



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 119691663 B

(45) 授权公告日 2025. 07. 04

(21) 申请号 202510208561.9

G06Q 50/06 (2024.01)

(22) 申请日 2025.02.25

G06N 5/025 (2023.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06F 18/10 (2023.01)

申请公布号 CN 119691663 A

G06F 18/2131 (2023.01)

G06N 5/04 (2023.01)

(43) 申请公布日 2025.03.25

(56) 对比文件

(73) 专利权人 北京知达客信息技术有限公司

CN 119476639 A, 2025.02.18

地址 100070 北京市丰台区南四环西路188

号十六区18号楼2层202

审查员 曾璇

(72) 发明人 林炳漂

(74) 专利代理机构 北京国科力为专利代理事务

所(普通合伙) 16056

专利代理师 宋素梅

(51) Int. Cl.

G06F 18/2433 (2023.01)

G06Q 10/067 (2023.01)

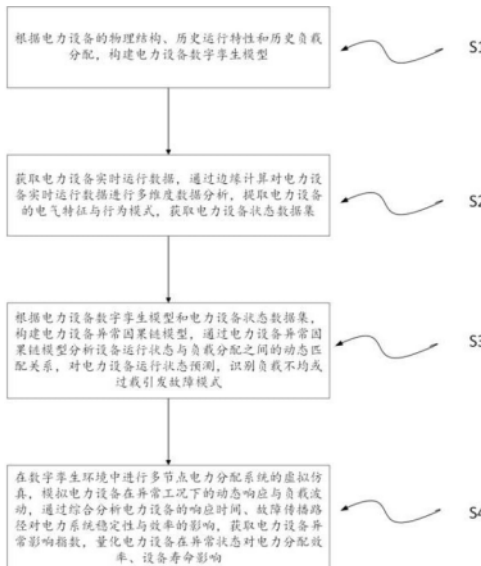
权利要求书2页 说明书10页 附图1页

(54) 发明名称

基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法

(57) 摘要

本发明公开了基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,涉及电网运行技术领域。该方法通过建立电力设备的数字孪生模型和实时数据分析,实现对电力设备运行状态的预测与异常仿真。通过分析电力设备的物理结构、运行特性及负载分配,构建数字孪生模型,利用边缘计算对实时数据进行多维度分析,提取电气特征和行为模式,生成设备状态数据集,基于模型和数据集,构建异常因果链模型,识别负载不均或过载引发的故障模式,通过虚拟仿真和故障传播分析,评估异常状态对电力系统稳定性和效率的影响,获取电力设备异常影响指数。提升电力设备故障预测的准确性,优化电力系统稳定性和效率,为智能运维和故障预警提供支持。



1. 基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

S1. 根据电力设备的物理结构、历史运行特性和历史负载分配, 构建电力设备数字孪生模型;

S2. 获取电力设备实时运行数据, 通过边缘计算对电力设备实时运行数据进行多维度数据分析, 提取电力设备的电气特征与行为模式, 获取电力设备状态数据集;

S3. 根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集, 构建电力设备异常因果链模型, 通过电力设备异常因果链模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系, 对电力设备运行状态预测, 识别负载不均或过载引发故障模式;

S4. 在数字孪生环境中进行多节点电力分配系统的虚拟仿真, 模拟电力设备在异常工况下的动态响应与负载波动, 通过综合分析电力设备的响应时间、故障传播路径对电力系统稳定性与效率的影响, 获取电力设备异常影响指数, 量化电力设备在异常状态对电力分配效率、设备寿命影响;

根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集, 构建电力设备异常因果链模型的具体过程如下:

根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集中电力设备的电气特征与行为模式, 作为输入数据;

根据电力设备运行逻辑、历史故障数据的互联关系, 通过因果推理构建电力设备因果关系图谱;

基于电力设备因果关系图谱, 确定各异常因素与设备故障之间的因果路径, 并对每个环节进行数学建模, 构建电力设备异常因果链模型;

通过电力设备异常因果链模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系的具体过程如下:

将预处理后的电力设备实时运行数据输入电力设备异常因果链模型;

基于电力设备因果关系图谱, 分析设备运行状态与负载分配之间的匹配关系, 通过因果推理分析, 评估负载波动对电力设备运行状态的影响;

识别负载不均或过载引发故障模式的具体过程如下:

基于电力设备异常因果链模型, 分析电力设备运行中的负载波动和设备响应特性, 结合电气特征与运行行为模式, 识别负载不均或过载引发故障模式;

通过综合分析电力设备的响应时间、故障传播路径对电力系统稳定性与效率的影响的具体过程如下:

通过电力设备的异常因果链模型, 分析电力设备在不同工作状态下的响应时间, 评估设备对异常状态的反应速度和滞后效应;

基于电力设备的物理结构, 模拟故障发生后, 故障从一个设备传播到其他设备的路径, 分析故障扩散对电力系统稳定性的影响;

获取电力设备异常影响指数的具体过程如下:

将响应时间与设备正常运行时的基准值进行对比, 确定其偏离程度;

结合故障传播路径分析和响应时间评估, 模拟故障从故障源设备扩展至非故障源设备的过程, 评估故障传播对电力系统影响;

根据故障传播路径分析和响应时间分析结果,量化异常状态对电力设备和电力系统稳定性、效率的影响,获取电力设备的异常影响指数;

