

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2012 年 8 月 9 日 (09.08.2012)



(10) 国际公布号
WO 2012/103682 A1

- (51) 国际专利分类号:
F27B 3/08 (2006.01) *F27B 3/28* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2011/070852
- (22) 国际申请日: 2011 年 1 月 31 日 (31.01.2011)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): **东北大学 (NORTHEAST UNIVERSITY)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110004 (CN)。
- (72) 发明人: 及
- (75) 发明人/申请人 (仅对美国): **张颖伟 (ZHANG, Yingwei)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110004 (CN)。 **杜文友 (DU, Wenyu)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110004 (CN)。 **李智明 (LI, Zhiming)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110004 (CN)。 **樊云鹏 (FAN, Yunpeng)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110004 (CN)。

(74) 代理人: **沈阳东大专利代理有限公司 (SHENYANG DONGDA PATENT AGENCY CO.LTD)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

[见续页]

(54) Title: OPERATION FAULT DETECTION DEVICE FOR ELECTRIC ARC FURNACE AND METHOD THEREOF

(54) 发明名称: 一种电弧炉运行故障检测装置与方法

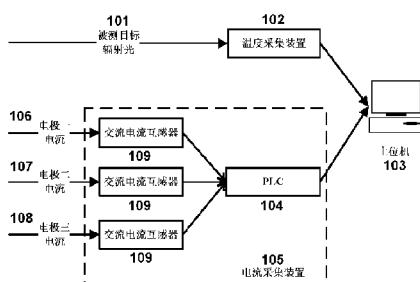


图 1 / Fig. 1

101 RADIATION LIGHT FROM TARGET TO BE DETECTED
102 TEMPERATURE ACQUISITION DEVICE
103 CONTROL COMPUTER
104 PLC
105 CURRENT ACQUISITION DEVICE
106 FIRST ELECTRODE CURRENT
107 SECOND ELECTRODE CURRENT
108 THIRD ELECTRODE CURRENT
109 AC CURRENT TRANSFORMER

(57) Abstract: Disclosed are an operation fault detection device for an electric arc furnace and method thereof. The device includes a temperature acquisition device, a current acquisition device and a control computer. A multi-mode fault monitoring and diagnosing method using the device includes the steps as below: 1) data standardization; 2) building an incentive monitoring module of the electric arc furnace working process, attaining M common subsets of closely related working modes, and special subsets of each working mode; 3) calculating hotelling T^2 statistics and square prediction error (SPE) statistics, and conducting fault monitoring and diagnosing for the electric arc furnace working process. The advantages of the invention are that the method of chrometry temperature measuring can improve the calculation precision and the device is adaptable for operating in several different stable modes.

[见续页]

**根据细则 4.17 的声明:**

— 关于申请人有权申请并被授予专利(细则 4.17(ii))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

— 包括经修改的权利要求及声明(条约第 19 条(1))。

(57) 摘要:

一种电弧炉运行故障检测装置与方法。其中装置包括温度采集装置、电流采集装置和上位机。采用该装置进行多模态故障监测与诊断方法,包括如下步骤:1. 数据标准化;2. 建立电弧炉工作过程的初始监测模型,得到 M 个工作模态关系密切的公共子集以及每种工作模态的特殊子集;3. 计算霍特林 T^2 统计量和平方预测误差 SPE 统计量,对电弧炉工作过程进行故障监测与诊断。本发明的优点是:比色测温的方法能够提高计算的精确度,装置适合工作在多种不同的稳定模态下。

一种电弧炉运行故障检测装置与方法

技术领域

本发明属于故障检测技术领域，特别涉及一种电弧炉运行故障检测装置与方法。

背景技术

电弧炉是一种以三相交流电为电源，利用电极与被熔炼炉料之间发生电弧并产生高温来熔炼矿石和金属的电弧炉。电弧炉在生产运行中会产生大量的废气，这些废气是通过电极升降来排出的，如果电极升降调节不及时则会致使炉内气体大量积压，轻则在产品内部形成空隙，如果积压气体过多，炉内熔融物料有可能喷出，出现喷料故障，而在电极的调节过程中电极位置容易产生偏移加之炉内物料分布不均匀使某个电极附近温度偏高，其他电极附近温度偏低，电极之间的温度不均衡，影响生产质量。更严重的是，这种温度不均衡现象的长时间存在还会致使电弧炉温度较高的部位温度急剧升高，如果没有有效的监测和预防措施便造成漏炉事故。

为了保证设备和人员的安全，以及产品质量，运行故障检测已成为提高生产力和安全性的关键问题。在过去的几十年，主成分分析（PCA），偏最小二乘法（PLS）已被广泛应用于工业生产过程，并取得了很大成功，多元统计过程控制（MSPC）也已被深入研究。然而，电弧炉工作过程中往往存在多个工作模态，这使得多种生产方式、多种模态生产过程的故障检测问题更加复杂。多元统计过程控制（MSPM）应用到多模态的生产过程中往往存在很多问题。即使生产过程工作在另一个稳态运行模态下，MSPM 方法也会经常误报。近几年，出现了递归 PCA 和自适应性的 PLS 方法。虽然这些方法也可以用于在线故障检测，但是仍然缺乏处理多种工作模态过程的应对能力，检测效果并不理想。

另外，由于电弧形成时能量很集中，弧区温度在 3000℃ 以上，温度难以测量。传统生产过程通过观测电弧炉炉壁来判断温度，由于物质的比热容和阻热率的存在，炉壁温度本身的变化与炉内温度相比存在较大的滞后。而炉子内部温度又不容易测量，传统的热电偶采用接触式测温，受热电偶本身遇高温熔化影响，随着温度升高，测量成本急剧提高。针对这一现状，一些工程技术人员从改变热电偶本身制作材料的角度出发，研制出能够承受更高温度的测量设备，虽然提升了能够测量温度的范围，但受接触式测温技术本身特点限制，设备损耗严重，这样不仅使设备的耐用程度下降，并且由于设备材料熔于炉内，给熔炼过程带来更多杂质，对产品质量造成影响。

发明内容

针对已有技术的不足，本发明提供一种电弧炉运行故障检测装置与方法。

该装置包括温度信号采集装置，电流信号采集装置和上位机；电流信号采集装置包括交流电流互感器和PLC，交流电流互感器的输出端连接PLC的输入端，PLC的输出端连接上位机；温度信号采集装置包括成像装置、色彩传感器、两组收发一体电路和串口通信电路；成像装置包括物镜和目镜；收发一体电路包括微控制器和射频收发器；两组收发一体电路中的射频收发器一组作为发射器，另一组作为接收器；色彩传感器的输入端连接成像装置，色彩传感器的输出端连接第一组收发一体电路中微控制器的输入端，微控制器的输出端连接射频发射器的输入端，射频发射器的输出端通过无线网络连接第二组收发一体电路中射频接收器的输入端，射频接收器的输出端连接微控制器的输入端，微控制器的输出端连接串口通信电路的输入端，串口通信电路的输出端连接上位机；成像装置的物镜对准被测目标，将光敏传感器固定在目镜一端，使被测目标辐射光经过成像装置投射到色彩传感器的感光部位。色彩传感器与微控制器相连，微控制器采集到信号后控制射频发射电路发射无线射频信号，射频接收电路收到信号后在微控制器的协调下控制串口通信电路将数据传至上位机。无线信号的发射和接收采用的是两套相同的收发一体电路，在微控制器的控制下起到不同的作用。上位机运行组态软件，包括实时显示、历史查询、数据存储、报警处理等功能。

现场数据经过两种采集装置传送至上位机，上位机使用本发明提出的方法对现场数据运算分析，判断是否出现故障。

本发明装置各部分功能如下：

- 1) 电流信号采集装置：包括交流互感器和PLC，电弧炉的一个特点是低电压，大电流。因此在变压器到电弧炉这段线路内的电压不高，但电流非常大，在运行中电压100伏时电流高达一万安培，难以直接测量。因此使用交流互感器，它所起到的作用是将电极内的大电流转化成0-5V的标准信号。交流互感器与PLC的模拟输入端连接，PLC完成模数转换的任务，将三个电极对应的电流信号同步采集到PLC内，再通过PLC串口发送至上位机。
- 2) 温度信号采集装置：包括成像装置、色彩传感器、微控制器、收发一体电路和串口通信电路。高温熔融物质辐射出的电磁波谱包含从红外线到紫外线内所有波长范围的电磁波，不同波长电磁波在不同温度下的辐射强度不同，这其中也包含可见光部分，波长范围不同的两种可见光，如红光和绿光在不同温度下的辐射强度比值也是不同的。因此可采用间接测量两种波长可见光辐射强度的比值的方法来测量温度。温度信号采集装置的功能是通过成像装置将被测目标辐射的可见光投射到色彩传感器的感光部位，色彩传感器在微控制器的作用下分别测量红色和绿色两种可见光的辐射强度，数据传至微控制器内，微控制器控制发送电路将数据以无线信号的形式发送出去，接收

电路接收信号,在微控制器的控制下通过串口将数据发送至上位机,其中位于发送端的微控制器内写入控制色彩传感器程序和无线数据发送程序,位于接收端的微控制器写入无线数据接收程序和串口通信程序。

- 3) 上位机:数据传至上位机,监控软件首先将色彩传感器采集到的数据利用比色测温法转化为温度数据,并将电流和温度数据写入数据库中,同时在监控界面内显示实时温度和电流以及两种数据的历史温度曲线。上位机还会对历史数据分析,监控运行是否出现故障。

上位机接收到红绿两种颜色可见光辐射光强信号后需要对数据进行计算得到温度值,下面是比色测温法:

理论依据为普朗克辐射定律

$$M(\mu, T) = \varepsilon(\mu, T) c_1 \cdot \mu^{-5} / (e^{c_2/(\mu \cdot T)} - 1) \quad (1)$$

式(1)中, μ 是电磁波波长, $M(\mu, T)$ 为光谱辐出度, $\varepsilon(\mu, T)$ 为灰体发射率, T 为绝对温度, c_1 和 c_2 分别是热辐射第一常数和热辐射第二常数。 e 表示自然对数;

当 $c_2 / (\mu \cdot T) \gg 1$ 时普朗克定律可由维恩公式代替

$$M(\mu, T) = \varepsilon(\mu, T) c_1 \cdot \mu^{-5} \cdot e^{-c_2/(\mu \cdot T)} \quad (2)$$

当给定两个波长 μ_1 , μ_2 对应的光谱辐出度为

$$M(\mu_1, T) = \varepsilon(\mu_1, T) c_1 \cdot \mu_1^{-5} \cdot e^{-c_2/(\mu_1 \cdot T)} \quad (3)$$

$$M(\mu_2, T) = \varepsilon(\mu_2, T) c_1 \cdot \mu_2^{-5} \cdot e^{-c_2/(\mu_2 \cdot T)} \quad (4)$$

将上面(3)、(4)两式相比整理得到测温计算公式

$$T = \frac{c_2 \cdot (1/\mu_2 - 1/\mu_1)}{\ln(M(\mu_1, T) / M(\mu_2, T)) - \ln(\varepsilon_1 / \varepsilon_2) - 5 \ln(\mu_2 / \mu_1)} \quad (5)$$

利用红绿两种颜色滤镜采集不同波长的光辐出度作为公式的输入。由于两种颜色波长比较接近,灰体发射率的比值近似等于1可以进一步简化计算公式。于是得出温度计算公式

$$T = \frac{c_2 \cdot (1/\mu_2 - 1/\mu_1)}{\ln(M(\mu_1, T) / M(\mu_2, T)) - 5 \ln(\mu_2 / \mu_1)} \quad (6)$$

电弧炉在运行中存在多种模态,在不同模态下,都存在一个稳定的工作状态,当工作模态切换时,电流和温度数据都会出现变动,使故障诊断易出现漏报和错报。本发明提出了一种针对多模态的故障诊断方法,能够在工作模态切换的同时智能识别当前工作模态并针对当

前的工作模态进行故障诊断。

采用电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断，按如下步骤进行：

步骤一：采集数据并规范数据使数据标准化；在电弧炉工作过程中，设定有 M 个工作模态，当电弧炉稳定运行在不同模态时分别采集 M 个模态下三相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 和电弧炉炉内温度 t 。于是得到初始数据集 $\mathbf{X}_m = [\mathbf{x}_{1,m}^T, \mathbf{x}_{2,m}^T, \mathbf{L}, \mathbf{x}_{l,m}^T, \mathbf{x}_{N_m}^T]^T (N_m \times J)$ ($m=1, 2, \dots, M$)，其中下标 m 代表第 m 个工作模态， N_m 为第 m 个模态下数据采样的个数， J 为变量个数，本发明中 J 取 4 为方便说明算法下面继续使用 J ，对初始数据集使用求均值和标准偏差的方法规范采集的数据，得到正常运行标准化数据集 $\mathbf{X}_m = (N_m \times J) (m=1, 2)$ ；

步骤二：对数据进行分解，建立电弧炉工作过程的初始监测模型；用步骤一标准化后得到 M 个数据集，下面建立电弧炉工作过程的初始监测模型，即通过计算该监测模型的 M 个工作模态下的全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g$ ，来对电弧炉工作过程 M 个工作模态下得到的数据集进行分解，得到 M 个工作模态关系密切的公共子集，以及每种工作模态的特殊子集；

建立电弧炉工作过程的初始监测模型，建模过程分以下两步过程：

1、计算电弧炉工作过程的全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g$

电弧炉工作过程不同模态的数据集具有共同的变量相关性，通过找到电弧炉工作过程全局主要因素，以它们的线性组合可以表示其他样本甚至可以替换其他所有样本，同时，它们可以表示原始数据的主要特性，以及数据分布差异和他们各自的变化信息。因此，电弧炉工作过程的全局主要因素可以作为不同工作模态的数据集的相似性评价指标。

电弧炉工作过程中每个工作模态下得到的数据集的子集主要因素为 $\mathbf{p}_m (m=1, 2, \dots, M)$ ，下标 m 代表不同的工作模态，同时，每个工作模态下的数据集的主要因素 $\mathbf{p}_m$ 与所在的数据集存在以下关系式：

$$\mathbf{p}_m = \sum_{n=1}^{N_m} a_{n,m} \mathbf{x}_{n,m} = \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m \quad (7)$$

$\mathbf{a}_m = [a_{1,m}, a_{2,m}, \mathbf{K}, a_{n,m}]^T$ 为线性组合系数，其中字母 n 表示 $\mathbf{a}_m$ 的行数，即 $\mathbf{p}_m$ 可以表示为 $\mathbf{X}_m$ 中 N_m 个向量的线性组合，此时，引入电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ ，使得它可以和

电弧炉工作过程每个工作模态下得到的子集主要因素十分接近。用全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 描述各个工作模态下子集的主要因素，得到电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 方法如下：

为了使电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 与电弧炉工作过程每种工作模态下得到的子集主要因素 $\mathbf{p}_{m,j}$ 充分的接近，通过使式子 $(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2$ 达到最大值，引入

$R^2 = (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_1)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2 + \dots + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_M^T \mathbf{a}_M)^2$ ，则问题转化为求多项式 R^2 最大值的问题。同时

