

主标题：基于朗坤苏畅工业互联网平台的运行优化应用

副标题：报警更全面，诊断更精准

江苏国信扬州发电有限责任公司（以下简称“国信扬电”），总装机容量为252万千瓦，是江苏省内首家拥有4台63万千瓦机组的特大型火力发电企业。为了满足电网不断增加的调峰需求，机组更高的节能降耗、环保减排等要求，国信扬电和朗坤合作企业数字化创新项目——智慧运行系统，打造一个满足智慧电厂总体规划要求、发电集控运行急需、智能辅助决策的智能监盘产品，以电厂实时/历史数据为基础，通过工业互联网平台，将智能算法和设备运行机理规则相融合，结合专家知识，实现设备关键参数的劣化分析和设备故障预测，将被动等待故障发生转变为故障的提前预警。

一、项目概况

1. 项目背景

电力产业是国民经济的基础产业，在经济发展过程中发挥着非常重要的作用。近年来，国务院、发改委、能源局陆续出台了“十四五”规划、《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》、《电力发展“十三五”规划》、《新时代的中国能源发展》白皮书等一系列政策文件，推动大数据、人工智能等信息技术和电力产业的深度融合。

在“双碳”目标提出后，火电机组面临的电网调峰需求不断增加，同时机组在节能降耗、碳减排等方面要求也越来越高。在传统的监盘操作模式中，DCS 控制逻辑绝大多数采用 PID 调节，存在部分协调控制能力弱、调节性能差的问题；而且 DCS 报警逻辑大部分为了设备安全保护设置，参数报警值远离正常运行范围，运行人员监盘过程中，要熟知各个参数的跳闸值、报警值、不同工况运行范围以及设备带病运行时的参数偏离值。因此在面对机组运行工况频繁波动、环保压力日益严峻以及设备长期服役存在隐患等复杂情况下，运行人员存在监盘压力大、参数异常发现晚、故障判断不够及时等问题。

江苏国信扬州发电有限责任公司（以下简称国信扬电）一期 $2 \times 630\text{MW}$ 燃煤发电机组投产于 1998 年，二期两台国产超临界燃煤发电机组投产于 2006 年，经提参数扩容改造后改造为 $2 \times 650\text{MW}$ 超临界机组。虽然四台均为 60 万千瓦级机组，但是由于投产较早，受限于当时的技术，现场测点少、监测手段少，而且系统大多是通过黑匣子的方式写回 DCS 控制，运行人员对这种控制原理无法理解，遇到问题分析不够透彻。

在电力企业全面推进数字化转型之际，应充分利用运行人员丰富的运行经验，充分挖掘海量运行数据中的价值，设计出一套符合生产现场运行需要的智慧运行系统，辅助值班人员监盘、判断、操作指导及运行优化等工作，解放其一部分烦琐的脑力和体力劳动，固化全体集控人员的运行经验，实现“人防”向“技防”的转变，将更多精力投身于探索更加安全稳定、清洁高效的火电发展道路。

综上所述，传统的监盘模式已经不能适应日趋复杂的安全、环保、经济等各方面的精细化要求。所以，无论是从应对外部形势变化的需要，还是从集控运行自身发展，开展智慧运行系统的研究势在必行。

2. 项目简介

智慧运行系统依托工业互联网平台，利用大数据分析、人工智能和专家系统等手段对电厂历史运行、试验调整等数据进行机器学习，将电厂运行知识和经验进行数字化、模型化，为电厂机组、系统、设备和参数建立监督模型，通过模型预测实现多种工况下运行参数的智能预警和机组设备的优化诊断，并提供相应的操作指导，辅助运行人员进行异常处理，降低机组设备发生故障的概率和风险。