电力设备的异常影响指数(AEI)公式如下:

$$AEI = \arctan \left(\left(\frac{T_{\text{actual}} - T_{\text{baseline}}}{T_{\text{baseline}}} \right) \times W_1 + \left(\frac{C_{\text{fault}}}{C_{\text{total}}} \right) \times W_2 \right);$$
公式参数解释: T_{actual} :电

力设备在异常状态下的响应时间, T_{baseline} :电力设备在正常状态下的基准响应时间, W_1 :响应时间加权因子,表示响应时间对电力设备异常影响指数的权重,通常会根据系统设计的需求设定,响应时间对设备运行效率的影响较大时, W_1 的值会越高, C_{fault} :故障传播路径中影响的设备数量, C_{total} :系统中总设备数量, W_2 :故障传播加权因子,表示故障传播路径对异常影响指数的贡献权重,通常反映了故障扩展对整个电力系统稳定性的影响。

2.根据权利要求1所述的基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,其特征在于:根据电力设备的物理结构、历史运行特性和历史负载分配,构建电力设备数字孪生模型的具体过程如下:

电力设备物理结构包括电力设备外形与尺寸、核心部件配置、电气连接与接线结构;

电力设备历史运行特性包括电力设备的工作参数、设备性能曲线及历史故障记录;

电力设备历史负载分配包括电力设备负载的时间序列数据和负载的动态变化趋势;

通过有限元分析对电力设备的电气性能进行建模,结合多物理场仿真将电力设备的物理结构、运行特性和负载分配进行系统集成,构建电力设备数字孪生模型。

3.根据权利要求2所述的基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,其特征在于:通过边缘计算对电力设备实时运行数据进行多维度数据分析,提取电力设备的电气特征与行为模式,获取电力设备状态数据集的具体过程如下:

通过边缘计算对电力设备实时运行数据预处理,通过时域分析、频域分析和统计分析提取多维度特征;

在边缘计算节点对电力设备负载波动、设备启动和停机模式、运行周期行为模式进行局部分析,提取电力设备的运行为特征;

综合电气特征和运行为模式的分析结果,汇总并构建电力设备状态数据集。

基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电网运行技术领域,具体为基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法。

背景技术

[0002] 随着全球电力需求的不断增长,电力系统的可靠性、稳定性和效率成为保障经济发展和社会运行的重要因素。特别是在智能电网和工业自动化快速发展的背景下,电力设备的运行状态监测和异常预测显得尤为重要。数字孪生技术作为一种创新的技术手段,通过创建电力设备的虚拟副本,可以实时监测电力设备的运行状态,预测设备故障,提升电力系统的智能化水平。通过对电力设备进行数字化建模和实时数据分析,结合边缘计算和大数据技术,可以有效提升电力设备的运行效率和故障预警能力,为电力系统的智能调度、负载管理以及故障响应提供支持。

[0003] 例如公告号为CN117391310B的发明专利公开了一种基于数字孪生技术的电网设备运行状态预测及优化方法,具体包括下述步骤:设备信息获取;设备数字孪生模型构建;电网设备数字孪生混合模型构建;设备信息数据处理;综合评估结果获取;设备运行状态全面可视化感知;电网设备状态预测和优化控制;数字孪生模型修正;电网设备状态优化控制。本发明属于电网运行技术领域,具体提供了一种基于数字孪生技术的电网设备运行状态预测及优化控制的方法,该方法具有下述优点:(1)提升设备运行状态全面可视化感知的能力;(2)提升对电网设备运行状态实时预测和优化控制的准确性;(3)提升设备故障预警的准确性以及运维人员应急决策处置的能力。

[0004] 现有基于数字孪生的电力设备状态监测和预测方法,多数侧重于设备单一状态的预测和基于静态数据的分析,未能充分考虑电力设备在实际运行过程中复杂的动态响应。传统方法常常依赖于单一传感器的数据和简单的阈值判断来评估设备的健康状况,缺乏对设备运行状态的多维度、全方位分析。无法有效评估故障传播对其他设备的影响及其对电力系统稳定性和效率的潜在威胁。

发明内容

[0005] 针对现有技术的不足,本发明提供了基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,通过综合分析电力设备的动态响应、故障传播路径以及负载匹配关系,提升电力设备状态预测的准确性,并量化设备在异常状态下对电力系统稳定性、效率和设备寿命的影响,解决了上述背景技术的问题。

[0006] 为实现以上目的,本发明通过以下技术方案予以实现:基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,包括以下步骤:S1.根据电力设备的物理结构、历史运行特性和历史负载分配,构建电力设备数字孪生模型;S2.获取电力设备实时运行数据,通过边缘计算对电力设备实时运行数据进行多维度数据分析,提取电力设备的电气特征与行为模式,获取电力设备状态数据集;S3.根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集,构

建电力设备异常因果链模型,通过电力设备异常因果链模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系,对电力设备运行状态预测,识别负载不均或过载引发故障模式;S4.在数字孪生环境中进行多节点电力分配系统的虚拟仿真,模拟电力设备在异常工况下的动态响应与负载波动,通过综合分析电力设备的响应时间、故障传播路径对电力系统稳定性与效率的影响,获取电力设备异常影响指数,量化电力设备在异常状态对电力分配效率、设备寿命影响;所述电力设备异常影响指数用于量化电力设备在异常状态下对电力系统稳定性与效率影响的指标。

