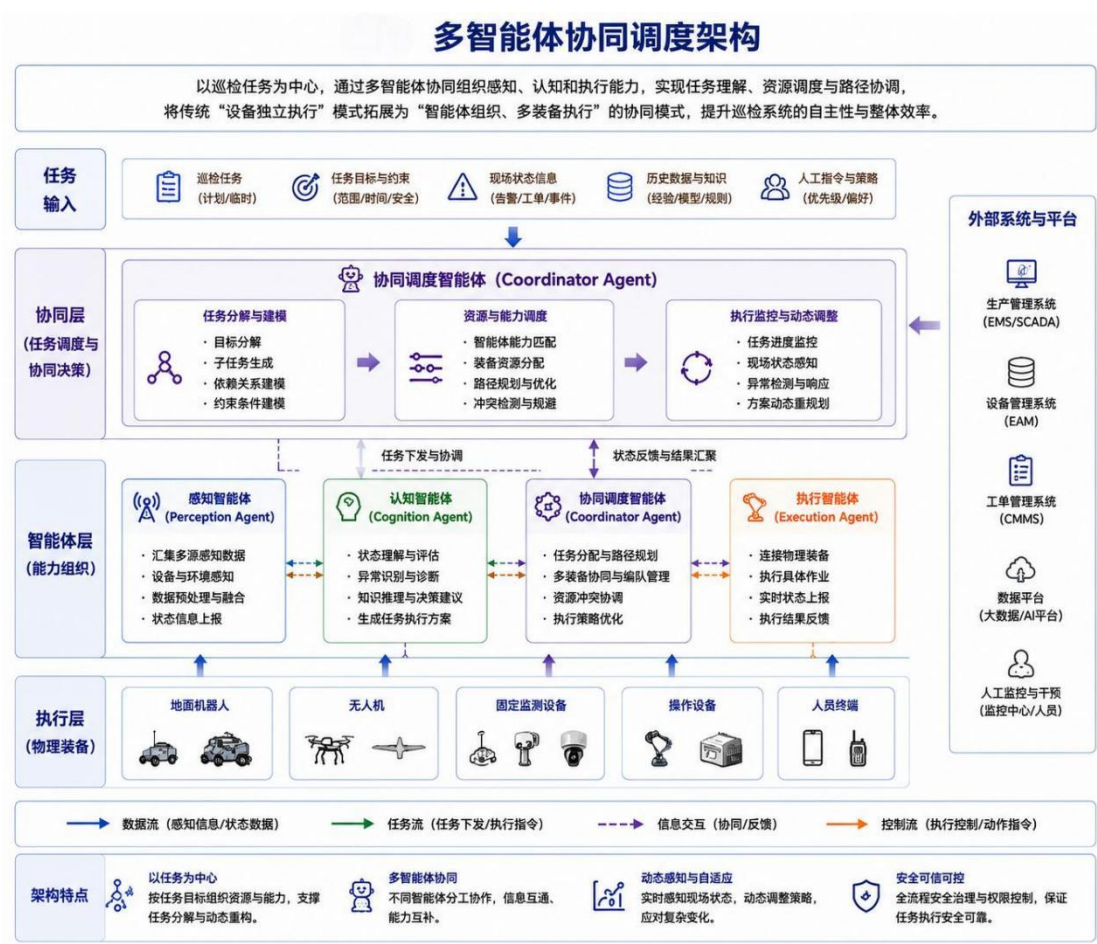


图 4 多智能体协同调度架构

需要强调的是，Y-ICF 中的智能体角色并不与感知、认知、协同和执行四个层次形成简单的一一对应关系。四层用于描述能源智能巡检的能力结构，智能体则作为连接不同能力、任务和资源的组织载体，可根据具体场景和任务需求进行组合与配置。由此，Y-ICF 旨在将传统“设备独立执行、系统分别管理”的运行方式，进一步转化为“任务统一组织、能力按需调用、多装备协同执行、结果持续反馈”的系统级协作模式。

3. 安全治理贯穿任务全过程，在自主协同与安全可靠之间建立边界

能源生产具有较高的安全性、可靠性和合规要求，智能巡检系统

自主能力提升的同时，也需要建立与之相适应的安全约束机制。特别是当大模型和智能体由信息查询、辅助研判进一步参与任务规划和装备调用时，需要明确系统自主运行边界、人工授权条件以及异常情况下的接管机制，避免智能能力扩展超出既有生产安全要求。

基于这一特点，Y-ICF 将安全治理作为贯穿感知、认知、协同和执行四层的横向机制，重点从操作边界、过程审计和人工接管三个方面对任务运行进行约束。

操作边界根据任务类型、设备对象、风险等级和业务权限限定智能体及执行装备的自主操作范围。对于预设安全范围内的低风险任务，系统可按照既定规则自主执行；对于超出权限边界或涉及关键设备操作的任务，则进入人工确认或授权流程。