引入不等式 $\varepsilon \leq \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_1)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2} = \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_3^T \mathbf{a}_3)^2} \leq \frac{1}{\varepsilon}$ ，其中 ε 是起约束作用的参数并且满足 $0.8 \leq \varepsilon < 1$ ，

为了保证电弧炉工作过程的全局主要因素与电弧炉工作过程每种工作模态下得到的子集的主要因素十分接近，本发明中 ε 取值为 0.9。问题变为求解下式：

$$\max R^2 = \max \left(\sum_{m=1}^M (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 \right) \quad (8)$$

同时满足约束条件

$$s.t. \begin{cases} \varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_{m-1}^T \mathbf{a}_{m-1})^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 \leq 0 \\ \varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_{m-1}^T \mathbf{a}_{m-1})^2 \leq 0 \\ \mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g = 1 \\ \mathbf{a}_m^T \mathbf{a}_m = 1 \end{cases} \quad (9)$$

本专利处理电弧炉工作过程不同工作模态下的故障诊断，工作模态的区别体现在生产原料上。由于生产过程的需要，会对生产原料进行调整。在不同生产原料下，正常生产的电流也就不同，但都会工作在一个稳定的状态。为了不失一般性，先假设有两种生产模态对应两种不同的生产原料A和B。下面以模态A和模态B分别表示生产原料为A和B时电弧炉的生产模态，即M为2；为了达到上述目标，引入初始目标函数并求解初始目标函数的极大值：

$$\begin{aligned} F(\mathbf{p}_g, \mathbf{a}, \lambda) = & (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 - \lambda_g (\mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g - 1) \\ & - \lambda_A (\mathbf{a}_A^T \mathbf{a}_A - 1) - \lambda_B (\mathbf{a}_B^T \mathbf{a}_B - 1) \\ & - \lambda_1 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 \right) \\ & - \lambda_2 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 λ_g , λ_A , λ_B , λ_1 和 λ_2 设为常数标量。对上式的 $\mathbf{p}_g$, $\mathbf{a}_A$, $\mathbf{a}_B$ 分别求偏导数整理得到如下式子：

$$(1-\lambda_1\varepsilon+\lambda_2)\mathbf{X}_A^T\mathbf{X}_A\mathbf{p}_g+(1-\lambda_2\varepsilon+\lambda_1)\mathbf{X}_B^T\mathbf{X}_B\mathbf{p}_g=\lambda_g\mathbf{p}_g \quad (11)$$

$$\mathbf{a}_A=\sqrt{\frac{(1-\lambda_1\varepsilon+\lambda_2)}{\lambda_A}}\mathbf{X}_A\mathbf{p}_g=\sqrt{\frac{1}{\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_A^T\mathbf{X}_A)\mathbf{p}_g}}\mathbf{X}_A\mathbf{p}_g \quad (12)$$

$$\mathbf{a}_B=\sqrt{\frac{(1-\lambda_2\varepsilon+\lambda_1)}{\lambda_B}}\mathbf{X}_B\mathbf{p}_g=\sqrt{\frac{1}{\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_B^T\mathbf{X}_B)\mathbf{p}_g}}\mathbf{X}_B\mathbf{p}_g \quad (13)$$

λ_A , λ_B 可以从 (11) (12) (13) 计算过程中得到求解表达式:

$$\lambda_A=(1-\lambda_1\varepsilon+\lambda_2)\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_A^T\mathbf{X}_A)\mathbf{p}_g \quad (14)$$

$$\lambda_B=(1-\lambda_2\varepsilon+\lambda_1)\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_B^T\mathbf{X}_B)\mathbf{p}_g \quad (15)$$

分析等式(11)来寻找电弧炉工作过程全局主要因素 $\mathbf{p}_g$, 由前面提到的不等式可知 $\mathbf{p}_g$ 应满足以下关系式:

$$\begin{cases} \lambda_1\left(\varepsilon\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_A^T\mathbf{a}_A\right)^2-\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_B^T\mathbf{a}_B\right)^2\right)=0, \\ \lambda_2\left(\varepsilon\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_B^T\mathbf{a}_B\right)^2-\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_A^T\mathbf{a}_A\right)^2\right)=0, \\ \lambda_1,\lambda_2\geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \lambda_1\left(\varepsilon\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_A^T\mathbf{a}_A\right)^2-\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_B^T\mathbf{a}_B\right)^2\right)=0, \\ \lambda_2\left(\varepsilon\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_B^T\mathbf{a}_B\right)^2-\left(\mathbf{p}_g^T\mathbf{X}_A^T\mathbf{a}_A\right)^2\right)=0, \\ \lambda_1,\lambda_2\geq 0. \end{cases} \quad (17)$$

将(12), (13)式的结果带入(16), (17)式中, 从而得到以下结果。

$$\begin{cases} \lambda_1\left(\varepsilon\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_A^T\mathbf{X}_A)\mathbf{p}_g-\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_B^T\mathbf{X}_B)\mathbf{p}_g\right)=0, \\ \lambda_2\left(\varepsilon\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_B^T\mathbf{X}_B)\mathbf{p}_g-\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_A^T\mathbf{X}_A)\mathbf{p}_g\right)=0, \\ \lambda_1,\lambda_2\geq 0. \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \lambda_1\left(\varepsilon\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_A^T\mathbf{X}_A)\mathbf{p}_g-\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_B^T\mathbf{X}_B)\mathbf{p}_g\right)=0, \\ \lambda_2\left(\varepsilon\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_B^T\mathbf{X}_B)\mathbf{p}_g-\mathbf{p}_g^T(\mathbf{X}_A^T\mathbf{X}_A)\mathbf{p}_g\right)=0, \\ \lambda_1,\lambda_2\geq 0. \end{cases} \quad (19)$$

在上式中, 为求得电弧炉工作过程全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 的值, 对讨论 λ_1 和 λ_2 的取值进行分析, 过程如下:

(1). 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时, 通过 (18), (19)式可知, (18) 与 (19) 式是矛盾的, 因此这种情况无法求得 $\mathbf{p}_g$ 的值, 此时无解。

(2). 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$ 时, (18), (19)式恒等于0, 即(18), (19)式会失去约束作用。此时等式(11)变为

$$\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g + \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g = \lambda_g \mathbf{p}_g \quad (20)$$

由(20)式可知, 求解 $\mathbf{p}_g$ 的值转化为求解 $(\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A + \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B)$ 的特征向量问题, 通过求解可以得到 $(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2$ 的极大值, 但是由于(18), (19)式失去约束效力, 此时得到的电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 无法保证与每个工作模态下的子集主要因素都十分接近, 因此此时的 $\mathbf{p}_g$ 值无法满足要求;

(3). 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时, 计算(18), (19)式可以得到

$$\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g = 0 \quad (21)$$

其中参数 ε 应满足 $0.8 \leq \varepsilon < 1$, 本专利取0.9。等式(21)只有唯一的未知向量 $\mathbf{p}_g$, 通过计算 (21) 得到几组解作为 $\mathbf{p}_g$ 的解, 令其为 $\mathbf{p}_{g1}$;

(4). 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 = 0$ 时, 应用同样的方法进行处理, 得到等式

$$\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g = 0 \quad (22)$$

与第3步相似的分析方法的到另一组 $\mathbf{p}_g$ 的解, 令其为 $\mathbf{p}_{g2}$;

可知 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 可以作为满足条件的 $\mathbf{p}_g$ 的解。将 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 结合在一起共同组合成 R 列的矩阵 $\mathbf{P}_g [\mathbf{p}_{g1}, \mathbf{p}_{g2}]$, 其中 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 的列数之和为 R 列, 从而得到电弧炉工作过程全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g (J \times R)$ 作为满足假设条件的解;

2、将电弧炉工作过程两种工作模态下的数据集分别进行分解

通过上述建模过程得到电弧炉工作过程全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g (J \times R)$, $\mathbf{P}_g$ 的列向量 $\mathbf{p}_g$ 应满足线性关系: $\mathbf{p}_g = \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_1$ 和 $\mathbf{p}_g = \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_2$, 其中 $\mathbf{a}_1$ 和 $\mathbf{a}_2$ 是线性组合系数且 $\mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g = 1$, $\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1 = 1$, $\mathbf{a}_2^T \mathbf{a}_2 = 1$, 则上式可以变形为 $\mathbf{a}_1 = \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g$ 和 $\mathbf{a}_2 = \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g$; 令 R 组线性组合系数 $\mathbf{a}_1$ 和 $\mathbf{a}_2$ 分别组成两个特殊子集的得分矩阵 $\mathbf{T}_A^C$ 和 $\mathbf{T}_B^C$, 可以得到如下表达式:

$$\mathbf{T}_A^C = \mathbf{X}_A \mathbf{P}_g, \mathbf{T}_B^C = \mathbf{X}_B \mathbf{P}_g \quad (23)$$

通过下面计算可以将电弧炉在工作模态A下的数据集 $\mathbf{X}_A$ 分解为包含公共信息的公共部分数据集 $\mathbf{X}_A^C$, 以及特殊部分数据集 $\mathbf{X}_A^S$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_A = \mathbf{X}_A^C + \mathbf{X}_A^S \\ \mathbf{X}_A^C = \mathbf{T}_A^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_A \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_A^S = \mathbf{X}_A - \mathbf{X}_A^C = \mathbf{X}_A^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (24)$$

同理可以将电弧炉在工作模态B下的数据集 $\mathbf{X}_B$ 分解为公共部分数据集 $\mathbf{X}_B^C$ 和特殊部分数据集 $\mathbf{X}_B^S$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_B = \mathbf{X}_B^C + \mathbf{X}_B^S \\ \mathbf{X}_B^C = \mathbf{T}_B^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_B \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_B^S = \mathbf{X}_B - \mathbf{X}_B^C = \mathbf{X}_B^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (25)$$

完成上述分解过程，此时完成电弧炉工作过程的初始监测模型过程；

步骤三：对电弧炉工作过程进行故障监测与诊断，利用建立电弧炉工作过程的初始监测模型，计算 T^2 统计量和 SPE 统计量；

结合主元分析（PCA）方法，可以得到两种模态数据集特殊部分得分矩阵 $\mathbf{T}_A^S$ 和 $\mathbf{T}_B^S$ ，以及特殊部分的残差矩阵 $\mathbf{E}_A^S$ 和 $\mathbf{E}_B^S$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{T}_A^S = \mathbf{X}_A^S \mathbf{P}_g^S = \mathbf{X}_A (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_g^S \\ \hat{\mathbf{X}}_A^S = \mathbf{T}_A^S (\mathbf{P}_g^S)^T \\ \mathbf{E}_A^S = \mathbf{X}_A^S - \hat{\mathbf{X}}_A^S \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}_B^S = \mathbf{X}_B^S \mathbf{P}_g^S = \mathbf{X}_B (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_g^S \\ \hat{\mathbf{X}}_B^S = \mathbf{T}_B^S (\mathbf{P}_g^S)^T \\ \mathbf{E}_B^S = \mathbf{X}_B^S - \hat{\mathbf{X}}_B^S \end{cases} \quad (27)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}_A^S$ ， $\hat{\mathbf{X}}_B^S$ 分别是 $\mathbf{X}_A^S$ 和 $\mathbf{X}_B^S$ 的估测矩阵， $\mathbf{P}_A^S (J \times R_A^S)$ 和 $\mathbf{P}_B^S (J \times R_B^S)$ 分别是两个特殊子集的PCA负荷矩阵， R_A^S ， R_B^S 分别是两个子集主元个数。 $\mathbf{E}_A^S$ ， $\mathbf{E}_B^S$ 分别为两个特殊子集的残差，也是最终模型的残差。电弧炉在模态A和模态B下特殊子集的PCA负荷矩阵 $\mathbf{P}_A^S$ 和 $\mathbf{P}_B^S$ 计算公式如下

$$\frac{1}{N_A - 1} (\mathbf{X}_A^S (\mathbf{X}_A^S)^T) \mathbf{P}_A^S = \gamma_A \mathbf{P}_A^S \quad (28)$$

$$\frac{1}{N_B - 1} (\mathbf{X}_B^S (\mathbf{X}_B^S)^T) \mathbf{P}_B^S = \gamma_B \mathbf{P}_B^S \quad (29)$$

其中， $\frac{1}{N_A - 1} (\mathbf{X}_A^S (\mathbf{X}_A^S)^T)$ 、 $\frac{1}{N_B - 1} (\mathbf{X}_B^S (\mathbf{X}_B^S)^T)$ 为电弧炉A, B两种模态数据集的协方差矩阵，

γ_B 和 γ_A 为各协方差矩阵对应的特征值； $\mathbf{P}_A^S \in R^{J \times I}$ ， $\mathbf{P}_B^S \in R^{J \times I}$ 分别由电弧炉A, B两种模态数据集协方差矩阵特征向量组成。

将A、B两种模态的数据集分解为公共数据集部分和特殊数据集部分,即由式(24)得到 $\mathbf{X}_A^C$ 、 $\mathbf{X}_B^S$, 由(25式)得到 $\mathbf{X}_B^C$ 、 $\mathbf{X}_A^S$, 下面计算这四个矩阵特征值组成的对角矩阵:

设 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值为 φ 则有 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征多项式 $|\varphi \cdot E - \mathbf{X}_A^C|$, E 代表单位矩阵, 另特征多项式等于零即 $|\varphi \cdot E - \mathbf{X}_A^C|=0$ 经整理可得到变量为 φ 的特征方程 $G(\varphi)=0$, 解这个方程可得到 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值, 以 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值为对角线元素得到对角矩阵 Λ_A^C , 同理可得到另外三个矩阵 $\mathbf{X}_A^S$, Λ_B^C , $\mathbf{X}_B^S$ 的特征值组成的对角矩阵 Λ_A^S , Λ_B^C , $\mathbf{X}_B^S$ 。

分别在A、B两种模态的公共数据集部分和特殊数据集部分进行故障检测分析。在统计过程监控中, 通常根据假设检验的原则, 判定过程有无故障的发生, 利用霍特林 (Hotelling) T^2 统计和平方预测误差 (SPE) 统计进行故障检测, 通过绘制控制图即可判断出是否发生故障。

$\mathbf{x}_{new} (J \times 1)$ 为电弧炉工作过程新观测数据, 通过投影 $\mathbf{x}_{new}$ 到全局主要因素 $\mathbf{P}_g$, 可以得到新采样数据对于两种工作模态的公共部分数据集的得分向量 $\mathbf{t}_{new}^C = \mathbf{P}_g^T \mathbf{x}_{new}$ 。同时利用下式 (30)

(31) 计算A、B两种工作模态的公共部分的 T^2 统计, 可以得到对模态A和模态B数据集公共部分 T^2 统计量 $T_{C,A}^2$ 和 $T_{C,B}^2$, 下面是两种工作模态的公共部分的 T^2 统计的计算公式。

$$T_{C,A}^2 = (\mathbf{t}_{new}^C)^T (\Lambda_A^C)^{-1} \mathbf{t}_{new}^C \quad (30)$$

$$T_{C,B}^2 = (\mathbf{t}_{new}^C)^T (\Lambda_B^C)^{-1} \mathbf{t}_{new}^C \quad (31)$$