项目建设内容主要包括国信扬电数字孪生建模、大数据模型算法库建设、机理模型函数组件库建设、监盘预警模型建设、专家知识库建设和监盘报警展示页面开发。

3. 项目目标

智慧运行系统是利用大数据分析、人工智能和专家系统等手段对电厂历史运行、试验调整等数据进行机器学习，将电厂运行知识和经验进行数字化、模型化，为电厂机组、系统、设备和参数建立监督模型，通过模型预测实现多种工况下运行参数的智能预警和机组设备的优化诊断，并提供相应的操作指导，辅助运行人员进行异常处理，降低机组设备发生故障的概率和风险。

主要建设目标如下：

1、打造电力行业工业互联网平台，支撑智慧运行系统稳定高效运行

建设适用于电力行业的工业互联网平台，具有较强的先进性、稳定性与支撑能力。具备工业大数据实时采集、边缘计算预处理、海量时序数据存储、大数据建模、机理建模、预警分析、专家知识库等功能，支撑智慧运行系统稳定高效运行，同时支持横向纵向业务集成和后期扩展，促进电力企业数字化转型。

2、打造智慧运行系统数据服务中心

数据服务中心集大数据实时采集、边缘计算预处理、时序数据存储于一体，具备从数据采集、存储，到数据清洗、筛选，以及数据质量判断、质量评价一整套完整的数据管理能力。通过从 SIS 侧或 DCS 侧采集机组运行数据，在边缘层通过智能网关进行数据预处理后，进行数据的存储。数据服务中心提供通用数据接口，提供准确、可靠的实时、历史查询数据服务功能。

3、多层次数字孪生建模技术，打造数字孪生建模平台

利用多层次数字孪生建模技术，构建“电厂-机组-专业-系统-设备”多层次的电厂数字孪生体。数字孪生建模平台以标准化编码构建通用系统模型，提高模型复用效率。从顶层设计出发，面向电力行业构建了包含行业、专业、设备类型在内的通用编码，并逐步细化到具体参数，实现测点编码的多层级、标准化，可快速进行复用。

4、建立图形化建模平台，实现机理模型和数理模型的融合

基于图形化建模平台，利用“拖拉拽”的方式，实现数据的采集、清洗，模型训练和发布，降低 AI 技术的使用门槛，实现“零代码”的机理模型和数理模型构建；同时满足机理模型调用数理模型，实现智慧运行系统的机理和数理模型双驱动。

5、建立报警调度中心，实现报警信息的调度于抑制

通过报警调度中心实现报警的统一调度管理。支持报警屏蔽功能，避免同一故障产生的多条次生报警淹没源头报警，造成运行人员无法及时判定故障；支持报警结果调用，模型产生的报警结果可被其他模型做为输入条件调用。

6、构建与监盘模型相结合的专家知识库，建立智慧运行系统指导中心

通过对电厂运行规程、运行经验、故障处理方案等知识的结构化处理，建立与监盘模型相关联的专家知识库，报警触发时及时推送操作指导和优化方案，辅助运行人员进行异常处理。实现监盘异常及时告知、及时处理的效果，提高机组运行的安全性和经济性。

7、研发基于工业互联网平台的智慧运行系统

智慧运行系统基于工业互联网平台，结合大数据分析、边缘计算、人工智能等技术，挖掘机组运行数据价值，将运行人员对运行监盘、分析、判断、操作全过程的运行经验融入到智能算法当中，通过机器学习的方法固化运行经验和操作步骤，最终达到逐步代替人分析、判断和操作。智慧运行系统通过电厂-机组-专业-系统-设备进行分级监盘，涵盖三大专业、38 个系统，实现对机组参数异常和设备故障的全覆盖。