过程审计对任务生成、分析研判、任务分配、装备调用、人工授权和执行结果等关键环节进行记录，形成可追溯的任务运行链路，为异常分析、责任追溯和系统优化提供依据。

人工接管则面向设备异常、通信故障、任务执行偏差或系统无法可靠判断等情况，为工作人员保留任务暂停、终止、调整和控制权接管能力，防止异常状态继续扩展。

通过将安全约束嵌入任务全过程，Y-ICF 形成“边界预设—过程监控—超限授权—全程留痕—异常接管”的安全治理思路，使智能体和巡检装备的自主能力在明确的规则、权限和人工监督边界内运行，并根据技术成熟度和工程验证结果逐步扩展自主范围。

4. 定位于开放集成与持续验证，为协同智能巡检提供参考框架

Y-ICF 定位于能源智能巡检的能力集成与协同组织框架，不限定具体机器人型号、基础模型或算法实现。感知、认知和执行层可根据不同能源场景接入已有算法、模型、数据和装备，协同层重点负责不

同能力之间的任务组织、资源匹配和状态协调，安全治理机制则对任务运行全过程进行约束。通过保持各层能力的开放接入，Y-ICF 可根据场景需求和技术发展持续扩展系统能力。

同时，不同能源场景在设备类型、生产流程、环境条件和安全要求等方面存在差异，Y-ICF 的适用性仍需通过实际项目持续验证和完善。框架的价值不在于提供适用于所有场景的固定技术方案，而在于提供一种组织感知、认知、协同和执行能力的系统化方法，为能源企业开展智能巡检能力建设、多装备协同和系统集成提供参考。

Y-ICF 通过纵向贯通“感知—认知—协同—执行”能力链路，横向嵌入安全治理机制，并以智能体连接任务、能力与执行资源，形成“任务组织—能力调用—装备执行—状态反馈”的运行闭环。其核心目标是将分散的算法、模型和智能装备由单点应用进一步组织为面向巡检任务的系统级能力，为能源智能巡检由单机自主向系统协同演进提供参考框架。

5. Y-ICF 的优势特点

综合来看，Y-ICF 的优势主要体现在系统协同、开放集成、安全可控和持续演进四个方面。首先，Y-ICF 以巡检任务为中心，通过“感知—认知—协同—执行—反馈”闭环，将原本分散的算法、模型、智能体和巡检装备组织为统一的系统级能力，提升多装备、多能力之间的协同效率。其次，框架采用开放式能力分层设计，不绑定特定基础模型、算法或机器人平台，能够兼容既有系统并根据不同能源场景灵活扩展。再次，Y-ICF 将安全治理贯穿任务全过程，通过操作边界、过程审计和人工接管等机制，在提升自主协同水平的同时保障系统运行安全可控。最后，框架以智能体作为任务、能力和资源之间的连接载体，可根据现场状态和任务需求动态调整资源配置，为能源智能巡

检从单点智能、单机自主向多智能体、多装备系统协同和持续演进提供了统一的参考框架。

三、能源 AI 智能巡检产业应用

能源 AI 智能巡检已在变电站、发电厂、新能源场站等生产场景开展应用。由于不同场景在设备类型、空间环境、作业方式和安全要求等方面存在差异，智能巡检逐步形成面向不同业务需求的技术组合和应用模式。

本部分从平台建设、典型场景和协同应用三个层面梳理能源 AI 智能巡检的产业实践。首先分析智能巡检平台及基础设施建设，明确多类装备、数据和模型接入的系统基础；其次以变电站、发电厂、新能源场站等典型场景为代表，分析当前主要应用方式；最后通过多装备协同等实践，进一步分析智能巡检由单装备应用向多装备协同发展的应用特征。

（一）智能巡检平台加快建设，支撑多类装备接入与应用

1. 云边端架构逐步形成，兼顾集中分析与现场实时处理

随着巡检机器人、无人机和各类感知设备不断进入能源生产现场，智能巡检系统逐步由单一装备应用向平台化部署拓展。面向多设备接入、数据汇聚、模型运行和现场实时处理等需求，“云—边—端”协同逐步成为智能巡检平台的重要技术架构之一。

其中，云端主要承担模型训练与管理、历史数据分析以及跨场站数据汇聚等任务；边缘侧部署于场站或生产区域附近，重点承担现场数据处理、模型推理和实时告警等功能；终端则由机器人、无人机、固定摄像头和各类传感设备组成，负责现场信息采集和巡检任务执行。

云、边、端之间通过数据、模型和任务信息交互，形成从现场采集、边缘处理到集中分析的系统链路，整体架构及数据流如图 5 所示：

云边端协同的核心价值在于根据任务特征合理配置计算和处理能力。模型训练、历史分析和跨场站数据管理可依托集中计算资源完成；对实时性和连续运行要求较高的识别、告警等任务则可在边缘侧或终端侧处理，从而降低现场任务对远程网络和集中计算资源的依赖。