[0007] 进一步地,根据电力设备的物理结构、历史运行特性和历史负载分配,构建电力设备数字孪生模型的具体过程如下:电力设备物理结构包括电力设备外形与尺寸、核心部件配置、电气连接与接线结构;电力设备历史运行特性包括电力设备的工作参数、设备性能曲线及历史故障记录;电力设备历史负载分配包括电力设备负载的时间序列数据和负载的动态变化趋势;通过有限元分析对电力设备的电气性能进行建模,结合多物理场仿真将电力设备的物理结构、运行特性和负载分配进行系统集成,构建电力设备数字孪生模型。

[0008] 进一步地,通过边缘计算对电力设备实时运行数据进行多维度数据分析,提取电力设备的电气特征与行为模式,获取电力设备状态数据集的具体过程如下:通过边缘计算对电力设备实时运行数据预处理,通过时域分析、频域分析和统计分析提取多维度特征;在边缘计算节点对电力设备负载波动、设备启动和停机模式、运行周期行为模式进行局部分析,提取电力设备的运行为特征;综合电气特征和运行为模式的分析结果,汇总并构建电力设备状态数据集。

[0009] 进一步地,根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集,构建电力设备异常因果链模型的具体过程如下:根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集中电力设备的电气特征与行为模式,作为输入数据;根据电力设备运行逻辑、历史故障数据的互联关系,通过因果推理构建电力设备因果关系图谱;基于电力设备因果关系图谱,确定各异常因素与设备故障之间的因果路径,并对每个环节进行数学建模,构建电力设备异常因果链模型。

[0010] 进一步地,通过电力设备异常因果链模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系的具体过程如下:将预处理后的电力设备实时运行数据输入电力设备异常因果链模型;基于电力设备因果关系图谱,分析设备运行状态与负载分配之间的匹配关系,通过因果推理分析,评估负载波动对电力设备运行状态的影响。

[0011] 进一步地,识别负载不均或过载引发故障模式的具体过程如下:基于电力设备异常因果链模型,分析电力设备运行中的负载波动和设备响应特性,结合电气特征与运行为模式,识别负载不均或过载引发故障模式。

[0012] 进一步地,通过综合分析电力设备的响应时间、故障传播路径对电力系统稳定性与效率的影响的具体过程如下:通过电力设备的异常因果链模型,分析电力设备在不同工作状态下的响应时间,评估设备对异常状态的反应速度和滞后效应;基于电力设备的物理结构,模拟故障发生后,故障从一个设备传播到其他设备的路径,分析故障扩散对电力系统稳定性的影响。

[0013] 进一步地,获取电力设备异常影响指数的具体过程如下:将响应时间与设备正常运行时的基准值进行对比,确定其偏离程度;结合故障传播路径分析和响应时间评估,模拟

故障从故障源设备扩展至非故障源设备的过程,评估故障传播对电力系统影响;根据故障传播路径分析和响应时间分析结果,量化异常状态对电力设备和电力系统稳定性、效率的影响,获取电力设备的异常影响指数。

[0014] 本发明具有以下有益效果:

[0015] (1)、基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,通过构建电力设备的数字孪生模型和获取实时运行数据,能够精准地反映电力设备的实际运行状态,并结合边缘计算进行多维度数据分析,提取电气特征与行为模式。提升电力设备的实时监测能力和故障预测精度,有效减少了电力设备运行过程中的不确定性和风险。

[0016] (2)、基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,通过构建电力设备异常因果链模型,分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系,并在数字孪生环境中进行多节点电力分配系统的虚拟仿真,能够全面模拟电力设备在异常工况下的动态响应与负载波动。通过对电力系统稳定性和效率的综合分析,本发明不仅可以量化异常状态对电力分配效率和设备寿命的影响,还能够为电网的智能调度和优化控制提供重要的数据支持,从而提升了电网的整体运行效率和设备的使用寿命。

[0017] 当然,实施本发明的任一产品并不一定需要同时达到以上所述的所有优点。

附图说明

[0018] 图1为本发明基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法流程图。

具体实施方式

[0019] 本申请实施例通过基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,解决了传统电力设备监测和故障预测准确性不足的问题。通过实时数据分析和虚拟仿真,能够精确识别负载不均、过载引发的故障,并评估故障传播对电力系统稳定性的影响,提升了电力系统的故障预警能力和稳定性。

[0020] 本申请实施例中的方案,总体思路如下:

[0021] 根据电力设备的物理结构、历史运行特性和历史负载分配,构建电力设备数字孪生模型。

[0022] 获取电力设备实时运行数据,通过边缘计算对电力设备实时运行数据进行多维度数据分析,提取电力设备的电气特征与行为模式,获取电力设备状态数据集。

[0023] 根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集,构建电力设备异常因果链模型,通过电力设备异常因果链模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系,对电力设备运行状态预测,识别负载不均或过载引发故障模式。

[0024] 在数字孪生环境中进行多节点电力分配系统的虚拟仿真,模拟电力设备在异常工况下的动态响应与负载波动,通过综合分析电力设备的响应时间、故障传播路径对电力系统稳定性与效率的影响,获取电力设备异常影响指数,量化电力设备在异常状态对电力分配效率、设备寿命影响。

[0025] 请参阅图1,本发明实施例提供一种技术方案:基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,包括以下步骤:S1.根据电力设备的物理结构、历史运行特性和历史负载分配,构建电力设备数字孪生模型;S2.获取电力设备实时运行数据,通过边缘计算对

