

一种基于AI视觉与虚拟电子围栏的核电站相位级智能管控系统研究

张国旗 王铭睿 唐浩杰

大亚湾核电运营管理有限公司 广东 深圳 518124

摘要: 针对核电站检修作业中传统物理围栏与人工监护模式存在的灵活性差、成本高昂、响应滞后及精细化不足等问题, 本文提出一种基于AI视觉与虚拟电子围栏的核电站相位级智能管控系统。该系统通过“AI摄像头+扬声器+虚拟电子围栏+后台管理系统”的集成架构, 可实现从“现场布控、行为识别、预警响应”到“自动监管、持续监督”的全流程数字化管控。系统创新性地将管控区域细化至“机组-相位”级别, 并结合AI行为识别与语音播报技术, 有效解决了“走错间隔”等重大安全风险。计划在某某核电站进行试点应用, 该系统可将区域布控时间从4小时缩短至2分钟, 人工监护成本降低50%, 违规行为识别响应时间 ≤ 2 秒, 漏监率降低80%。研究结果表明, 该系统可显著提升核电站检修作业的安全性及效率, 为核电行业智能化转型提供了可复制、可推广的安全管理范式。

关键词: 核电站; 智能管控; AI视觉; 虚拟电子围栏; 相位级; 安全监护

引言

核电站作为国家能源体系的重要组成部分, 其安全稳定运行直接关系到国家安全与社会稳定。在核电站的日常运营中, 设备检修是保障其长期可靠运行的关键环节。然而, 检修作业环境复杂, 涉及高电压、强电流等高风险区域, 对作业人员的准入和行为管控提出了极为严苛的要求。传统的检修安全管控模式主要依赖于物理隔离(如铁马、围栏)和人工监护。这种模式虽然在一定程度上起到了隔离作用, 但随着核电技术的不断发展和设备复杂度的日益提升, 其固有的局限性愈发凸显。

首先, 物理围栏的部署与撤除需要耗费大量的人力和时间, 缺乏灵活性, 难以适应多机组、多相位交叉作业等动态变化的检修场景。其次, 人工监护不仅成本高昂, 而且监护人易因疲劳、注意力分散等因素导致漏监, 无法实现对违规行为的实时识别与预警。此外, 传统的监控系统多为“事后查证”型, 缺乏AI智能识别与实时干预能力, 无法在危险发生前进行有效阻断。据相关数据统计, 因“走错间隔”等人为失误引发的潜在安全事件在核电行业时有发生, 对核安全稳定运行构成严重威胁。

为应对上述挑战, 以人工智能、物联网为代表的数字化技术为核电安全管理提供了新的解决思路。本文旨在探讨一种基于AI视觉与虚拟电子围栏的核电站相位级智能管控系统。该系统通过构建一套集“感知、识别、预警、管控”于一体的智能化平台, 实现对检修作业区域和人员行为的全方位、精细化、实时化管理, 以期从根本上提升核电站检修作业的安全水平, 推动核电行业

向数字化、智能化转型。

1 传统管控技术的不足

当前, 核电站检修作业的安全管控主要依赖于物理隔离和人工监护相结合的传统模式。尽管该模式在过去发挥了重要作用, 但在面对日益复杂的作业环境和更高的安全标准时, 其弊端日益显现, 主要体现在以下三个方面:

1.1 物理围栏灵活性差, 难以适应动态作业需求

在传统的检修作业中, 为确保非授权人员不误入高风险区域, 通常采用铁马、警示带等物理设施进行硬隔离。然而, 这种方法存在显著的灵活性不足问题。铁马围栏的搬运、组装和拆除完全依赖人工, 是一项耗时耗力的工作。例如, 在开关站等广阔区域进行检修时, 布置和撤除围栏可能需要数名工作人员花费数小时才能完成。这不仅增加了检修的准备和收尾时间, 降低了整体作业效率, 而且在面对临时变更作业区域或多点交叉作业时, 物理围栏无法快速响应和调整, 形成了管控的“时间窗口”和“空间盲区”。此外, 物理围栏本身不具备身份识别和权限验证功能, 无法从根本上阻止有意的或无意的闯入行为, 安全风险依然存在^[1]。

1.2 人工监护成本高且漏监偶发, 实时预警能力缺失

人工监护是传统安全管控的另一核心手段。为每个高风险作业点配备专职监护人, 不仅人力成本巨大, 而且监护效果受人为主观因素影响极大。监护人员需要长时间保持高度集中, 极易产生疲劳, 从而导致注意力不集中, 出现漏监、误判等情况。例如, 当作业人员出现未佩戴安全帽、未正确使用安全带等违规行为时, 监护