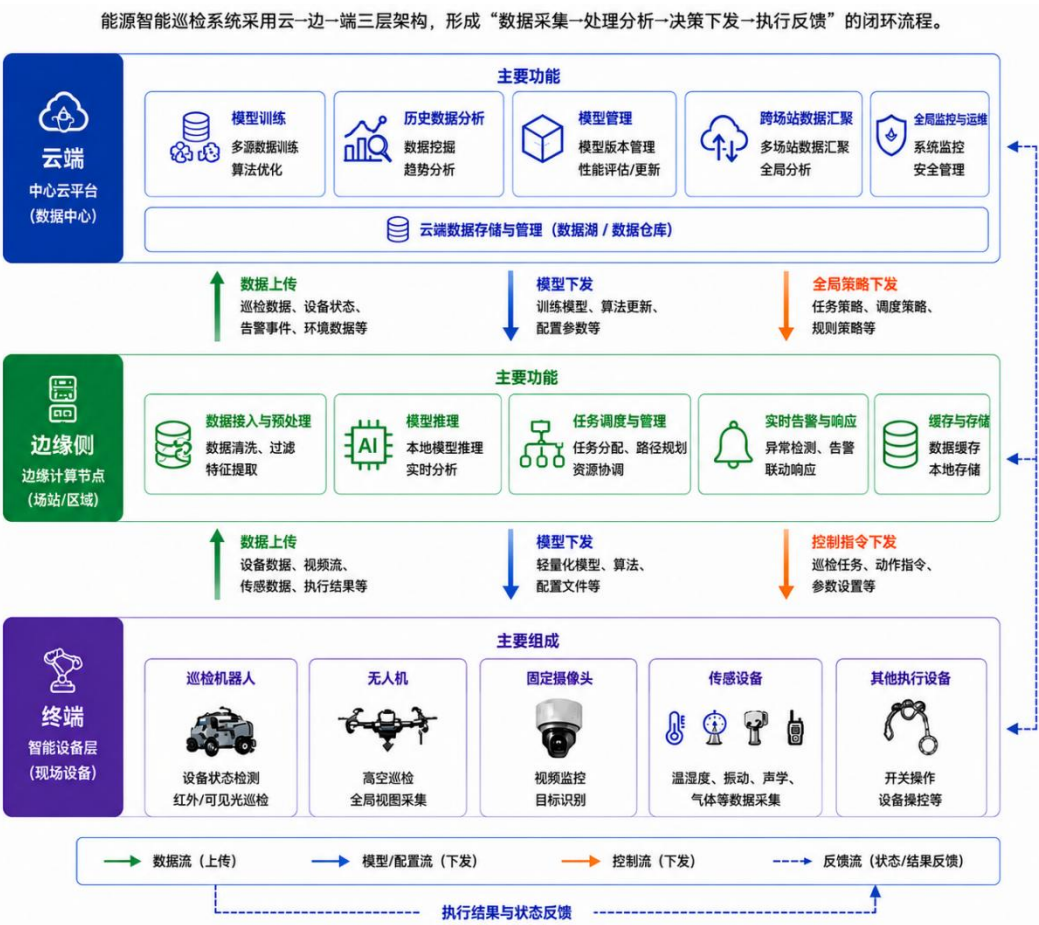


图 5 云边端分层架构与数据流

2. 平台能力由设备管理向数据、模型和任务统一管理拓展

随着巡检装备和智能应用类型增加，平台承担的功能也由设备连接、状态监控逐步向设备、数据、模型和任务等多类资源统一管理拓展，平台开始成为连接现场装备与智能应用的重要基础。

在设备管理方面，平台需要接入机器人、无人机、固定监测设备

和各类传感器，获取设备位置、电量、运行状态和任务状态等信息；在数据管理方面，需要对可见光、红外、声学等多源巡检数据进行汇聚、存储和关联；在模型管理方面，需要支持视觉识别、异常检测等 AI 模型的部署、更新和运行管理；在任务管理方面，则需要完成巡检计划配置、任务下发、执行状态监控、异常告警和结果记录等功能。

由此，智能巡检平台的作用正在由单纯的“设备接入与监控”向“设备—数据—模型—任务”统一管理拓展，为不同巡检装备和智能能力在同一系统中的协同运行提供基础支撑。

(二) 典型巡检场景持续深化，单机智能应用日趋成熟

1. 变电站巡检应用较早，设备状态识别与自动巡查逐步普及

变电站设备布局相对集中、巡检点位较为固定，巡检任务具有较强的规律性，是机器人和人工智能技术较早开展工程应用的电力生产场景之一。当前智能巡检主要围绕设备外观、仪表状态、温度异常和异常声音等内容展开，通过巡检机器人、固定监测设备等方式，辅助完成部分重复性、周期性巡检任务。

在典型应用中，轮式或轨道式机器人可搭载可见光、红外、声学等感知设备，按照预设巡检任务完成现场信息采集，并结合视觉识别等算法开展仪表读数、开关状态和设备外观分析。巡检结果进一步汇集至站端系统，形成状态记录、异常告警和巡检结果，为设备运行状态分析提供数据基础。

随着智能装备、感知算法和相关标准持续发展，变电站智能巡检的应用能力已由移动巡视和数据采集逐步向自动识别、异常告警和结果管理等环节拓展。同时，变电站设备布局相对固定、巡检任务较为规范，也为轮式、轨道式机器人等装备开展自主巡检提供了较好的应用条件。

