

基于时间序列的大型核电厂设备 异动态势感知系统设计

高帆¹, 李小辉¹, 郭莉侠¹, 杨强², 郭贞荣¹

(1. 江苏核电有限公司, 江苏 连云港 222000;

2. 核电运行研究(上海)有限公司, 上海 200000)

摘要: 为了准确感知核电厂设备异动态势, 防止负荷电压、负荷电流数值异常增大, 设计基于时间序列的大型核电厂设备异动态势感知系统; 在系统硬件设计上, 完善设备数据自动处理模块、设备异动信号采集器、态势感知装置之间的实时连接关系; 系统软件设计上, 构建时间序列模型, 实现对核电厂设备异动数据的处理; 选取核心异动态势指标, 按照标量化处理流程, 通过阈值方法实现对核电设备异动态势的感知, 完成大型核电厂设备异动态势感知; 实验结果表明, 上述系统通过准确感知核电厂设备异动态势, 将设备负荷电压、负荷电流数值控制在阈值之内, 能够维护核电厂设备的稳定运行。

关键词: 时间序列; 设备异动; 态势感知; 自动处理; 时序趋势特征; 态势指标; 量化处理

Design of Transaction Situational Awareness System for Large Nuclear Power Plant Equipment Based on Time Series

GAO Fan¹, LI Xiaohui¹, GUO Lixia¹, YANG Qiang², GUO Zhenrong¹

(1. Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China;

2. Nuclear Power Operations Research (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: In order to accurately perceive the abnormal situation of nuclear power plant equipment and prevent abnormal increase in load voltage and load current values, a large-scale nuclear power plant equipment abnormal situation perception system based on time series is designed. In terms of the system hardware design, improve the real-time connection relationship between the equipment data automatic processing module, the equipment abnormal signal collector, and the situational awareness device. In terms of the system software design, construct the time series model, and process abnormal data of nuclear power plant equipment. Select the core abnormal situation indicators, follow the scalar processing process, use threshold methods to perceive the abnormal situation of nuclear power equipment, and complete the abnormal situation perception of large-scale nuclear power plant equipment. Experimental results show that by accurately sensing the abnormal situation of the equipment, the above system can control the load voltage and load current values of the equipment within the threshold and maintain the stable operation of nuclear power plant equipment.

Keywords: time series; equipment transaction; situational awareness; automatic process; time series trend characteristics; situation indicator; quantitative process

0 引言

核电厂设备的异动情况可能导致严重的事故和安全风险。实时感知设备的异动态势可以及早发现潜在的故障和异常, 进行计划维护工作, 避免不可预测的设备非计划停机, 有助于避免事故的发生, 提高核电厂的安全性。核电厂设备异动态势感知是指对核电厂各种设备在运行过程中的异常变化进行实时监测和感知的一种技术^[1]。现有的态势感知流程包含数据信息转换、执行记录编辑、管理模块开发等多个环节, 且为保证数据处理结果的真实性, 应依

照精准感知需求定义具体的处理条件, 提升异动态势感知效果。

对于核电设备异动态势的感知, 王艳松等人^[2]提出了基于核主成分分析和 AP 聚类算法的态势感知技术。联合聚类分析法、核主成分分析法, 定义几种相似的轨迹度量指标。一方面确定惯性中心在核电态势坐标序列中所处位置, 另一方面也可以完成对轨迹相似度的集中标定, 确定核电设备的基础异动态势。李晓婷等人^[3]提出的基于深度学习的自组织态势感知与决策系统按照深度学习原则, 建立了

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-11-29。

作者简介: 高帆(1993-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 高帆, 李小辉, 郭莉侠, 等. 基于时间序列的大型核电厂设备异动态势感知系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 251-257.

具体的目标识别模型。通过自主决策连同任务规划的方式,判断核电厂设备的实时运行情况,再以此为基础,获得具体的态势感知结果。王睿弘^[4]提出了基于 DSP 的发电厂继电保护设备态势感知方法。利用深度学习人工智能算法构建设备目标识别模型,完成设备感知人物。Gammon T 等人^[5]提出的基于卷积神经网络的电厂核心设备安全态势感知方法。基于卷积神经网络计算设备异动态势感知模型的最优值,获得设备安全态势感知结果。在实际应用过程中,以上方法对于核电设备异动态势的感知准确性相对较弱,并不能准确感知核电厂设备异动,导致负荷电压、负荷电流数值出现异常增大。为避免上述情况的发生,利用时间序列算法的应用优势,设计一种新型的大型核电厂设备异动态势感知系统,并通过对比实验的方式,突出该系统的实际应用价值。

