# 基于人工智能的电力设备运行态势感知及可视化技术

文/刘若涵[1]　刘旭中[2]
1. 平顶山学院电气与机械工程学院；2. 国网河南省电力公司南阳供电公司

*基于人工智能机器学习算法和深度学习模型，开展电力设备运维相关工作，在准确性、成本等方面效果显著。但也面临数据质量与隐私、模型可解释性与可信度、实时性与计算资源需求等挑战，对此提出相应的解决方案。未来更先进算法与新兴技术相融合，人工智能将进一步拓展潜在应用场景，加速电力行业的数智化转型。*

当代社会，电力是至关重要的能源形式，其稳定供应与否直接影响各个领域能否正常运转。而电力设备的运行状态直接影响电力系统的稳定性及安全性[1]。如果能及时、准确、直观地感知电力设备的运行态势、潜在风险，就能提前发现问题，采取预防措施，优化资源配置，制定科学的维护计划，从而确保电力系统的安全可靠运行，满足现代电力系统对精细化管理的需求。

在电力领域，人工智能（AI）技术经历了运算智能、感知智能和认知智能3个阶段[2]。近年来，人工智能正逐渐从单项技术向集成技术、从浅层学习到深度学习发展[3]，以高级机器学习为代表的新一代AI技术为电力设备运行态势感知带来了革命性的契机[4-5]。传统的电力设备运行态势监测主要依赖于人工，成本高、效率差。通过机器学习和深度学习算法，人工智能可以实时监测和评估电力设备运行状态，深度挖掘和分析海量监测数据，建立预测模型，提高故障诊断的精准性、及时性，优化电力设备的运维策略。此外，借助图像识别、语音识别等人工智能技术，还能进一步

提高设备监测的效率和准确性，降低人工劳动强度和运维成本。

## 人工智能技术及适用场景

### 1. 机器学习算法

机器学习算法分类及适用场景见表1。

表1　机器学习算法分类及适用场景

| 类型 | 特点 | 常见算法 | 适用场景 |
| --- | --- | --- | --- |
| 监督学习 | 有明确的标签，通过有标记的训练数据来学习预测模型 | 决策树、线性回归、随机森林等 | 可用于电力设备故障的分类和预测 |
| 无监督学习 | 通过无标记的数据，发现隐藏的模式、结构及关系 | 主要是聚类分析等 | 对不同模式进行分类、识别，以实现更精准的预测 |
| 强化学习 | 通过与环境的交互，智能体根据反馈学习最优策略 | Q-learning、深度Q网络（DQN）、策略梯度等 | 优化电力设备的控制策略，提高运行效率 |

### 2. 深度学习模型

深度学习模型分类及适用场景见表2。

表2　深度学习模型分类及适用场景

| 类型 | 特点 | 适用场景 |
| --- | --- | --- |
| 卷积神经网络 | 擅长处理图像和空间数据 | 电力设备图像识别和故障检测等 |
| 循环神经网络 | 处理具有时间顺序或序列特征的数据，捕捉变化规律，预测未来状态 | 电力系统故障诊断、负荷预测和新能源功率预测等 |
| 生成对抗网络 | 在图像生成、转换等任务中，表现优异 | 可用于生成新的数据样本，扩充电力设备训练数据集，提高模型泛化能力 |

## 电力设备运行数据采集与分析

### 1. 各类电力设备运行数据的来源

（1）传感器数据

通过安装在电力设备上的电流、电压及湿度等各类传感器，采集设备运行参数。其功能见表3。

表3　传感器数据功能

| 类型 | 功能 |
| --- | --- |
| 电流传感器 | 实时监测电流的大小、频率和相位等参数 |
| 电压传感器 | 精确测量电压的幅值、波动和稳定性 |
| 温度传感器 | 监控设备关键部位的温度变化 |
| 湿度传感器 | 用于评估设备运行环境的湿度情况 |

（2）监控系统数据

包括各类智能监控平台、远程监控系统、电力自动化系统等收集的设备运行状态和电网运行信息。其功能见表4。

表4　监控系统数据功能

| 类型 | 功能 |
| --- | --- |
| 智能监控平台 | 整合电流、电压等各类传感器数据，为运维人员提供可视化设备运行状态视图 |
| 远程监控系统 | 集中监测不同地点分布的电力设备 |
| 电力自动化系统 | 实时采集电网中的设备参数等数据 |