与此同时，发电侧同样是智能巡检技术较早落地探索的核心领域。早在变电站智能巡检规模化推广阶段，火电企业就已针对锅炉、汽轮机、发电机等核心主设备，开展基于固定传感器与离线巡检仪的状态监测应用，逐步替代部分人工巡检项目。早期发电侧智能巡检聚焦于设备温度、振动、泄漏等关键参数的自动采集，通过在重点区域部署红外测温点、振动传感器、气体监测装置，实现核心设备运行状态的连续感知与异常预警，为后续移动巡检机器人的应用奠定了技术与数据基础。随着技术成熟度提升，发电侧巡检逐步从固定点监测向移动自动巡查延伸，与变电站智能巡检形成协同发展态势。

2. 发电厂巡检环境更加复杂，装备与感知方式呈现差异化配置

与变电站相比，传统火力发电厂生产系统涉及锅炉、汽轮机、输煤、水处理等多个区域，不同区域在设备类型、空间结构和作业环境等方面存在明显差异，对巡检装备的环境适应性、感知能力和安全运行提出了不同要求。

因此，火电场景智能巡检更强调根据具体生产区域和巡检任务进行装备与感知能力组合配置。在道路和通道条件较好的区域，可采用轮式机器人开展设备外观、温度和环境状态巡检；对于存在台阶、坡道等复杂通行条件的区域，可根据任务需要采用四足机器人等装备；针对设备温度、异常声音及环境状态等不同检测对象，还可配置红外、声学、气体等感知手段，形成与具体巡检任务相匹配的技术组合。

这一应用特点表明，智能巡检技术方案需要与具体生产场景相适配。相较于设备布局 and 巡检任务较为规则的变电站，火电厂更需要根据生产区域、设备类型、作业环境 and 安全要求，对巡检装备、感知方式和任务流程进行针对性配置。

除传统火力发电场景外，以风电、光伏为代表的新能源发电场景

同样呈现出显著的差异化巡检需求。光伏电站普遍具有占地面积广、设备数量多、地理环境多样（平地、山地、水面等）的特点，人工巡检效率低、盲区多，且部分复杂地形存在安全风险。当前光伏智能巡检以无人机为核心载体，搭载可见光、红外热成像载荷，可快速完成大面积光伏组件的外观破损、热斑、脏污等缺陷检测；针对集中式光伏电站的升压站、汇流箱等重点区域，可搭配轮式巡检机器人完成设备精细化巡检，形成“空中+地面”的协同巡检模式。

风电场的巡检对象涵盖风机叶片、塔筒、机舱、箱变及集电线路，设备分布分散且高度高、高空作业风险大。风机叶片巡检主要采用无人机搭载高清相机与红外设备，通过精准航线规划完成叶片表面裂纹、腐蚀、雷击损伤等缺陷的自动化检测；塔筒与机舱内部巡检则可采用爬壁机器人、轨道机器人，替代人工完成高空高危作业，实现螺栓松动、油脂泄漏、部件磨损等问题的精准识别。不同新能源场景根据自身资源禀赋与设备特征，形成了差异化的智能巡检技术路径与装备配置方案。

3. 典型场景由“机器替人”向智能识别延伸，但仍以单机任务为主

综合变电站、火力发电厂及新能源电站等多场景应用可以看到，当前较为成熟的智能巡检主要集中在自动移动、数据采集、设备识别、异常告警和巡检记录等环节。机器人已经能够承担部分重复性、环境风险较高或巡检频次较大的任务，视觉、红外、声学等技术则进一步提高了巡检数据自动分析能力。

但从应用方式看，较成熟的方案仍多围绕单台机器人或单类装备设计，巡检路线、任务内容和执行顺序通常提前配置。当一个场站同时部署机器人、无人机以及固定监测设备后，不同装备如何共享信息、

根据任务动态分工，以及异常发现后如何调用其他设备复核和处置，仍需要进一步探索。

这也使产业应用的关注点开始从“单台设备能否完成巡检任务”，逐步延伸至“多类设备能否在同一任务中协同工作”，为多机协同巡检的应用提供了现实需求。

(三) 多机协同应用加速探索，系统级智能逐步走向实践

随着机器人、无人机等巡检装备在能源场站的应用增加，部分项目开始由单台设备独立巡检转向多装备协同。与变电站、发电厂较为成熟的单机巡检相比，多机协同更强调不同装备之间的任务分工、信息共享和统一调度。当前，多机器人协同、空地协同等模式已开始在部分能源场景开展项目验证和应用探索，升压站、新能源场站等成为相关技术的重要实践场景。

1. 升压站开展多机器人协同实践，探索不同装备分工配合

升压站设备类型较多，巡检任务既包括大范围设备状态检查，也涉及部分近距离检测和操作任务，单一机器人在移动范围、环境适应和操作能力方面存在一定局限。针对这一特点，部分项目开始采用不同形态机器人配合完成巡检任务。

2025 年，中国华能集团吉林公司组织实施“DeepSeek 驱动下升压站多移动机器人协同值守关键技术研究”和“能源领域机器人实验室建设”等科技项目，对多机器人协同巡检开展工程验证。项目涉及大模型本地化部署、三维场景重建、自主导航、视觉识别、声纹分析、多机器人协同控制等内容，并配置人形机器人和四足机器人承担不同类型的巡检任务。