人可能因短暂分神而未能及时发现和制止。更为关键的是，传统的视频监控系统大多仅作为“事后追溯”的工具，缺乏AI智能识别与实时预警能力。系统无法自动识别画面中的违规行为并发出警报，导致从违规行为发生到被发现、再到被制止之间存在较长的时间延迟，错过了最佳的干预时机，无法实现真正的主动安全防御。

1.3 区域管控精细化不足，“走错间隔”风险突出

核电站的设备布局极为复杂，尤其是在开关站等区域，往往存在多机组、多相位（如1台机组含3个相位）设备密集排列的情况。传统的管控方式通常以某个大型区域为单位进行隔离，缺乏对“机组-相位”这一精细化层级的精准管控能力。这种粗放的管控模式易导致作业人员在复杂的作业环境中误入非检修区域，即“走错间隔”。一旦人员误入带电的或正在运行的设备区域，将可能引发严重的人身伤亡和设备损坏事故。因此，如何实现检修区域的精细化、动态化划分和管控，是杜绝“走错间隔”风险、提升核电本质安全水平的关键所在。

2 系统总体设计与架构

为解决上述问题，本文提出一种基于AI视觉与虚拟电子围栏的核电站相位级智能管控系统。该系统旨在通过数字化、智能化手段，重构检修作业的安全管控流程，实现从“人防”到“技防”的根本性转变。

2.1 设计理念与目标

本系统的设计理念是“精准识别、实时预警、动态管控、数据驱动”。其核心目标是：

提升安全性：通过AI实时识别和预警，将安全隐患

消除在萌芽状态，杜绝“走错间隔”等重大风险。

提高效率：以虚拟围栏替代物理围栏，实现“秒级”布控，大幅缩短检修准备时间。

降低成本：减少对人工监护的依赖，降低人力成本。

实现精细化管理：将管控颗粒度细化至“相位”级别，满足复杂场景下的精准管控需求。

2.2 系统技术架构

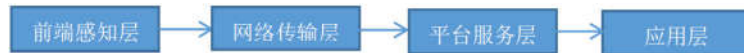
系统采用分层架构设计，主要由前端感知层、网络传输层、平台服务层和应用层构成。

前端感知层：作为系统的“眼睛”和“嘴巴”，主要包括AI高清摄像头和定向扬声器。AI摄像头负责采集作业现场的实时视频流，并进行初步的边缘计算分析；扬声器则用于接收后台指令，对现场人员进行语音播报和警示。

网络传输层：利用核电站现有的有线或无线（如4G、5G）网络，将前端采集的视频数据安全、稳定、低延迟地传输至后台管理平台。

平台服务层：这是系统的“大脑”，部署在后台服务器上。它集成了AI算法引擎、业务逻辑处理、数据存储与管理等核心功能。AI算法引擎负责对视频流进行深度分析，包括区域入侵检测、人员行为识别（如未戴安全帽、未系安全带）等。

应用层：为管理人员提供直观的人机交互界面。管理人员可以通过PC端或移动端应用，实时查看现场画面、配置虚拟围栏、设置管控规则、接收报警信息、查询历史记录和导出分析报告。如图一所示：



图一 系统架构层级图

3 系统核心功能与关键技术

本系统的核心竞争力在于其智能化的管控功能和一系列关键技术的创新应用，可实现对传统模式的全面升级。

3.1 虚拟电子围栏的动态构建与权限管理

系统以虚拟电子围栏完全取代了传统的铁马等物理围栏。管理人员可以在后台管理系统中，通过简单的鼠标拖拽操作或者手机APP端手动绘画，在实时视频画面上快速绘制出任意形状和大小的管控区域。这一过程仅需数秒至数分钟，相较于传统方式耗时数小时，效率提升显著。更重要的是，虚拟围栏具备动态调整能力，可根据作业计划的变更实时修改区域范围和生效时段。系统支持为不同区域设置不同的权限规则，例如，只有经过授权的“工作组成员”才能进入特定区域。当AI摄像头识别到人员接近或进入虚拟围栏时，会立即联动后台进

行身份验证。

3.2 AI行为识别与多模态实时预警

这是系统实现主动安全防御的核心。系统搭载了基于深度学习的AI算法，能够对视频画面中的人员行为进行7x24小时的自动分析。

区域入侵识别：当系统识别到未经授权的人员（非工作组成员）进入虚拟围栏区域时，会立即触发一级报警。后台系统会弹出报警画面，并通过现场扬声器自动播报语音提示，如“您已进入3号机ABC相位区域，请确认工作区域！”，同时通知后台管理人员进行人工复核和干预。