与此类似计算电弧炉工作过程新观察值在特殊子集的得分 $\mathbf{t}_{A,new}^S = (\mathbf{P}_A^S)^T \mathbf{x}_{new}$, $\mathbf{t}_{B,new}^S = (\mathbf{P}_B^S)^T \mathbf{x}_{new}$, 同时利用下式 (32), (33) 计算A、B两种模态的数据集特殊部分 T^2 统计量

$$T_{S,A}^2 = (\mathbf{t}_{A,new}^S)^T (\Lambda_A^S)^{-1} \mathbf{t}_{A,new}^S \quad (32)$$

$$T_{S,B}^2 = (\mathbf{t}_{B,new}^S)^T (\Lambda_B^S)^{-1} \mathbf{t}_{B,new}^S \quad (33)$$

Λ_A^S, Λ_B^S 分别代表特殊子集的特征值组成的对角阵。

计算最终的残差 $\mathbf{e}_{A,new}^S$ 、 $\mathbf{e}_{B,new}^S$ 。设 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ 分别是 $\mathbf{x}_{new}^S$ 在A、B两种模态下的估计值, 将 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$, $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$, $\mathbf{x}_{new}^S$ 带入式 (26), (27) 得到:

$$\mathbf{e}_{A,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (34)$$

$$\mathbf{e}_{B,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (35)$$

利用残差求得 A、B 两种模态的 SPE 统计量 $SPE_{A,new}^S$ 和 $SPE_{B,new}^S$:

$$SPE_{A,new}^S = (\mathbf{e}_{A,new}^S)^T \mathbf{e}_{A,new}^S \quad (36)$$

$$SPE_{B,new}^S = (\mathbf{e}_{B,new}^S)^T \mathbf{e}_{B,new}^S \quad (37)$$

霍特林 T^2 统计量的控制限计算方法如下:

$$T_{\lim,A}^2 = \frac{p \cdot (n_A - 1)}{n_A - p} F(p, n_A - 1, \alpha) \quad (38)$$

$$T_{\lim,B}^2 = \frac{p \cdot (n_B - 1)}{n_B - p} F(p, n_B - 1, \alpha) \quad (39)$$

其中 $F(p, n_A - 1, \alpha)$ 表示置信限为 α , 自由度分别为 $p, n_A - 1$ 的 F 分布, $F(p, n_B - 1, \alpha)$ 表示置信限为 α , 自由度分别为 $p, n_B - 1$ 的 F 分布。

在残差子空间, 模态A和模态B的平方预测误差SPE统计量 SPE^A 、 SPE^B 的控制限, 可以由下式得到:

$$SPE^A \sim g^A \chi_{h^A}^2 \quad (40)$$

$$SPE^B \sim g^B \chi_{h^B}^2 \quad (41)$$

其中 $\chi_{h^A}^2$ 表示自由度为 h^A 的 χ^2 分布, $g^A = b^A / 2a^A$, $h^A = 2(a^A)^2 / b^A$, a^A , b^A 分别是正常工况下模态A的SPE估计均值和方差。 $\chi_{h^B}^2$ 表示自由度为 h^B 的 χ^2 分布, $g^B = b^B / 2a^B$, $h^B = 2(a^B)^2 / b^B$, a^B , b^B 分别是正常工况下模态B的SPE估计均值和方差。

利用 T^2 统计和平方预测误差SPE统计进行故障监测, 通过对比两种工作模态下各自绘制的控制图即可判断出电弧炉当前工作在何种工作模态下, 并在相应的工作模态下进行在线故障检测。当相应的工作模态下的 T^2 统计和SPE统计超出各自的控制限时, 认为有故障发生, 否则, 整个过程正常。

本发明的优点是: 本装置采用辐射测温方法, 可实现远距离非接触式测温, 由于能够采集到两种不同颜色可见光的辐射强度, 因此能够采用比色测温的方法提高计算的精确度。无线通信协议可以组成无线传感器网络, 方便现场布线, 采用接收应答机制确保数据传送的准确性, 当由于特殊情况出现致使通信失败时还可以智能判断出错原因并尝试恢复通信。接收端微控制器内实现了与PLC相同的通信协议, 实现了不同设备之间的兼容。适合工作在多种不同的稳定模态的工业生产过程, 能够对电弧炉的运行当前所处的工作模态进行智能的识别, 并能够针对这一工作模态进行故障诊断。具有良好的人机界面, 可以显示温度历史曲线便于直观了解生产过程中温度的变化趋势, 并具有报警功能。

附图说明

图 1 为本发明装置总体结构图；

图 2 为本发明温度信号采集装置结构图；

图 3 为本发明发送端控制器程序流程图；

图 4 为本发明接收端控制器程序流程图；

图 5 为本发明收发一体电路原理图；

图 6 为本发明串口通信电路原理图；

图 7 为本发明电弧炉工业过程原理图；

图 8 正常运行时数据集公共部分 T^2 统计量控制图；

图 9 正常运行时数据集特殊部分 T^2 统计量控制图；

图 10 正常运行时数据集总体SPE统计量控制图；

图 11 新观测数据集公共部分 T^2 统计量控制图；

图 12 新观测数据集特殊部分 T^2 统计量控制图；

图 13 新观测数据集总体的SPE统计量控制图；

图 14 故障诊断方法流程图；

图中：1为电流互感器，2、3、4为三个电极，5是炉壁，6为熔池，7为生产过程排出的气体，8为定滑轮。

具体实施方式

本实施例中为控制器选用型号为 CC2430；射频收发器选用型号为 CC2591；交流电流互感器选用 LYM-0.5 型母线式低压电流互感器，PLC 选用西门子 S7-200；成像装置选用望远镜；色彩传感器选用型号为 TCS320；

如图1所示，该装置包括温度信号采集装置，电流信号采集装置和上位机；电流信号采集装置包括交流电流互感器和PLC，交流电流互感器分别与电弧炉的三个电极串联，将通过电极的大电流信号转换成0-5V的标准信号送到PLC的模拟输入端，由PLC进行模数转换并通过PLC串口传至上位机；温度信号采集装置如图2所示，包括成像装置、色彩传感器、两组收发一体电路和串口通信电路；成像装置包括物镜和目镜；包括微控制器和射频收发器；两组收发一体电路中的射频收发器一组作为发射器，另一组作为接收器；色彩传感器的输入端连接成像装置，色彩传感器的输出端连接第一组收发一体电路中微控制器的输入端，收发一体电路如图5所示，微控制器的输出端RF_N、TXRX_SWITCH、P1_1、P1_7依次连接射频发射器的输入端RF_N、RF_P、HGM、EN和PAEN，射频发射器的输出端通过无线网络连接第二组收发一体电路中射频接收器的输入端，射频接收器的输出端RF_N、RF_P、HGM、EN和PAEN

依次连接微控制器的输入端RF_N、TXRX_SWITCH、P1_1、P1_7，微控制器的P0_2连接串口通信电路的P0-2/RX端，微控制器的P0_3连接串口通信电路的P0-3/TX端，串口通信电路的TIOUT和RIOUT连接至上位机；串口通信电路如图6所示，成像装置的物镜对准被测目标，将光敏传感器固定在目镜一端，使被测目标辐射光经过成像装置投射到色彩传感器的感光部位。色彩传感器与微控制器相连，微控制器采集到信号后控制射频发射电路发射无线射频信号，射频接收电路收到信号后在微控制器的协调下控制串口通信电路将数据传至上位机。无线信号的发射和接收采用的是两套相同的收发一体电路，在微控制器的控制下起到不同的作用。上位机运行组态软件，包括实时显示、历史查询、数据存储、报警处理等功能。

电弧炉的生产现场电磁环境复杂，因此本发明的装置采用了基于IEEE 802.15.4规范的无线网络协议。这一协议实现的功能包括自动搜寻网络，出错自动恢复，数据传输校正的功能，并且分别在发送端和接收端的微控制器内实现这一协议确保了数据传输的准确性。具体的实现参见图3所示，发送端程序流程图，采集到的数据由微控制器封装成帧，包括载入本机地址，目标地址，载入请求确认标志，加入帧长度，计算CRC循环检测码。发射电路采用的是TI公司的具有调制解调功能，内含8051微控制器内核的射频SOC（片上系统）芯片CC2430，能够从物理层支持IEEE 802.15.4规范，从而保证数据的正确传输。

通过解析S7-200PLC与组态软件的通信过程的得出S7-200PLC与组态软件之间的通信协议，并使用C语言在接收端的微控制器内实现这一协议，最终达到设备兼容的目标。具体的实现方法参见图4，在发送数据之前先将数据仿照PLC与上位机通信的格式封装数据，包括载入本机地址，载入写数据命令，载入寄存器类型、偏移地址，计算数据个数，载入数据，载入校验字节。完成封装后通过串口将数据发送至上位机。

电弧炉工作过程：

图7为电弧炉工业过程原理图，从图中可以看到1为电流互感器，2、3、4为三个电极，5是炉壁，6为熔池，7为生产过程排出的气体，8为定滑轮。

将本发明的成像装置，色彩传感器，收发一体电路固定在定滑轮的支撑结构上，物镜对准熔池。收发一体电路、串口通信电路以及上位机放置在操作台内。开始生产后，采集熔池辐射的红绿两种可见光信号并通过收发一体电路将信号传至接收电路，在微控制器的控制下将信号传至上位机，PLC与电流互感器相连采集电流数据传至上位机。

电弧炉在运行中会产生大量的废气，如果积压气体过多，炉内熔融物料有可能喷出，出

现喷料故障。电弧炉在运行中原材料分镁粉和镁块两种，下面为两种模态下取得的一部分数据其中模态A对应镁粉，模态B对应镁块。

表 2. 模态 A 下的部分建模数据

变量 No.	电流 A (安培)	电流 B (安培)	电流 C (安培)	电流 C (摄氏度)
1	8264.47	10434.55	8824.69	2853.2
2	8043.67	9955.90	8534.97	2860.4
3	8111.64	9807.76	8392.92	2858.5
4	8199.31	10056.70	8415.42	2861.1
5	8647.01	10402.67	8082.11	2866.7
6	8962.98	10682.08	7913.34	2855.4
7	8880.94	10739.74	8495.12	2864.3
8	8625.92	10835.38	8957.83	2860.9
9	8551.85	10704.11	8975.64	2850.5
10	8659.20	10614.10	8686.86	2855.7

表1. 模态B下的部分建模数据

变量 No.	电流 I _A (安培)	电流 I _B (安培)	电流 I _C (安培)	温度 t (摄氏度)
1	11353.87	9858.86	9616.025	2816.3
2	11199.16	9947.46	9539.61	2820.5
3	11512.79	10553.63	11540.92	2826.8
4	11335.58	10410.64	10027.16	2830.1
5	11290.58	10220.31	9491.79	2837.2
6	11475.76	10212.81	10669.42	2835.9
7	11344.49	9866.36	9772.60	2840.4
8	11200.10	9642.74	9315.05	2833.3
9	11315.89	9970.90	9643.68	2844.7
10	11502.95	9994.81	10036.07	2839.3

通过识别电弧炉所处的工作模态，进行有针对性的故障检测，并对检测结果进行分析。

采用电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断方法，按如下步骤进行：如图17所示，

步骤一：采集数据并规范数据使数据标准化

对于训练数据和实时工况数据采用1.2秒的采样间隔采集数据。取其中一种正常工作模态

下的数据用来建立模型A,用另一种正常工作模态数据用来建立模型B,模型A共取了349个采样点,模型B共取了403个采样点。其中置信限取99%,每个样本包含4个变量,利用均值和标准偏差规范采集的数据;

步骤二、对数据进行分解,将两种模态的公共部分与特殊部分分解建模分析,通过计算该监测模型的 A、B 工作模态下的全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g$,对电弧炉工作过程 A、B 工作模态下得到的数据集进行分解,得到 A、B 工作模态关系密切的公共子集,以及 A、B 工作模态的特殊子集;

对模态A和模态B下采样得到的数据集进行整理,分别进行标准化处理。通过前文所述方法求得全局基础矩阵 $\mathbf{P}_g$,进而分别对模态A下的数据集以及模态B下的数据集进行分解,分解出公共部分子集和特殊部分子集。分别对各自子集建立PCA模型。分别计算出两种模态下特殊子集的负荷向量 $\mathbf{P}_A^S$ 和 $\mathbf{P}_B^S$ 。假设 $\mathbf{x}_{new}$ 为观测数中的一个可以用的新样本,通过 $\mathbf{P}_g$ 对其投影得到公共部分的得分向量。通过 $\mathbf{P}_A^S$ 和 $\mathbf{P}_B^S$ 对其投影得到特殊部分的得分向量,进而求得 T^2 统计量,通过计算残差求得SPE统计量;

步骤三:对电弧炉运行进行故障检测与诊断

选取模态A正常运行数据和模态B正常运行数据,分别有349个采样点和3个变量数据集,以及有403个采样点和3个变量的数据集并分别建立模型。首先对一组新的观测进行测试。如图8和图9所示,在模态A下不论是公共部分 T^2 统计量还是特殊部分 T^2 统计量均未超越的置信区域,然而,在模态B特殊部分的 T^2 统计量确远超过控制限。通过图10可知两种模态的SPE统计量均未超越控制限,由此可以判断所检测的数据是正常数据。通过对3个图的比较可知当前数据与模态A更为接近,由此可以判断电弧炉所处的运行模态;

对新观测数据进行故障检测。由上面分析可知电弧炉工作在模态A,于是在模态A下进行故障检测。如图11,12,13,通过对三幅图的对比可知特殊部分的 T^2 统计量超限最严重,而公共部分的 T^2 统计量只有部分区域超限,大部分区域未超限,可以判断发生了故障并且集中在特殊部分;

通过上面的实例,表明了本发明——电弧炉运行故障检测装置与方法的有效性,实现了对电弧炉运行的故障监测。

权利要求书

1、一种电弧炉运行故障检测装置，其特征在于：该装置包括温度信号采集装置，电流信号采集装置和上位机；电流信号采集装置包括交流电流互感器和 PLC，交流电流互感器的输出端连接 PLC 的输入端，PLC 的输出端连接上位机；温度信号采集装置包括成像装置、色彩传感器、两组收发一体电路和串口通信电路；成像装置包括物镜和目镜；收发一体电路包括微控制器和射频收发器；两组收发一体电路中的射频收发器一组作为发射器，另一组作为接收器；色彩传感器的输入端连接成像装置，色彩传感器的输出端连接第一组收发一体电路中微控制器的输入端，微控制器的输出端连接射频发射器的输入端，射频发射器的输出端通过无线网络连接第二组收发一体电路中射频接收器的输入端，射频接收器的输出端连接微控制器的输入端，微控制器的输出端连接串口通信电路的输入端，串口通信电路的输出端连接上位机。

2、采用权利要求 1 所述的电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断方法，其特征在于：按如下步骤进行：

步骤一：采集数据并规范数据使数据标准化；在电弧炉工作过程中，设定有 M 个工作模态，当电弧炉稳定运行在不同模态时分别采集 M 个模态下三相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 和电弧炉炉内温度 t ；得到初始数据集 $\mathbf{X}_m = [\mathbf{x}_{1,m}^T, \mathbf{x}_{2,m}^T, \dots, \mathbf{x}_{l,m}^T, \mathbf{x}_{N_m}^T]^T (N_m \times J)$ ，其中 $m=1, 2, \dots, M$ ，其中下标 m 代表第 m 个工作模态， N_m 为第 m 个模态下数据采样的个数， J 为变量个数，对初始数据集使用求均值和标准偏差的方法规范采集的数据，得到正常运行标准化数据集 $\mathbf{X}_m = (N_m \times J)$ 其中 $m=1, 2, \dots$ ；