在具体任务中，四足机器人主要发挥机动和复杂地形适应能力，

承担较大范围的巡查和状态采集；人形机器人则用于需要近距离检查或操作的任务。两类机器人通过任务调度和状态信息共享进行配合，使不同装备能够根据自身能力承担相应任务。

与传统单机巡检相比，这类项目关注的重点已经不只是单台机器人的识别准确率或自主导航能力，而是不同设备能否在统一任务下完成分工。当一台设备发现异常后，系统可根据任务需要调度其他设备开展复查或后续作业，从而推动巡检方式由设备独立运行向多装备协同转变。从项目建设内容看，两项课题覆盖了环境感知、智能分析、协同控制和机器人执行等多个环节，与第二章 Y-ICF 框架提出的感知、认知、协同和执行四类能力具有较强的对应关系，具体见表 5。

表 5 Y-ICF 框架与升压站机器人协同项目能力映射（注：Y-ICF 为本文提出的能源智能巡检协同分析框架，表中映射用于分析项目能力组成，不代表项目按照 Y-ICF 标准建设）

Y-ICF 层	课题 A（DeepSeek 驱动升压站多机器人协同值守）	课题 B（能源领域机器人实验室建设）
执行层	多机器人协同巡检执行	人形机器人+机器狗本体开发与安装
协同层	多智能体（Agent）调度、协同控制与决策算法	智能运维模型研发平台（支持智能体与 workflow 构建）
认知层	DeepSeek 本地化部署、多源数据融合分析与故障预测	人工智能算法平台（典型工况数据与算法验证环境）
感知层	三维重建、SLAM 导航、视觉识别、声纹分析	多传感器融合实验环境
验收状态	课题相关技术指标达到项目要求，并开展相关知识产权布局	

项目设置的部分考核指标也体现了这种系统建设思路。例如，感知环节包括三维地图构建、仪表读数识别、设备关键部件异常检测和声音异常检测；认知环节包括大模型本地化部署和多源数据分析；协

同环节包括多智能体协同控制与决策；执行环节则由不同形态机器人完成具体任务。相关指标以项目招标文件和验收要求为依据，为多机器人协同巡检提供了工程验证基础。

2. 新能源场站探索空地协同，适应大范围、分散式巡检需求

风电场、光伏电站等新能源场站具有面积大、设备分散、部分设备位置较高等特点，与变电站和发电厂的巡检条件存在明显差异。无人机具有覆盖范围大、机动性较强等特点，因此已成为新能源设备巡检的重要装备之一。

在风电场景中，无人机可搭载可见光、红外等设备，对风机叶片和高空部件进行数据采集，并结合图像识别技术辅助发现裂纹、腐蚀、雷击损伤等异常。地面机器人则可用于塔基设备、场区道路和其他地面设施检查。

光伏电站同样具有大范围巡检需求。无人机搭载红外设备可以对光伏阵列进行快速扫描，辅助发现组件热斑等异常；固定监控设备和地面巡检装备则可承担场区安全、设备状态和重点区域巡查任务。

在此基础上，部分新能源场站开始探索无人机与地面装备配合的“空地协同”方式：无人机负责大范围和高空区域巡检，地面装备负责近距离设备检查，两类设备的巡检结果汇入统一平台进行处理。与升压站的人形机器人、四足机器人协同相比，空地协同采用了不同的装备组合，但解决的问题具有共性，即根据场景和任务特点选择合适的设备，并在统一任务下进行组织。

目前，这类应用仍以项目探索为主，不同装备之间的任务调度、数据共享和接口方式尚未形成统一模式。因此，新能源场站也是后续验证多装备协同技术的重要应用场景。

3. 不同场景技术组合差异明显，协同能力仍处于逐步验证阶段

从现有应用看，能源智能巡检已经形成较为丰富的装备和技术组合，但不同场景的发展阶段并不一致。

变电站设备布局和巡检路线相对固定，轨道式、轮式机器人及视觉、红外等技术应用较早，单机自动巡检具有较好的应用基础；发电厂设备和生产环境更加复杂，需要根据高温、粉尘、复杂通道等条件配置不同装备和传感方式；升压站开始探索人形机器人、四足机器人等不同装备之间的任务协同；风电、光伏等新能源场站则更多利用无人机与地面设备形成互补。不同场景在设备特征、主要技术路线、标准化基础和多机协同进展等方面的差异见表 6。

因此，能源智能巡检很难依靠一种机器人或一套固定方案覆盖所有场景。不同场站需要根据设备类型、空间条件、巡检任务和安全要求选择相应的技术组合。当前较为成熟的能力仍主要集中在设备感知、异常识别和单机自主巡检，多装备协同已经出现工程实践，但在统一接口、任务调度、跨系统联动以及不同场景复制等方面仍有进一步完善空间。

表 6 不同能源场景智能巡检应用特征对比

维度	变电站（通用）	发电厂（通用）	升压站场景	新能源场站
设备特征	设备密集、电压等级高	设备种类多、高危区域多	设备种类多、高危区域多	设备分散、面积大、地形复杂
主流技术路线	轨道式+轮式	轮式+四足机器人（复杂环境适应型）	多形态机器人组合应用探索（轮式、四足、人形等）	无人机为主+地面机器人辅助