1 核电厂设备异动态势感知系统硬件设计

大型核电厂设备异动态势感知系统的应用硬件由设备数据自动处理模块、异动信号采集器、态势感知装置三部分组成,本章节针对其具体设计方法展开研究。

1.1 设备数据自动处理模块设计

核电厂设备异动态势感知过程中所需的所有数据样本全部来源于自动处理模块,该模块是异动信号采集器、态势感知装置的数据来源。大型核电企业检修过程中,会产生大量的工单执行记录与纸质回单,对于主机元件而言,文件记录的大量累积不利于信息管理以及后续的记录回溯,特别是在数据记录频繁变更时期,主机元件无法完成对信息参量的协同化处理,还有可能导致半结构文档无法由 PDF 格式转化成 DOC 格式。为实现对核电设备运行数据的全面化管理,亟需建立面向整个核电工程监测数据的结构化处理模块。核电厂设备异动信息自动处理模块依据数据的时间序列进行自动编码。主机元件在感知信息参量时,只要保证指令文件读取结果的有效性,即可以实现对核电厂设备异动态势的准确判定。硬件配置上,异动态势自动处理模块由移动感知终端、PC 工作站、Web 网络界面、数据存储等多个部件结构共同组成。其中,移动感知终端、PC 工作站之间的连接主要借助 USB 线缆。为保证异动信息传输查询指令、结构化文档感知指令同时执行,USB 线缆必须具有较强的数据负载能力,可以并行传输电子数据文件、时间序列信息、移动信息表单、OCR 信息文本等多个类型的数据样本,因此采用 PCI Express Gen4 线路。只有保证传输查询指令和文档感知指令行为能力的时间序列匹配性,才能够将系统主机采样所得的核电厂设备异动态势感知信息完全寄存于数据存储部件之中^[6]。具体的异动态势自动处理模块结构设计如图 1 所示。

图 1 中,结构化服务负责对大型核电厂设备异动态势感知文档进行时间序列结构化处理,将多种数据转换为具有时间序列编码的 OCR 格式文本,便于结构化搜索。其中数据处理引擎配置如下:处理器: Intel Xeon Platinum 8280,

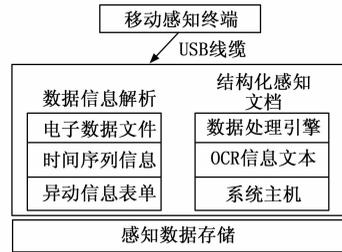


图 1 异动态势自动处理模块设计

存储部件为 SATA SSD 固态硬盘、RAID 阵列硬盘。由于结构化服务不能脱离系统主机而独立运行,所以数据处理指令的执行要求系统主机、数据处理引擎必须保持同步接入状态。

1.2 核电厂设备异动信号采集器

为了实现大型核电厂设备异动态势信号的采集,首先需要对路由单元进行相关配置,包括启动 NetFlow 采集芯片、闭合存储单元、启动异动信号传输单元。利用 NetFlow 芯片收集和记录上节设备数据自动处理模块网络数据包的流量信息。Broadcom Trident II 芯片是一种高性能的网络交换芯片,具有内置的 NetFlow 收集和处理功能。它支持高速的数据包捕获和解析,并能够提供丰富的流量统计信息。因此将其作为 NetFlow 芯片。由于设备数据自动处理模块所输出信号参量的端口号与 IP 信息完全相同,所以路由单元具备分类与辨别数据对象的能力。服务单元作为核电厂设备异动信号采集器的次级执行部件,由数据传输端口、模数转换电路两部分组成^[7]。其中,模数转换电路与路由单元的 NetFlow 采集芯片部件之间相连,可以提取与大型核电厂设备异动行为相关的全部态势信息参量,并可以借助数据传输端口将这些数据信息样本反馈至态势感知装置等其他部件结构之中,采用 Texas Instruments TI ADS124S08 24 位 8 通道关断型 Delta-Sigma ADC 电路。数据传输端口是核电厂设备异动信号采集器与其他系统结构之间的连接通路,其开放状态影响信号采集器元件的执行能力,因此选择 100 Gigabit Ethernet (100GbE) Port 端口。电力单元负责接收核电厂设备异动信号,可以在 LT1083 高电流、可调线性稳压器元件的配合下,更改 Tektronix PWS2000 电源模块两端的电压负载水平,从而在维持大型核电厂设备稳定运行状态的同时,完成对异动态势信号的感知与处理^[8]。完整的核电厂设备异动信号采集器结构模型如图 2 所示。

如图 2 所示,核电厂设备异动信号采集器结构中,数据信息参量的传输只能由输入端指向输出端,且即便在数据样本大量累积的情况下,为保证系统主机对异动态势感知结果的准确性,采集器装置在单位指令周期内,也只能录入一种类型的数据信号参量。