步骤二：对数据进行分解，建立电弧炉工作过程的初始监测模型；用步骤一标准化后得到 m 个数据集，建立电弧炉工作过程的初始监测模型，通过计算该监测模型的 M 个工作模态下的全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g$ ，对电弧炉工作过程 M 个工作模态下得到的数据集进行分解，得到 M 个工作模态关系密切的公共子集，以及每种工作模态的特殊子集；

步骤三：对电弧炉工作过程进行故障监测与诊断；利用建立电弧炉工作过程的初始监测模型，计算霍特林 T^2 统计量和平方预测误差 SPE 统计量；

电弧炉工作过程新观察值在特殊子集的得分 $\mathbf{t}_{A,new}^S = (\mathbf{P}_A^S)^T \mathbf{x}_{new}$ ， $\mathbf{t}_{B,new}^S = (\mathbf{P}_B^S)^T \mathbf{x}_{new}$ ，其中 $\mathbf{P}_A^S$ 是 A 模态特殊子集的 PCA 负荷矩阵， $\mathbf{P}_B^S$ 是 B 模态特殊子集的 PCA 负荷矩阵， $\mathbf{x}_{new}$ 为电弧炉工作过程新观测数据；计算 A、B 两种模态的数据集特殊部分霍特林 T^2 统计量

$$T_{S,A}^2 = (\mathbf{t}_{A,new}^S)^T (\Lambda_A^S)^{-1} \mathbf{t}_{A,new}^S \quad (29)$$

$$T_{S,B}^2 = (\mathbf{t}_{B,new}^S)^T (\Lambda_B^S)^{-1} \mathbf{t}_{B,new}^S \quad (30)$$

Λ_A^S, Λ_B^S 分别代表特殊子集的特征值组成的对角阵:

计算最终的残差 $\mathbf{e}_{A,new}^S$ 、 $\mathbf{e}_{B,new}^S$ ，设 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ 分别是 $\mathbf{x}_{new}^S$ 在 A、B 两种模态下的估计值，将 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ 、 $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ 、 $\mathbf{x}_{new}^S$ 带入式 (26)，(27) 得到:

$$\mathbf{e}_{A,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (31)$$

$$\mathbf{e}_{B,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (32)$$

利用残差求得 A、B 两种模态的平方预测误差统计量 $SPE_{A,new}^S$ 和 $SPE_{B,new}^S$:

$$SPE_{A,new}^S = (\mathbf{e}_{A,new}^S)^T \mathbf{e}_{A,new}^S \quad (33)$$

$$SPE_{B,new}^S = (\mathbf{e}_{B,new}^S)^T \mathbf{e}_{B,new}^S \quad (34)$$

利用霍特林 T^2 统计量和平方预测误差 SPE 统计量进行故障监测，通过对比两种工作模态下各自绘制的控制图即可判断出电弧炉当前工作在何种工作模态下，并在相应的工作模态下进行在线故障检测，当相应的工作模态下的霍特林 T^2 统计量和平方预测误差 SPE 统计量超出各自的控制限时，认为有故障发生，否则，整个过程正常。

3、根据权利要求2所述的电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断方法，其特征在于：所述的步骤二中电弧炉工作过程的初始监测模型，按如下步骤进行：

1)、计算电弧炉工作过程的全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g$

电弧炉工作过程中每个工作模态下得到的数据集的子集主要因素为 $\mathbf{p}_m (m=1,2,L,M)$ ，

下标 m 代表不同的工作模态，每个工作模态下的数据集的主要因素 $\mathbf{p}_m$ 与所在的数据集存在以下关系式：

$$\mathbf{p}_m = \sum_{n=1}^{N_m} a_{n,m} \mathbf{x}_{n,m} = \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m \quad (7)$$

$\mathbf{a}_m = [a_{1,m}, a_{2,m}, K, a_{n,m}]^T$ 为线性组合系数，其中字母 n 表示 $\mathbf{a}_m$ 的行数，即 $\mathbf{p}_m$ 可以表示为 $\mathbf{X}_m$ 中 N_m 个向量的线性组合，全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 描述各个工作模态下子集的主要因素，得到电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 方法如下：

使电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 与电弧炉工作过程每种工作模态下得到的子集主要因素 $\mathbf{p}_{m,j}$ 充分的接近，通过使式子 $(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2$ 达到最大值，求取多项式

$R^2 = (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_1)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2 + L + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_M^T \mathbf{a}_M)^2$ 的最大值，和不等式

$\varepsilon \leq \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_1)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2} = \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_3^T \mathbf{a}_3)^2} \leq \frac{1}{\varepsilon}$ ，其中 ε 是约束参数并且满足 $0.8 \leq \varepsilon < 1$ ，为了保证电弧炉工

作过程的全局主要因素与电弧炉工作过程每种工作模态下得到的子集的主要因素十分接近，求解下式：

$$\max R^2 = \max \left(\sum_{m=1}^M (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 \right) \quad (8)$$

同时满足约束条件

$$s.t. \begin{cases} \varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_{m-1}^T \mathbf{a}_{m-1})^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 \leq 0 \\ \varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_{m-1}^T \mathbf{a}_{m-1})^2 \leq 0 \\ \mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g = 1 \\ \mathbf{a}_m^T \mathbf{a}_m = 1 \end{cases} \quad (9)$$

以模态A和模态B分别表示电压值为A和B时电弧炉的生产模态，即M为2；设定初始目标函数并求解初始目标函数的极大值：

$$\begin{aligned} F(\mathbf{p}_g, \mathbf{a}, \lambda) = & (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 - \lambda_g (\mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g - 1) \\ & - \lambda_A (\mathbf{a}_A^T \mathbf{a}_A - 1) - \lambda_B (\mathbf{a}_B^T \mathbf{a}_B - 1) \\ & - \lambda_1 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 \right) \\ & - \lambda_2 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 λ_g , λ_A , λ_B , λ_1 和 λ_2 设为常数标量，对上式的 $\mathbf{p}_g$, $\mathbf{a}_A$, $\mathbf{a}_B$ 分别求偏导数整理得到如下式子：

$$(1 - \lambda_1 \varepsilon + \lambda_2) \mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g + (1 - \lambda_2 \varepsilon + \lambda_1) \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g = \lambda_g \mathbf{p}_g \quad (11)$$

$$\mathbf{a}_A = \sqrt{\frac{(1 - \lambda_1 \varepsilon + \lambda_2)}{\lambda_A}} \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g}} \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g \quad (12)$$

$$\mathbf{a}_B = \sqrt{\frac{(1 - \lambda_2 \varepsilon + \lambda_1)}{\lambda_B}} \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g}} \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g \quad (13)$$

λ_A , λ_B 可以从 (11) (12) (13) 计算过程中得到求解表达式:

$$\lambda_A = (1 - \lambda_1 \varepsilon + \lambda_2) \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g \quad (14)$$

$$\lambda_B = (1 - \lambda_2 \varepsilon + \lambda_1) \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g \quad (15)$$

由不等式 $\varepsilon \leq \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_1)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2} = \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_3^T \mathbf{a}_3)^2} \leq \frac{1}{\varepsilon}$ 可知 $\mathbf{p}_g$ 应满足以下关系式:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 \right) = 0, \\ \lambda_2 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 \right) = 0, \\ \lambda_1, \lambda_2 \geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 \right) = 0, \\ \lambda_2 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 \right) = 0, \\ \lambda_1, \lambda_2 \geq 0. \end{cases} \quad (17)$$

将(12), (13)式的结果带入(16), (17)式中, 得到以下结果:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g \right) = 0, \\ \lambda_2 \left(\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g \right) = 0, \\ \lambda_1, \lambda_2 \geq 0. \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g \right) = 0, \\ \lambda_2 \left(\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g \right) = 0, \\ \lambda_1, \lambda_2 \geq 0. \end{cases} \quad (19)$$

在上式中, 为求得电弧炉工作过程全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 的值, 对 λ_1 和 λ_2 的取值进行分析, 过程如下:

(1). 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时, 通过 (18), (19)式可知, (18) 与 (19) 式是矛盾的, 因此这种情况无法求得 $\mathbf{p}_g$ 的值, 此时无解;

(2). 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$ 时, (18), (19)式恒等于0, 即(18), (19)式会失去约束作用, 此时等式(11)变为

$$\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g + \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g = \lambda_g \mathbf{p}_g \quad (20)$$

由(20)式可知, 求解 $\mathbf{p}_g$ 的值转化为求解 $(\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A + \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B)$ 的特征向量问题, 通过求解可以得到 $(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \mathbf{a}_A)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \mathbf{a}_B)^2$ 的极大值, 但是由于(18), (19)式失去约束效力, 此时得到的电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 无法保证与每个工作模态下的子集主要因素都十分接近, 因此此时的 $\mathbf{p}_g$ 值无法满足要求;

(3). 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时, 计算(18), (19)式可以得到

$$\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g = 0 \quad (21)$$

其中参数 ε 应满足 $0.8 \leq \varepsilon < 1$ ，等式(21)只有唯一的未知向量 $\mathbf{p}_g$ ，通过计算(21)得到解作为 $\mathbf{p}_g$ 的解，令其为 $\mathbf{p}_{g1}$ ；

(4) . 当 $\lambda_1 \neq 0$ ， $\lambda_2 = 0$ 时，应用同样的方法进行处理，得到等式

$$\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g = 0 \quad (22)$$

与第3步相似的分析方法的到另一组 $\mathbf{p}_g$ 的解，令其为 $\mathbf{p}_{g2}$ ；

可知 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 可以作为满足条件的 $\mathbf{p}_g$ 的解，将 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 结合在一起共同组合成 R 列的矩阵 $\mathbf{P}_g = [\mathbf{p}_{g1}, \mathbf{p}_{g2}]$ ，其中 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 的列数之和为 R 列，得到电弧炉工作过程全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g (J \times R)$ 作为满足假设条件的解；

2)、将电弧炉工作过程两种工作模态下的数据集分别进行分解

通过上述建模过程得到电弧炉工作过程全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g (J \times R)$ ， $\mathbf{P}_g$ 的列向量 $\mathbf{p}_g$ 应满足线性关系： $\mathbf{p}_g = \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_1$ 和 $\mathbf{p}_g = \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_2$ ，其中 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_2$ 是线性组合系数且 $\mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g = 1$ ， $\boldsymbol{\alpha}_1^T \boldsymbol{\alpha}_1 = 1$ ， $\boldsymbol{\alpha}_2^T \boldsymbol{\alpha}_2 = 1$ ，则上式可以变形为 $\boldsymbol{\alpha}_1 = \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_2 = \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g$ ；令 R 组线性组合系数 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_2$ 分别组成两个特殊子集的得分矩阵 $\mathbf{T}_A^C$ 和 $\mathbf{T}_B^C$ ，可以得到如下表达式：

$$\mathbf{T}_A^C = \mathbf{X}_A \mathbf{P}_g, \mathbf{T}_B^C = \mathbf{X}_B \mathbf{P}_g \quad (23)$$

通过下面计算可以将电弧炉在工作模态A下的数据集 $\mathbf{X}_A$ 分解为包含公共信息的公共部分数据集 $\mathbf{X}_A^C$ ，以及特殊部分数据集 $\mathbf{X}_A^S$ ；

$$\begin{cases} \mathbf{X}_A = \mathbf{X}_A^C + \mathbf{X}_A^S \\ \mathbf{X}_A^C = \mathbf{T}_A^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_A \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_A^S = \mathbf{X}_A - \mathbf{X}_A^C = \mathbf{X}_A^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (24)$$

同理可以将电弧炉在工作模态B下的数据集 $\mathbf{X}_B$ 分解为公共部分数据集 $\mathbf{X}_B^C$ 和特殊部分数据集 $\mathbf{X}_B^S$ ；

$$\begin{cases} \mathbf{X}_B = \mathbf{X}_B^C + \mathbf{X}_B^S \\ \mathbf{X}_B^C = \mathbf{T}_B^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_B \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_B^S = \mathbf{X}_B - \mathbf{X}_B^C = \mathbf{X}_B^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (25)$$

完成上述分解过程，此时完成电弧炉工作过程的初始监测模型建立。

4、根据权利要求2所述的电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断，其特征在于：所述的步骤三中计算霍特林 T^2 统计量和平方预测误差SPE统计量方法如下：

结合主元分析（PCA）方法，可以得到两种模态数据集特殊部分得分矩阵 $\mathbf{T}_A^S$ 和 $\mathbf{T}_B^S$ ，以及特殊部分的残差矩阵 $\mathbf{E}_A^S$ 和 $\mathbf{E}_B^S$ ：

$$\begin{cases} \mathbf{T}_A^S = \mathbf{X}_A^S \mathbf{P}_A^S = \mathbf{X}_A (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_A^S \\ \hat{\mathbf{X}}_A^S = \mathbf{T}_A^S (\mathbf{P}_A^S)^T \\ \mathbf{E}_A^S = \mathbf{X}_A^S - \hat{\mathbf{X}}_A^S \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}_B^S = \mathbf{X}_B^S \mathbf{P}_B^S = \mathbf{X}_B (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_B^S \\ \hat{\mathbf{X}}_B^S = \mathbf{T}_B^S (\mathbf{P}_B^S)^T \\ \mathbf{E}_B^S = \mathbf{X}_B^S - \hat{\mathbf{X}}_B^S \end{cases} \quad (27)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}_A^S$ ， $\hat{\mathbf{X}}_B^S$ 分别是 $\mathbf{X}_A^S$ 和 $\mathbf{X}_B^S$ 的估测矩阵， $\mathbf{P}_A^S (J \times R_A^S)$ 和 $\mathbf{P}_B^S (J \times R_B^S)$ 分别是两个特殊子集的PCA负荷矩阵， R_A^S ， R_B^S 分别是两个子集主元个数， $\mathbf{E}_A^S$ ， $\mathbf{E}_B^S$ 分别为两个特殊子集的残差，也是最终模型的残差；

将A、B两种模态的数据集分解为公共数据集部分和特殊数据集部分，即由式(24)得到 $\mathbf{X}_A^C$ 、 $\mathbf{X}_B^C$ ，由（25式）得到 $\mathbf{X}_B^C$ 、 $\mathbf{X}_B^S$ ，下面计算这四个矩阵特征值组成的对角矩阵：

设 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值为 φ 则有 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征多项式 $|\varphi \cdot \mathbf{E} - \mathbf{X}_A^C|$ ， $\mathbf{E}$ 代表单位矩阵，另特征多项式等于零即 $|\varphi \cdot \mathbf{E} - \mathbf{X}_A^C| = 0$ 经整理可得到变量为 φ 的特征方程 $G(\varphi) = 0$ ，解这个方程可得到 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值，以 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值为对角线元素得到对角矩阵 Λ_A^C ，同理可得到另外三个矩阵 $\mathbf{X}_A^S$ ， Λ_B^C ， $\mathbf{X}_B^S$ 的特征值组成的对角矩阵 Λ_A^S ， Λ_B^S ， $\mathbf{X}_B^S$ ；