标准化程度	较高 (相关巡检机器人及无人机巡检标准体系逐步完善)	中等 (相关设备和巡检标准逐步完善)	中等 (DL/T 系列部分覆盖)	较低 (多装备协同相关标准仍需进一步完善)
多机协同进展	单机为主	单机为主	多装备协同应用探索	空地协同试点
Y-ICF 适用性	较高 (感知、认知能力具备较好应用基础)	较高 (感知、认知能力具备较好应用基础)	较高 (多装备协同场景与四层能力结构具有较强对应关系)	中等 (需结合空地协同特点进行适配)

四、能源 AI 智能巡检面临挑战

能源 AI 智能巡检已在设备识别、自主巡检、多机器人协同等领域开展了较为丰富的实践探索，但从单点项目向体系化应用转变，仍受生产环境、安全要求、场景差异、系统集成和数据治理等因素制约。与一般人工智能应用相比，能源巡检直接进入生产现场，并涉及设备运行和生产安全，对系统可靠性、设备适应性和自主决策边界提出了更高要求。

(一) 复杂能源环境约束突出，协同智能落地难度较大

1. 特殊作业环境对巡检装备适应性提出更高要求

能源生产现场包含高温、粉尘、潮湿、防爆、高电磁干扰等多种复杂环境，不同区域对巡检装备的结构设计、通信方式和安全等级提出不同要求。例如，燃油储罐区、制氢站等防爆区域，相关电子和通信设备需要满足相应的防爆要求；地下空间、电缆隧道以及金属结构密集区域，则可能出现无线信号衰减和通信覆盖不足等问题。

这些环境条件不仅影响单台巡检设备的运行，也会进一步影响多机协同。多机器人协同通常需要持续交换位置、任务和设备状态，当通信质量下降或链路中断时，现有调度机制中的任务分配和状态同步

可能受到影响。因此，相比单机巡检，多机协同对通信覆盖、系统可靠性和异常情况下的运行机制提出了更高要求。

2. 通信可靠性影响协同运行，需要建立异常情况下的任务保障机制

当前多机协同方案较多依赖统一平台或中心节点进行任务调度。在通信条件良好的场景中，这种方式便于掌握设备状态并统一安排任务，但在地下空间、防爆区域和复杂厂区等环境中，通信条件可能成为协同运行的限制因素。

工程实践通常可以通过增加通信节点、优化网络覆盖等方式改善通信条件，但也会增加建设和维护工作。更重要的是，协同巡检不能仅考虑正常通信状态，还需要明确通信中断后的处理方式。例如，当机器人无法与调度平台保持连接时，是继续完成当前任务、转为单机运行，还是返回安全区域，需要根据任务风险和现场条件提前设置相应策略。

因此，多机协同不仅是任务调度问题，还涉及通信、设备和安全机制之间的配合。如何保证系统在异常情况下仍能够安全运行，是协同巡检进一步进入复杂生产区域需要解决的问题。

(二) 场景差异与接口壁垒并存，规模化复制能力不足

1. 不同能源场景需求差异明显，单一方案难以直接复制

能源行业覆盖火电、水电、风电、光伏、核电等多种生产场景，不同场景的巡检对象、空间环境和安全要求存在明显差异。不同能源场景的巡检重点、特殊约束及适配技术路线见表 7。

火电场景需要面对高温、粉尘以及部分防爆区域；水电场景涉及潮湿环境、大坝和狭长空间；风电场景具有设备分散、高空作业和偏远地区运行等特点；光伏电站面积较大，并存在强光、高温等环境因

素；核电场景则具有更加严格的安全和设备准入要求。

这些差异直接影响巡检装备和技术方案的选择。轮式机器人、四足机器人、无人机以及其他特种装备各有适用范围，一个场景中形成的装备组合和巡检流程往往不能原样复制到另一个场景。

因此，能源智能巡检的规模化并不意味着使用完全相同的硬件方案，而更需要在保留共性平台能力的基础上，根据不同场景配置相应的装备、算法和任务流程。这也对巡检系统的模块化和适配能力提出了更高要求。

表 7 不同发电类型智能巡检需求与技术适配分析（注：根据不同发电场景特点、行业应用案例及相关技术资料整理）

发电类型	巡检重点	特殊约束	技术路线适配
火电	锅炉、汽机、输煤系统、化学系统	高温区域、防爆区域、煤粉尘环境	轮式+四足机器人（复杂环境适应型）
水电	水轮机组、大坝结构、闸门启闭设备	潮湿环境、大坝内部狭长空间	轮式机器人+特殊环境适应型机器人
风电	叶片、塔筒、机舱及关键部件	高空作业、偏远地区、复杂气候条件	无人机为主+地面机器人辅助
光伏	组件阵列、汇流箱、逆变器	大面积分布、强光环境、高温运行条件	无人机为主+固定式监控
核电	核岛设备、常规岛设备、辐射监测	辐射防护、极高安全等级、严格的设备准入	特种机器人及远程操作装备

2. 设备与平台接口不统一，跨厂商集成仍需适配

能源智能巡检涉及机器人、无人机、传感器、AI 平台以及生产管理系统等多个环节。不同厂商设备在通信协议、数据格式和控制接口等方面存在差异，当一个场站同时接入多种设备时，通常需要针对