电力设备实时运行数据进行多维度数据分析,提取电力设备的电气特征与行为模式,获取电力设备状态数据集;S3.根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集,构建电力设备异常因果链模型,通过电力设备异常因果链模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系,对电力设备运行状态预测,识别负载不均或过载引发故障模式;S4.在数字孪生环境中进行多节点电力分配系统的虚拟仿真,模拟电力设备在异常工况下的动态响应与负载波动,通过综合分析电力设备的响应时间、故障传播路径对电力系统稳定性与效率的影响,获取电力设备异常影响指数,量化电力设备在异常状态对电力分配效率、设备寿命影响;电力设备异常影响指数用于量化电力设备在异常状态下对电力系统稳定性与效率影响的指标。

[0026] 本实施方案中,S1通过收集电力设备的物理结构、历史运行特性(设备在不同负载和环境条件下的工作表现)以及历史负载分配(各设备的负载变化情况),建立数字孪生模型。该模型为电力设备的虚拟复制体,能模拟设备在不同工况下的行为。S2通过边缘计算技术,实时收集电力设备的运行数据,并对数据进行多维度分析。分析的内容包括电力设备的电气特征(如电流、电压、功率等)和行为模式(如设备的启停、负载变化等)。最终,形成电力设备的状态数据集,作为后续分析的基础。S3根据电力设备的数字孪生模型和实时运行状态数据集,构建电力设备异常因果链模型。该模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系。通过模型识别设备是否出现负载不均或过载等问题,并预测其可能引发的故障模式。例如,若负载分配不合理或过载,可能导致设备故障或电力系统不稳定。S4在数字孪生环境中,进行多节点电力分配系统的虚拟仿真。模拟在异常工况下,电力设备如何响应负载波动以及故障的传播路径。通过分析设备响应时间、故障传播路径及负载波动,评估这些因素对电力系统稳定性和效率的影响。最终,获取电力设备的异常影响指数,用于量化电力设备在异常状态下对电力分配效率和设备寿命的影响。数字孪生模型是一种将物理实体(如电力设备)与其虚拟模型进行映射的技术。该模型通过物理设备的实时数据、历史数据以及模拟数据进行构建,实时反映设备的运行状态。数字孪生模型不仅可以模拟设备的行为,还可以在虚拟环境中进行测试和优化,从而有效预测设备的故障和性能变化。边缘计算采用的是一种分布式计算架构,指的是将数据处理和分析推向网络的边缘节点,而非将所有数据传送到远程数据中心。这样做的好处是能大幅度减少延迟,提升数据处理效率。在电力设备监控中,边缘计算通过在设备本地或接近设备的地方进行数据分析,快速响应设备的运行变化。电力设备异常因果链模型是一种通过分析电力设备在运行中的异常状态与其原因之间的因果关系,建立的模型。该模型能够揭示设备异常产生的原因,并通过分析负载分配、设备响应等因素,预测未来可能发生的故障模式。例如,负载过大可能导致设备过热,从而引发故障,模型能够提前识别并预测这种故障模式。虚拟仿真指的是在计算机中模拟现实世界的运行状态和过程。在电力设备的运行状态预测中,虚拟仿真用于模拟电力设备在不同工况下(如负载波动、故障发生等)的行为。这种仿真通过数字孪生模型构建,并通过计算机模型反映设备响应和系统变化,帮助工程师预测潜在风险并优化操作。

[0027] 具体地,根据电力设备的物理结构、历史运行特性和历史负载分配,构建电力设备数字孪生模型的具体过程如下:电力设备物理结构包括电力设备外形与尺寸、核心部件配置、电气连接与接线结构;电力设备历史运行特性包括电力设备的工作参数、设备性能曲线及历史故障记录;电力设备历史负载分配包括电力设备负载的时间序列数据和负载的动态

变化趋势;通过有限元分析对电力设备的电气性能进行建模,结合多物理场仿真将电力设备的物理结构、运行特性和负载分配进行系统集成,构建电力设备数字孪生模型。

[0028] 本实施方案中,电力设备外形与尺寸:指电力设备的外部形态和其具体的物理尺寸(包括长、宽、高、体积)。这些尺寸决定了设备的占地空间、安装方式以及与其他设备的适配性。外形和尺寸对设备的安装、维护、以及运行时的热管理和通风等方面有直接影响。核心部件配置:指电力设备内部的关键部件配置,包括变压器、开关设备、电气元件(如继电器、断路器、电容器、电感器等)。这些部件决定了设备的基本功能和性能。例如,在变电站的设备中,变压器的容量和配置直接影响电压转换和功率传输的能力。电气连接与接线结构:指设备内部以及设备与外部电网或其他设备之间的电气连接方式,包括接线端子、接地方式、接头设计、电缆布线。这些电气连接决定了电流流通的路径、传输的稳定性及安全性。电力设备历史运行特性:电力设备的工作参数:指电力设备在正常工作过程中所需的基本参数,包括电压、电流、功率因数、频率、温度。这些参数在设备的运行过程中会影响其工作性能。设备性能曲线:是反映电力设备在不同运行条件下性能变化的曲线,通常包含效率、负载能力、输出功率、温升等参数的变化趋势。性能曲线帮助了解设备在不同负载和工况下的表现。历史故障记录:包括电力设备在过去运行过程中出现的所有故障类型、故障发生时间、频率及修复情况数据。历史故障记录能够帮助分析设备的可靠性和可能的故障模式。电力设备历史负载分配:负载的时间序列数据:记录电力设备在不同时间段内的负载变化情况。负载的动态变化趋势:指电力设备负载在一定时间内的变化趋势,可能表现为负荷的逐渐增加或减少、周期性波动等。负载的动态变化能够揭示电力系统在不同时间内的需求变化及其对设备运行的影响。负载分配建模:负载分配可以通过负载流分析方法建模:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \left(V_i \cdot V_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \right); \text{其中, } P_i \text{ 表示节点 } i \text{ 的有功}$$