1.3 态势感知装置

态势感知装置由传感器认知模块、执行模块两部分组成。感知模块对于大型核电厂设备异动态势行为的评估需

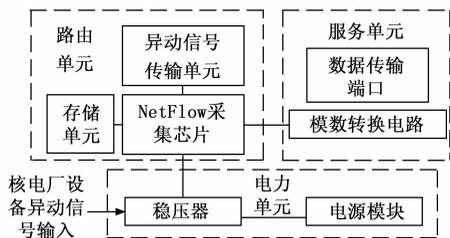


图 2 核电厂设备异动信号采集器结构模型

借助电压传感器、电流传感器、温度传感器 3 个部件结构。电压传感器负责感知核电厂设备所承担的电压负载水平, 在异动信号采集器保持稳定运行状态的情况下, 该元件可将电压数据直接转换成精确的电信号参量^[9]。因此采用动态和静态应用的赫斯曼高精度电压变送器 SensorData T-113。电流传感器负责感知核电厂设备所负荷的电流作用强度, 未达到额定负载条件之前, 传感器元件所显示的数值水平越大, 就表示核电设备所负荷的电流强度越大。硬件设计上采用 ES2000-9725 电流传感器。温度传感器负责监测电力设备的温度情况, 采用 MIK-WRN 电力设备温度监测传感器。完整的态势感知装置连接结构如图 3 所示。

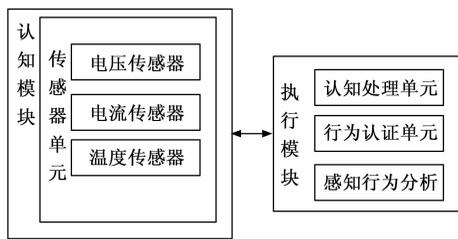


图 3 态势感知装置结构简图

执行模块包含认知处理单元、行为认知单元与感知行为分析单元, 在异动态势感知系统运行过程中, 整个模块单元与认证模块之间始终存在着明显的信息双向反馈传输关系^[10]。从功能性角度来看, 异动信号采集器、态势感知装置的连接等级完全相同, 都接受异动态势自动处理模块的直接调度, 因此执行模块的主机处理器需要具备处理速度快、吞吐量大、响应速度快、兼容性强等要求。系统选取 ARM Cortex-A78 作为态势感知装置执行模块的处理器。执行模块主要负责处理认知模块获得的态势认知信息、异动行为认证、感知异动行为分析 3 个任务。

2 核电厂设备异动态势感知系统软件设计

核电厂设备异动态势感知系统软件设计流程图如图 4 所示。

如图 4 所示, 本文构建时间序列模型, 提取异动数据时序特征并编码, 实现对核电厂设备异动数据的处理。选取核心异动态势指标, 按照标量化处理流程, 通过阈值方法实现对核电设备异动态势的感知。

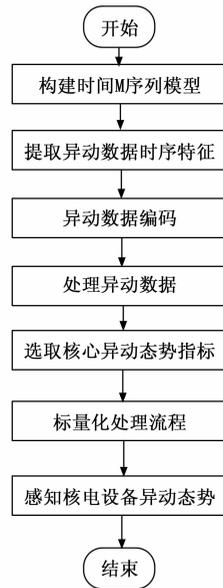


图 4 核电厂设备异动态势感知系统软件设计流程

2.1 基于时间序列模型的核电厂设备异动数据处理

时间序列也称为动态数列, 是指按照时间先后顺序排列二次的统计指标数值表达数列, 按照时间序列条件可以根据已获得的历史数据, 对未来可能得到的数据样本进行预测, 且整个运算过程中, 单一数据对象的取值不会对实际预测结果造成影响。相较于其他类型的定义模型, 时间序列完全遵循时间顺序对随机变量进行定义, 等时段间隔内依照给定的采样率分类数值观测结果, 既可以描述出变量对象的随机性变化行为, 也可以在保证数据样本完整性的情况下, 实现对信息参量的挖掘与处理。因此态势感知系统运行主机对核电厂设备异动数据的处理遵循时间序列条件, 本章节内容在上章硬件设计结构中设备数据自动处理模块硬件基础上, 设计基于时间序列模型的核电厂设备异动数据处理算法, 并完善核电设备异动数据的具体处理流程。