分别在A、B两种模态的公共数据集部分和特殊数据集部分进行故障检测分析，利用霍特林 T^2 统计和平方预测误差SPE统计进行故障检测，通过绘制控制图即可判断出是否发生故障， $\mathbf{x}_{new} (J \times 1)$ 为电弧炉工作过程新观测数据，通过投影 $\mathbf{x}_{new}$ 到全局主要因素 $\mathbf{P}_g$ ，得到新采样数据对于两种工作模态的公共部分数据集的得分向量 $\mathbf{t}_{new}^C = \mathbf{P}_g^T \mathbf{x}_{new}$ ，同时利用下式（30）（31）计算A、B两种工作模态的公共部分的霍特林 T^2 统计量，得到对模态A和模态B数据集公共部分霍特林统计量 $T_{C,A}^2$ 和 $T_{C,B}^2$ ，下面是两种工作模态的公共部分的霍特林统计量的计算公式：

$$T_{C,A}^2 = (\mathbf{t}_{new}^C)^T (\Lambda_A^C)^{-1} \mathbf{t}_{new}^C \quad (30)$$

$$T_{C,B}^2 = (\mathbf{t}_{new}^C)^T (\Lambda_B^C)^{-1} \mathbf{t}_{new}^C \quad (31)$$

按上述方法计算电弧炉工作过程新观察值在特殊子集的得分 $\mathbf{t}_{A,new}^S = (\mathbf{P}_A^S)^T \mathbf{x}_{new}$ ，

$\mathbf{t}_{B,new}^S = (\mathbf{P}_B^S)^T \mathbf{x}_{new}$ ，同时利用下式 (32)，(33) 计算A、B两种模态的数据集特殊部分霍特林统计量

$$\begin{aligned} T_{S,A}^2 &= (\mathbf{t}_{A,new}^S)^T (\mathbf{\Lambda}_A^S)^{-1} \mathbf{t}_{A,new}^S \\ (32) \quad T_{S,B}^2 &= (\mathbf{t}_{B,new}^S)^T (\mathbf{\Lambda}_B^S)^{-1} \mathbf{t}_{B,new}^S \end{aligned} \quad (33)$$

$\mathbf{\Lambda}_A^S, \mathbf{\Lambda}_B^S$ 分别代表特殊子集的特征值组成的对角阵：

计算最终的残差 $\mathbf{e}_{A,new}^S$ 、 $\mathbf{e}_{B,new}^S$ ，设 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ 分别是 $\mathbf{x}_{new}^S$ 在A、B两种模态下的估计值，将 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ ， $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ ， $\mathbf{x}_{new}^S$ 带入式 (26)，(27) 得到：

$$\mathbf{e}_{A,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (34)$$

$$\mathbf{e}_{B,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (35)$$

利用残差求得 A、B 两种模态的 SPE 统计量 $SPE_{A,new}^S$ 和 $SPE_{B,new}^S$ ：

$$SPE_{A,new}^S = (\mathbf{e}_{A,new}^S)^T \mathbf{e}_{A,new}^S \quad (36)$$

$$SPE_{B,new}^S = (\mathbf{e}_{B,new}^S)^T \mathbf{e}_{B,new}^S \quad (37)。$$

经修改的权利要求

国际局收到日：2012年5月3日(03.05.2012)

权 利 要 求 书

1、一种电弧炉运行故障检测装置，其特征在于：该装置包括温度信号采集装置，电流信号采集装置和上位机；电流信号采集装置包括交流电流互感器和 PLC，交流电流互感器的输出端连接 PLC 的输入端，PLC 的输出端连接上位机；温度信号采集装置包括成像装置、色彩传感器、两组收发一体电路和串口通信电路；成像装置包括物镜和目镜；收发一体电路包括微控制器和射频收发器；两组收发一体电路中的射频收发器一组作为发射器，另一组作为接收器；色彩传感器的输入端连接成像装置，色彩传感器的输出端连接第一组收发一体电路中微控制器的输入端，微控制器的输出端连接射频发射器的输入端，射频发射器的输出端通过无线网络连接第二组收发一体电路中射频接收器的输入端，射频接收器的输出端连接微控制器的输入端，微控制器的输出端连接串口通信电路的输入端，串口通信电路的输出端连接上位机。

2、采用权利要求 1 所述的电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断方法，其特征在于：按如下步骤进行：

步骤一：采集数据并规范数据使数据标准化；在电弧炉工作过程中，设定有 M 个工作模态，当电弧炉稳定运行在不同模态时分别采集 M 个模态下三相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 和电弧炉炉内温度 t ；得到初始数据集 $\dot{X}_m = [x_{1,m}^T, x_{2,m}^T, \dots, x_{l,m}^T \dots, x_{N_m}^T]^T (N_m \times J)$ ，其中 $m=1,2,\dots,M$ ，其中下标 m 代表第 m 个工作模态， N_m 为第 m 个模态下数据采样的个数， J 为变量个数，对初始数据集使用求均值和标准偏差的方法规范采集的数据，得到正常运行标准化数据集 $X_m = (N_m \times J)$ 其中 $m=1,2$ ；

步骤二：对数据进行分解，建立电弧炉工作过程的初始监测模型；用步骤一标准化后得到 m 个数据集，建立电弧炉工作过程的初始监测模型，通过计算该监测模型的 M 个工作模态下的全局主要因素矩阵 P_g ，对电弧炉工作过程 M 个工作模态下得到的数据集进行分解，得到 M 个工作模态关系密切的公共子集，以及每种工作模态的特殊子集；

步骤三：对电弧炉工作过程进行故障监测与诊断；利用建立电弧炉工作过程的初始监测模型，计算霍特林 T^2 统计量和平方预测误差 SPE 统计量；

结合主元分析 (PCA) 方法，可以得到两种模态数据集特殊部分得分矩阵 T_A^S 和 T_B^S ，以及特殊部分的残差矩阵 E_A^S 和 E_B^S

$$\begin{cases} \mathbf{T}_A^S = \mathbf{X}_A^S \mathbf{P}_A^S = \mathbf{X}_A (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_A^S \\ \hat{\mathbf{X}}_A^S = \mathbf{T}_A^S (\mathbf{P}_A^S)^T \\ \mathbf{E}_A^S = \mathbf{X}_A^S - \hat{\mathbf{X}}_A^S \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}_B^S = \mathbf{X}_B^S \mathbf{P}_B^S = \mathbf{X}_B (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_B^S \\ \hat{\mathbf{X}}_B^S = \mathbf{T}_B^S (\mathbf{P}_B^S)^T \\ \mathbf{E}_B^S = \mathbf{X}_B^S - \hat{\mathbf{X}}_B^S \end{cases} \quad (27)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}_A^S$, $\hat{\mathbf{X}}_B^S$ 分别是 $\mathbf{X}_A^S$ 和 $\mathbf{X}_B^S$ 的估测矩阵, $\mathbf{P}_A^S (J \times R_A^S)$ 和 $\mathbf{P}_B^S (J \times R_B^S)$ 分别是两个特殊子集的PCA负荷矩阵, R_A^S , R_B^S 分别是两个子集主元个数。 $\mathbf{E}_A^S$, $\mathbf{E}_B^S$ 分别为两个特殊子集的残差, 也是最终模型的残差;

电弧炉工作过程新观察值在特殊子集的得分 $\mathbf{t}_{A,new}^S = (\mathbf{P}_A^S)^T \mathbf{x}_{new}$, $\mathbf{t}_{B,new}^S = (\mathbf{P}_B^S)^T \mathbf{x}_{new}$, 其中 $\mathbf{P}_A^S$ 是A模态特殊子集的PCA负荷矩阵, $\mathbf{P}_B^S$ 是B模态特殊子集的PCA负荷矩阵, $\mathbf{x}_{new}$ 为电弧炉工作过程新观测数据; 计算A、B两种模态的数据集特殊部分霍特林 T^2 统计量

$$T_{S,A}^2 = (\mathbf{t}_{A,new}^S)^T (\Lambda_A^S)^{-1} \mathbf{t}_{A,new}^S \quad (32)$$

$$T_{S,B}^2 = (\mathbf{t}_{B,new}^S)^T (\Lambda_B^S)^{-1} \mathbf{t}_{B,new}^S \quad (33)$$

Λ_A^S, Λ_B^S 分别代表特殊子集的特征值组成的对角阵:

计算最终的残差 $\mathbf{e}_{A,new}^S$ 、 $\mathbf{e}_{B,new}^S$, 设 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ 分别是 $\mathbf{x}_{new}^S$ 在A、B两种模态下的估计值, 将 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$, $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$, $\mathbf{x}_{new}^S$ 带入式 (26), (27) 得到:

计算最终的残差 $\mathbf{e}_{A,new}^S$ 、 $\mathbf{e}_{B,new}^S$, 设 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ 分别是 $\mathbf{x}_{new}^S$ 在A、B两种模态下的估计值, 将 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$, $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$, $\mathbf{x}_{new}^S$ 带入式 (26), (27) 得到:

$$\mathbf{e}_{A,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S]^T \right) \mathbf{x}_{new} \quad (34)$$

$$\mathbf{e}_{B,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S] [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S]^T \right) \mathbf{x}_{new} \quad (35)$$

利用残差求得 A、B 两种模态的平方预测误差统计量 $SPE_{A,new}^S$ 和 $SPE_{B,new}^S$:

$$SPE_{A,new}^S = (\mathbf{e}_{A,new}^S)^T \mathbf{e}_{A,new}^S \quad (36)$$

$$SPE_{B,new}^S = (\mathbf{e}_{B,new}^S)^T \mathbf{e}_{B,new}^S \quad (37)$$

利用霍特林 T^2 统计量和平方预测误差SPE统计量进行故障监测, 通过对比两种工作模态下各自绘制的控制图即可判断出电弧炉当前工作在何种工作模态下, 并在相应的工作模态下进行在线故障检测, 当相应的工作模态下的霍特林 T^2 统计量和平方预测误差SPE统计量超出各自的控制限时, 认为有故障发生, 否则, 整个过程正常。

3、根据权利要求2所述的电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断方法, 其特征在于: 所述的步骤二中电弧炉工作过程的初始监测模型, 按如下步骤进行:

1)、计算电弧炉工作过程的全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g$

电弧炉工作过程中每个工作模态下得到的数据集的子集主要因素为 $\mathbf{p}_m (m=1,2,\dots,M)$,

下标m代表不同的工作模态，每个工作模态下的数据集的主要因素 $\mathbf{p}_m$ 与所在的数据集存在以下关系式：

$$\mathbf{p}_m = \sum_{n=1}^{N_m} a_{n,m} \mathbf{X}_{n,m} = \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m \quad (7)$$

$\mathbf{a}_m = [a_{1,m}, a_{2,m}, \dots, a_{n,m}]^T$ 为线性组合系数，其中字母 n 表示 $\mathbf{a}_m$ 的行数，即 $\mathbf{p}_m$ 可以表示为 $\mathbf{X}_m$ 中 N_m 个向量的线性组合，全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 描述各个工作模态下子集的主要因素，得到电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 方法如下：

使电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 与电弧炉工作过程每种工作模态下得到的子集主要因素 $\mathbf{p}_{m,j}$ 充分的接近，通过使式子 $(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2$ 达到最大值，求取多项式 $R^2 = (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_1)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2 + \dots + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_M^T \mathbf{a}_M)^2$ 的最大值，和不等式 $\varepsilon \leq \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_1)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2} = \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_2)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_3^T \mathbf{a}_3)^2} \leq \frac{1}{\varepsilon}$ ，其中 ε 是约束参数并且满足 $0.8 \leq \varepsilon < 1$ ，为了保证电弧炉工作过程的全局主要因素与电弧炉工作过程每种工作模态下得到的子集的主要因素十分接近，求解下式：

$$\max R^2 = \max \left(\sum_{m=1}^M (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 \right) \quad (8)$$

同时满足约束条件

$$s.t. \begin{cases} \varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_{m-1}^T \mathbf{a}_{m-1})^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 \leq 0 \\ \varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_m^T \mathbf{a}_m)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_{m-1}^T \mathbf{a}_{m-1})^2 \leq 0 \\ \mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g = 1 \\ \mathbf{a}_m^T \mathbf{a}_m = 1 \end{cases} \quad (9)$$

以模态A和模态B分别表示电压值为A和B时电弧炉的生产模态，即M为2；设定初始目标函数并求解初始目标函数的极大值：

$$\begin{aligned}
F(\mathbf{p}_g, \boldsymbol{\alpha}, \lambda) = & (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_A)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_B)^2 - \lambda_g (\mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g - 1) \\
& - \lambda_A (\boldsymbol{\alpha}_A^T \boldsymbol{\alpha}_A - 1) - \lambda_B (\boldsymbol{\alpha}_B^T \boldsymbol{\alpha}_B - 1) \\
& - \lambda_1 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_A)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_B)^2 \right) \\
& - \lambda_2 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_B)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_A)^2 \right)
\end{aligned} \tag{10}$$

其中 $\lambda_g, \lambda_A, \lambda_B, \lambda_1$ 和 λ_2 设为常数标量, 对上式的 $\mathbf{p}_g, \boldsymbol{\alpha}_A, \boldsymbol{\alpha}_B$ 分别求偏导数整理得到如下式子:

$$(1 - \lambda_1 \varepsilon + \lambda_2) \mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g + (1 - \lambda_2 \varepsilon + \lambda_1) \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g = \lambda_g \mathbf{p}_g \tag{11}$$

$$\boldsymbol{\alpha}_A = \sqrt{\frac{(1 - \lambda_1 \varepsilon + \lambda_2)}{\lambda_A}} \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g}} \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g \tag{12}$$

$$\boldsymbol{\alpha}_B = \sqrt{\frac{(1 - \lambda_2 \varepsilon + \lambda_1)}{\lambda_B}} \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g}} \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g \tag{13}$$

λ_A, λ_B 可以从 (11) (12) (13) 计算过程中得到求解表达式:

$$\lambda_A = (1 - \lambda_1 \varepsilon + \lambda_2) \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g \tag{14}$$

$$\lambda_B = (1 - \lambda_2 \varepsilon + \lambda_1) \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g \tag{15}$$

由不等式 $\varepsilon \leq \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_1^T \boldsymbol{\alpha}_1)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \boldsymbol{\alpha}_2)^2} = \frac{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_2^T \boldsymbol{\alpha}_2)^2}{(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_3^T \boldsymbol{\alpha}_3)^2} \leq \frac{1}{\varepsilon}$ 可知 $\mathbf{p}_g$ 应满足以下关系式:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_A)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_B)^2 \right) = 0, \end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases} \lambda_2 \left(\varepsilon (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_B)^2 - (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_A)^2 \right) = 0, \\ \lambda_1, \lambda_2 \geq 0. \end{cases} \tag{17}$$

将(12), (13)式的结果带入(16), (17)式中, 得到以下结果:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g \right) = 0, \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} \lambda_2 \left(\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g \right) = 0, \\ \lambda_1, \lambda_2 \geq 0. \end{cases} \tag{19}$$

在上式中, 为求得电弧炉工作过程全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 的值, 对 λ_1 和 λ_2 的取值进行分析, 过程如下:

(1). 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时, 通过 (18), (19) 式可知, (18) 与 (19) 式是矛盾的, 因此这种情况无法求得 $\mathbf{p}_g$ 的值, 此时无解;