功率, V_i 和 V_j 是节点电压, G_{ij} 和 B_{ij} 分别是节点 i 和节点 j 之间的导纳矩阵元素, θ_{ij} 是节点间的电压相角差。限元分析与多物理场仿真:有限元分析是一种数值计算方法,用于对电力设备的电气性能进行建模和仿真。通过将电力设备划分为若干小单元,计算其在不同工作条件下的应力、电场、磁场等物理现象,进而分析设备的性能和状态。多物理场仿真:结合了多个物理领域进行综合仿真。电力设备在实际工作中往往涉及多个物理现象的相互作用,使用多物理场仿真能够更加准确地模拟和分析设备在复杂工况下的整体行为。系统集成与数字孪生模型构建:在以上各项数据的基础上,系统集成是指将电力设备的物理结构、运行特性和负载分配信息进行综合,结合有限元分析和多物理场仿真结果,生成一个综合的数字孪生模型。该模型不仅能够反映设备在不同工况下的行为,还能够模拟设备在电力系统中的表现,进行实时状态预测与故障诊断。

[0029] 具体地,通过边缘计算对电力设备实时运行数据进行多维度数据分析,提取电力设备的电气特征与行为模式,获取电力设备状态数据集的具体过程如下:通过边缘计算对电力设备实时运行数据预处理,通过时域分析、频域分析和统计分析提取多维度特征;在边缘计算节点对电力设备负载波动、设备启动和停机模式、运行周期行为模式进行局部分析,提取电力设备的运行为特征;综合电气特征和运行为模式的分析结果,汇总并构建电力设备状态数据集。

[0030] 本实施方案中,边缘计算节点负责对电力设备实时运行数据进行预处理。实时数

据通常包含大量的电力设备运行信息,这些数据在没有处理的情况下可能存在噪声或缺失。预处理包括对数据的清洗、填补缺失值、去除异常值等操作,以确保后续分析的准确性。

时域分析:指通过分析电力设备实时数据的时间序列来提取设备的运行特征。例如,电压或电流信号随时间变化的趋势、波动范围、周期。这有助于判断设备在正常工作时的稳定性或异常波动。

频域分析:是将电力设备的信号转换到频率域进行分析,常用的方法如傅里叶变换。频域分析可以帮助识别设备中频繁发生的周期性波动,如电流的谐波、频率的偏差等,这些都可能与设备的故障或性能下降相关。

统计分析:对数据进行描述性统计分析,帮助识别电力设备的性能趋势或潜在的异常行为。例如,设备的电流均值偏离预期值可能表示设备负载不均,方差过大则可能意味着系统波动性增加。

局部分分析与行为模式提取:在边缘计算节点中,除了基本的电气特征提取外,还会对电力设备的具体行为模式进行局部分析。这些行为模式包括:

- 负载波动:**电力设备在运行过程中负载的变化趋势,包括负载波动的幅度和频率。负载波动的分析有助于识别设备在工作负荷较高或较低时的表现。
- 设备启动与停机模式:**分析设备的启动和停止过程中的电气特征,如启动时的电流冲击、停机时的电压变化等。这些模式有助于识别设备启动或停机过程中是否存在异常情况。
- 运行周期行为模式:**分析设备在一个完整工作周期中的状态变化,包括周期性负载变化、设备休息时段和工作时段等。这能够帮助理解设备的周期性行为模式,识别任何不规则的变化。

综合电气特征与行为模式分析:将上述电气特征(如电流、电压、频率)与运行行为模式(负载波动、启动/停机模式、周期性行为)进行综合分析。这些信息有助于形成一个全面的设备状态视图,能够描述设备在不同运行状态下的完整特征。通过数据融合、特征选择和模型建立,将电气特征和行为模式转化为有用的信息。结合电气特征和运行行为模式的分析结果,汇总并构建电力设备状态数据集。该数据集包含设备的实时状态、健康度、负载情况、异常指标等,可以为设备状态评估、故障预测、运行优化等提供数据支持。

[0031] 具体地,根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集,构建电力设备异常因果链模型的具体过程如下:根据电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集中电力设备的电气特征与行为模式,作为输入数据;根据电力设备运行逻辑、历史故障数据的互联关系,通过因果推理构建电力设备因果关系图谱;基于电力设备因果关系图谱,确定各异常因素与设备故障之间的因果路径,并对每个环节进行数学建模,构建电力设备异常因果链模型。

[0032] 本实施方案中,输入数据准备:该过程的输入数据来自电力设备数字孪生模型和电力设备状态数据集。具体来说,输入数据包括:

- 电气特征:**如电压、电流、功率电气参数,这些数据反映了电力设备的运行状况和健康状态。
- 行为模式:**包括设备的运行状态、负载波动、设备启动/停机模式、运行周期,这些行为模式有助于识别设备是否存在潜在故障或性能问题。

构建电力设备因果关系图谱:电力设备因果关系图谱是通过因果推理的方法来构建的。在这一步,主要依据电力设备的运行逻辑以及设备的历史故障数据,挖掘出不同电气特征和行为模式之间的因果关系。