二、项目实施概况

1. 项目总体架构和主要内容

(1) 项目总体架构

工业互联网平台集工业大数据实时采集、边缘计算预处理、海量时序数据存储于一体，实现数据互联，数据融合，智能决策和资源共享。

智慧运行系统以电厂 DCS 的实时/历史数据为基础，通过边缘层的物联网平台实现数据的实时接入，在 PaaS 层通过数据智能平台、数字孪生建模平台和应

用开发平台，实现可视化建模、数据实时计算和专家知识管理等，为智慧运行系统的智能预警、故障诊断和决策分析提供数据支撑。

项目总体架构图如下图所示：

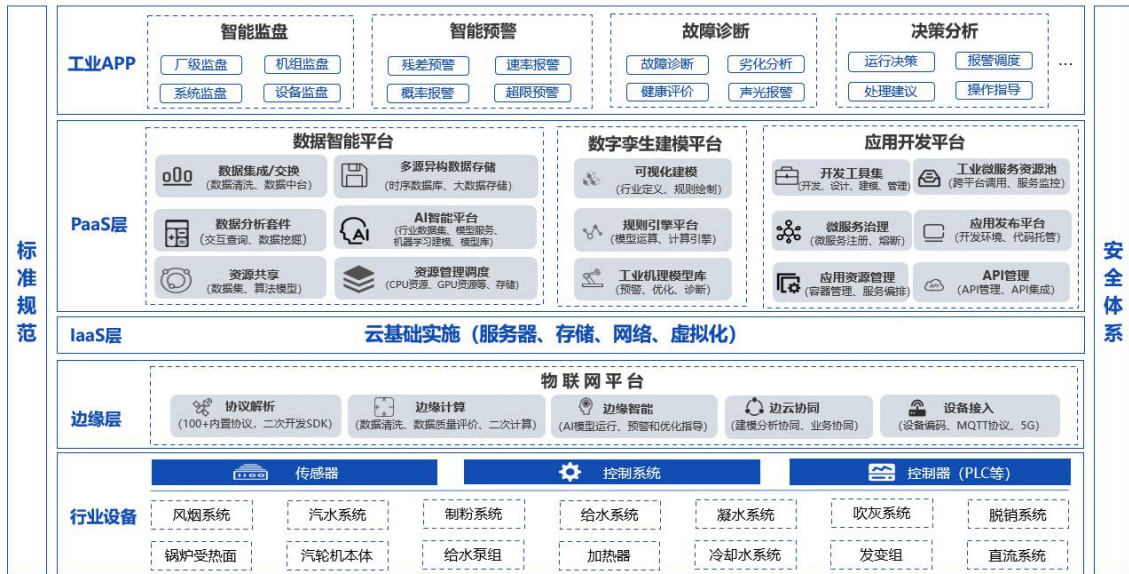


图 1 项目总体架构图



图 2 智慧运行系统业务架构图

(2) 主要内容

基于工业互联网平台的电厂智慧运行系统于 2020 年 12 月开始建设，朗坤智慧组建项目实施小组入驻国信扬电，国信扬电安排脱产的运行人员配合系统开发。双方共同成立智慧运行系统开发中心，组建联合开发小组，完成项目蓝图设计、制定项目实施细则、发布考核办法、明确双方工作职责，坚持周例会和月例会制度，及时解决项目实施中存在的问题，按计划圆满完成了关键技术研究 and 项目实施。项目主要建设内容包括：

（1）完成了国信扬电数字孪生建模平台建设

根据电厂实际组织结构，采用灵活的“电厂-机组-专业-系统-设备”五个层级分步建模的方式，构建孪生虚拟电厂；同时面向电力行业构建了包含行业、机组、专业、系统、设备类型在内的通用编码，并逐步细化到具体参数，实现测点编码的多层级、标准化，可快速进行复用。

数字孪生建模平台支持图形化的机理建模和大数据建模。平台提供数学函数、水蒸气函数、振动函数、参数趋势函数、统计函数、AI 函数、比较函数等函数组件和常用的逻辑规则组件，实现机理模型的快速构建；平台融合分类算法、聚类算法、回归算法、深度学习算法等多类智能算法，实现数理模型的快速训练和发布，同时支持在机理模型中调用数理模型。

（2）开展关键技术研究，研发多种适用于监盘模型的智能算法

开展分布式时序数据库技术、多层级数字电厂建模技术、大数据计算引擎技术、数据智能技术、图形化建模技术、工况分析技术等关键技术研究，为智能算法、监盘模型的研发提供技术支撑。