（3）历史运维记录

包含设备的维修工单（或故障记录）、巡检报告 预防性试验数据等。

1）维修工单（或故障记录）。包含故障描述、处理情况等信息。

2）巡检报告。定期巡检时对设备外观、运行声音等方面的检查记录。

3）预防性试验数据。如绝缘电阻测试、耐压试验结果等。

### 2. 数据的特点与挑战

（1）海量性

随着电力设备数量的持续增加和监测准确度的提高，数据量呈指数级增长，大量的数据需要高效的存储和处理架构来应对。

（2）多源性

不同类型的传感器、监控系统和记录方式导致数据格式和准确度各异。电力设备数据来源广泛，格式和标准不一，需要进行有效的整合和融合，需要统一的数据标准和接口。

（3）噪声、缺失值和异常值

由于传感器准确度、环境干扰、设备突发故障及操作失误等因素的影响，电力设备数据中可能存在噪声、缺失值或异常值，从而影响数据分析结果的准确性。

### 3. 数据清洗与预处理方法

采用数据过滤、平滑和去噪等方法去除噪声和异常值，通过数据标准化、归一化等操作，将数据转换为统一的格式和范围。

## 基于人工智能的电力设备运行态势感知模型

### 1. 状态评估模型

（1）设备健康状态指标

设备健康状态指标可以包括设备的绝缘电阻、温度、湿度和振动幅度等物理参数，也可以涵盖设备的运行时间、维修次数和负载率等运行相关数据。此外，还可以引入一些综合指标，如设备的可靠性指标、可用性指标和可维护性指标等，以全面

反映设备的健康状况。

（2）评估模型的构建与训练

基于定义的健康状态指标，可以利用机器学习或深度学习算法构建评估模型。例如，预训练动态词向量模型PowerBERT[6]。在模型训练过程中，需要大量的标注数据，即已知健康状态的设备数据，让模型学习不同指标与设备健康状态之间的关系。训练好的评估模型能够根据实时监测的数据，快速准确地评估设备的健康状态，为运维决策提供有力支持。

2. 故障预测模型

（1）基于机器学习的故障预测

通过对设备运行参数、环境条件和维修记录等历史数据的分析，运用决策树、支持向量机等算法，根据不同的特征和条件进行分类、判断，捕捉复杂的故障特征，动态处理线性与非线性问题，建立故障预测模型。

（2）基于深度学习的故障预测

卷积神经网络能够从图像、传感器数据中提取特征，通过分析发现潜在的故障迹象。循环神经网络及其变体，能够根据电力设备运行状态变化规律，较为精准地预测设备未来可能发生的故障。例如，一种基于跨模态特征融合的层次化分类模型，为精准诊断变电站设备故障提供了技术支撑[7]。

3. 性能优化模型

（1）能耗分析与优化

采用智能控制策略，通过采集电力设备的能耗数据，结合设备的运行模式和负载情况，利用人工智能算法进行预测性的能耗管理，优化设备的运行参数、调整负载分配，并根据未来的负载需求提前规划设备的运行状态以降低能耗，从而实现能源的高效利用。

（2）效率提升策略

实时监测设备的性能指标和运行环境，动态调整控制参数，利用强化学习算法，让设备在不同的运行条件下自主学习最优的运行策略。例如，基于多源异构数据挖掘技术，构建知识图谱将系统运行态势感知与决策需求结合，提升系统运行效率[8]。

## 电力设备运行态势可视化技术

1. 可视化的目标与需求

（1）推进电力设备数字化

可视化技术推动电力设备数字化。大量传感器和智能感知终端通过电力物联网平台安全接入[9-10]，以电力设备状态智能感知为基础，以数字孪生和精准评估诊断为核心，最终通过多维信息合成和可视化技术进行展示[11]。

