



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106450388 A

(43)申请公布日 2017.02.22

(21)申请号 201610859265.6

(22)申请日 2016.09.26

(71)申请人 中国计量大学

地址 310018 浙江省杭州市下沙高教园区  
学源街258号

(72)发明人 卫东 高志 李志勇 徐创  
王央康 常亚文

(51)Int. Cl.

H01M 8/04992(2016.01)

H01M 8/04701(2016.01)

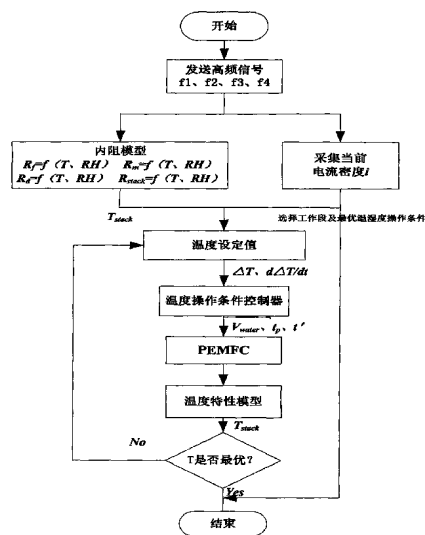
权利要求书2页 说明书7页 附图7页

(54)发明名称

一种水冷型燃料电池温度优化与控制方法

(57)摘要

内阻直接反映燃料电池电堆内部真实的水热管理状况,本发明基于内阻检测,提出了一种温度优化及控制方法,先通过对燃料电池内部机理分析,建立燃料电池内阻模型、温度模型,再对模型进行仿真,以仿真结论为指导进行实验,通过实验得到的数据对模型参数进行优化,使模型根据符合燃料电池实际的工作状态。之后进行控制,以优化后的模型为控制基础,先通过EIS法测出电堆当前电流下总内阻与段内阻值,代入内阻模型计算出电堆内部温度大小,再将当前温度值与最优值对比,将差值代入温度模型计算出控制变量调节大小,通过对控制效果图分析,该方法可以很好地将堆内温度控制在最优值附近,并明显提高控制的实时性和稳定性,方法是有效、可行的。



1. 一种水冷型燃料电池温度优化与控制方法,其特征在于:通过机理法建立燃料电池内阻模型,热管理模型,通过实验数据对模型参数进行优化,以优化后的模型为指导,相应的调整控制变量大小,实现对燃料电池堆内温度的控制具体,步骤如下:

步骤一:根据燃料电池等效电路模型,燃料电池输出性能损耗的根本原因是电堆工作过程中产生活化内阻 $R_f$ 、欧姆内阻 $R_m$ 、浓差内阻 $R_d$ ,由于电堆正常工作时输出时直流电,故电堆内阻不考虑容性阻抗及其他复阻抗。因此,电堆总内阻 $R_{stack}$ 为 $R_f$ 、 $R_m$ 、 $R_d$ 三者之和;

步骤二:在电堆运行过程中会伴随着热量的生成与散失,电堆内部热量变化的主要原因有:电堆电化学反应生成的热量 $\Delta Q_1$ 、冷却水带走的热量 $\Delta Q_2$ 、尾气排放带走的热量 $\Delta Q_3$ 。假设控制器采样时间为 $t$ 、尾气排放间隔时间为 $t_p$ 、尾气排放时间为 $t'$ ,基于能量守恒定律,机理法建立燃料电池温度模型:

$$\begin{aligned} \Delta T = & \{N \times iA \times (1.2 - U) \times t \\ & + \{[a_1 \times iAt - (\rho_{w,max}^{T_{stack}} \times v_c - RH_{c,in} \times \rho_{w,max}^{T_e} \times v_c)] * \frac{t \times t'}{t' + t_p}\} \times C_{H_2O,l} \times (T_{stack} - T_e) \\ & + (b_1 \times v_{at} - b_2 \times iAt) \times C_{H_2,a} \times (T_{stack} - T_e) \\ & + (d_1 \times v_{ct} - d_2 \times iAt) \times C_{air,c} \times (T_{stack} - T_e) \\ & + \frac{m_{H_2O,v}}{M_{H_2O}} \times r + k \times q_{ft} \times C_{H_2O,l} (T_{out} - T_{in})\} / (m_{stack} \times C_{stack}) \end{aligned}$$