研发了基于局部波峰波谷与多项式拟合的工业数据趋势识别方法、基于滑动窗口的多元时间序列缺失值填充方法等多种数据挖掘方法，实现了电厂海量历史数据的自动采集、清洗和相关性分析等功能；研发了电站锅炉效率对标优化的数据分析方法、参数周期性波动的监测方法、参数晃动监测方法、基于 GMM 与 EM 算法的设备参数劣化分析方法等适用于电厂变工况的智能算法，实现了机组全系统关键参数异常的快速判断和预警功能。

完成多个函数组件和逻辑规则组件开发。在监盘模型构建过程中，研发了变化速率、首尾差值、均值滤波、小时均值、参数质量判断、参数晃动函数、最优

值函数等 8 个函数组件，新增 M/N、信号保持、R/S 触发器等 4 个逻辑规则组件，满足不同场景的建模需求。

(3) 完成了单机组 1000+ 监盘模型构建

通过图形化建模工具进行机理模型和数理模型建模，完成了基于数理和机理双驱动的 1089 个的预警模型，数理模型占比 30% 以上。模型覆盖锅炉、汽机和电气三大专业，其中锅炉专业模型 620 个，汽机专业模型 285 个，电气专业模型 184 个。

根据业务应用场景，归纳了 7 种综合的、通用的监盘诊断逻辑组，包括偶发类诊断逻辑、缺陷类诊断逻辑、定期类诊断逻辑、长周期诊断逻辑、对比类诊断逻辑、自控类诊断逻辑和变工况诊断逻辑。

(4) 建立了与预警模型相关联的专家知识库

通过对电厂运行规程、运行经验、故障处理方案等知识进行结构化处理，与监盘模型进行关联，建立了模型可共享复用的智慧运行系统专家知识库，知识库包括监盘预警模型、特征参数、故障模式、故障现象、故障原因、处理措施等知识，在监盘系统进行预警时，及时推送操作指导和优化方案。

(5) 完成了基于工业互联网平台的智慧运行系统研发

该项目提出了基于机理规则和 AI 算法深度融合的智慧运行系统总体架构，构建了多层级的电厂，研发了从电厂海量实时/历史数据中快速提取关键特征参数的数据挖掘方法，开发了多种适用于电厂变工况的智能算法，构建了覆盖机组各类异常的监盘预警模型，建立了监盘模型相关联的专家知识库，研发了基于工业互联网平台的智慧运行系统，并在国信扬电成功应用。

2. 网络、平台或安全互联架构

平台从网络传输、设备接入、身份与访问管理、应用架构、基础设施和后期运维多个层面提供安全控制机制，有效保障平台的信息安全，满足等保三级安全评测需求，并提供评测支持服务。