（2）为运维人员提供直观理解

可视化技术将大量的监测数据和复杂的运行信息转化为易于理解的图形、图像和动画，使运维人员能够迅速捕捉关键信息，快速理解设备的运行状态，无需深入研究数据表格和报告。

（3）辅助决策支持

通过电力设备的可视化展示，运维人员能够更及时、高效地识别设备运行中的异常情况和变化趋势，为科学运维提供支撑。例如，在决定设备维护计划、资源分配和电网调度时，直观的可视化信息能够帮助决策者做出更明智、更及时的决策。

2. 可视化方法与工具

（1）二维图表与图形

折线图、柱状图和饼图等二维图表常用于展示电力设备的单一参数或指标的变化趋势和比例关系。例如，可以用折线图展示设备温度随时间的变化，用柱状图比较不同设备的能耗水平。

（2）三维建模与仿真

基于AI视觉技术，可以对电力设备进行清晰的3D信息采集[12]，利用三维建模软件和可视化平台工具软件[13-14]进行三维建模与仿真，模拟设备在不同运行条件下的性能和状态，帮助运维人员预测问题、优化运维措施。

（3）虚拟现实与增强现实技术

虚拟现实（VR）技术能够创建逼真的模拟场景，帮助运维人员进行全方位的操作演练，减少实际操作中的错误和风险。增强现实（AR）将虚拟信息叠加在真实设备或场景上，借助增强现实设备进行人机交互，可以实现电力智能抢修[15]。

3. 多维度数据融合的可视化展示

（1）时空数据的可视化

结合时间和空间维度，通过动态图表或地图、热力图等方式展示设备在不同时间、地点（位置）的运行状态变化。例如，通过某电力设备在不同地理位置的运行状态随时间的变化情况，发现区域和时间上的规律和异常。

（2）不同设备状态的关联展示

将多个相关设备的状态信息进行关联展示，呈现多个设备之间状态的相互关系，便于分析系统的整体运行情况。例如变压器与周边断路器、避雷器的状态关系，有助于分析设备之间的相互影响和协同工作情况。

4. 电力设备可视化应用

利用电力设备多源异构数据挖掘[8]和数据空间合成与立体展示[16]等方法，大型区域电网可采用先进的可视化技术对电力设备进行实时监测和分析，并据此构建出三维模型和虚拟现实场景，运维人员能够直观地查看设备的内部结构和运行状态，利用多维度数据融合的可视化界面，综合监控不同区域、不同类型的设备。

5. 效果评估

可视化技术效果评估见表5。

表5　效果评估

| 效果 | 说明 |
| --- | --- |
| 准确性提升 | 可视化技术可以大幅提升故障诊断的准确性，减少误判和漏判的情况，提前采取措施避免重大事故的发生 |
| 运维成本降低 | 直观的可视化展示优化了运维工作流程，减少了不必要的巡检和维修工作，降低了人力和物力成本 |
| 可靠性增强 | 及时发现设备潜在问题并进行处理，增强电力系统的可靠性，提高供电质量，减少停电时间和次数 |