(2). 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$ 时, (18), (19) 式恒等于 0, 即 (18), (19) 式会失去约束作用, 此时等式 (11) 变为

$$\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g + \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g = \lambda_g \mathbf{p}_g \quad (20)$$

由 (20) 式可知, 求解 $\mathbf{p}_g$ 的值转化为求解 $(\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A + \mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B)$ 的特征向量问题, 通过求解可以得到 $(\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_A)^2 + (\mathbf{p}_g^T \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_B)^2$ 的极大值, 但是由于 (18), (19) 式失去约束效力, 此时得到的电弧炉工作过程的全局主要因素 $\mathbf{p}_g$ 无法保证与每个工作模态下的子集主要因素都十分接近, 因此此时的 $\mathbf{p}_g$ 值无法满足要求;

(3). 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时, 计算 (18), (19) 式可以得到

$$\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g = 0 \quad (21)$$

其中参数 ε 应满足 $0.8 \leq \varepsilon < 1$, 等式 (21) 只有唯一的未知向量 $\mathbf{p}_g$, 通过计算 (21) 得到解作为 $\mathbf{p}_g$ 的解, 令其为 $\mathbf{p}_{g1}$;

(4). 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 = 0$ 时, 应用同样的方法进行处理, 得到等式

$$\varepsilon \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_A^T \mathbf{X}_A) \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_g^T (\mathbf{X}_B^T \mathbf{X}_B) \mathbf{p}_g = 0 \quad (22)$$

与第 3 步相似的分析方法的到另一组 $\mathbf{p}_g$ 的解, 令其为 $\mathbf{p}_{g2}$;

可知 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 可以作为满足条件的 $\mathbf{p}_g$ 的解, 将 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 结合在一起共同组合成 R 列的矩阵 $\mathbf{P}_g = [\mathbf{p}_{g1}, \mathbf{p}_{g2}]$, 其中 $\mathbf{p}_{g1}$ 和 $\mathbf{p}_{g2}$ 的列数之和为 R 列, 得到电弧炉工作过程全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g (J \times R)$ 作为满足假设条件的解;

2)、将电弧炉工作过程两种工作模态下的数据集分别进行分解

通过上述建模过程得到电弧炉工作过程全局主要因素矩阵 $\mathbf{P}_g (J \times R)$, $\mathbf{P}_g$ 的列向量 $\mathbf{p}_g$ 应满

足线性关系: $\mathbf{p}_g = \mathbf{X}_A^T \boldsymbol{\alpha}_1$ 和 $\mathbf{p}_g = \mathbf{X}_B^T \boldsymbol{\alpha}_2$, 其中 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_2$ 是线性组合系数且 $\mathbf{p}_g^T \mathbf{p}_g = 1$, $\boldsymbol{\alpha}_1^T \boldsymbol{\alpha}_1 = 1$, $\boldsymbol{\alpha}_2^T \boldsymbol{\alpha}_2 = 1$, 则上式可以变形为 $\boldsymbol{\alpha}_1 = \mathbf{X}_A \mathbf{p}_g$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_2 = \mathbf{X}_B \mathbf{p}_g$; 令 R 组线性组合系数 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_2$ 分别组成两个特殊子集的得分矩阵 $\mathbf{T}_A^C$ 和 $\mathbf{T}_B^C$, 可以得到如下表达式:

$$\mathbf{T}_A^C = \mathbf{X}_A \mathbf{P}_g, \mathbf{T}_B^C = \mathbf{X}_B \mathbf{P}_g \quad (23)$$

通过下面计算可以将电弧炉在工作模态A下的数据集 $\mathbf{X}_A$ 分解为包含公共信息的公共部分数据集 $\mathbf{X}_A^C$, 以及特殊部分数据集 $\mathbf{X}_A^S$:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_A = \mathbf{X}_A^C + \mathbf{X}_A^S \\ \mathbf{X}_A^C = \mathbf{T}_A^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_A \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_A^S = \mathbf{X}_A - \mathbf{X}_A^C = \mathbf{X}_A^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (24)$$

同理可以将电弧炉在工作模态B下的数据集 $\mathbf{X}_B$ 分解为公共部分数据集 $\mathbf{X}_B^C$ 和特殊部分数据集 $\mathbf{X}_B^S$:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_B = \mathbf{X}_B^C + \mathbf{X}_B^S \\ \mathbf{X}_B^C = \mathbf{T}_B^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_B \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_B^S = \mathbf{X}_B - \mathbf{X}_B^C = \mathbf{X}_B^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (25)$$

完成上述分解过程, 此时完成电弧炉工作过程的初始监测模型建立。

4、根据权利要求2所述的电弧炉运行故障检测装置进行多模态故障监测与诊断, 其特征在于: 所述的步骤三中计算霍特林 T^2 统计量和平方预测误差SPE统计量方法如下:

通过下面计算可以将电弧炉在工作模态A下的数据集 $\mathbf{X}_A$ 分解为包含公共信息的公共部分数据集 $\mathbf{X}_A^C$, 以及特殊部分数据集 $\mathbf{X}_A^S$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_A = \mathbf{X}_A^C + \mathbf{X}_A^S \\ \mathbf{X}_A^C = \mathbf{T}_A^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_A \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_A^S = \mathbf{X}_A - \mathbf{X}_A^C = \mathbf{X}_A^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (24)$$

同理可以将电弧炉在工作模态B下的数据集 $\mathbf{X}_B$ 分解为公共部分数据集 $\mathbf{X}_B^C$ 和特殊部分数据集 $\mathbf{X}_B^S$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_B = \mathbf{X}_B^C + \mathbf{X}_B^S \\ \mathbf{X}_B^C = \mathbf{T}_B^C \mathbf{P}_g^T = \mathbf{X}_B \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T \\ \mathbf{X}_B^S = \mathbf{X}_B - \mathbf{X}_B^C = \mathbf{X}_B^T (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \end{cases} \quad (25)$$

结合主元分析 (PCA) 方法, 可以得到两种模态数据集特殊部分得分矩阵 $\mathbf{T}_A^S$ 和 $\mathbf{T}_B^S$, 以及特殊部分的残差矩阵 $\mathbf{E}_A^S$ 和 $\mathbf{E}_B^S$:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_A^S = \mathbf{X}_A^S \mathbf{P}_A^S = \mathbf{X}_A (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_A^S \\ \hat{\mathbf{X}}_A^S = \mathbf{T}_A^S (\mathbf{P}_A^S)^T \\ \mathbf{E}_A^S = \mathbf{X}_A^S - \hat{\mathbf{X}}_A^S \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}_B^S = \mathbf{X}_B^S \mathbf{P}_B^S = \mathbf{X}_B (\mathbf{I} - \mathbf{P}_g \mathbf{P}_g^T) \mathbf{P}_B^S \\ \hat{\mathbf{X}}_B^S = \mathbf{T}_B^S (\mathbf{P}_B^S)^T \\ \mathbf{E}_B^S = \mathbf{X}_B^S - \hat{\mathbf{X}}_B^S \end{cases} \quad (27)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}_A^S$, $\hat{\mathbf{X}}_B^S$ 分别是 $\mathbf{X}_A^S$ 和 $\mathbf{X}_B^S$ 的估测矩阵, $\mathbf{P}_A^S (J \times R_A^S)$ 和 $\mathbf{P}_B^S (J \times R_B^S)$ 分别是两个特殊子集的PCA负荷矩阵, R_A^S , R_B^S 分别是两个子集主元个数, $\mathbf{E}_A^S$, $\mathbf{E}_B^S$ 分别为两个特殊子集的残差, 也是最终模型的残差;

将A、B两种模态的数据集分解为公共数据集部分和特殊数据集部分, 即由式(24)得到 $\mathbf{X}_A^C$ 、 $\mathbf{X}_B^S$, 由(25式)得到 $\mathbf{X}_B^C$ 、 $\mathbf{X}_B^S$, 下面计算这四个矩阵特征值组成的对角矩阵:

设 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值为 φ 则有 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征多项式 $|\varphi \cdot \mathbf{E} - \mathbf{X}_A^C|$, $\mathbf{E}$ 代表单位矩阵, 另特征多项式等于零即 $|\varphi \cdot \mathbf{E} - \mathbf{X}_A^C| = 0$ 经整理可得到变量为 φ 的特征方程 $G(\varphi) = 0$, 解这个方程可得到 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值, 以 $\mathbf{X}_A^C$ 的特征值为对角线元素得到对角矩阵 Λ_A^C , 同理可得到另外三个矩阵 $\mathbf{X}_A^S$, Λ_B^C , $\mathbf{X}_B^S$ 的特征值组成的对角矩阵 Λ_A^S , Λ_B^C , $\mathbf{X}_B^S$;

分别在A、B两种模态的公共数据集部分和特殊数据集部分进行故障检测分析, 利用霍特林 T^2 统计和平方预测误差SPE统计进行故障检测, 通过绘制控制图即可判断出是否发生故障, $\mathbf{x}_{new} (J \times 1)$ 为电弧炉工作过程新观测数据, 通过投影 $\mathbf{x}_{new}$ 到全局主要因素 $\mathbf{P}_g$, 得到新采样数据对于两种工作模态的公共部分数据集的得分向量 $\mathbf{t}_{new}^C = \mathbf{P}_g^T \mathbf{x}_{new}$, 同时利用下式 (30) (31) 计算A、B两种工作模态的公共部分的霍特林 T^2 统计量, 得到对模态A和模态B数据集公共部分霍特林统计量 $T_{C,A}^2$ 和 $T_{C,B}^2$, 下面是两种工作模态的公共部分的霍特林统计量的计算公式:

$$T_{C,A}^2 = (\mathbf{t}_{new}^C)^T (\Lambda_A^C)^{-1} \mathbf{t}_{new}^C \quad (30)$$

$$T_{C,B}^2 = (\mathbf{t}_{new}^C)^T (\Lambda_B^C)^{-1} \mathbf{t}_{new}^C \quad (31)$$

按上述方法计算电弧炉工作过程新观察值在特殊子集的得分 $\mathbf{t}_{A,new}^S = (\mathbf{P}_A^S)^T \mathbf{x}_{new}$, $\mathbf{t}_{B,new}^S = (\mathbf{P}_B^S)^T \mathbf{x}_{new}$, 同时利用下式 (32), (33) 计算A、B两种模态的数据集特殊部分霍特林统计量

$$T_{S,A}^2 = (\mathbf{t}_{A,new}^S)^T (\Lambda_A^S)^{-1} \mathbf{t}_{A,new}^S \quad (32)$$

$$T_{S,B}^2 = (\mathbf{t}_{B,new}^S)^T (\Lambda_B^S)^{-1} \mathbf{t}_{B,new}^S \quad (33)$$

Λ_A^S, Λ_B^S 分别代表特殊子集的特征值组成的对角阵:

计算最终的残差 $\mathbf{e}_{A,new}^S$ 、 $\mathbf{e}_{B,new}^S$ ，设 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ 分别是 $\mathbf{x}_{new}^S$ 在 A、B 两种模态下的估计值，将 $\hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S$ ， $\hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S$ ， $\mathbf{x}_{new}^S$ 带入式 (26)，(27) 得到：

$$\mathbf{e}_{A,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{A,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S][\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_A^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (34)$$

$$\mathbf{e}_{B,new}^S = \mathbf{x}_{new}^S - \hat{\mathbf{x}}_{B,new}^S = \left(\mathbf{I} - [\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S][\mathbf{P}_g, \mathbf{P}_B^S]^T \right) \mathbf{x}_{new}^S \quad (35)$$

利用残差求得 A、B 两种模态的 SPE 统计量 $SPE_{A,new}^S$ 和 $SPE_{B,new}^S$ ：

$$SPE_{A,new}^S = (\mathbf{e}_{A,new}^S)^T \mathbf{e}_{A,new}^S \quad (36)$$

$$SPE_{B,new}^S = (\mathbf{e}_{B,new}^S)^T \mathbf{e}_{B,new}^S \quad (37)。$$

根据 PCT 第 19 条提出的修改声明

申请人根据国际检索报告及其书面意见，根据 PCT 第 19 条修改了权利要求书，具体修改说明如下：

1. 将说明书第 8 页中的式 (26) 和 (27) 加入到权利要求 2 中；
2. 将说明书第 8 页中的式 (24) 和 (25) 加入权利要求 4 中；
3. 根据说明书第 9 页的式 (32) — (37) 的内容，将权利要求 2 中的式 (29) — (34) 的标号分别修改为 (32) — (37)。