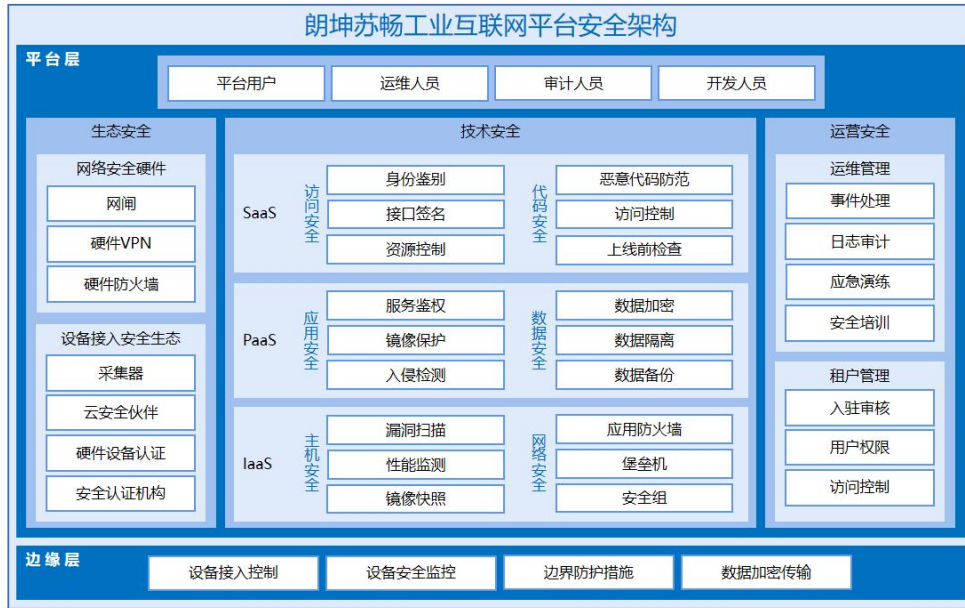


图 3 朗坤苏畅工业互联网平台安全架构

3. 具体应用场景和应用模式

基于工业互联网平台，建立数据中心、模型中心、报警调度中心、监盘中心和指导中心，打造“一个平台”、“五个中心”，实现监盘智能化。

系统业务架构如图所示：

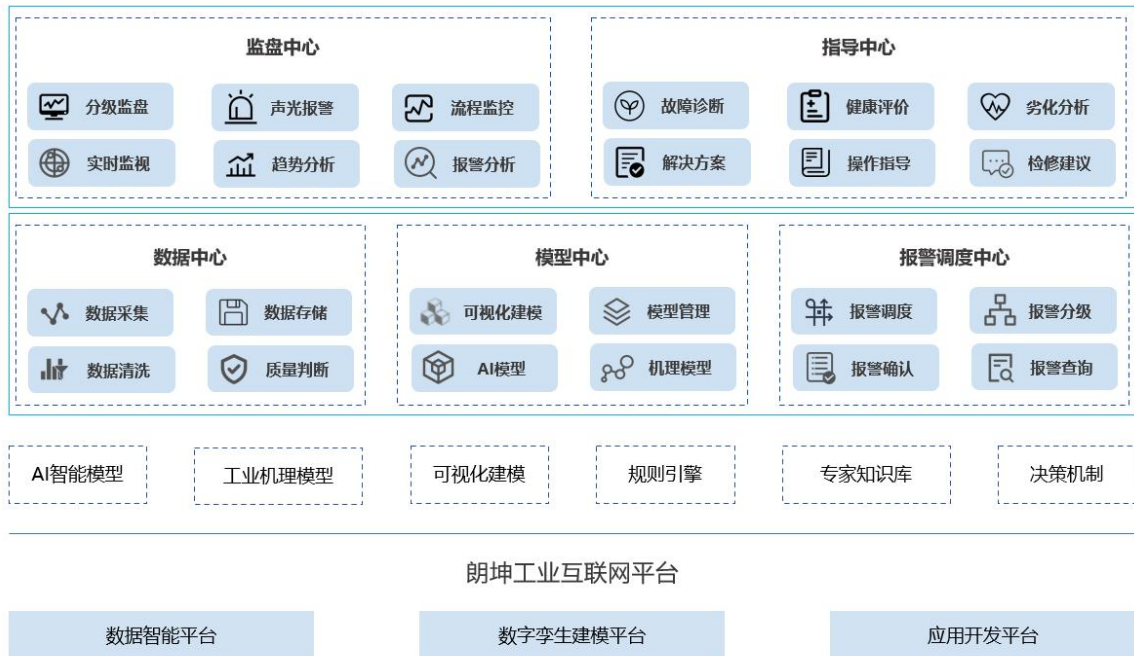


图 3 智慧运行系统业务架构图

(1) 基于工业互联网平台，构建数据中心，实现海量数据的汇聚

数据中心集大数据实时采集、边缘计算预处理、时序数据存储于一体，具备从数据采集、存储，到数据清洗、筛选，以及数据质量判断、质量评价一整套完整的数据管理能力。

(2) 基于工业互联网平台，构建模型中心，实现模型的灵活调用

支持可视化建模，利用拖拽的方式，实现“零代码”的模型构建。支持图形化的机理建模和数理建模，满足机理模型和数理模型的相互调用，实现监盘的双重保障。

(3) 基于工业互联网平台，构建报警调度中心，实现故障精准送达

实现报警的统一调度管理。支持报警屏蔽功能，避免同一故障产生的多条次生报警淹没主要报警，造成运行人员无法及时判定故障；支持报警结果调用，模型产生的报警结果可被其他模型做为输入条件调用。

