



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113593741 B

(45) 授权公告日 2023.04.07

(21) 申请号 202110874433.X

G06F 18/241 (2023.01)

(22) 申请日 2021.07.30

G06F 18/10 (2023.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06N 3/09 (2023.01)

申请公布号 CN 113593741 A

审查员 吴少波

(43) 申请公布日 2021.11.02

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72) 发明人 王明军 王嘉诚 何少鹏 章静

田文喜 苏光辉 秋穗正

(74) 专利代理机构 西安智大知识产权代理事务

所 61215

专利代理师 何会侠

(51) Int. Cl.

G21D 3/00 (2006.01)

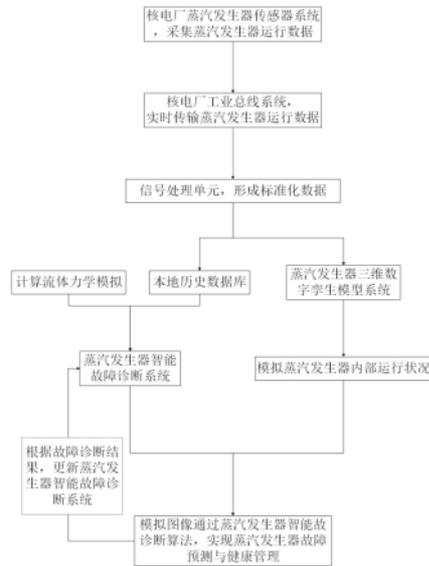
权利要求书2页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

一种蒸汽发生器故障诊断方法

(57) 摘要

本发明公开了一种蒸汽发生器故障诊断方法,包括以下步骤:通过核电厂蒸汽发生器现有传感器系统,采集蒸汽发生器运行数据;利用核电厂工业总线,实现蒸汽发生器运行数据的实时传输;经过信号处理单元,形成标准化数据;处理后的特征信号,分别传输至历史数据库与蒸汽发生器三维数字孪生模型系统(以下简称,三维数字孪生系统)压力、温度、速度等特征信号;通过三维数字孪生系统中物理引擎实现蒸汽发生器内部运行状况实时模拟;根据计算流体力学模拟与历史数据库,构建蒸汽发生器智能故障诊断模型;结合模拟图像通过蒸汽发生器智能故障诊断算法,实现蒸汽发生器故障诊断。



1. 一种蒸汽发生器故障诊断方法,其特征在于:针对蒸汽发生器运行状态下实时故障诊断;故障诊断系统由核电厂蒸汽发生器传感器系统与核电厂工业总线组成,实现蒸汽发生器运行状态实时监测与数据交互;利用信号处理,将检测数据进行特征提取与特征标准化;利用物理引擎,根据特征信号模拟蒸汽发生器内部流场特征;根据计算流体力学模拟与历史数据库,构建蒸汽发生器智能故诊断模型;结合模拟图像通过蒸汽发生器智能故诊断模型,实现蒸汽发生器故障诊断;

包括如下步骤:

步骤1:利用核电厂蒸汽发生器传感器系统,采集蒸汽发生器运行数据,具体步骤如下:

步骤1-1:将核电厂蒸汽发生器传感器具体位置进行标注,实现传感器与空间信息相互对应;

步骤1-2:将步骤1-1中的各个传感器组进行分类,分为蒸汽发生器一次测组、蒸汽发生器二次测组、蒸汽发生器进出口管道组与工厂环境组;

步骤1-3:利用核电厂蒸汽发生器传感器系统,采集带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据;

步骤2:利用核电厂工业总线,将步骤1中采集带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据存储至核电厂数据中心,实现蒸汽发生器运行数据的实时传输;

步骤3:将核电厂数据中心的带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据通过滤波函数,使蒸汽发生器运行数据形成标准化数据格式,具体步骤如下:

步骤3-1:将步骤2中存储至核电厂数据中心的带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据,根据其信号特征,采用卡尔曼滤波法、高斯滤波法、中位值滤波法、限幅值滤波法、递推平均滤波法、递推中位值滤波法、一阶滞后滤波法或加权递推平均滤波法,提取有效数据;

步骤3-2:将经过步骤3-1滤波后的有效数据,与步骤1-1中的传感器位置信息一一对应,实现传感器信号与位置信息相关联;

步骤3-3:将步骤3-2中关联后的信息,根据核电厂蒸气发生器测量的物理量压力、温度、振幅、辐射量、流速与湿度进行特征编码分类;

步骤3-4:从左起第一列为传感器编码列,首字母P为检测的物理量类型压力P、温度T、振幅A、辐射量R、流速F与环境湿度H,AABB分别为测量点与具体传感器单元;第二列为传感器空间位置S,传感器空间位置分组为蒸汽发生器一次测组S1、蒸汽发生器二次测组S2、蒸汽发生器进出口管道组S3与工厂环境组S0,AABBCC为笛卡尔坐标系空间坐标绝对或规定原点相对高度;第三列为检测起始时间YY\MM\DD;第四列为具体测量数值,形成符合数据分析的标准格式的标准信号;

步骤4:将步骤3-4的标准信号分别传输至历史数据库与三维数字孪生系统,具体步骤如下;

步骤4-1:将步骤3-4标准信号保存至核电厂本地运行数据中心,并绘制检测曲线;

步骤4-2:根据三维数字孪生系统的模拟物理量的要求,将与压力、温度、速度、辐射特征信号传输至三维数字孪生系统;

步骤5:将步骤4-2中的特征信号,通过三维数字孪生系统中的物理引擎实现蒸汽发生器内部运行状况实时模拟,实现蒸汽发生器三维运行状态与环境模拟,得到可视化效果图;

步骤6:根据计算流体力学模拟结果与历史数据库特征信号,实现蒸汽发生器智能故诊

断,具体步骤如下:

步骤6-1:利用计算流体力学程序,分别模拟蒸汽发生器安全运行工况与事故工况下的蒸汽发生器内部流场,形成压力、速度、温度与辐射云图;同时,模拟蒸汽发生器厂房运行环境,实现蒸汽发生器故障与安全运行工况下的数值模拟,形成辐射与温度云图;

步骤6-2:根据步骤3-4中的传感器空间位置,将步骤6-1中的模拟云图进行关联,实现数值模拟云图与采集信号位置相对应,并进行标记;

步骤6-3:将步骤6-2中标记后的数值模拟云图作为蒸汽发生器智能故障诊断学习样本;

步骤6-4:利用有监督型深度学习卷积神经网络CNN,形成蒸汽发生器智能故诊断模型;

步骤7:将步骤5中的可视化效果图通过步骤6中的蒸汽发生器智能故诊断模型,实现蒸汽发生器故障诊断,具体步骤如下:

步骤7-1:将步骤5中的可视化效果图作为输入数据,利用6-4蒸汽发生器智能故诊断模型进行故障类型分类与寿命预测,最终实现蒸汽发生器全三维故障诊断与寿命预测;

步骤7-2:根据步骤7-1蒸汽发生器智能故诊断的结果,不定期更新蒸汽发生器智能故诊断单元模型,重复步骤6与步骤7。

## 一种蒸汽发生器故障诊断方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于核反应堆热工水力计算技术领域,具体涉及到一种基于数值模拟模拟与数字孪生系统的蒸汽发生器故障诊断方法。

### 背景技术

[0002] 压水堆蒸汽发生器是产生汽轮机所需蒸汽的换热设备,在核反应堆中,核裂变产生的热量由冷却剂带出,通过蒸汽发生器将热量传递给二回路工质,使其产生具有一定温度、一定压力和一定干度的蒸汽。蒸汽发生器不仅是一回路的设备,又是二回路的设备,是核电厂中重要的能量交换设备。