说明书附图

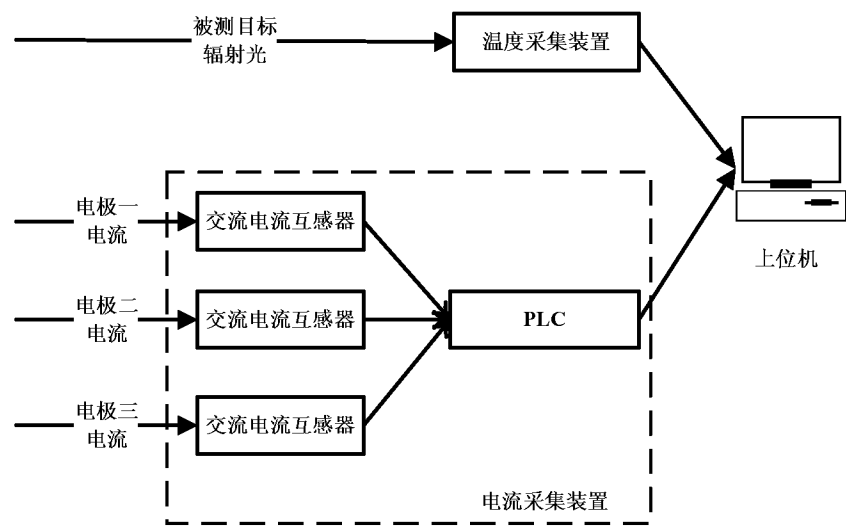


图 1

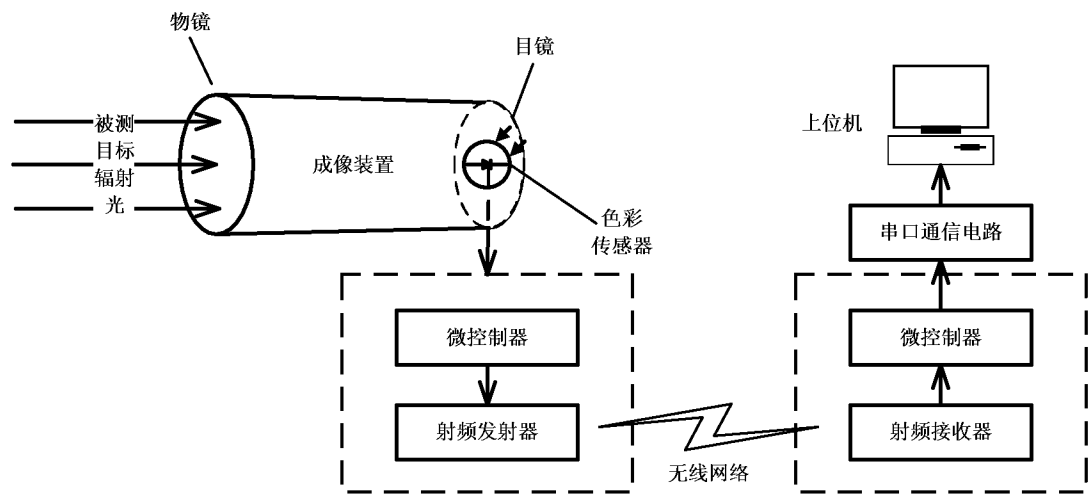


图 2

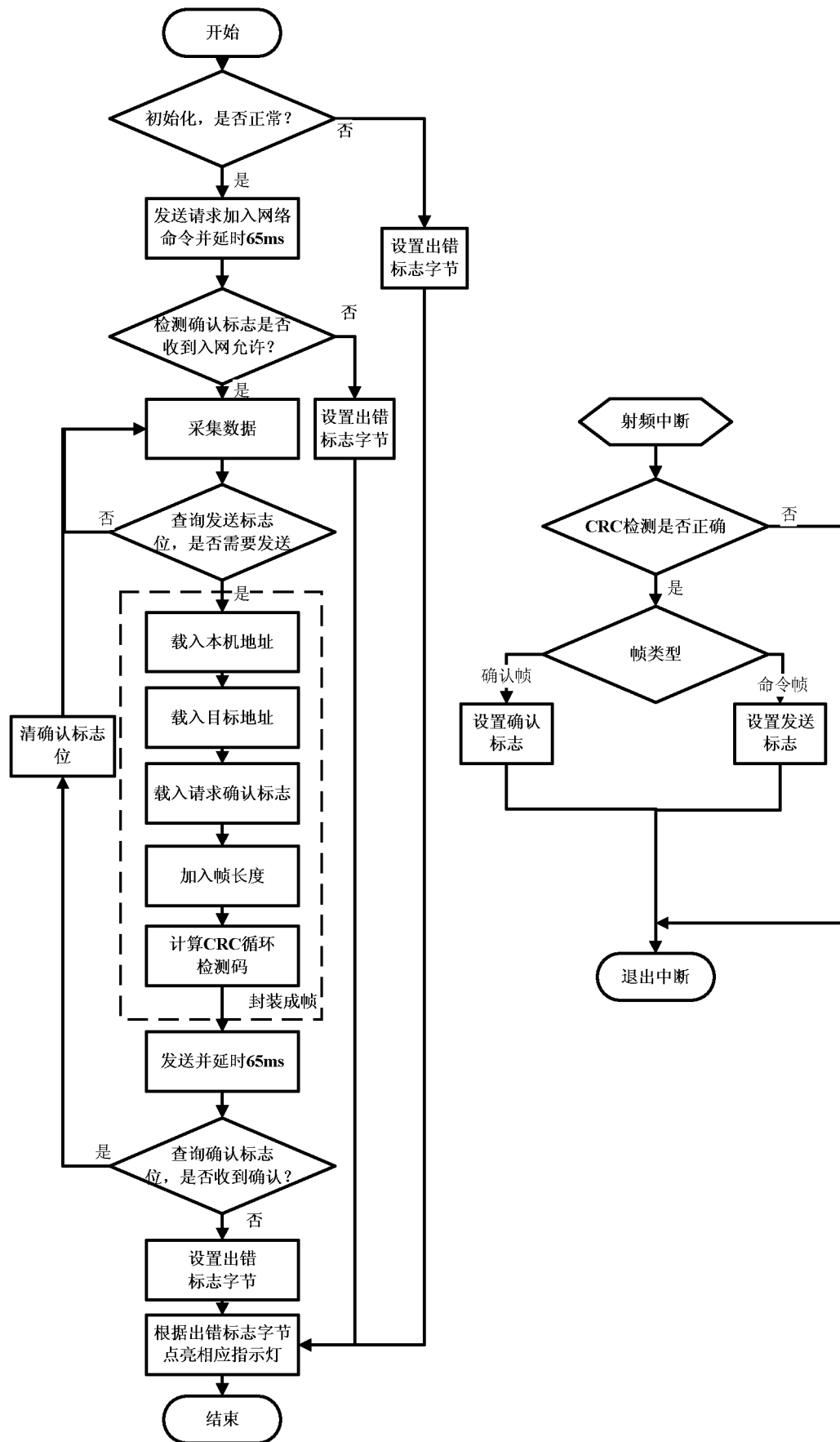


图 3

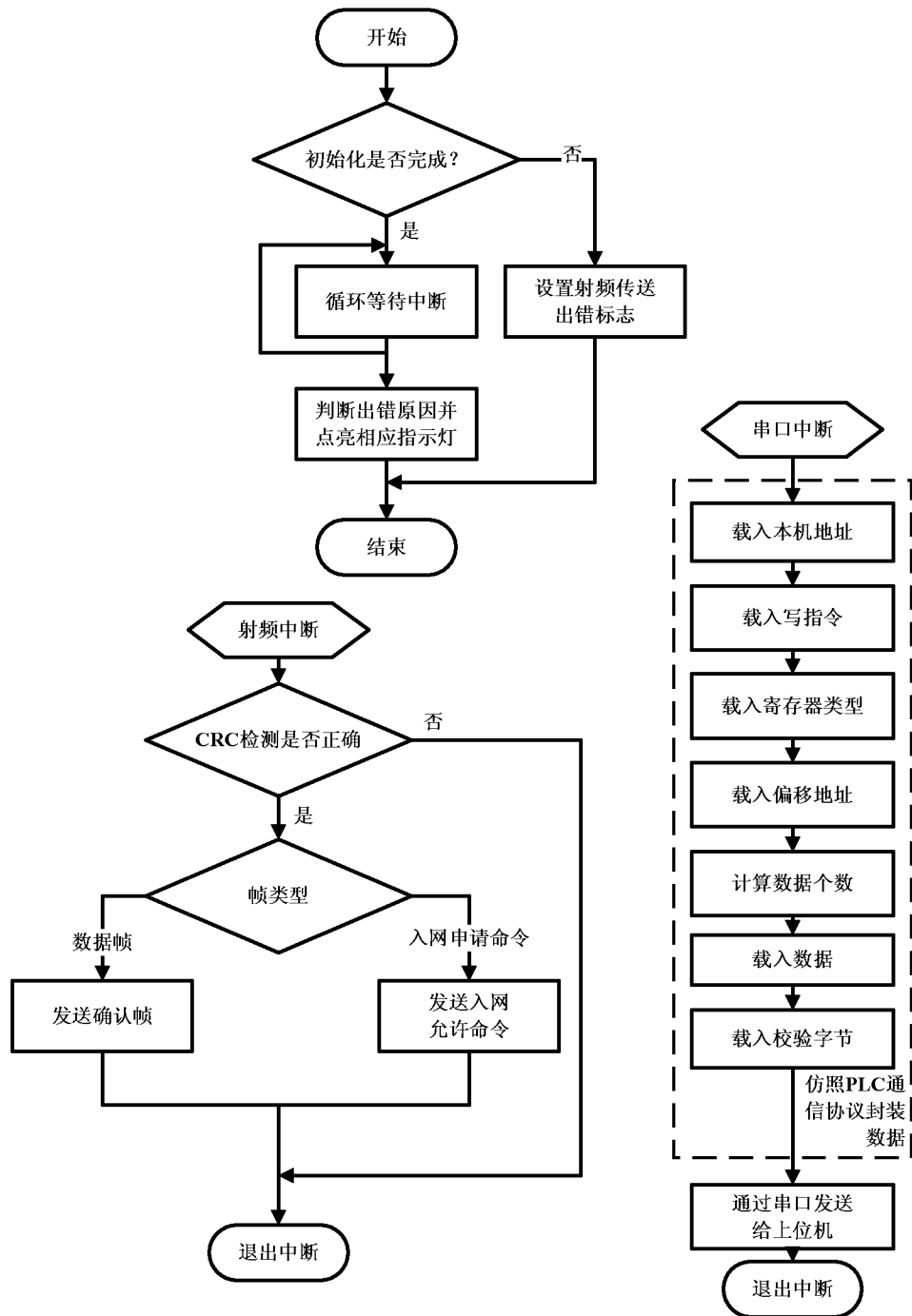


图 4

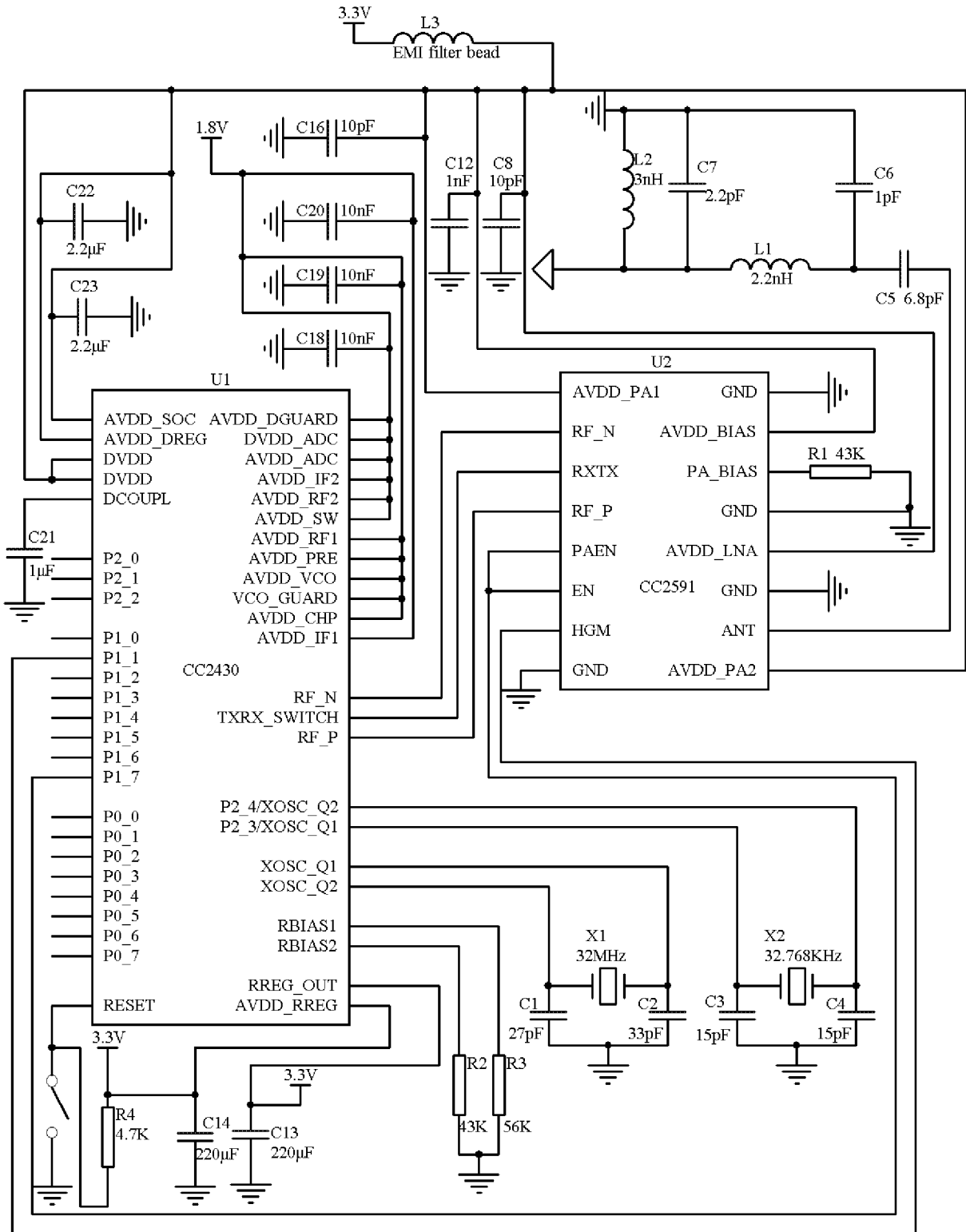


图 5

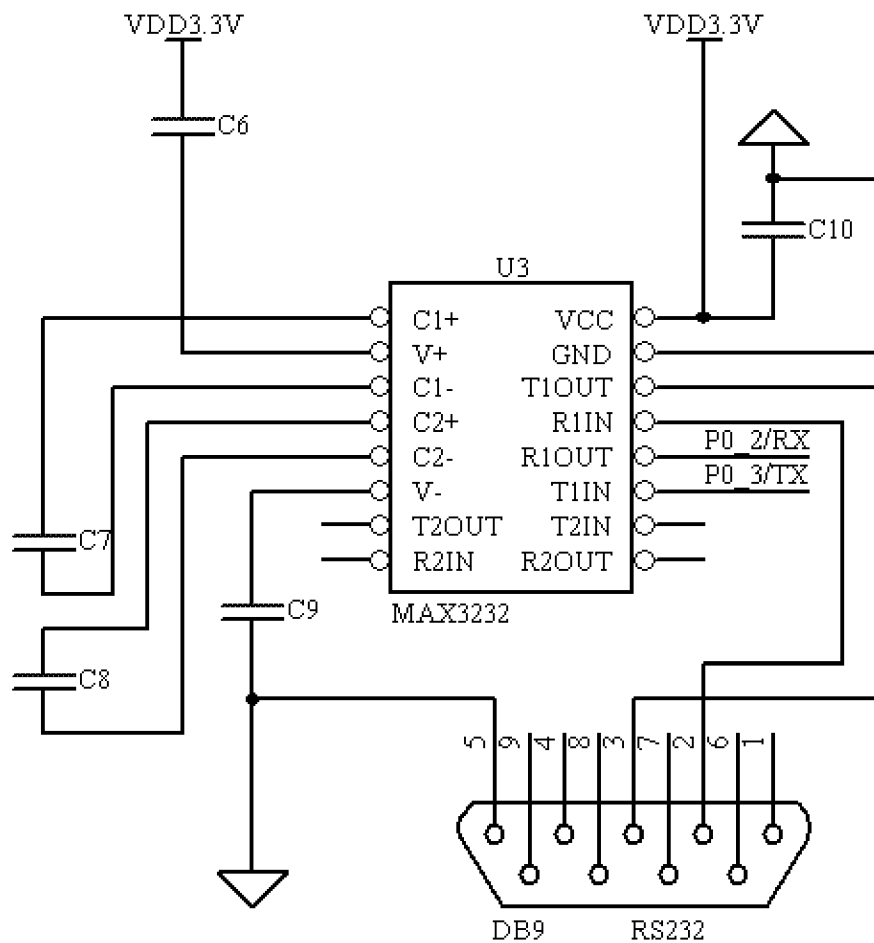


图 6

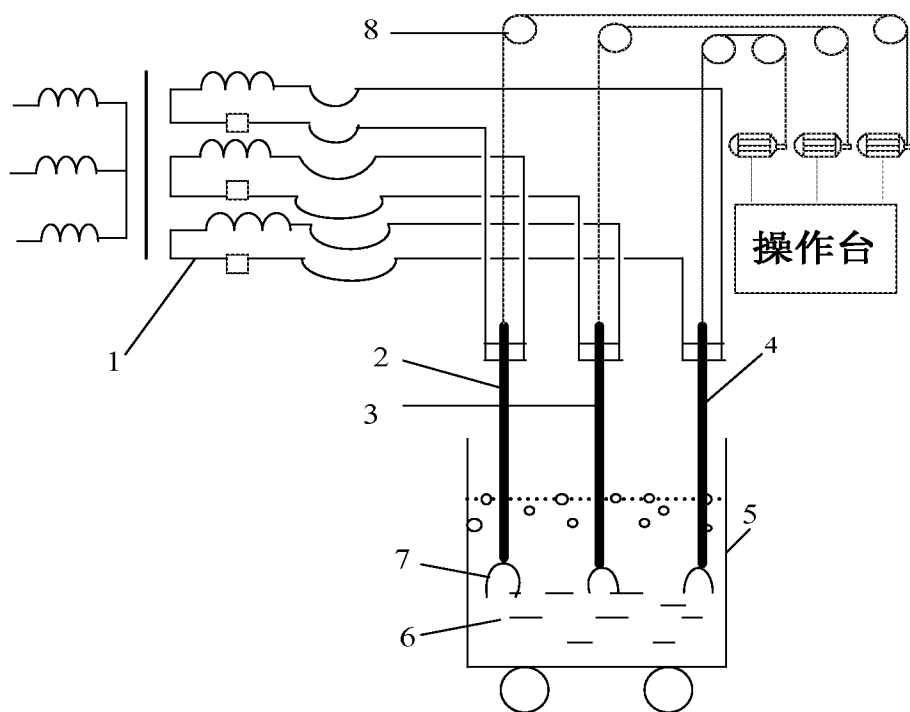


图 7

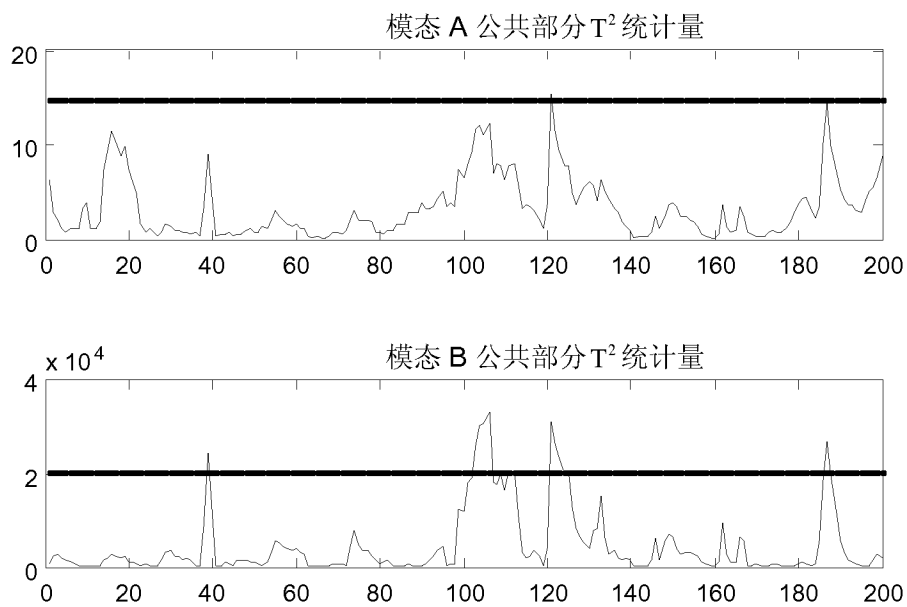


图 8

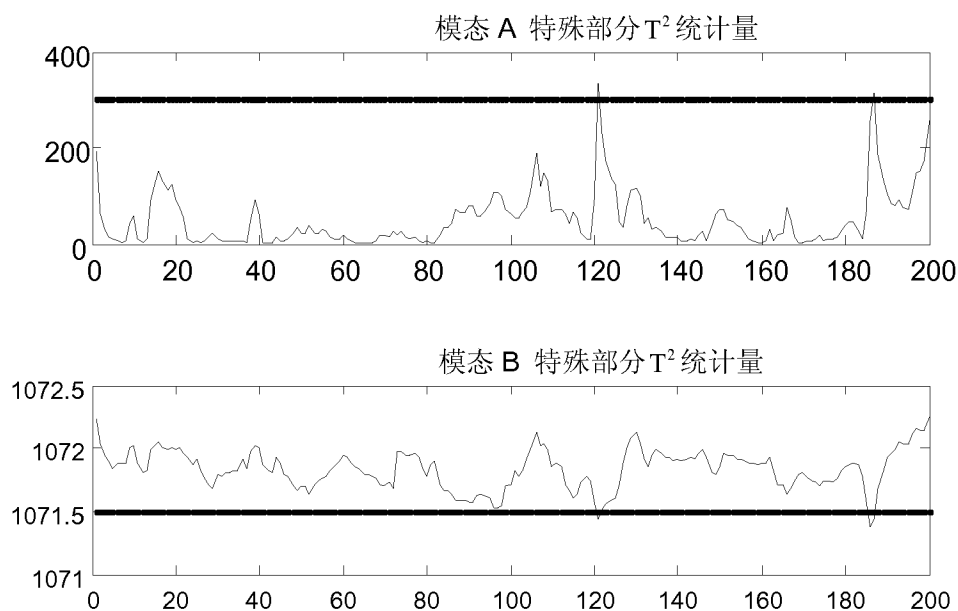
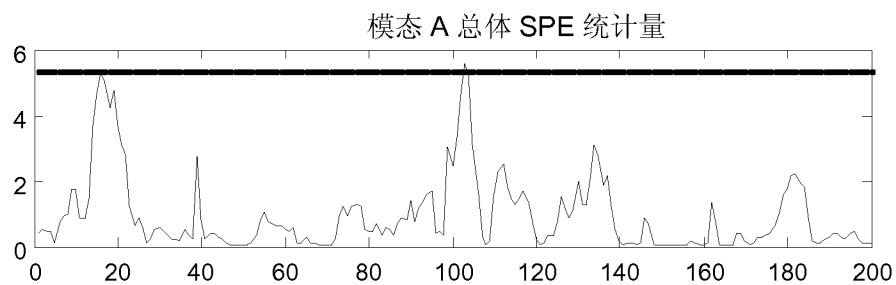


图 9



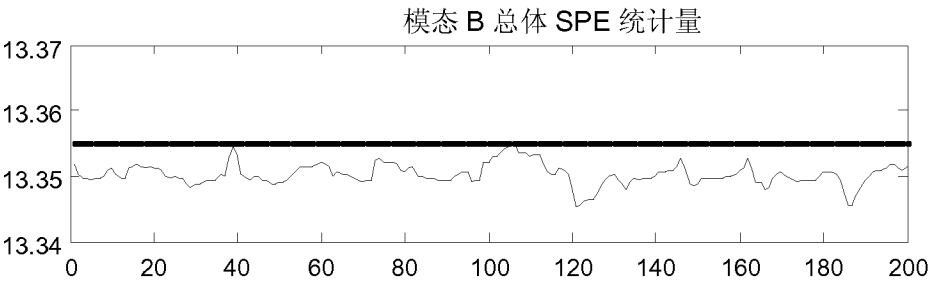


图 10

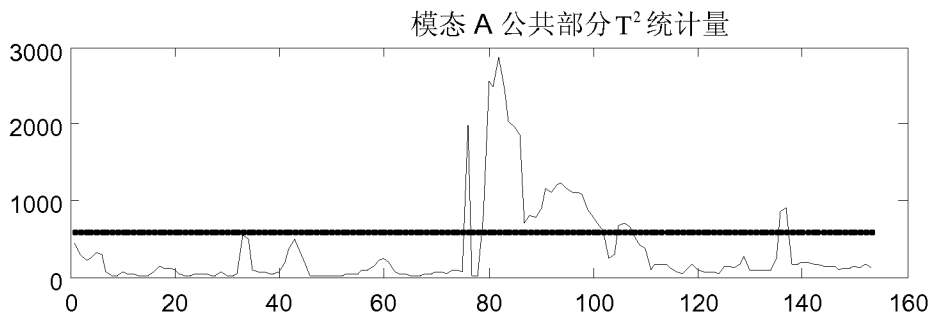


图 11

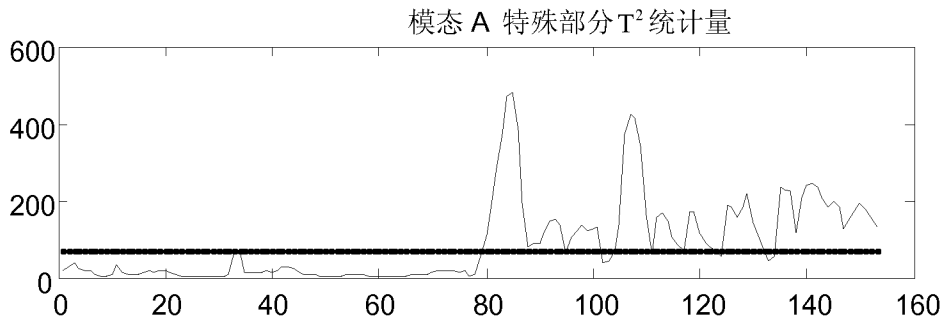


图 12

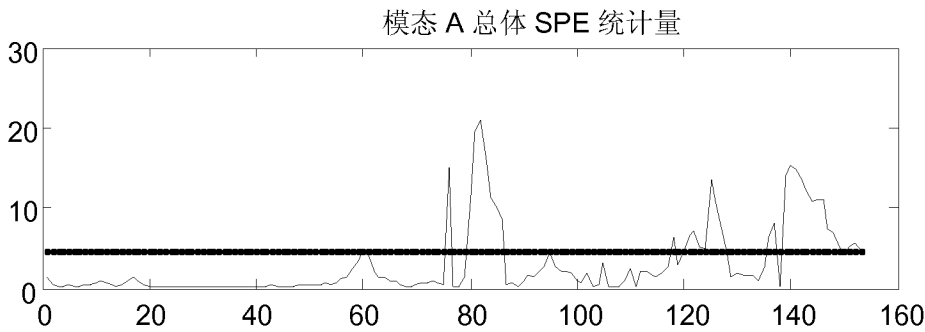


图 13

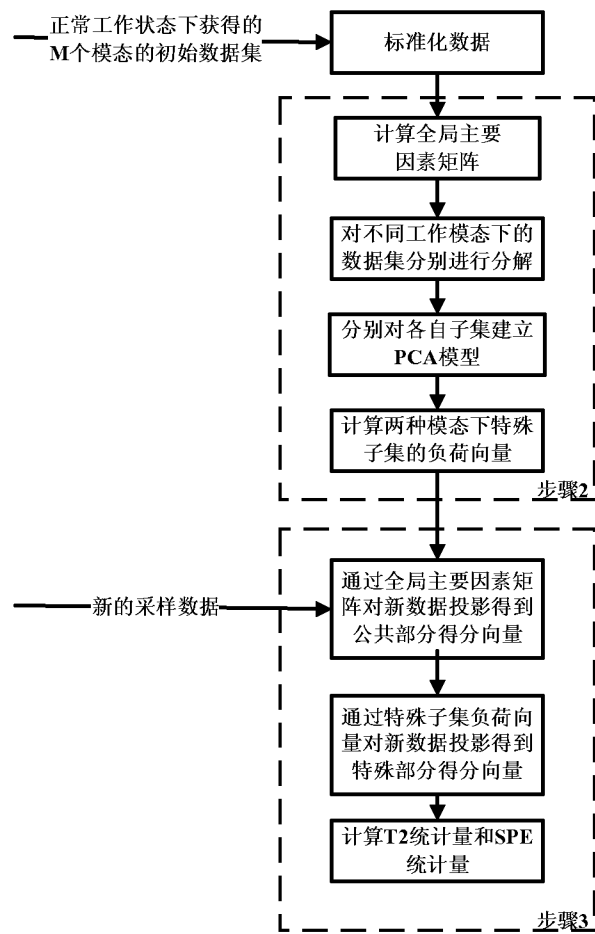


图14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2011/070852

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: F27B, F27D19, F27D21, G05B, G05D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNKI; WPI; EPODOC: arc+, furnac+, signal+, acquisit+, collect+, imag+, radio, frequenc+, temperatur+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN2674499Y (ZHONGKE CHUANGXINYUAN HIGH & N) 26 Jan. 2005(26.01.2005) description page 2 line 15-page 9 line 21, figures 1, 2	1-4
A	CN2932448Y (UNIV TIANJIN TECHNOLOGY) 08 Aug. 2007(08.08.2007) the whole document	1-4
A	CN101261762A (YUAN, Chuanhai) 10 Sep. 2008(10.09.2008) the whole document	1-4
A	CN101071306A (GUANGDONG SHAOZHU GROUP CO LTD) 14 Nov. 2007(14.11.2007) the whole document	1-4

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim (S) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 12 Oct. 2011(12.10.2011)	Date of mailing of the international search report 03 Nov. 2011 (03.11.2011)
---	--

Name and mailing address of the ISA/CN
The State Intellectual Property Office, the P.R.China
6 Xitucheng Rd., Jimen Bridge, Haidian District, Beijing, China
100088
Facsimile No. 86-10-62019451

Authorized officer