其中:  $a_1 = M_{H_2O} / (2N_A \times e)$ ;  $b_1 = RH_{a,in} \times \rho_{w,max}^{T_e}$ ;  $b_2 = \frac{M_{H_2}}{2N_A \times e}$ ;  $d_1 = RH_{c,in} \times \rho_{w,max}^{T_e}$ ;  
 $d_2 = \frac{M_{O_2}}{4N_A \times e}$ ;

$\Delta T$ 为堆内温度变化值, $^{\circ}C$ ;  $\rho_{w,max}^{T_e}$ 为环温饱和蒸汽密度, $kg/m^3$ ;  $\rho_{w,max}^{T_{stack}}$ 为电堆内部饱和蒸汽密度, $kg/m^3$ ;  $v_c$ 为进气流量, $L/min$ ;  $C_{H_2O,l}$ 、 $C_{H_2,l}$ 、 $C_{air,c}$ 、 $C_{stack}$ 分别为水蒸气、氢气、空气、电堆比热容, $kJ/kg \cdot ^{\circ}C$ ;  $RH_{a,in}$ 、 $RH_{c,in}$ 分别为氢气和空气进气湿度;  $T_{stack}$ 、 $T_e$ 分别为电堆和环境温度, $^{\circ}C$ ;  $m_{H_2O,v}$ 为汽化水质量;  $r$ 为水蒸气汽化潜热, $40.2kJ/mol$ ;

步骤三:对内阻模型进行仿真,由仿真结果可知:以燃料电池当前所处段内阻最小和总内阻最小为寻优原则,得出活化段、欧姆段、浓差段最优温度操作条件;对热管理模型进行仿真,可知冷却水流量对温度影响较大,而尾气排放时间与尾气排放间隔时间对温度影响较小;

步骤四:通过仿真得到电堆不同工作阶段下最优温度值虽具有指导意义,但并不能等效电堆真实工况,故以仿真结果为指导,在仿真得到的最优温度值的较小范围内通过实验数据再次进行寻优;通过实验得到数据,对内阻模型、热管理模型进行拟合并分析误差,验证模型有效性;

步骤五:根据上述结论进行控制,阻抗测试仪依次向电堆发射高频到低频小幅振荡的交流电信号,根据得到的响应信号计算出当前电流下的分段内阻 $R_f$ 、 $R_m$ 、 $R_d$ 与总内阻 $R_{stack}$ ,将信号发送给信号处理器,信号处理器基于内阻模型计算得出当前电流下的电堆内部温度值 $T_{stack}$ ,并与最优温度值 $T_{优}$ 对比产生偏差信号 $\Delta T$ 传输给温度控制器;温度控制器根据热管理模型计算出相应控制变量的调节大小并产生控制信号作用于驱动装置;驱动装置将信号放大后产生驱动信号作用于冷却水电磁阀和尾气排放电磁阀,对控制变量进行调整,在此

过程中,信号处理器不停的检测堆内温度传给温度控制器。

2. 根据权利要求1所述的燃料电池的温度控制方法,其特征在于:

所述信号处理器,是将得到的当前段内阻和总内阻,分别代入段内阻模型与总内阻模型,联立方程组,解得电堆内部的温度值。

3. 根据权利要求1所述的燃料电池的温度控制方法,其特征在于:

所述温度控制器,是将得到的温度偏差信号  $\Delta T$ ,代入热管理模型,计算得到相应控制变量的调整值大小。

4. 根据权利要求1所述的燃料电池的温度控制方法,其特征在于:

所述燃料电池的最优温度操作条件,是以燃料电池当前所处段内阻与总内阻最小为寻优原则,先通过对内阻模型进行仿真实验,确定一个较宽范围的最优值,再对宽范围的最优值进行细化,通过实验得到精确的最优温度操作条件。

## 一种水冷型燃料电池温度优化与控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种水冷型质子交换膜燃料电池温度优化及控制的方法。

### 背景技术

[0002] 能源是经济发展的基础,伴随着全球经济的飞速发展,人类对能源的依赖越来越重,但传统的化石燃料如煤、石油、天然气储量有限,预计将在本世纪中叶日趋枯竭,同时,化石燃料所排放出的二氧化碳,已经引起了全球变暖的危机,而石油天然气等化石能源所带来的大气、水质、土壤污染,严重威胁到人类的生存环境。传动能源体系已经无法适应未来社会对高效、清洁、经济、安全的能源体系要求。新能源的开发利用已经成为越来越受关注的课题。

[0003] 氢气作为一种清洁能源,越来越受到人们的重视与青睐,而氢氧燃料电池则在这方面表现出巨大的潜力。PEMFC作为氢能发电的新型发电技术之一,具有高效率、低污染、低噪声、响应快等一系列优点,特别适用于人类的日常生活中,有着光明的应用前景。

[0004] 在PEMFC运行中,其输出性能受堆内温度影响很大,温度可以通过影响化学反应的速率来影响质子与电子的传输速度,从而影响输出电流的大小;同时温度也影响电池的运行特性,当温度较低时电池的各种极化增强,欧姆内阻较大,会使PEMFC性能下降;而当温度升高时,会降低欧姆内阻,减少极化损失,但是过高的温度会导致质子交换膜脱水,电导率下降,电池性能变坏甚至膜损坏,因此有效地控制温度是保证PEMFC性能的关键。由于PEMFC电堆的密封特性,电堆内部温度值无法通过传感器直接测得,而外部输出性能(电压、电流)无法直接反应电堆内部真实热管理状态。现有一种燃料电池温度控制方法,与传统方法相比,成功解决了燃料电池内部温度无法直接测量的难题,并通过检测内阻来代替检测外部输出性能,极大的提高了电堆温度控制的实时性与准确性。

### 发明内容

[0005] 内阻直接反映燃料电池电堆内部真实的水热管理状况,本发明基于内阻检测,提出了一种温度优化及控制方法,先通过对燃料电池内部机理分析,建立燃料电池内阻模型、温度模型,再对模型进行仿真,以仿真结论为指导进行实验,通过实验得到的数据对模型参数进行优化,使模型根据符合燃料电池实际的工作状态。之后进行控制,以优化后的模型为控制基础,先通过EIS法测出电堆当前电流下总内阻与段内阻值,代入内阻模型计算出电堆内部温度大小,再将当前温度值与最优值对比,将差值代入温度模型计算出控制变量调节大小,通过对控制效果图分析,该方法可以很好地将堆内温度控制在最优值附近,并明显提高控制的实时性和稳定性,方法是有效、可行的。

[0006] 具体步骤如下:

[0007] 步骤一:建立内阻模型。根据燃料电池等效电路模型,燃料电池输出性能损耗的根本原因是电堆工作过程中产生活化内阻 $R_f$ 、欧姆内阻 $R_m$ 、浓差内阻 $R_d$ 。

[0008] 活化内阻表达式为:

$$[0009] \quad R_f = \frac{R}{\alpha n F i \times \exp\left[1268\left(\frac{1}{T_{stack}} - \frac{1}{T_0}\right)\right]} \quad (1)$$

[0010] 其中R为理想气体常数,8.316J/(K·mol); $\alpha$ 为电化学反应速度参数;n为氢气反应转移的电子数, $n=2$ ;F为法拉第常数,96485.3C/mol; $T_{stack}$ 为电堆温度,K; $T_0$ 为环境温度,K;