(4) 基于工业互联网平台，构建监盘中心

以电厂-机组-专业-系统-设备进行分级监盘，涵盖三大专业、38个系统，单机组完成1089个监盘模型，其中数理模型占比30%以上。

(5) 基于工业互联网平台，构建指导中心，实现经验积累

基于专家知识库，构建指导中心，将电厂运行规程、运行经验、操作指导等知识与监盘模型进行关联；异常报警时，智慧运行系统自动推送异常原因和解决方案，辅助运行人员进行异常处理。

4. 安全及可靠性



通过国家工业信息安全发展研究中心测试

平台安全架构遵循并通过 GB/T39403-2020《云制造服务平台安全防护管理要求》国家标准；

安全评测细节工业互联网产业联盟标准 AII/004-2018《工业互联网平台 安全防护要求》行业标准；

安全评测细节平台资源层、IAAS 层、PAAS 层、SAAS 层等安全相关的 172 项关键指标评测结果全部符合标准。

5. 其他亮点

(1) 提出了基于机理规则和 AI 算法深度融合的智慧运行系统总体架构，建立了数据中心、模型中心、报警调度中心、监盘中心和指导中心，实现了数据统一处理、模型可视化构建、报警统一调度、机组全盘监督和操作指导实时推送的功能，为研发智慧运行系统奠定了基础。

(2) 研发了基于局部波峰波谷与多项式拟合的工业数据趋势识别方法、基于滑动窗口的多元时间序列缺失值填充方法等数据挖掘方法,实现了电厂海量历史数据的自动采集、清洗和相关性分析等功能,解决了从历史数据中快速提取特征参数的难题。

(3) 研发了电站锅炉效率对标优化的数据分析方法、参数周期性波动的监测方法、参数晃动监测方法、基于 GMM 与 EM 算法的设备参数劣化分析方法等适用于电厂变工况的智能算法,实现了机组全系统关键参数异常的快速判断和预警功能,取得了快于人工发现参数异常和设备故障的效果。

(4) 构建了基于数理和机理双驱动的 1089 个的预警模型,归纳了 7 种综合的、通用的监盘诊断逻辑组,取得了由单参数异常判断到多参数综合诊断的技术突破,实现了从单一人工经验分析到人工智能+运行机理联合诊断的转变。

(5) 建立了与预警模型相关联的专家知识库,实现了对电厂运行规程、运行经验、故障处理方案等知识的结构化处理,有预警时及时推送操作指导和优化方案的功能,取得了监盘异常及时告知、及时处理的效果。

三、下一步实施计划

智慧运行系统在电厂成功落地应用后,取得了良好的应用效果,但也存在一些需要优化和改进的地方,智慧运行系统下一步研究方向包括:

(1) 当数理模型训练样本数据充足,覆盖工况比较全面时,模型预测准确性较高;但随着机组运行年限的增加,存在设备老化、运行工况多变等情况,造成样本数据无法覆盖机组所有运行工况。或者新投运机组,前期样本数据不足,需要不断在数理模型中增加样本数据。

因此需要开发数理模型的自学习、自训练功能,实现模型样本数据的自采集、自筛选,模型的自训练、自预测以及自发布功能,满足模型需要不断更新的需求。

(2) 智慧运行系统针对故障报警推送操作指导后,有可能需要进一步进行故障处理,如缺陷登记、工单管理、开具工作票或操作票等,将智慧运行系统与生产管理系统进行深度融合,对故障进行闭环处理。

(3) 目前开发的智慧运行系统部署在安全二区/三区，主要考虑发挥工业互联网平台的优势。下一步计划将验证通过的模型进行封装，与 DCS 进行通讯，参与 DCS 的闭环控制。