2.1.1 异动数据时序特征提取

时序趋势特征描述了大型核电厂设备异动态势数据的实时传输能力, 在一个指令周期内, 只有保证时序趋势特征参量取值的一致性, 才能够实现对核电设备异动态势行为的准确感知。时间序列模型要求, 时序趋势特征的排序必须遵循由小到大的原则, 且整个数据样本集合中不可以存在两个取值相同的特征参量。从数值角度来看, 时序趋势特征的定义一致性可以保证异动数据与时间定义值之间的独立性对应关系; 从数据取样的角度来看, 时序趋势特征属于核电设备异动数据的属性参量, 不同取值结果虽然代表不同的数据信息对象, 但却不会对核电设备的异动态势行为造成影响^[11-12]。

规定 a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_n 表示 n 个不同的核电设备异动数据时序定义参数, 其计算式如下:

$$\begin{cases} a_1 = \zeta_1 \times \frac{s_1}{|\Delta A|} \\ a_2 = \zeta_2 \times \frac{s_2}{|\Delta A|} \\ \vdots \\ a_n = \zeta_n \times \frac{s_n}{|\Delta A|} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$ 分别表示核电设备异动态势的行为参量, 且 $\zeta_1 \neq \zeta_2 \neq \dots \neq \zeta_n$ 的不等式取值条件恒成立; ΔA 表示核电设备异动态势行为数据的单位累积量, 其取值属于 $[1, +\infty)$ 的数值区间; s_1, s_2, \dots, s_n 分别表示与不同核电设备异动态势行为参量相关的时间性定义参数。

在公式 (1) 的基础上, 可将核电设备异动数据时序趋势特征提取表达式定义为:

$$D = \psi \cdot \frac{\exp(\omega^2)}{\sum a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n} \cdot d \quad (2)$$

式中, ω 表示异动数据的时序趋势查询系数, d 表示时序趋势特征的数值定义参数, ψ 表示核电设备异动数据的时序性取样参数。系统主机对于异动数据时序趋势特征的取样要求数据样本必须属于同一传输周期, 因此在定义时间序列模型时, 不需考虑信息参量的非同源性。如若单纯考虑时序趋势特征完成对异动数据的抽取, 有可能导致所得信息参量不完全符合时间序列模型的定义标准, 因此需要按照时序特征进行特征编码, 从而使得系统主机能够对大型核电厂设备异动态势行为进行准确感知。

2.1.2 异动数据时序特征编码

时序特征编码是在上节提取的时序趋势特征基础上, 将所得的数据样本参量统一定义形式。时序特征编码对于大型核电厂设备异动态势行为数据的约束能力较强^[13]。依照时序特征编码条件取样异动态势行为信息, 既可以避免异常值参量的出现, 也能够帮助系统主机制定更为具体的异动态势行为感知程序指令。

规定 f 表示核电设备异动数据的时间性标记系数, σ 表示同一数据样本集合中的核电设备异动行为等级定义参数, ζ 表示基于时间序列的核电设备异动数据取样系数, \bar{G} 表示核电设备异动数据的时序性排列特征值, \tilde{g} 表示异动数据样本的时序性取样阈值, τ 表示核电设备异动数据的时序性编码周期, 且 $\tilde{g} \neq 0, \tau \neq 0$ 的不等式取值条件同时成立。在上述物理量的支持下, 联立公式 (2), 推导大型核电厂设备异动态势行为数据的时序特征编码结果为:

$$F = fD + \sigma \frac{[(\zeta + 1)\bar{G}]^2}{\tau \tilde{g}} \quad (3)$$

如果大型核电厂设备异动态势行为数据的取值频繁发生变化, 在定义时序特征编码条件时, 应尽量避免取得数值过于相近的信息参量指标^[14]。

2.1.3 基于时间序列的异动数据处理

对于大型核电厂设备异动态势感知系统而言, 时间序列模型反映出了时期总量指标的数值排列状态。在同一数

据集合中, 每一个时间序列指标都具有数值可加性的计算特征, 且每一个指标参量的数值水平都与其所代表核电设备异动数据时期长短具有直接联系^[15]。通常情况下, 时间序列集合中每一个指标数值都是由前一个指标数值累积汇总所得到的, 但由于计算方式并不相同, 所以整个序列集合中并不会出现完全相同的数据信息参量^[16]。系统主机在感知核电设备异动态势行为时, 不允许两个数据信息的数量级水平完全相等, 所以在时间序列模型中, 数值相同的数据样本对应同一个时序特征编码结果。基于上节的时序特征编码结果, 建立时序模型, 进行异动数据处理。

设 v 表示核电厂设备异动数据的可加性计算参数, $\bar{\omega}$ 表示异动数据的时间性长短判定系数, h 表示数据样本的时间间隔, \hat{j} 表示基于时间序列模型的数据样本数量, θ 表示时间序列条件下的数据映射系数, \hat{k} 表示基于时间序列模型的核电设备异动态势行为数据数值定义特征值, 联立公式 (3), 可将时间序列模型表达式定义为:

$$H = -\frac{\bar{\omega}}{v} \sum \log(h \times F) \cdot \left(\frac{\theta \times k}{j}\right) \quad (4)$$