[0003] 根据核电站运行经验表明,蒸汽发生器在运行过程中,蒸汽发生器会出现振动、磨损、疲劳、腐蚀等问题,导致传热管及其他部件性能退化并影响正常使用。蒸汽发生器性能退化涉及热工水力、力学、材料等众多学科,如果从单一方面、单一维度出发难以保证蒸汽发生器安全运行,借助深度学习算法、计算流体力学和数字孪生技术,可以更加直观和及时预测蒸汽发生器的运行故障。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种蒸汽发生器故障诊断方法,该方法能够运用计算流体力学手段、现有核电厂检测系统与三维数字孪生系统,实现蒸汽发生器故障诊断方法。

[0005] 为了达到上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0006] 一种蒸汽发生器故障诊断方法,其特征在于:针对蒸汽发生器运行状态下实时故障诊断;该故障诊断系统由核电厂蒸汽发生器传感器系统与核电厂工业总线组成,实现蒸汽发生器运行状态实时监测与数据交互;利用信号处理,将检测数据进行特征提取与特征标准化;利用物理引擎,根据特征信号(与压力、温度、速度有关)模拟蒸汽发生器内部流场特征;根据计算流体力学模拟与历史数据库,构建蒸汽发生器智能故障诊断模型;结合模拟图像通过蒸汽发生器智能故障诊断模型,实现蒸汽发生器故障诊断;

[0007] 包括如下步骤:

[0008] 步骤1:利用核电厂蒸汽发生器传感器系统,采集蒸汽发生器运行数据,具体步骤如下:

[0009] 步骤1-1:根据核电厂蒸汽厂房结构模型,使用3D MAX和GIS软件绘制三维地理信息模型,同时将核电厂蒸汽发生器传感器具体位置标注在三维模型,实现传感器与空间信息相互对应;

[0010] 步骤1-2:将步骤1-1中的各个传感器组进行分类,分为蒸汽发生器一次测组、蒸汽发生器二次测组、蒸汽发生器进出口管道组与工厂环境组;

[0011] 步骤1-3:利用核电厂蒸汽发生器传感器系统,采集带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据;

[0012] 步骤2:利用核电厂工业总线BUS系统,将步骤1中采集带有时序性特征的蒸汽发生

器运行数据存储至核电厂数据中心,实现蒸汽发生器运行数据的实时传输;

[0013] 步骤3:将核电厂数据中心的带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据通过滤波函数,使蒸汽发生器运行数据形成标准化数据格式,具体步骤如下:

[0014] 步骤3-1:将步骤2中存储至核电厂数据中心的带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据,根据其信号特征,采用卡尔曼滤波法、高斯滤波法、中位值滤波法、限幅值滤波法、递推平均滤波法、递推中位值滤波法、一阶滞后滤波法或加权递推平均滤波法,提取有效数据;

[0015] 步骤3-2:将经过步骤3-1滤波后的有效数据,与步骤1-1中的传感器位置信息一一对应,实现传感器信号与位置信息相关联;

[0016] 步骤3-3:将步骤3-2中关联后的信息,根据核电厂蒸气发生器测量的物理量压力、温度、振幅、辐射量、流速与湿度进行特征编码分类;

[0017] 步骤3-4:根据下表从左起第一列为传感器编码列首字母P为检测的物理量类型压力P、温度T、振幅A、辐射量R、流速F与环境湿度H,AABB分别为测量点与具体传感器单元;第二列为传感器空间位置,S为蒸汽发生器一次测组P、蒸汽发生器二次测组S、蒸汽发生器进出口管道组T与工厂环境组S)AABBCC为笛卡尔坐标系空间坐标绝对或规定原点相对高度;第三列为检测起始时间YY\MM\DD;第四列为具体测量数值,形成符合数据分析的标准格式的标准信号;

[0018]	传感器编码	传感器空间位置	检测时间	检测量
	P-AABB	S-AABBCC	YY\MM\DD	值

[0019] 步骤4:将步骤3-4的标准信号分别传输至历史数据库与三维数字孪生系统,具体步骤如下;