运行逻辑:指设备的工作原理、各个子系统之间的交互关系以及设备各部分如何协同工作。这些运行逻辑可以帮助我们理解故障是如何从一个环节传播到另一个环节的。

历史故障数据:通过分析历史故障发生时的电气特征和设备行为,挖掘出不同故障之间的因果关系。这些数据有助于识别故障模式、故障传播路径等。

因果推理与因果路径确定:因果推理:通过分析设备运行中的不同因素及其相互关系,利用因果推理

技术构建因果关系图谱。该图谱显示了电力设备中的各个变量(电气特征、设备行为模式)之间的因果关联。包括,负载波动对电力设备电气特性的影响的因果图谱关系:负载波动→电流波动→电气特性变化→设备性能下降;电力设备的负载波动可能导致电流的波动,进而引发电气特性(电压、电流、电阻)的变化。当负载变化频繁时,这些电气特性的不稳定会影响设备的整体性能;启动/停机模式对电力设备的影响的因果图谱关系:启动/停机模式→电压/电流冲击→电气特性失常→故障风险增加,在设备启动或停机的瞬间,由于电流或电压的突然变化,可能引发电气特性的瞬时失常。例如,启动时电流冲击可能导致电气元件(如电容、电抗器)出现过载或损坏,而停机时的电流波动也可能对设备产生负面影响。这些异常的电气特性变化会提高设备故障的风险,尤其是对于较为敏感的元件。周期性行为对电力设备的影响的因果图谱关系:周期性行为→设备温度变化→电气元件老化→故障发生;设备的周期性运行(例如,周期性负载波动或周期性启停)会导致设备内部温度的周期性变化。温度变化会引起电气元件的老化,尤其是对于电容、电缆等对温度敏感的部件。长期的温度变化会加速设备老化,降低其使用寿命,增加故障发生的几率。因果路径确定:根据构建的因果关系图谱,确定异常因素与设备故障之间的因果路径。每个异常因素(包括负载不均、温度过高、电压异常)通过一定的因果链条引发设备故障。识别这些路径有助于预测设备可能出现的故障模式。数学建模与构建异常因果链模型:对每个因果环节进行数学建模,通过建立数学方程或模型,量化异常因素与设备故障之间的关系。通过回归模型、神经网络或贝叶斯网络对每个因果环节进行建模,预测各个异常因素对设备故障的影响。将设备的异常状态与潜在故障之间的关系形式化、量化。有助于计算设备在不同运行条件下的故障概率,从而实现故障预测。将上述过程中的因果路径和数学建模结果整合在一起,最终构建出电力设备异常因果链模型。该模型能够反映电力设备从出现初始异常到发生最终故障的完整过程,通过追踪异常的因果链条,帮助预测设备故障、评估故障风险、优化设备维护策略。

[0033] 具体地,通过电力设备异常因果链模型分析设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系的具体过程如下:将预处理后的电力设备实时运行数据输入电力设备异常因果链模型;基于电力设备因果关系图谱,分析设备运行状态与负载分配之间的匹配关系,通过因果推理分析,评估负载波动对电力设备运行状态的影响。

[0034] 本实施方案中,将经过预处理的电力设备实时运行数据输入到电力设备异常因果链模型中。这些数据通常包括电力设备的电气特性(如电流、电压)和设备行为模式(如负载波动、启动/停机模式等)。这些数据是模型进行后续分析和推理的基础。基于之前构建的电力设备因果关系图谱,分析设备的运行状态与负载分配之间的匹配关系。因果关系图谱显示了电力设备的各种状态(电气特性、温度、负载状态等)之间的因果关系,帮助揭示不同运行状态下负载分配对设备的具体影响。匹配关系指的是设备负载分配和设备当前运行状态(如负载、温度、功率输出等)之间是否一致。如果负载分配不合理(如负载不均或过载),将对设备运行产生负面影响,从而可能引发设备故障或性能下降。通过因果推理分析,模型可以模拟负载波动对电力设备运行状态的影响。因果推理是一种根据已知数据推断变量间因果关系的方法。在此步骤中,通过分析负载波动如何通过因果链条影响设备的电气特性、温度变化等,评估其对设备运行稳定性、效率以及可能的故障模式的影响。如果负载波动过大,可能导致电流、电压不稳定,从而影响设备的电气特性和温度变化,进而可能引发设备

故障。这一分析为后续的预测、预警以及故障诊断提供了依据。

[0035] 具体地,识别负载不均或过载引发故障模式的具体过程如下:基于电力设备异常因果链模型,分析电力设备运行中的负载波动和设备响应特性,结合电气特征与运行为模式,识别负载不均或过载引发故障模式。

[0036] 本实施方案中,基于电力设备异常因果链模型,输入电力设备的实时电气特征以及设备的运行为模式,建立不同变量之间的因果关系图谱。该模型能够将负载波动、设备响应、故障模式等因素之间的相互影响进行量化和系统化。通过输入数据,模型根据历史数据和运行特性来推导设备当前状态下负载不均或过载的可能性。结合电气特征与运行为模式识别故障模式,在分析过程中,模型会将电气特征与运行为模式结合起来,识别负载不均和过载对设备可能产生的故障模式。例如,当负载分配不均时,电力设备承受过大的负载,导致电流或电压异常,从而可能引发过载或设备故障;同时,周期性的负载波动也可能对设备产生较大的压力,进一步加剧设备的损耗或故障发生。基于模型的分析结果,识别出负载不均或过载引发的故障模式,并输出故障预测结果。预测结果可以包括故障的类型、发生的概率、可能导致的设备损坏程度以及预防措施。

