

基于深度学习的工业企业能效诊断策略库设计与应用研究

余换林, 栗帅燕*

天津市普迅电力信息技术有限公司, 天津, 中国

*通讯作者

【摘要】在全球能源成本攀升与“双碳”目标背景下, 工业企业能效提升至关重要。本文提出基于深度学习的工业企业能效诊断策略库设计方法。该方法通过多源数据融合与预处理、能效 KPI 定义与状态划分、深度特征提取与诊断策略生成、策略库构建优化、在线应用与自进化五个核心步骤, 实现诊断策略的自动生成与持续优化。实例验证表明, 该方法能有效定位能效低下根因, 生成可解释策略, 诊断置信度达 0.92, 具备自进化能力, 为工业企业能效诊断提供了高效智能解决方案。

【关键词】深度学习; 工业企业; 能效诊断; 策略库; 多源数据融合

【基金项目】工业企业能效“云诊断”应用研究(编号: 526810250004)

1. 引言

随着全球能源危机加剧与环境保护意识提升, “碳达峰、碳中和”已成为全球共识。工业领域作为能源消耗的主要阵地, 其能效水平直接影响“双碳”目标的实现进程。据统计, 工业能耗占全球总能耗比重超过 30%[1], 而通过有效的能效诊断, 企业平均可实现 5% - 15% 的能耗降低, 不仅显著节约运营成本, 也为绿色低碳发展提供重要支撑。能效诊断作为识别能耗浪费与挖掘节能潜力的关键环节, 其精准性与效率直接决定节能措施的实施效果。近年来, 工业互联网的快速发展为能效诊断提供了海量多源运行数据, 但如何从高维、异构的工业数据中提取有效信息, 构建适应复杂场景且具备自我进化能力的诊断策略库, 仍是当前领域面临的核心挑战。

目前, 工业能效诊断技术主要分为基于专家规则库的系统与基于传统机器学习模型的方法, 但二者均存在明显局限。专家规则库依赖领域经验, 以“IF-THEN”规则[2]形式存储异常模式, 在实时数据匹配时触发报警。然而, 该方法面临知识获取瓶颈, 规则编写依赖少数专家, 难以覆盖复杂、隐性能效劣化模式; 灵活性差, 无法自适应不同产线或工况差异, 维护困难; 分析深度不足, 仅能处理已知因果关系, 难以挖掘潜在关联。传统机器学习方法, 如回归分析、支持向量机等, 通过建立能效基准模型识别异常, 虽较规则库有所进步, 但仍存在特征依赖强、依赖人工特征工程, 时序处理能力弱, 难以

应对高维非线性动态过程, 以及诊断范围孤立, 缺乏系统级协同分析与根因追溯能力等问题, 制约了其在复杂工业环境中的精准应用。

2. 基于深度学习的能效诊断策略库设计方法

本研究提出的基于深度学习的工业企业能效诊断策略库设计方法, 主要包括多源异构数据融合与预处理、能效 KPI[3]定义与状态划分、深度特征提取与诊断策略生成、策略库构建验证与优化以及在线应用与自进化五个核心步骤, 形成了从数据处理到策略应用与优化的完整闭环。

2.1 多源异构数据融合与预处理

工业企业能效诊断涉及的数据类型多样, 且数据质量直接影响后续模型训练与诊断策略生成的效果, 因此多源异构数据[4]的融合与预处理是整个方法的基础环节。

工业企业能效诊断涉及的数据类型多样, 主要包括四类: 一是传感器时序数据, 如温度、压力、流量等, 能够直接反映设备与系统的运行状态; 二是生产计划数据, 包括产品批次、产量、生产节拍等, 用于关联能效与生产过程的关系; 三是物料属性数据, 如物料的成分、密度、比热容等, 这些数据会影响能源的消耗效率; 四是人工记录的能效异常事件标签数据, 如设备故障、管道泄漏、换热器结垢等异常事件记录。对采集到的多源异构数据, 进行“数据清洗-数据对齐-数据降噪-数据标准化”预处理操作。首先采用插值法处理缺失值, 通过 3σ 准则识别并剔除异常跳变数据, 确保数据的完整性与准确性;

其次，采用小波变换对传感器时序数据进行降噪处理，减少工业环境中电磁干扰、设备振动等因素对数据的影响；最后，采用 Z-score[5] 标准化方法将数据转换为均值为 0、标准差为 1 的标准化数据，消除不同变量量纲差异对模型训练的影响。

公式如下：

$$x_{norm} = \frac{x-u}{\sigma} \quad (1)$$

其中， x 为原始数据， u 为数据均值， x_{norm} 为数据标准差。

2.2 能效关键绩效指标定义与状态划分

从系统级与设备级两个层面定义能效 KPI：一是系统级 KPI，主要反映整个生产系统的能效水平，如单位产品能耗、单位产值能耗等，宏观反映企业整体能效状况；二是设备级 KPI，针对关键耗能设备，如泵组、风机、换热器、锅炉等，定义设备级 KPI，如泵组效率（泵的有效功率与轴功率的比值）、锅炉热效率（锅炉输出热量与燃料输入热量的比值）、换热器传热系数等，用于精准定位设备层面的能效问题。然后根据能效 KPI 的历史分布特征与企业运营目标，采用百分位数法将系统或设备的运行状态自动