四、项目创新点和实施效果

1. 项目先进性及创新点

(1) 运行优化功能架构

提出了基于机理规则和 AI 算法深度融合的运行优化功能架构，建立了基于数据的智能监控模型，为运行优化应用的数据处理、模型可视化、报警调度、机组监督和操作指导提供了基础。

(2) 数据挖掘方法

研发了基于局部波峰波谷与多项式拟合的运行数据趋势识别方法、基于滑动窗口的多元时间序列缺失值填充方法等数据挖掘方法，实现了电厂海量历史数据的自动采集、清洗、相关性分析以及从历史数据中快速提取特征参数。

(3) 智能算法

研发了电站锅炉效率对标优化的数据分析方法、参数周期性波动的监测方法、参数晃动监测方法、基于 GMM 和线性贝叶斯的设备早期劣化预警方法等适用于电厂变工况的智能算法，实现了机组全系统关键参数异常的快速判断和预警。

(4) 预警模型和专家知识库

构建了基于数理和机理双驱动的覆盖机组各类异常工况的预警模型，建立了与预警模型相关联的专家知识库，取得了多参数综合诊断的技术突破，实现了基于电厂运行规程、运行经验、故障处理方案等先验知识结构化处理的运行操作指导。

2. 实施效果

智慧运行系统适用于电力（燃煤发电、燃气发电、垃圾发电、生物质发电、水电等）、化工、钢铁、建材等领域，目前智慧运行系统在火力发电领域有比较高的需求。

截至 2021 年，国内 1000MW 级别燃煤机组数量在 130 台以上，600MW 级别机组数量在 600 台以上，300MW 级别机组数量在 1000 台以上，加上 E 级以上的燃气机组，国内有超过 2000 台的火电机组没有建设智慧运行系统；同时在水电、垃圾发电、生物质发电等行业以及化工、钢铁、建材等领域也可以推广应用。智慧运行系统有广阔的市场前景。

（1）直接效益

减少机组非停次数，降低机组启停机的经济损失。智慧运行系统的智能预警功能，在设备劣化早期提前预警，避免设备故障进一步加大造成机组非停，提高运行的安全性；同时利用智能分析算法实现设备健康状态监测，为合理停机检修提供科学的分析数据，延长关键设备的利用率，减少机组启停带来的经济损失。年度可减少机组非停次数 1 至 2 次，降低机组非停损失估算 80 万元/次；设备异常提前预警，延长设备的使用寿命和维护周期，降本增效估算 100 万元/年。

减轻运行人员劳动强度和工作压力，延长岗位专业年限。通过智慧运行系统代替部分人工监盘，将部分原先需要运行人员时刻翻看 DCS 画面，进行参数对比的监盘内容，交给智慧运行系统去完成；同时结合专家系统，进行操作指导和优化方案的推荐，减轻运行人员劳动强度和工作压力，延长岗位专业年限。

（2）间接效益

将模糊隐性的运行经验转化为显性的专家系统规则。电厂很多的运行经验都存储在运行人员的大脑中，在知识的传承和发展上存在一定的滞后和阻碍。而通过智慧运行系统专家知识库的建设，可以将模糊隐性的运行经验进行显性化和规则化，帮助运行经验少的值班人员快速掌握运行经验，减少运行人员之间的经验差异。可降低运行人员培训投入成本，估算 20 万元/年。

（3）社会效益

节能减排，政策响应。国家的“十四五”规划中明确提出要推进煤电科技创新，深度融合智能发电技术，降低燃煤机组能耗，实现节能减排；“碳达峰碳中和”目标提出后，对节能减排提出了更高的要求。

智慧运行系统不仅对机组运行异常情况进行预警，还进行机组性能上的优化指导，例如锅炉效率对标优化、脱硝智能喷氨优化、冷端优化等，提升运行操作经济性，降低机组发电能耗，提质增效估算 100 万元/年。