YANG, Yi

Telephone No. (86-10)62084859

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2011/070852

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP2004156865A (MITSUBISHI JUKOGYO KK) 03 Jun. 2004(03.06.2004) the whole document	1-4
A	JP2007026799A (TOSHIBA GE AUTOMATION SYSTEMS KK) 01 Feb. 2007(01.02.2007) the whole document	1-4

Information on patent family members

PCT/CN2011/070852

None

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2011/070852

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F27B 3/08 (2006.01) i

F27B 3/28 (2006.01) i

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2011/070852

A. 主题的分类

参见附加页

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: F27B, F27D19, F27D21, G05B, G05D

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS; CNKI; WPI; EPODOC: 东北大学, 电弧炉, 故障, 电流, 传感器, 感应, 信号采集, 发射, 接收, 射频, 温度, arc+, furnac+, signal+, acquisit+, collect+, imag+, radio, frequenc+, temperatur+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN2674499Y (北京中科创新园高新技术有限公司) 26.1 月 2005(26.01.2005) 说明书第 2 页第 15 行-第 9 页第 21 行, 附图 1 和 2	1-4
A	CN2932448Y (天津理工大学) 08.8 月 2007(08.08.2007) 全文	1-4
A	CN101261762A (原传海) 10.9 月 2008(10.09.2008) 全文	1-4
A	CN101071306A (广东省韶铸集团有限公司) 14.11 月 2007(14.11.2007) 全文	1-4
A	JP2004156865A (MITSUBISHI JUKOGYO KK) 03.6 月 2004(03.06.2004) 全文	1-4

☒ 其余文件在 C 栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期
12.10 月 2011(12.10.2011)

国际检索报告邮寄日期
03.11 月 2011 (03.11.2011)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088
传真号: (86-10)62019451

受权官员
杨轶
电话号码: (86-10) **62084859**

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2011/070852

C(续). 相关文件

类 型	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	JP2007026799A (TOSHIBA GE AUTOMATION SYSTEMS KK) 01.2 月 2007(01.02.2007) 全文	1-4

关于同族专利的信息

PCT/CN2011/070852

PCT/ISA/210 表(同族专利附件) (2009 年 7 月)

A. 主题的分类

F27B 3/08 (2006.01) i

F27B 3/28 (2006.01) i