[0020] 步骤4-1:将步骤3-4标准信号保存至核电厂本地运行数据中心,并绘制检测曲线;

[0021] 步骤4-2:根据三维数字孪生系统的模拟物理量的要求,将与压力、温度、速度、辐射特征信号传输至三维数字孪生系统;

[0022] 步骤5:将步骤4-2中的特征信号,通过三维数字孪生系统中的Unity 3D物理引擎实现蒸汽发生器内部运行状况实时模拟,实现蒸汽发生器三维运行状态与环境模拟,得到可视化效果图;

[0023] 步骤6:根据计算流体力学程序Fluent、Star CCM+或OpenFoam模拟结果与历史数据库特征信号,实现蒸汽发生器智能故诊断,具体步骤如下:

[0024] 步骤6-1:利用计算流体力学程序,分别模拟蒸汽发生器安全运行工况与事故工况下的蒸汽发生器内部流场,形成压力、速度、温度与辐射云图;同时,模拟蒸汽发生器厂房运行环境,实现蒸汽发生器故障与安全运行工况下的数值模拟,形成辐射与温度云图;

[0025] 步骤6-2:根据步骤3-4中的传感器空间位置,将步骤6-1中的模拟云图进行关联,实现数值模拟云图与采集信号位置相对应,并进行标记;

[0026] 步骤6-3:将步骤6-2中标记后的数值模拟云图作为蒸汽发生器智能故障诊断学习样本;

[0027] 步骤6-4:利用有监督型深度学习卷积神经网络CNN,形成蒸汽发生器智能故诊断模型;

[0028] 步骤7:将步骤5中的可视化效果图通过步骤6中的蒸汽发生器智能故诊断模型,实

现蒸汽发生器故障诊断,具体步骤如下:

[0029] 步骤7-1:将步骤5中的可视化效果图作为输入数据,利用6-4蒸汽发生器智能故障诊断模型进行故障类型分类与寿命预测,最终实现蒸汽发生器全三维故障诊断与寿命预测;

[0030] 步骤7-2:根据步骤7-1蒸汽发生器智能故障诊断的结果,不定期更新蒸汽发生器智能故障诊断单元模型,重复步骤6与步骤7。

[0031] 本发明方法采用计算流体力学软件与深度学习算法相结合,实现了根据流体动力学模型的智能故障诊断算法;同时利用数字孪生系统,最终实现了蒸汽发生器实时可视化模拟下的故障诊断。和现有技术相比较,本发明具备如下优点:

[0032] 1.利用核电厂成熟数据采集方案,提高方法的可实现性与实施地安全性

[0033] 2.采用计算流体力学计算模型作为深度学习算法训练参数,丰富故障类型和提高故障模拟的可靠性与精确性;

[0034] 3.通过三维数字孪生系统,实现人机交互模式下的故障诊断。

## 附图说明

[0035] 图1为蒸汽发生器结构示意图。

[0036] 图2为本发明流程图。

## 具体实施方式

[0037] 以下结合图2所示流程图,以典型蒸汽发生器检测方案为例。对本发明作进一步的详细描述,另外典型蒸汽发生器结构如图1所示。

[0038] 一种基于数值模拟模拟与数字孪生系统的蒸汽发生器故障诊断方法,包括如下步骤:

[0039] 步骤1:利用核电厂蒸汽发生器传感器系统,采集蒸汽发生器运行数据,具体步骤如下:

[0040] 步骤1-1:根据核电厂蒸汽厂房结构模型,使用3D MAX和GIS软件绘制三维地理信息模型,同时将核电厂蒸汽发生器传感器具体位置标注在三维模型,实现传感器与空间信息相互对应;

[0041] 步骤1-2:将步骤1-1中的各个传感器组进行分类,分为蒸汽发生器一次测组、蒸汽发生器二次测组、蒸汽发生器进出口管道组与工厂环境组;