划分为“优”“良”“中”“差”四个等级（详见表 1），为预处理后的数据集中每个样本打上对应的能效状态标签，形成带标签的训练数据集，用于后续深度学习模型的训练。

表 1.能效关键绩效指标定义表

序号	等级	取值	表示含义
1	优	KPI 值处于历史数据的前 20%（即 P20 以下）	系统或设备运行能效处于最佳水平，无明显能耗浪费
2	良	KPI 值处于历史数据的 20%-50%（即 P20-P50）	能效水平良好，存在轻微节能潜力
3	中	KPI 值处于历史数据的 50%-80%（即 P50-P80）	能效水平一般，存在明显能耗浪费，需进行诊断优化
4	差	KPI 值处于历史数据的后 20%（即 P80 以上）	能效水平极差，存在严重能耗浪费，需紧急处理

2.3 深度特征提取与诊断策略生成

构建多任务深度学习网络模型，实现深度特征的自动提取、能效状态分类以及诊断策略的自动生成，模型结构如图 1 所示，核心包括特征提取器、状态分类器与策略生成器三个模块。

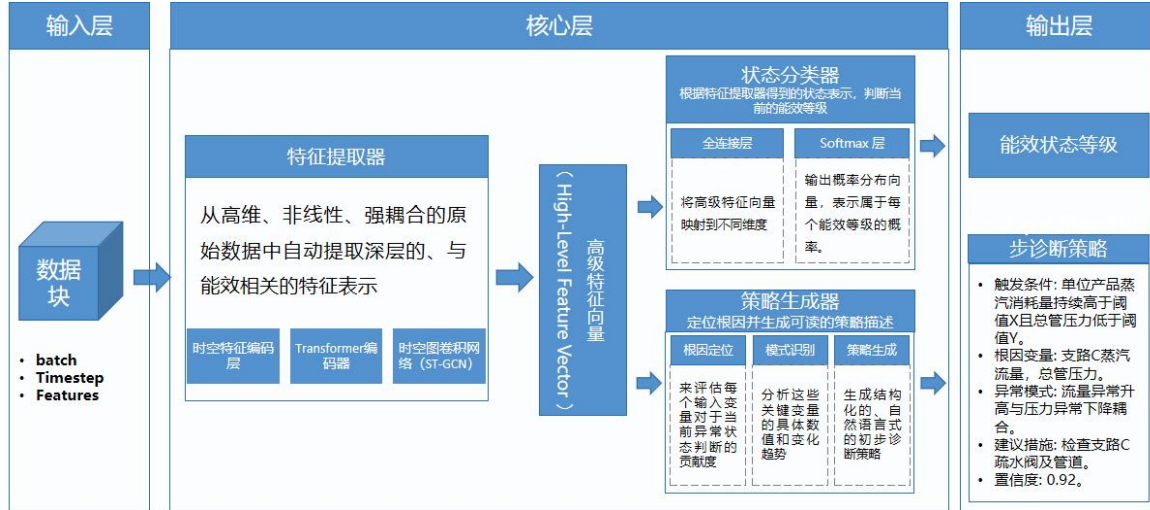


图 1.深度学习网络模型结构示意图

2.3.1 特征提取器

特征提取器的核心功能是从高维、非线性、强耦合的工业时序数据中自动提取深层特征与动态关联关系，为后续状态分类与策略生成提供有效特征支撑。本研究采用 Transformer 编码器[6]作为特征提取器的核心架构，Transformer 编码器由多个编码器层堆叠而成，每个编码器层包括多头自注意力（Multi-Head Self-Attention）子层与前馈神经网络（Feed-Forward Network）子层[7-9]，其

中多头自注意力子层，通过并行计算多个注意力头，捕捉不同尺度下变量间的关联关系，而前馈神经网络子层对多头自注意力子层的输出进行非线性变换，增强模型的表达能力。通过 Transformer 编码器的层层处理，将输入的时序数据转换为融合全局时空关联信息的高级特征向量（High-Level Feature Vector），实现深度特征的自动提取。

2.3.2 状态分类器

状态分类器以特征提取器输出的高级特

征向量为输入，通过多分类任务判断当前系统或设备的能效状态，是深度学习模型的主任务。其结构包括全连接层与 Softmax 层：

(1) 全连接层：将高级特征向量映射到与能效状态等级数量（本研究为 4 个等级）对应的维度，实现特征维度的转换；

(2) Softmax 层：对全连接层的输出进行归一化处理，输出当前样本属于“优”“良”“中”“差”四个状态的概率分布，公式如下：

$$P(y_i|x) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^4 e^{z_j}} \quad (2)$$

其中， z_i 为全连接层输出的第 i 个状态的 logit 值（未归一化的概率）， y_i 为第 i 个能效状态， $P(y_i|x)$ 为样本 x 属于状态 y_i 的概率。