在时间序列模型基础上, 系统主机对于核电设备异动数据处理流程的完善首先需要完成对异动态势数据的取样, 然后分析关联数据样本的具体传输行为, 最后在联合时间序列模型, 定义具体的异动数据处理方案。在系统运行过程中, 异动数据处理流程需要各级应用部件的共同配合, 且由于已取样数据样本的类别与属性并不完全相同, 所以为保证主机元件对核电厂设备异动态势行为的准确感知能力, 依照时间序列模型筛选数据样本时, 还要求信息参量的时序趋势特征与时序特征编码条件之间保持关联性对应关系^[17-18]。

时间序列模型对于核电设备异动数据取值的要求较为严格, 因此在处理数据样本的过程中, 不会对同一类信息参量进行重复取样。基于时间序列的核电厂设备异动数据处理表达式的定义参考公式 (5):

$$J = \frac{\sqrt{H}}{\prod_{m \rightarrow \infty} L_{\max}^2 - L_{\min}^2} \quad (5)$$

其中: l 表示核电设备异动数据时序趋势特征与时序特征编码条件之间的数值对应参数, m 表示异动数据的时间序列特征值, L_{\max} 表示已取样异动数据类别属性定义项的最大取值结果, L_{\min} 表示异动数据类别属性定义项的最小取值结果。由此完成设备数据自动处理模块的异动数据处理算法设计。基于异动数据处理的处理结果, 对核电设备异动态势进行感知。

2.2 核电设备异动态势的感知算法

在上节数据处理时间序列模型的支持下, 选取异动态势指标, 再通过量化处理的方式, 完成对感知等级的划分, 基于硬件设计中的态势感知装置实现对大型核电厂设备异动态势的感知。

2.2.1 异动态势指标选取

基于时间序列模型选取异动态势指标遵循如下原则。

1) 独立完整原则: 感知系统要求大型核电厂设备异动态势指标体系必须保持完整性, 且所选取指标需要反映出核电设备态势水平的各个阶段, 即必须大于识别阈值。

2) 动静结合原则: 不同异动态势指标的数值特性有所不同, 但大型核电厂设备的运行状态在一段时间内是不会改变的, 因此为实现对异动态势行为的精准感知, 应考虑不同态势指标的关联性^[19]。

3) 分层原则: 各类态势指标对于大型核电厂设备运行状态的影响程度是不同的, 因此对于系统主机而言, 这些指标的数值地位是不平等的, 在感知过程中, 需要进行标准均值化的考虑^[20]。在计算过程中, 其量化处理结果的针对性较强。

利用公式 (5), 推导基于设备数据时间序列模型的异动态势指标选取条件表达式为:

$$M = \frac{\bar{b}^2}{J \cdot \sum |\vartheta \times B|^c} > 0 \quad (6)$$

式中, \bar{b} 表示核电设备异动态势行为数据标准值。 \bar{B} 表示系统感知主机在单位时间内取得的核电设备异动态势行为数据均值。 ϑ 表示基于时间序列模型的异动态势指标识别阈值, 且 $\vartheta \neq 0$ 的取值条件恒成立。 c 表示已获取异动态势指标之间的关联性度量值。通过上述公式筛选出满足选取条件的指标。单位执行周期内, 主机元件所需处理异动态势数据的数量级水平相对较高, 且种类并不唯一, 因此为保证感知结果的准确性, 还必须对所得指标进行量化处理。

2.2.2 态势指标量化处理

由于大型核电厂设备的运行较为复杂, 上节已选取异动态势指标中仍有部分参量为标称型数据, 其无法作为量化感知对象直接输入系统主机之中, 因此对于不同的异动态势指标还需要进行量化处理。所谓量化处理即是指从数值角度对核电设备异动态势指标进行计算, 一般来说, 核电设备异动态势行为的表现能力越强, 量化后态势指标的计算数值也就越大^[21-22]。对于核电设备异动态势指标量化处理表达式的计算参考公式 (7), 由于上节条件筛选出的指标 $M > 0$, 因此可以作为分母:

$$V = \frac{\sum \eta \cdot |\hat{C}| \cdot X}{M} \quad (7)$$

式中, η 表示核电设备异动态势指标在系统主机中的转码效率。 \hat{C} 表示异动态势指标的数值量化特征。 X 表示基于时间序列的核电设备异动态势行为数据类别数。量化处理完成了由标称型数据到数值型数据的转换, 特别是在大型核电厂设备表现出非平稳运行状态的情况下, 只有依靠数值型数据定义具体的执行指令, 才能保证异动态势感知结果符合实际应用需求。