违规行为识别：系统能够精准识别多种典型的违规行为，包括但不限于：未佩戴安全帽、未正确使用安全带、人员倒地等。一旦识别到此类行为，系统会立即触

发二级报警，并通过现场扬声器发出针对性更强的语音警告，如“请正确佩戴安全帽！”，督促作业人员立即纠正。这种“视觉识别+语音播报”的多模态协同方式，可实现对违规行为的即时发现、即时提醒和即时纠正，将风险扼杀在摇篮里^[2]。

3.3 相位级精细化管控与防“走错间隔”机制

针对核电站“走错间隔”的重大风险，本系统创新性地提出了“相位级”精细化管控方案。系统支持在同一个作业点内，为不同机组（如3号机组、4号机组）及所涉及相位（如ABC三相）设置独立的虚拟围栏和管控策略。结合AI的人员识别与定位技术，系统可以精确判断作业人员当前所处的具体“机组-相位”位置。当系统检测到某位作业人员从授权的检修区域（如3号机ABC三相）移动至非授权区域（如4号机ABC三相）时，会立即判定为“走错间隔”风险，并触发最高级别的声光报警和语音提示，如“您已进入4号机ABC三相区域，请核对作业位置！”，有效防止了因人员走错位置而引发的恶性事故。

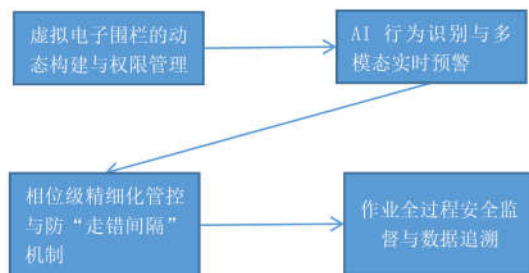
3.4 作业全过程安全监督与数据追溯

系统可实现对检修作业从人员准入、作业过程到完工退出的全生命周期闭环管理。

准入验证：在作业人员进入管控区域前，可通过系统终端进行身份和资质验证。

过程监督：在作业过程中，系统持续进行AI视频分析，记录所有人员的行为轨迹和关键事件。

数据追溯：所有视频录像、报警记录、人员进出日志等数据均被完整保存。管理人员可以随时调阅历史数据，对安全事件进行回溯分析，查找管理漏洞。系统还能自动生成安全分析报告，为持续改进安全管理流程提供数据支撑。如图二所示：



图二 智能作业安全管控流程图

4 未来试点应用分析

该技术计划在某某核电站开关站区域进行试点应用。

4.1 应用场景描述

试点项目聚焦于核电站开关站的检修作业。该区域设备密集，涉及3号、4号等多个机组，且每个机组又分为A、B、C三个相位，作业环境复杂，是“走错间隔”风险的偶发区。传统的管控方式在此场景下面临巨大挑战。

4.2 预计效果评估

系统将来会取得显著效果，具体体现在以下几个方面：

安全显著提升：系统会大幅降低运行期间“走错间隔”的风险事件。AI对违规行为的识别准确率超过95%，响应时间 ≤ 2 秒，可实现对安全风险的实时、主动防御。同时管理人员会借助系统的应用极大地增强了现场的安全管控能力，降低了人为失误的概率。

经济效益明显：

成本节约：虚拟围栏替代物理围栏，年省围栏费用约1万元；减少专职监护，单台机组年省人工成本约10万元。

效率提升：区域布控从平均4小时/区域缩至2分钟/区域，效率提升超百倍；单次检修工期缩短约5%。

管理效益优化：系统生成的数字化记录与报告，推动安全管理从“经验驱动”转“数据驱动”，助力管理决策更科学、作业流程与资源配置更优化。

5 结束语

本文针对核电站检修痛点，提出基于AI视觉与虚拟电子围栏的智能管控系统。该系统实现“相位级”精细管控与实时预警，有效提升本质安全，具备显著经济与社会效益，值得在核电行业推广。

参考文献

- [1]肖少剑,朱红岷.计算机视觉在电网远程智能巡视中的应用[J].电工技术.2025,(24).DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2025.24.047.
- [2]田舒铭,刘颖超,孙叶,等.对变电站智能巡视技术的几点探讨[J].建筑工程技术与设计.2018,(17).