[0011] 由内阻特性分析可知 $R_m$ 与 $T_{stack}$ 、 $RH_{stack}$ 关系表达式为:

$$[0012] \quad R_m = \frac{t_m}{5.139\lambda - 3.26 \times 10^{-3} \times \exp\left[1268 \times \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{stack}}\right)\right]} \quad (2)$$

[0013] 其中: $\lambda=0.043+17.18RH_{stack}-39.85RH_{stack}^2+36RH_{stack}^3$ , $RH_{stack}$ 为电堆湿度,%; $t_m$ 为质子交换膜厚度, $\mu\text{m}$ ;

[0014] 为维持PEMFC正常工作,必须持续不断的输送反应物并把生成物从电堆中移除,这需要克服组件产生的浓差内阻:

$$[0015] \quad R_d = \frac{RT_{stack} \delta}{SC_g D_{eff} n^2 F^2} \quad (3)$$

[0016] 式中: $n' = [\beta \tau^2 F / RT]^{\frac{1}{2}}$ ; $\beta$ 为电导率系数,kg; $\tau$ 为电化学反应转移粒子摩尔数,mol; $\delta$ 为扩散层厚度, $\mu\text{m}$ ;S为催化层面积, $\text{cm}^2$ ;C<sub>g</sub>为反应物总浓度,mol/L;D<sub>eff</sub>为水迁移系数,J/(K·mol)。

[0017] 由式(1)、式(2)、式(3)联立得电堆内阻 $R_{stack}$ :

$$[0018] \quad R_{stack} = N \times \left[ \frac{R}{\alpha n F i \times \exp\left(\frac{1}{T_{stack}} - \frac{1}{T_0}\right)} + \frac{t_m}{[5.139\lambda - 3.26] \times 10^{-3} \times \exp\left[1268 \times \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{stack}}\right)\right]} + \frac{RT_{stack} \delta}{SC_g D_{eff} n^2 F^2} \right] \quad (4)$$

[0019] 其中N为单片电池数,n为氢氧电化学反应电子迁移系数;

[0020] 步骤二:建立热管理模型。在电堆运行过程中会伴随着热量的生成与散失,电堆内部热量变化的主要原因有:电堆电化学反应生成的热量 $\Delta Q_1$ 、冷却水带走的热量 $\Delta Q_2$ 、尾气排放带走的热量 $\Delta Q_3$ 。假设控制器采样时间为t、尾气排放间隔时间为 $t_P$ 、尾气排放时间为 $t'$ 。

[0021] 则在单个采样周期t内电堆内部热平衡方程为:

$$[0022] \quad \Delta Q = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 - \Delta Q_3 \quad (5)$$

[0023] 根据比热容公式可知,单个采样周期t内的电堆内部温度变化为:

$$[0024] \quad \Delta T_{stack} = \frac{\Delta Q}{m_{stack} * C_{stack}} \quad (6)$$

[0025] 电堆输出功率的大小直接反应了电化学反应生成热量的多少,输出功率越大、生成热量越多。由电化学及能量守恒原理,电化学反应生成热量 $\Delta Q_1$ 为:

$$[0026] \quad \Delta Q_1 = N * i A * (1.2 - U) * t \quad (7)$$

[0027] 为了保证电堆内部温度处于相对稳定状态,向电堆供给循环冷却水,通过循环水带走电堆内部过剩热量。若循环冷却水进电堆温度为 $T_{in}$ 、出电堆温度为 $T_{out}$ ,冷却水流量 $q_f$ ,换热效率为k,则t时间内冷却水带走热量 $\Delta Q_2$ 为:

$$[0028] \quad \Delta Q_2 = k q_f t \times C_{H_2O,l} (T_{out} - T_m) \quad (8)$$