2.2.3 异动态势感知实现

将上节量化的大型核电厂设备异动关键性能指标的历

史数据作为阈值, 利用态势感知装置采集传感监测信息, 经过上节数据处理模块的处理, 通过同步阈值方法实现设备的异动态势感知。在选取历史数据时应确保指标阈值数据的时间跨度足够长, 并涵盖多个正常运行期间的观测结果。通常, 可以使用均值加减若干倍标准差作为阈值上下限, 即上限值为均值加标准差, 下限值为均值减标准差。在每个时间步上, 比较每个设备异动性能指标参数的当前观测值与设定阈值。如果观测值超过上限或低于下限, 则将其判定为异常。可以设置一个容差范围, 例如允许观测值在一定范围内波动而不被视为异常。定期回顾和更新阈值, 以反映设备性能的变化和演变。根据数据之间的时间映射关系调整阈值参数, 确保异动感知的准确性和可靠性^[23-24]。

以异动态势感知数据之间的时间映射关系作为依据, 构建异动感知模型, 设 t 表示异动态势的感知阈值标准值, q 表示异动态势行为数据指标均值, ω 表示基于时间序列模型的核电设备异动态势行为数据统计系数, Q 表示异动态势行为的风险性系数因子。在上述物理量的支持下, 联立公式 (7), 可将感知结果表达式定义为:

$$Z = \frac{-\omega(V)^2}{qQ} \quad (8)$$

如果公式 (8) 的计算结果大于设定阈值, 则判定为异动值, 由此实现核电厂设备异动态势感知。

3 实例分析

为突出说明基于时间序列的大型核电厂设备异动态势感知系统、基于核主成分分析和 AP 聚类算法的态势感知技术^[2]、基于深度学习的自组织态势感知与决策系统^[3]的实用差异性, 设计如下对比实验。

3.1 实验准备

在核电厂中, 设备异动行为是导致核电负荷电压、负荷电流数值异常增大的主要原因, 如果异动行为的持续时间过长, 则会导致核电厂设备的电压、负荷电流数值表现出非平稳运行状态, 据此进行测试。将某核电厂作为实验对象, 设备异动感知实验具体环境如图 5 所示。

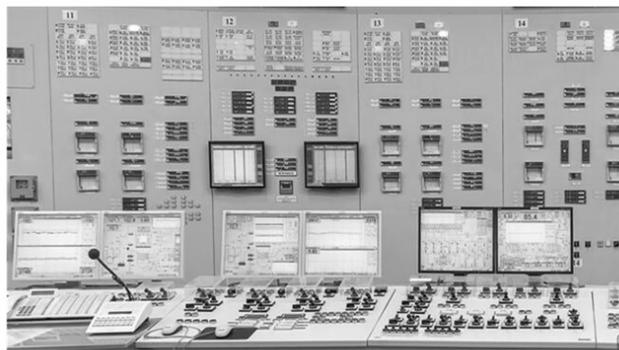


图 5 核电厂设备异动态势行为感知数据记录实验环境

本次实验所感知的异动设备元件的具体型号如表 1 所示。

表 1 实验设备选型

项目	实验元件	名称与型号
1	核电机	ACP1000
2	压力表	YTP100ML MF 电泵表
3	测压装置	DN20 电压表
4	测流装置	SLQ-2500 电流表
5	整流器	KBPC5010 整流桥堆
6	供电电源	SK1000A 直流电源

出于公平性考虑，每测得一组实验数据，都要确保相关设备元件恢复至初始连接状态后，才可以进行后续实验步骤，且在更换实验方法时，各个设备元件的连接形式与实时运行状态并不会发生变化。

3.2 流程与数据处理

本次实验的具体执行流程如下：首先，应用本文设计感知系统的核电厂设备异动信号采集器获取核电设备运行过程中，负荷电压、负荷电流的数值变化情况；然后输入到设备数据自动处理模块进行数据处理，最后输入到态势感知装置进行感知，所得结果为实验组变量；

应用基于核主成分分析和 AP 聚类算法的态势感知技术，监测核电设备运行过程中，负荷电压、负荷电流的数值变化情况，所得结果为对照 A 变量；应用基于深度学习的自组织态势感知与决策系统，监测核电设备运行过程中，负荷电压、负荷电流的数值变化情况，所得结果为对照 B 变量。

将以上所有变量数据结果输入到仿真平台进行算法运行，测试参数如下：监测数据采集频率为 10 min；时间序列数据的长度为 1 h，异动阈值为负荷电压差值超过 150.0 V、负荷电流差值超过 50.0 A。