## 挑战与解决方案

1. 数据质量与隐私问题

（1）数据缺失与错误

解决方案包括数据清洗和修复技术，采用多源数据融合来补充缺失值，建立数据质量监测机制及时发现和纠正错误。

（2）保障数据安全与隐私的措施

通过采取严格的访问控制，数据加密，匿名化处理等措施，确保电力设备运行数据在传输、存储和使用过程中的安全性和隐私性。

2. 模型的可解释性与可信度

（1）解释模型决策的方法

采用特征重要性分析、局部解释模型-可解释模型（LIME）等技术，对模型的输出结果进行解释，让运维人员理解模型是如何做出决策的。

（2）提高模型可信度的策略

通过交叉验证、模型评估指标的选择以及与领域专家合作验证等方式，提高模型的可信度和可靠性。

3. 实时性与计算资源需求

（1）优化算法提高实时响应

采用高效的算法和数据结构，对模型进行压缩和优化，减少计算时间，提高实时响应能力。

（2）分布式及云计算的应用

利用云计算平台，扩展计算资源，实现对大规模数据的快速处理、分析。

## 未来展望

1. 技术发展趋势预测

（1）更先进的人工智能算法

人工智能技术不断发展，会出现更加高效、准确的算法，如强化学习与生成对抗网络的融合、多模态认知大模型[17]等。

（2）与其他新兴技术的融合

人工智能与物联网、5G通信及区块链等技术的深度融合，实现更广泛的数据采集、更快速的数据传输和更安全的数据共享。

2. 潜在应用场景的拓展

（1）智能电网的全面智能化管理

依托智能化技术，在发电、输电、变电、配电及用电的各个环节，实现对电力设备的精确监管，提高电网的全面智能化水平。

（2）新能源领域的应用

推进人工智能在太阳能、水能、生物能及风能等新能源领域的应用，在新能源设备的监测和运维中发挥重要作用。

3. 对电力行业的影响与变革

推动电力行业从传统的定期维护模式向基于状态的预测性维护模式转变，提高电力系统的灵活性和适应性，加速电力行业的数字化和智能化转型。

## 结束语

传统电力设备运行态势监测方法成本高、效率差，本文基于人工智能技术，探讨新的电力设备运行态势感知及可视化技术。同时，也分析面临的挑战及解决方案，并对未来的发展趋势和潜在应用场景进行展望。

目前人工智能技术在电力设备缺陷识别、状态

辨识等感知领域和电力知识图谱等认知领域的部分任务上达到或超越人类水平，但在运行调控、系统规划等决策领域还需要继续加强研究[18]。此外，还需要持续提升模型的可解释性和可信度、优化实时性和计算资源、加强数据安全管理，推动电力设备运行态势感知及可视化技术创新发展，推进电力行业数智化转型。**EA**

（收稿日期：2024-09-23）

## 参考文献

[1] 唐飞．基于人工神经网络技术的电力设备状态实时监测研究[J]．自动化应用，2024，65(8)：118-120．

[2] 车万翔，郭江，崔一鸣．自然语言处理：基于预训练模型的方法[M]．北京：电子工业出版社，2021．

[3] 杨博，陈义军，姚伟，等．基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述[J]．电力系统自动化，2022，46(22)：200-223．

[4] 唐文虎，牛哲文，赵柏宁，等．数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]．高电压技术，2020，46(9)：2985-2999．

[5] 赵晋泉，夏雪，徐春雷，等．新一代人工智能技术在电力系统调 度运行中的应用评述[J]．电力系统自动化，2020，44(24)：1-10．

[6] 贾骏，杨强，付慧，等．基于电力设备大数据的预训练语言模型构建和文本语义分析[J]．中国电机工程学报，2023，43(3)：1027-1035．

[7] 白艳峰．基于层次化多标签分类的电力设备缺陷检测[D]．北京：华北电力大学，2023．

[8] 牛哲文．基于多源异构数据挖掘的电力系统运行态势感知技术研究[D]．广州：华南理工大学，2021．

[9] 齐波，冀茂，郑玉平，等．电力物联网技术在输变电设备状态 评估中的应用现状与发展展望[J]．高电压技术，2022，48(8)：3012-3031．

[10] 何奉禄，陈佳琦，李钦豪，等．智能电网中的物联网技术应用与发 展[J]．电力系统保护与控制，2020，48(3)：58-69．

[11] 盛戈皞，钱勇，罗林根，等．面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]．高电压技术，2023，49(5)：1765-1778．

[12] 李杨，董元龙，林明晖，等．基于AI视觉技术的电力设备检测方法[J]．微型电脑应用，2023，39(9)：90-93．

[13] 杨帆，吴涛，廖瑞金，等．数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]．高电压技术，2021，47(5)：1505-1521．

[14] 李伟，周小虎，宋勤．基于多源数据融合的变电站三维可视化模型设计[J]．制造业自动化，2021，43(9)：20-23．

[15] 谢锐彪．面向电力智能抢修的增强现实交互研究[D]．北京：华北电力大学，2022．

[16] 姜骞，刘亚东，严英杰，等．电力设备多源异构数据空间合成与立体展示方法[J]．高电压技术，2022，48(1)：66-74．

[17] 李刚，方鸿，刘云鹏， 等．新型电力系统中的大模型驱动技术：现状、机遇与挑战[J]．高电压技术，2024，50(7)：2864-2878．

[18] 韩笑，郭剑波，蒲天骄，等．电力人工智能技术理论基础与发展展望(一)：假设分析与应用范式[J]．中国电机工程学报，2023，43(8)：2877-2890．