不同设备开展接口适配。类似问题也存在于软件侧。不同 AI 模型和平台在模型调用、数据输入输出和工具接口等方面仍存在差异，而能源企业既有的设备管理、生产管理等业务系统也存在较大的建设差异。

这使得智能巡检项目实施过程中，除算法开发外，还需要投入较多工作完成设备接入、数据转换、系统接口和业务流程衔接。特别是在多装备协同场景中，如果设备状态、任务指令和巡检结果缺少统一的数据表达和接口规范，调度平台就难以直接管理不同厂商的装备。

3. 从项目交付到规模复制，需要提高共性能力复用程度

场景差异和接口问题叠加后，容易形成“一场景一方案、一设备一接口”的项目建设方式。单个项目可以通过定制开发完成交付，但当方案需要向其他场站或其他能源类型复制时，又需要重新进行设备适配和系统集成。

因此，能源智能巡检规模化应用的关键并不是消除不同场景之间的差异，而是区分哪些能力可以共用、哪些能力需要根据现场配置。例如，设备接入、任务管理、模型管理、权限控制等可以形成相对稳定的平台能力，而具体机器人类型、感知设备和巡检流程则根据场景进行配置。这也是智能巡检从项目建设走向规模化应用需要解决的工程问题。

(三) 安全与数据治理约束突出，自主智能应用边界待明确

1. 自主决策能力提升，现有安全管理方式面临新的适配要求

传统能源生产管理体系主要围绕人员操作建立，操作权限、审批流程、操作记录和应急处置均有较为明确的制度要求。当大模型和智能体开始参与异常研判、任务生成甚至装备控制后，原有管理方式需要进一步明确机器自主决策的权限范围。

现阶段，大模型输出仍具有一定的不确定性，在训练数据覆盖不

足或复杂异常情况下，也可能出现判断偏差。因此，在安全要求较高的生产场景中，智能体尚不适合在缺少约束的情况下直接执行关键操作。

较为可行的方式是根据任务风险划分自主权限：对于常规巡查、数据采集等低风险任务，可以提高自动化程度；对于涉及设备操作、生产控制等高风险任务，则保留人工确认和授权环节。当系统出现异常或判断置信度不足时，应能够及时转入人工处理。

2. 决策过程需要留痕，自主运行能力与可审计要求需要兼顾

能源生产不仅要求系统能够完成任务，还要求关键操作能够追溯。当智能体参与任务规划和设备调用后，需要记录任务来源、输入信息、调用工具、执行设备和最终结果等关键过程。

与传统规则系统相比，大模型输出依据和决策过程仍存在一定不透明性，因此安全管理不能只依赖模型本身的“可解释性”，还需要通过工程手段建立可审计机制。例如，对输入数据、模型输出、任务调用、人工授权和设备执行结果进行记录，在出现异常时能够还原任务执行过程。

这意味着大模型和智能体进入能源生产场景后，评价重点不能只有模型准确率，还需要同时考虑权限控制、过程记录、异常处理和人工接管等能力。

3. 数据安全要求较高，跨场站数据利用仍受到限制

巡检过程中会产生设备状态、缺陷记录、图像、声音和运行日志等大量数据，这些数据是训练和优化 AI 模型的重要基础。但能源行业具有较高的网络和数据安全要求，不同系统、场站和企业之间的数据不能简单按照一般互联网应用的方式进行汇聚和共享。

由此带来的直接问题是，不同企业和场站之间的数据共享仍受到

安全、管理和标准等因素限制。单个场站能够获取的数据类型和故障样本有限，特别是一些低频、长尾故障，很难依靠单一项目形成足够丰富的训练数据。

联邦学习、隐私计算等技术为数据不直接集中情况下的联合利用提供了新的技术思路，但其在能源生产环境中的通信条件、数据标准、安全审计以及实际部署成本等仍需要进一步验证。

因此，能源 AI 智能巡检的数据问题不仅是“有没有数据”，更重要的是数据能否在符合安全要求的前提下被规范使用。如何建立数据分类分级、授权使用和安全流通机制，将直接影响模型训练、跨场景优化以及行业共性能力的形成。

(四) Y-ICF 为破解系统性挑战提供协同集成路径

总体来看，上述挑战既包括装备环境适应性、通信可靠性等具体工程问题，也涉及跨厂商集成、跨场景复制、任务协同、安全治理和数据利用等系统性问题。Y-ICF 并非直接替代防爆设计、通信网络建设、设备可靠性提升或数据安全等专项技术，而是针对能源智能巡检中“能力分散、接口异构、协同不足、安全边界不清”等共性问题，提供统一的系统架构和协同组织机制。

通过“感知—认知—协同—执行”四层能力架构，Y-ICF 能够将不同厂商的机器人、无人机、传感器、AI 模型及业务系统纳入统一任务链路，并通过标准化能力接入、任务组织和状态交互，降低多类型设备和异构系统之间的集成复杂度，增强不同场景下共性能力的复用和扩展能力。针对复杂环境下通信波动、装备状态变化及任务优先级调整等情况，Y-ICF 以智能体为任务组织和能力连接载体，可根据实时状态进行任务重分配、资源重新匹配和执行策略调整，使多装备协同由固定流程下的联合运行进一步向面向任务的动态协作演进。