实验环境参数为：处理器：AMD Ryzen 7；内存：32 GB；仿真软件：MATLAB R2021a；编程语言：Scikit-learn。

根据核电负荷电压、负荷电流的数值情况，总结实验规律。下图反映了实验组、对照 A 组、对照 B 组核电负荷电压的具体实验情况。

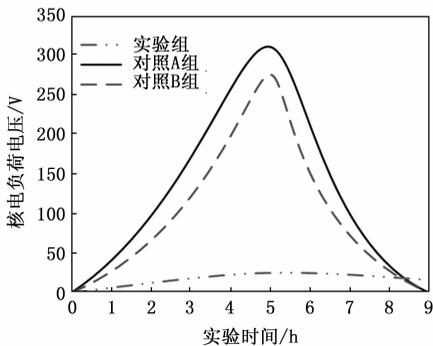


图 6 核电负荷电压

分析图 6 可知，实验过程中，实验组核电负荷电压最

大值仅能达到 25.0 V，与初始值 0 V、终止值 17.2 V 之间的差值水平相对较小，不符合异常增大的判定条件，说明本文方法选取核心异动态势指标，按照标量化处理流程，通过阈值方法感知核电设备异动态势，有效抑制了核电负荷电压的异常增大。第 5 h 时，对照 A 组核电负荷电压达到最大值 307.9 V，与初始值 0 V、终止值 0 V 之间的差值均超过 150.0 V，符合异常增大的判定条件。第 5 h 时，对照 B 组核电负荷电压达到最大值 275.1 V，与初始值 0 V、终止值 0 V 之间的差值也都超过 150.0 V，符合异常增大的判定条件。

图 7 反映了实验组、对照 A 组、对照 B 组核电负荷电流的具体实验情况。

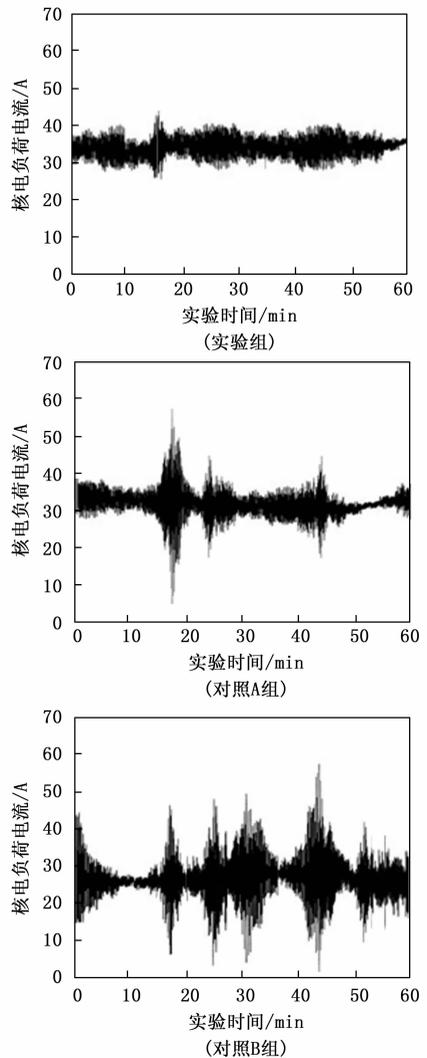


图 7 核电负荷电流

分析图 7 可知，整个实验过程中，实验组核电负荷电流最大值为 42.8 A、最小值为 26.7 A，二者差值为 16.1 A，不符合异常增大的判定条件。对照 A 组核电负荷电流最大值为 57.8 A、最小值为 5.1 A，二者差值为 52.7 A，符合异常增大的判定条件。对照 B 组核电负荷电流最大值为 58.2

A、最小值为 1.6 A, 二者差值为 56.6 A, 符合异常增大的判定条件。以上对比数据说明, 3 种方法中只有本文方法能够有效抑制核电负荷电流数值异常增大的变化态势。这是因为本文构建时间序列模型, 提取异动数据时序特征并编码, 为设备异动感知提供了良好的数据基础, 由于能够通过阈值准确感知异动态势, 因此提升了负荷电流数值异常增大的抑制效果。

3.3 实验结果讨论

综上可知本次实验结论为:

1) 应用基于核主成分分析和 AP 聚类算法的态势感知技术、基于深度学习的自组织态势感知与决策系统, 并不能解决核电负荷电压、核电负荷电流数值异常增大的问题, 故而不能准确感知核电厂设备异动态势。

2) 应用基于时间序列的大型核电厂设备异动态势感知系统, 能够有效抑制核电负荷电压、核电负荷电流数值异常增大的变化态势, 在精准感知核电设备异动能力方面具有较强的实用性价值。

4 结束语

文章设计了基于时间序列的大型核电厂设备异动态势感知系统, 通过处理核电设备异动数据的方式, 完善态势行为感知指令的执行流程。相较于基于核主成分分析和 AP 聚类算法的态势感知技术、基于深度学习的自组织态势感知与决策系统, 时间序列模型的应用, 解决了核电负荷电压、核电负荷电流数值异常增大的问题, 在精准感知核电设备异动能力方面的实用性较强, 能够较好维护核电设备的平稳运行状态。

参考文献:

[1] 廖春生, 陈维, 朱明亮, 等. 第三代核电站超大吨位预应力束应力分布关键技术 [J]. 原子能科学技术, 2023, 57 (S1): 129-138.