[0029] 电堆的尾气排放包括未反应的氢气、空气和水蒸气,电堆通过尾气排放带走的热量  $\Delta Q_3$  为:

$$\Delta Q_3 = \{[a_1 \times it - (\rho_{\omega, \max}^{T_{stack}} \times v_c - RH_{c, in} \times \rho_{\omega, \max}^{T_e} \times v_c)] \times \frac{t \times t'}{t' + t_p}\} \times C_{H_2O, l} \times (T_{stack} - T_e)$$

$$+ (b_1 \times v_a t - b_2 \times it) \times C_{H_2, a} \times (T_{stack} - T_e) \quad (9)$$

$$+ (d_1 \times v_c t - d_2 \times it) \times C_{air, c} \times (T_{stack} - T_e) + \frac{m_{H_2O, v}}{M_{H_2O}} \times r$$

$$[0031] \quad \text{其中: } a_1 = M_{H_2O} / (2N_A \times e); \quad b_1 = RH_{a, in} \times \rho_{\omega, \max}^{T_e}; \quad b_2 = \frac{M_{H_2}}{2N_A \times e} \quad d_1 = RH_{c, in} \times \rho_{\omega, \max}^{T_e};$$

$$d_2 = \frac{M_{O_2}}{4N_A \times e};$$

[0032]  $\rho_{\omega, \max}^{T_e}$  为环温饱和蒸汽密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{\omega, \max}^{T_{stack}}$  为电堆内部饱和蒸汽密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_c$  为进气流量,  $\text{L}/\text{min}$ ;  $C_{H_2O, l}$ 、 $C_{H_2, a}$ 、 $C_{air, c}$  分别为水蒸气、氢气、空气比热容,  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $RH_{a, in}$ 、 $RH_{c, in}$  分别为氢气和空气进气相对湿度, %;  $r$  为水蒸气汽化潜热,  $40.2 \text{kJ}/\text{mol}$ ;

[0033] 将 (7) (8) (9) 代入 (6) 可知单位时间  $t$  内电堆内部温度变化情况:

$$\Delta T = \{N \times iA \times (1.2 - U) \times t$$

$$+ \{[a_1 \times iAt - (\rho_{\omega, \max}^{T_{stack}} \times v_c - RH_{c, in} \times \rho_{\omega, \max}^{T_e} \times v_c)] \times \frac{t \times t'}{t' + t_p}\} \times C_{H_2O, l} \times (T_{stack} - T_e)$$

$$+ (b_1 \times v_a t - b_2 \times iAt) \times C_{H_2, a} \times (T_{stack} - T_e) \quad (10)$$

$$+ (d_1 \times v_c t - d_2 \times iAt) \times C_{air, c} \times (T_{stack} - T_e)$$

$$+ \frac{m_{H_2O, v}}{M_{H_2O}} \times r + k \times q_f t \times C_{H_2O, l} (T_{out} - T_{in}) / (m_{stack} \times C_{stack})$$

[0035] 步骤三: 模型仿真得出结论。对内阻模型进行仿真, 得出活化段、欧姆段、浓差段最优温度操作条件; 对热管理模型进行仿真, 确定影响温度的主控变量、辅控变量。

[0036] 步骤四: 仿真结论为指导进行实验。通过仿真得到电堆不同工作阶段下最优温度值虽具有指导意义, 但不能等效电堆真实工况, 故以仿真结果为指导, 在仿真得到的最优温度值的较小范围内通过实验数据再次进行寻优, 确定精确的温湿度最优操作条件; 通过实验得到数据, 对内阻模型、热管理模型进行拟合并分析误差, 验证模型有效性。