同时，Y-ICF 将安全治理贯穿感知、认知、协同和执行全过程，通过操作边界、权限控制、人工授权、过程审计和异常接管等机制，对大模型、智能体及执行装备的自主运行范围进行约束，为能源生产场景下自主智能能力的安全应用建立明确边界。在数据和模型应用方面，框架也可作为数据分类分级、模型调用、状态记录和跨系统协同提供统一承载机制，为后续结合隐私计算、联邦学习等技术开展跨场站能力优化提供基础。

因此，Y-ICF 的价值并不在于通过单一框架解决所有现场工程问题，而在于将原本分散解决的装备、算法、模型、业务和安全问题纳入统一系统架构进行组织和协同，提升能源智能巡检系统的可集成性、可协同性、可管控性和可扩展性。面向当前能源 AI 智能巡检由单点项目向体系化、规模化应用演进的阶段，有必要依托典型能源场站开展 Y-ICF 项目建设和工程验证，在真实生产环境中持续验证设备接入、智能体协同、异常处置、安全治理和跨场景适配能力，并逐步沉淀接口规范、任务机制、能力组件和实施方法，为后续跨场站复制和行业规模化推广形成可验证、可复用的技术基础与实施路径。

五、能源 AI 智能巡检发展建议

能源 AI 智能巡检正从单机应用向多装备协同拓展，但复杂生产环境、场景差异、系统接口、安全管理和数据利用等问题仍制约规模化应用。结合前述技术发展和产业实践，建议从协同能力建设、场景应用与标准化、安全治理与技术能力提升三个方面持续推进。

（一）强化核心技术与协同能力，推动智能巡检体系升级

当前能源智能巡检已在视觉识别、自主导航和状态检测等单项技术上形成一定基础，下一阶段应重点提升多设备、多系统之间的协同能力。项目建设除关注单机识别精度、续航和运动性能外，还应加强

任务分配、状态共享、异常处置和多设备协作等系统能力评价。针对防爆、地下空间及复杂电磁环境，应提高装备适应性和运行可靠性，并建立通信异常、设备故障情况下的任务保障与人工接管机制。协同能力建设宜结合实际场景分步推进，优先在边界清晰、条件可控的场景开展验证，逐步沉淀设备接入、任务调度和安全运行等共性能力，再向相似场景复制推广；对于差异较大的能源场景，则保留必要的装备与业务适配。

(二) 深化场景应用与标准建设，形成可复制推广模式

能源智能巡检规模化应用需要依托实际场景持续验证。应结合行业政策和高价值场景建设要求，优先选择巡检频次高、人工投入大、作业风险高、智能化需求明确的场景开展项目实践，并建立覆盖任务完成率、系统稳定性、人工干预、异常处置和运维成本等指标的综合评价体系。通过不同场站、不同周期的持续验证，判断技术成熟度和规模化推广条件，同时沉淀可复用的平台能力、设备接口和实施流程。进一步推进机器人、无人机、传感设备和 AI 平台间的接口与数据规范建设，将设备状态、任务指令、结果反馈及异常处理等共性要求与工程验证结合，逐步形成可复制的技术规范，降低跨设备、跨平台和跨场站应用的重复开发与适配成本。

(三) 完善安全与数据治理机制，明确自主智能应用边界

随着大模型、智能体等技术进入能源巡检，需明确模型决策与自主执行的安全边界，按任务风险分级授权，关键设备操作保留人工确认建立权限管控、过程留痕与异常接管机制，在工程验证基础上稳步扩大自主任务范围。数据治理层面，深化巡检数据分类分级与授权使用，推进设备、缺陷等数据规范建设；分阶段建设企业级巡检缺陷样本库与多模态数据集，统一编码、分类、格式与标注规则，沉淀多维

度关联数据；针对典型缺陷及东北地区低温、风雪、结冰等特殊环境，构建分级数据集并形成涵盖识别精度、泛化能力、环境鲁棒性的评测基准，支撑模型迭代与跨场站复制。同时，持续跟踪视觉—语言—动作模型（Vision-Language-Action, VLA）、数字孪生等前沿技术，通过场景验证其成熟度。

总体来看，能源 AI 智能巡检已从单机自动巡检逐步向多装备、多系统协同方向拓展。未来发展重心不再局限于单项技术性能提升，而是转向协同能力升级、场景规模推广、安全治理完善三位一体的体系化推进。随着大模型、多智能体和具身智能等技术持续发展，智能巡检的自主化程度将持续提升，但其应用必须与能源生产的安全要求和业务流程深度适配。本报告提出的 Y-ICF 集成分析框架，可为相关技术能力的系统集成与应用模式的落地实践提供参考，其适用性仍需在能源场景及高寒、风雪等特殊环境中持续验证和完善。

缩略语

AI	Artificial Intelligence	人工智能
Agent	Intelligent Agent	智能体
RAG	Retrieval-Augmented Generation	检索增强生成
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	同步定位与地图构建
API	Application Programming Interface	应用程序编程接口
VLA	Vision-Language-Action	视觉—语言—动作模型



有云数智（河北）科技有限公司
中国信通院云计算与数字化研究所
华能吉林发电有限公司
东北电力大学

2026年9月