[2] 王艳松, 高鑫, 胡彩娥, 等. 基于核主成分分析和 AP 聚类算法的电力系统态势感知技术 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (1): 25-36.

[3] 李晓婷, 贾婧, 孟云霞. 基于深度学习的自组织态势感知与决策系统 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46 (4): 147-151.

[4] 王睿弘. 基于 DSP 的发电厂继电保护设备态势感知方法 [J]. 电子技术与软件工程, 2023 (4): 86-91.

[5] GAMMON T, JAMIL S. Security situation awareness of core equipment in power plants based on convolutional neural networks [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2020, 31 (9): 46-53.

[6] 缪岚芯, 雷雨, 曾鹏鹏, 等. 基于粒度感知和语义聚合的图像-文本处理网络 [J]. 计算机科学, 2022, 49 (11): 134-140.

[7] 郑华林, 冯一夫, 潘盛湖. 基于 STM32 的金属管道弱磁信号采集系统设计 [J]. 工程设计学报, 2021, 28 (5): 646-653.

[8] 刘旭, 刘海宁, 林心园, 等. 基于数字信号处理器的振动信

号采集及边缘计算系统设计 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2021, 35 (4): 307-314.

[9] 田书欣, 李昆鹏, 魏书荣, 等. 基于同步相量测量装置的配电网安全态势感知方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (2): 617-632.

[10] 张俊豪, 罗国富, 杨幸博, 等. 基于深度学习和机器视觉的多源数据感知技术研究 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (4): 107-113.

[11] 郑恒峰, 李柏青, 刘道伟, 等. 基于电压相量时序轨迹特征的电网静态稳定态势在线评估指标 [J]. 电网技术, 2021, 45 (2): 640-648.

[12] 陈鹏, 吴一凡, 蔡爽, 等. 基于自编码压缩与多尺度特征提取的抽水蓄能机组劣化趋势评估与预测 [J]. 水利学报, 2022, 53 (6): 747-756.

[13] 李学明, 徐绍龙, 倪大成, 等. 基于时序特征模式识别的牵引电机过流实时诊断 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48 (10): 77-83.

[14] 杨鲜, 赵计生, 强保华, 等. 基于改进的 BSMOTE 和时序特征的风机故障采样算法 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (6): 1673-1678.

[15] 邱禧荷, 茹亚军, 陈斌, 等. 基于 Deep AR 神经网络时间序列模型的电能消耗预测 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (5): 599-603.

[16] 陆彦辉, 柳寒, 李航, 等. 基于多鉴别器生成对抗网络的时间序列生成模型 [J]. 通信学报, 2022, 43 (10): 167-176.

[17] 仇林遥, 王晓峰, 郑作亚, 等. 基于微服务架构的时空数据处理服务封装技术 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16 (1): 5-13.

[18] 黄逸丹, 舒逢春, 何旋, 等. VGOS 超宽带观测的首次 UT1 测量数据处理及分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2023, 48 (1): 75-83.

[19] 田书欣, 李昆鹏, 魏书荣, 等. 基于同步相量测量装置的配电网安全态势感知方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (2): 617-632.

[20] 熊中浩, 张伟, 杨国玉. 基于 DBN 的网络安全态势评估和态势预测建模研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47 (5): 35-39.

[21] 徐鹏涛, 曹健, 陈玮乾, 等. 基于离群值去除的卷积神经网络模型训练后量化预处理方法 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2022, 58 (5): 808-812.

[22] 杨喜文, 郑建凤, 邢力元. 基于 NSGA-II 算法的正逆向物流网络中回收处理中心选址 [J]. 高技术通讯, 2021, 31 (2): 214-222.

[23] 陈孝莲, 纪元, 过烽, 等. SD-EON 业务安全等级感知的低时延路由频谱分配算法 [J]. 光通信技术, 2021, 45 (5): 11-15.

[24] 王致远, 刘留, 樊圆圆, 等. 一种基于拥塞等级划分的 LTE-V 资源碰撞避免机制 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (2): 226-232.