2.3.3 策略生成器

策略生成器是实现模型可解释性与诊断策略自动化生成的核心模块，当状态分类器判断能效状态为非优时，策略生成器根因定位、异常模式识别，自动生成诊断策略。

(1) 根因定位：分析特征提取器中 Transformer 编码器的注意力权重矩阵，识别对当前非优状态贡献度最高的关键变量。注意力权重越高，表明该变量对能效状态的影响越大，即为导致能效低下的潜在根因变量；

(2) 异常模式识别：针对定位到的关键变量，分析其在时序维度上的变化趋势与数值特征，识别异常模式，如“变量 A 在过去 2 小时内持续高于阈值 B”“变量 C 与变量 D 呈现负相关异常（正常应为正相关）”等；

(3) 策略生成器根据预定义的策略模板，将根因变量与异常模式整合为结构化的自然语言诊断策略，解决了深度学习模型“黑箱”问题，为工业企业提供明确的能效优化方向。

2.4 诊断策略库构建

将初步诊断策略与历史数据中人工记录的专家诊断结果从根因匹配度和异常模式匹配度两个维度进行对比验证，若初步策略与专家诊断结果的匹配度高于预设阈值 80%，则认为该策略通过初步验证；若匹配度低于阈值，则需重新分析注意力权重与异常模式，调整策略内容。

采用强化学习技术对通过初步验证的策略进行优化，提升其置信度。首先构建强化学习环境，以历史数据集为环境，将诊断策略作为智能体，策略的诊断结果与专家诊断结果的匹配度作为奖励信号；然后设计奖励函数，若策略诊断结果与专家结果一致，给

予正奖励，若部分一致，给予中等奖励，若完全不一致，给予负奖励。智能体通过 PPO（Proximal Policy Optimization）[10] 算法，根据奖励信号调整策略的参数（如根因变量的权重、异常模式的判断阈值），最大化累积奖励，从而提升策略的置信度。

将经过验证与优化后，置信度高于预设阈值的诊断策略以结构化形式存入诊断策略库，每条策略包含字段触发条件、根因变量、异常模式、建议措施、置信度，通过结构化存储，便于后续在线诊断时快速查询与调用策略。

2.5 诊断策略库的在线应用与自进化

诊断策略库构建完成后，部署于工业企业在线能效诊断平台，实现实时诊断与策略库的持续自进化。经过清洗、对齐、标准化操作后的实时数据，输入训练好的深度学习模型，首先通过状态分类器判断当前能效状态；若状态为非优，则从诊断策略库中查询与当前数据特征匹配的诊断策略；将诊断策略包括根因变量、异常模式、建议措施，通过人机界面展示给运维人员，指导其进行现场检查与故障排除。运维人员根据诊断策略进行现场检查后，将检查结果作为人工反馈数据录入系统；同时，系统自动记录诊断策略的触发次数、故障确认率等数据，形成反馈数据集。

3. 结论

本文通过基于深度学习的工业企业能效诊断策略库设计方法和应用研究，实现从海量历史运行数据中自动化学习并提取有效诊断策略，构建可解释、可更新、可迁移的诊断策略库，进而提升工业企业能效诊断的精准性、高效性与智能化水平。从理论层面，丰富了数据驱动的工业能效诊断理论体系，为深度学习技术在工业能效诊断领域的应用提供了新的思路与方法；从实践层面，能够为工业企业提供一套完整的智能能效诊断解决方案，帮助企业快速定位能效问题根因，制定针对性节能措施，降低能耗成本，同时为工业领域“双碳”目标的实现提供技术支撑。

参考文献

[1] 王忠铨, 李久林, 杨娜. “双碳”目标下大跨木结构发展前景分析[J]. 建筑节能(中英文), 2025, 53(03): 46-53.
 [2] 陈应显. 模糊集 IF-THEN 规则的蚁群空间

- 聚类分析[J].数学的实践与认识, 2011, 41(19): 114-119.
- [3]刘畅, 王玮溪, 王之腾, 等.集成深度学习的机载多功能雷达工作模式识别方法[J].陆军工程大学学报, 2025, 4(03): 57-64.
- [4]李娟娟, 陈小辉, 许立杰, 等.水龙头行业能效对标指标体系构建研究及应用[J].节能, 2018, 37(11): 52-55.
- [5]孙玉亮.面向交通环境感知的目标检测算法设计、实现及部署[D].杭州电子科技大学, 2025.
- [6]纪其顺, 王瑞琴, 黄熠旻, 等.基于改进Transformer模型的超长序列处理方法[J].中文信息学报, 2025, 39(09): 32-42.
- [7]王海云, 庄棫, 汪伟, 等.一种电网调控运行多源异构数据库信息共享架构[J].太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(09): 984-990.
- [8]刘梓涵.基于对抗样本的联邦持续学习方法研究[D].广东工业大学, 2025.DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2025.001357.
- [9]李雁飞.复杂电磁环境下雷达辐射源目标识别研究[D].电子科技大学, 2025.DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2025.001213.
- [10]杨友波, 张目, 唐俊, 等.基于深度确定性策略梯度强化学习算法的航迹规划研究[J].现代计算机, 2023, 29(05): 1-7+27.