[0042] 步骤1-3:利用核电厂蒸汽发生器传感器系统,采集带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据;

[0043] 步骤2:利用核电厂工业总线BUS系统,将步骤1中采集带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据存储至核电厂数据中心,实现蒸汽发生器运行数据的实时传输;

[0044] 步骤3:将核电厂数据中心的带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据通过滤波函数,使蒸汽发生器运行数据形成标准化数据格式,具体步骤如下:

[0045] 步骤3-1:将步骤2中存储至核电厂数据中心的带有时序性特征的蒸汽发生器运行数据,根据其信号特征,采用卡尔曼滤波法、高斯滤波法、中位值滤波法、限幅值滤波法、递推平均滤波法、递推中位值滤波法、一阶滞后滤波法或加权递推平均滤波法,提取有效数据;

[0046] 步骤3-2:将经过步骤3-1滤波后的有效数据,与步骤1-1中的传感器位置信息一一对应,实现传感器信号与位置信息相关联;

[0047] 步骤3-3:将步骤3-2中关联后的信息,根据核电厂蒸气发生器测量的物理量压力、温度、振幅、辐射量、流速与湿度进行特征编码分类;

[0048] 步骤3-4:根据下表从左起第一列为传感器编码列首字母P为检测的物理量类型压力P、温度T、振幅A、辐射量R、流速F与环境湿度H,AABB分别为测量点与具体传感器单元;第二列为传感器空间位置,S为蒸汽发生器一次测组P、蒸汽发生器二次测组S、蒸汽发生器进出口管道组T与工厂环境组S)AABBCC为笛卡尔坐标系空间坐标绝对或规定原点相对高度;第三列为检测起始时间YY\MM\DD;第四列为具体测量数值,形成符合数据分析的标准格式的标准信号;

[0049]	传感器编码	传感器空间位置	检测时间	检测量
	P-AABB	S-AABBCC	YY\MM\DD	值

[0050] 步骤4:将步骤3-4的标准信号分别传输至历史数据库与三维数字孪生系统,具体步骤如下;

[0051] 步骤4-1:将步骤3-4标准信号保存至核电厂本地运行数据中心,并绘制检测曲线;

[0052] 步骤4-2:根据三维数字孪生系统的模拟物理量的要求,将与压力、温度、速度、辐射特征信号传输至三维数字孪生系统;

[0053] 步骤5:将步骤4-2中的特征信号,通过三维数字孪生系统中的Unity 3D物理引擎实现蒸汽发生器内部运行状况实时模拟,实现蒸汽发生器三维运行状态与环境模拟,得到可视化效果图;

[0054] 步骤6:根据计算流体力学程序Fluent、Star CCM+或OpenFoam模拟结果与历史数据库特征信号,实现蒸汽发生器智能故诊断,具体步骤如下:

[0055] 步骤6-1:利用计算流体力学程序,分别模拟蒸汽发生器安全运行工况与事故工况下的蒸汽发生器内部流场,形成压力、速度、温度与辐射云图;同时,模拟蒸汽发生器厂房运行环境,实现蒸汽发生器故障与安全运行工况下的数值模拟,形成辐射与温度云图;

[0056] 步骤6-2:根据步骤3-4中的传感器空间位置,将步骤6-1中的模拟云图进行关联,实现数值模拟云图与采集信号位置相对应,并进行标记;

[0057] 步骤6-3:将步骤6-2中标记后的数值模拟云图作为蒸汽发生器智能故障诊断学习样本,

[0058] 步骤6-4:利用有监督型深度学习卷积神经网络CNN,形成蒸汽发生器智能故诊断模型;

[0059] 步骤7:将步骤5中的可视化效果图通过步骤6中的蒸汽发生器智能故诊断模型,实现蒸汽发生器故障诊断,具体步骤如下:

[0060] 步骤7-1:将步骤5中的可视化效果图作为输入数据,利用6-4蒸汽发生器智能故诊断模型进行故障类型分类与寿命预测,最终实现蒸汽发生器全三维故障诊断与寿命预测;