[0037] 具体地,通过综合分析电力设备的响应时间、故障传播路径对电力系统稳定性与效率的影响的具体过程如下:通过电力设备的异常因果链模型,分析电力设备在不同工作状态下的响应时间,评估设备对异常状态的反应速度和滞后效应;基于电力设备的物理结构,模拟故障发生后,故障从一个设备传播到其他设备的路径,分析故障扩散对电力系统稳定性的影响。

[0038] 本实施方案中,分析电力设备的响应时间:电力设备的响应时间是指设备在遭遇异常状态(过载、故障、负载波动)时所需要的时间来作出反应。通过电力设备的异常因果链模型,系统可以模拟和分析设备在不同工作状态下的反应速度。具体包括:响应时间:电力设备从出现异常状态到作出反应的时间间隔。滞后效应:滞后效应指的是设备对负载波动或异常状态的反应存在延迟,可能导致初期异常未能及时得到处理,从而导致更严重的后果。通过对响应时间的评估,能够判断设备是否能够在合理的时间内作出反应,避免因为反应迟缓或滞后效应导致的故障扩展或电力系统的不稳定。故障传播路径分析:电力设备的物理结构是电力系统中各设备之间的连接关系,决定了故障如何从一个设备传播到其他设备。通过模拟电力设备物理结构及电力设备的运行状态,可以在发生故障后,分析故障传播的路径。模拟过程:在电力系统中,当某一设备发生故障(如过载、短路等)时,该故障可能会导致电力流向其它设备,形成连锁反应。通过模拟故障的发生,系统会根据设备的连接关系,预测故障将如何传播。例如,某个变电站的设备故障可能会影响到连接的多个输电线路,甚至导致其他变电站的电力中断。模拟故障传播路径可以帮助分析故障传播的速度和范围,预测故障波及的其他设备及其可能带来的影响。这对提高电力系统的容错能力和提高系统稳定性具有重要意义。分析故障扩散对电力系统稳定性的影响:一旦故障从一个设备传播到其他设备,它会影响电力系统的整体稳定性。例如,电力系统可能会因为过载、电压波动或设备失效等原因导致局部停电或大规模电力中断。通过分析故障传播路径及其对其他设备的影响,可以评估电力系统的稳定性和效率。主要包括:系统稳定性:故障是否会导致电力系统发生崩溃或大规模的电力中断。例如,当多个设备因故障连接而停运时,可能会导致整个电力网络的崩溃。效率影响:故障的扩散可能会影响到电力分配的效率,导致能

源浪费或负载不均,进而影响电力系统的整体运行效率。通过模拟和评估故障扩散的影响,能够识别系统中潜在的风险点,提前采取措施来增强电力系统的稳定性,避免发生故障传播引发更大规模的停电或损失。

[0039] 具体地,获取电力设备异常影响指数的具体过程如下:将响应时间与设备正常运行时的基准值进行对比,确定其偏离程度;结合故障传播路径分析和响应时间评估,模拟故障从故障源设备扩展至非故障源设备的过程,评估故障传播对电力系统影响;根据故障传播路径分析和响应时间分析结果,量化异常状态对电力设备和电力系统稳定性、效率的影响,获取电力设备的异常影响指数。

[0040] 本实施方案中,响应时间与设备正常运行时基准值的对比:为了量化电力设备在异常状态下的影响,需要首先获取设备在正常运行时的基准响应时间。这是一个参考值,用于评估设备在故障发生时的反应速度。异常情况下的响应时间偏离基准值,能够揭示设备在异常状态下的表现和效率。偏离程度:通过对比响应时间与正常值的偏离程度,能够得到设备对异常的适应性。响应时间延长,表示设备可能存在反应迟缓,导致系统的不稳定性或效率下降。故障传播路径分析与响应时间评估:通过故障传播路径的模拟分析,可以预测故障从故障源设备扩展至其他非故障源设备的过程。这个过程模拟了故障对系统其他部分的影响和传递。结合响应时间评估,可以确定设备在故障传播过程中的反应速度。若设备响应缓慢,故障可能会扩展至其他设备,进一步影响整个系统的稳定性。故障传播路径分析可以帮助识别电力系统中的薄弱环节,响应时间评估则能够揭示这些环节在故障发生时的反应性能。量化异常状态对电力设备和电力系统稳定性、效率的影响:通过综合故障传播路径分析和响应时间分析结果,可以量化电力设备的异常状态对电力系统的影响。具体来说,故障传播路径分析帮助了解故障扩展的范围,响应时间分析则揭示了设备对故障的反应能力。二者结合能够评估电力设备和电力系统的稳定性和效率下降的程度。电力设备的异常影响指数(AEI)可以通过以下公示表来式:

$$AEI = \arctan \left(\left(\frac{T_{\text{actual}} - T_{\text{baseline}}}{T_{\text{baseline}}} \right) \times W_1 + \left(\frac{C_{\text{fault}}}{C_{\text{total}}} \right) \times W_2 \right); \text{公式参数解释: } T_{\text{actual}}:$$

电力设备在异常状态下的响应时间。 T_{baseline} :电力设备在正常状态下的基准响应时间。

W_1 :响应时间加权因子,表示响应时间对电力设备异常影响指数的权重,通常会根据系统设计的需求设定。响应时间对设备运行效率的影响较大时, W_1 的值会越高。 C_{fault} :故障传播路径中影响的设备数量。 C_{total} :系统中总设备数量。 W_2 :故障传播加权因子,表示故障传播路径对异常影响指数的贡献权重,通常反映了故障扩展对整个电力系统稳定性的影响。

[0041] 综上,本申请至少具有以下效果:

[0042] 基于数字孪生的电力设备运行状态预测与异常仿真方法,通过基于数字孪生模型和电力设备状态数据集的分析,能够更加精准地预测设备的运行状态,识别潜在的故障模式,提前预警负载不均或过载引发的故障,有效降低设备故障风险。通过电力设备异常因果链模型的分析,能够揭示设备运行状态与负载分配之间的动态匹配关系,从而实现更加合理的负载分配,避免由于负载不均或过载造成的设备损害。通过对电力设备异常状态的多维度分析,包括响应时间、故障传播路径等,能够评估异常状态对系统稳定性和效率的影

响,并提出相应的优化方案,有助于提升整个电力系统的可靠性和运行效率。通过电力设备异常影响指数的量化,能够准确评估异常状态对电力设备和电力系统的影响,为后续的维护决策和风险管理提供量化依据,帮助企业优化资源配置,降低运行成本。

[0043] 本领域内的技术人员应明白,本发明的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本发明可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0044] 本发明是参照根据本发明实施例的系统、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0045] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0046] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0047] 尽管已描述了本发明的优选实施例,但本领域内的技术人员一旦得知了基本创造性概念,则可对这些实施例作出另外的变更和修改。所以,所附权利要求意欲解释为包括优选实施例以及落入本发明范围的所有变更和修改。

[0048] 显然,本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

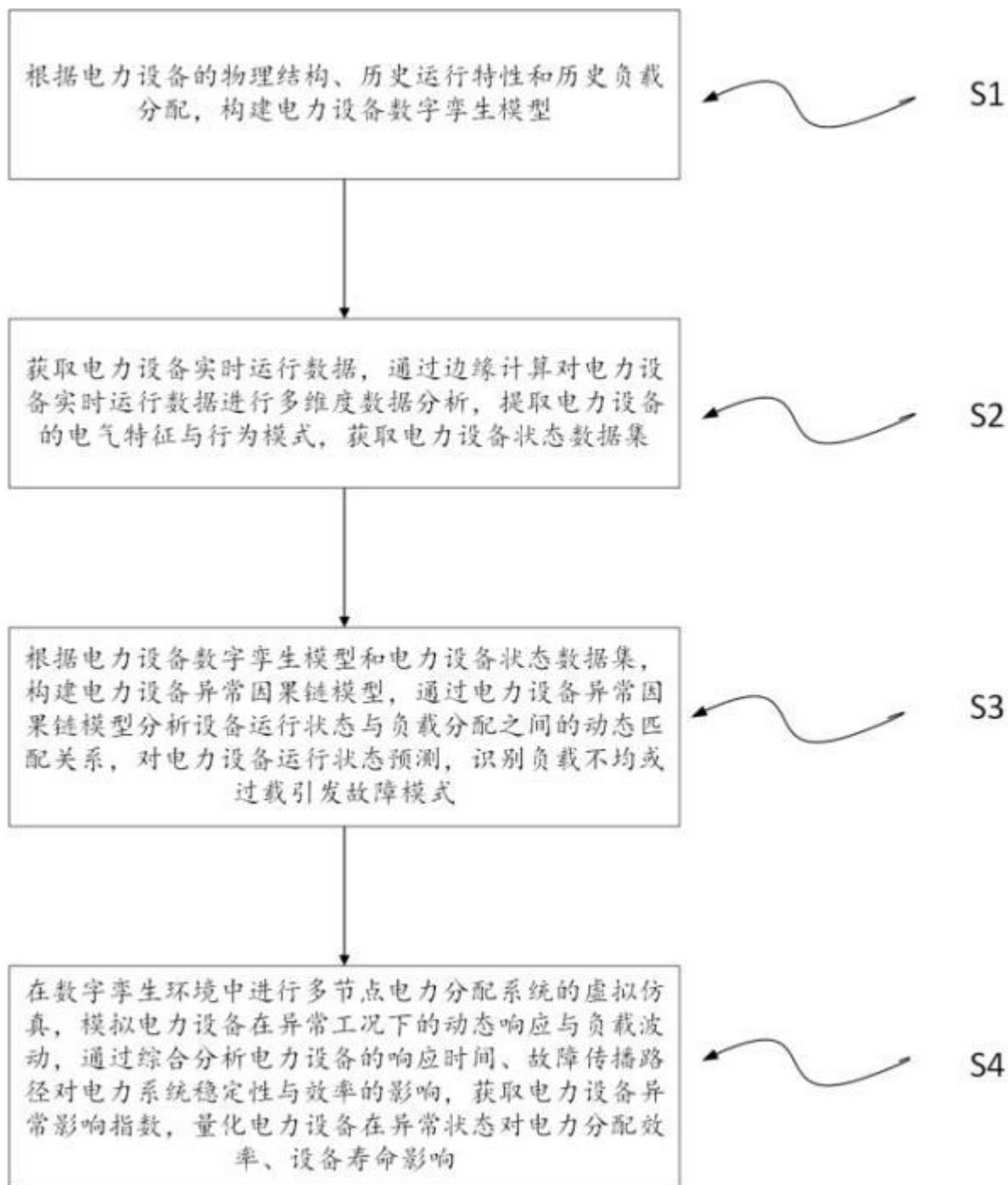


图 1