[0061] 步骤7-2:根据步骤7-1蒸汽发生器智能故诊断的结果,不定期更新蒸汽发生器智能故诊断单元模型,重复步骤6与步骤7。

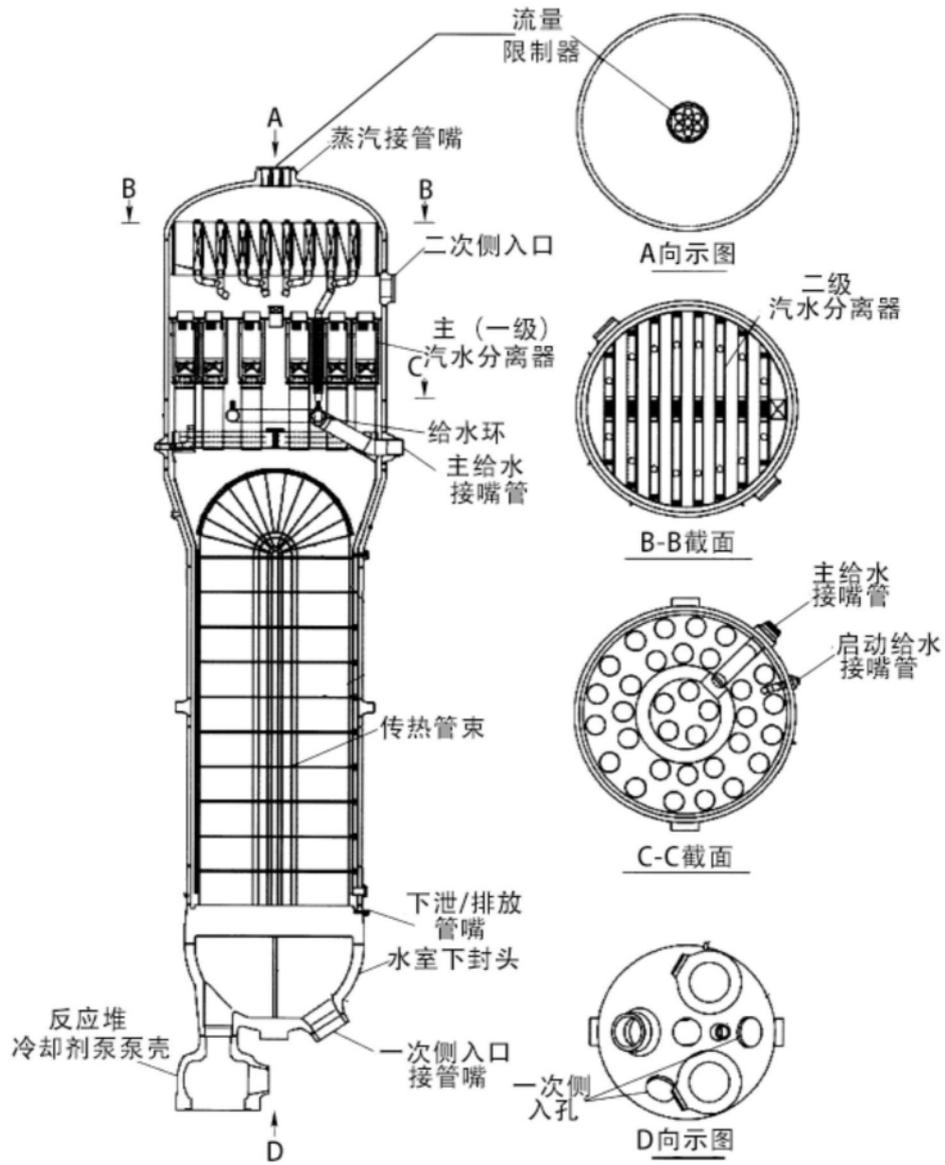


图1

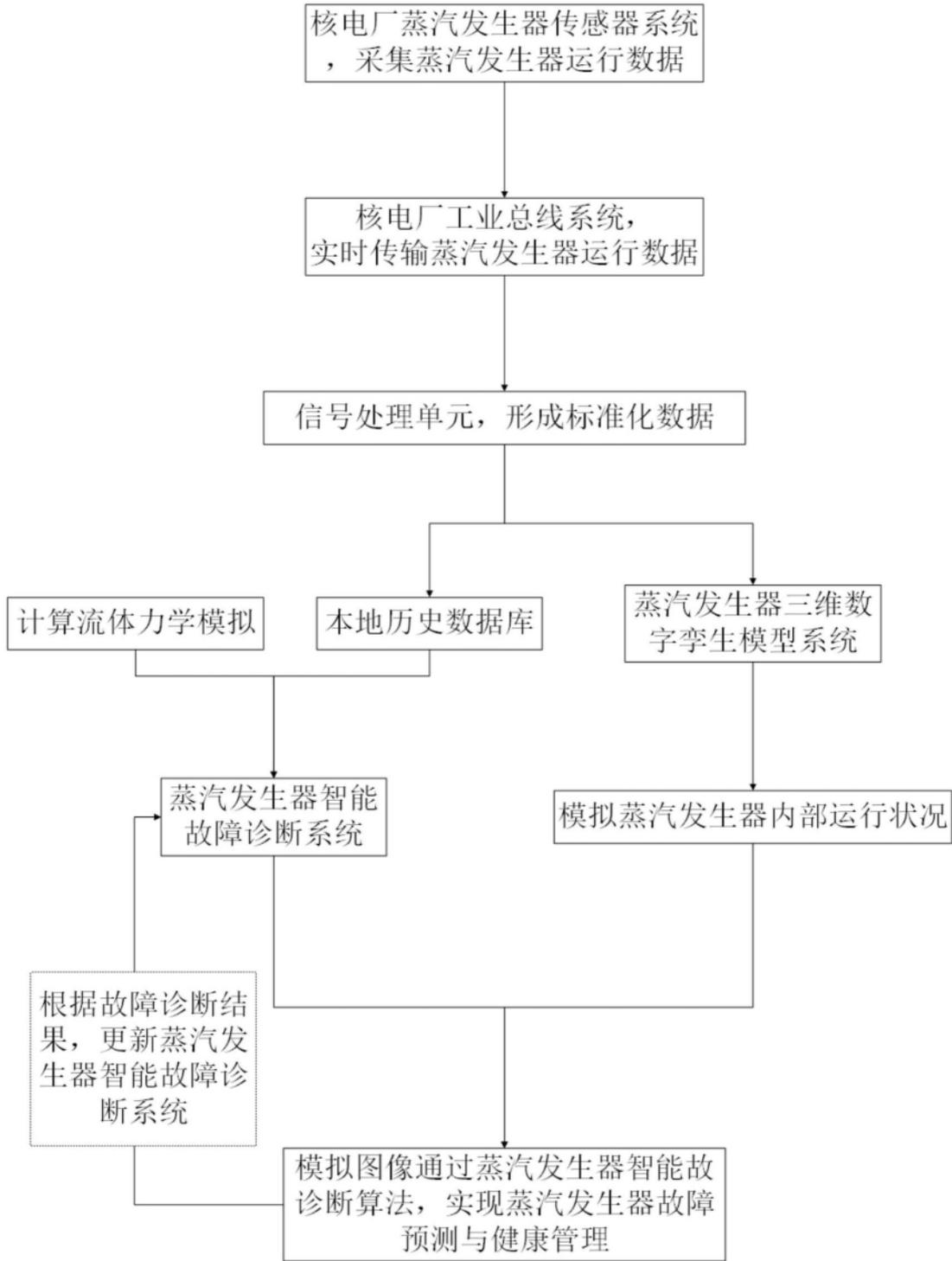


图2