[0037] 步骤五: 根据模型进行控制。阻抗测试仪先测出当前电流下的分段内阻 ( $R_f$ 、 $R_m$ 、 $R_d$ ) 与总内阻 ( $R_{stack}$ ), 经信号处理器处理后得到与最优温度值  $T_{opt}$  的偏差  $\Delta T$ , 传给温度控制器。控制器根据热管理模型, 计算得出冷却水流量  $q_f$  大小, 生成控制信号, 作用于冷却水流量阀, 冷却水流量阀相应的调整自身开度, 对冷却水流量  $q_f$  做出调整, 当冷却水流量调节完毕后, 再微调尾气排放时间  $t'$  和尾气排放间隔时间  $t_p$ , 进一步校准。在此过程中, 信号处理器不停的检测堆内温度传给温度控制器。

#### 附图说明:

[0038] 图1为本发明电堆活化段时总内阻与温度仿真图

[0039] 图2为本发明电堆欧姆段时总内阻与温度仿真图

[0040] 图3为本发明电堆浓差段时总内阻与温度仿真图

- [0041] 图4为本发明电堆活化段时总内阻与温度实验图  
 [0042] 图5为本发明电堆欧姆段时总内阻与温度实验图  
 [0043] 图6为本发明电堆浓差段时总内阻与温度实验图  
 [0044] 图7为本发明为活化段电堆温度变化与冷却水流量关系曲线图  
 [0045] 图8为本发明为活化段电堆温度变化与排气时间关系曲线图  
 [0046] 图9为本发明为活化段电堆温度变化与排气间隔时间关系曲线图  
 [0047] 图10为本发明电堆温度操作条件控制模型流程图  
 [0048] 图11为本发明系统结构图  
 [0049] 图12为本发明电堆温度控制模型结构图  
 [0050] 图13为本发明冷却水流量控制曲线图  
 [0051] 图14为本发明电堆温度变化曲线图  
 [0052] 具体实施方法:

[0053] 以下,参照附图,关于本发明的优选实施方案进行说明。

[0054] 步骤一:建立内阻模型。根据燃料电池等效电路模型,燃料电池输出性能损耗的根本原因是电堆工作过程中产生活化内阻 $R_f$ 、欧姆内阻 $R_m$ 、浓差内阻 $R_d$ 。

[0055] 活化内阻表达式为:

$$R_f = \frac{R}{\alpha n F i \times \exp[1268(\frac{1}{T_{stack}} - \frac{1}{T_0})]} \quad (1)$$

[0057] 其中 $R$ 为理想气体常数,8.316J/(K·mol); $\alpha$ 为电化学反应速度参数; $n$ 为氢气反应转移的电子数, $n=2$ ;F为法拉第常数,96485.C/mol; $T_{stack}$ 为电堆温度,K; $T_0$ 为环境温度,K;

[0058] 由内阻特性分析可知 $R_m$ 与 $T_{stack}$ 、 $RH_{stack}$ 关系表达式为:

$$R_m = \frac{t_m}{5.139\lambda - 3.26 \times 10^{-3} \times \exp[1268 \times (\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{stack}})]} \quad (2)$$

[0060] 其中: $\lambda = 0.043 + 17.18RH_{stack} - 39.85RH_{stack}^2 + 36RH_{stack}^3$ , $RH_{stack}$ 为电堆湿度,%; $t_m$ 为质子交换膜厚度, $\mu\text{m}$ ;

[0061] 为维持PEMFC正常工作,必须持续不断的输送反应物并把生成物从电堆中移除,这需要克服组件产生的浓差内阻:

$$R_d = \frac{RT_{stack} \delta}{SC_g D_{eff} n^2 F^2} \quad (3)$$

[0063] 式中: $n' = [\beta \tau^2 F / RT]^{-1/2}$ ; $\beta$ 为电导率系数, $\beta \approx 6$ ; $\tau$ 为电化学反应转移粒子摩尔数,C/mol; $\delta$ 为扩散层厚度, $\mu\text{m}$ ;S为催化层面积, $\text{cm}^2$ ;C<sub>g</sub>为反应物总浓度,mol/L;D<sub>eff</sub>为水迁移系数,J/(K·mol)。

[0064] 由式1、式2、式3联立得电堆内阻 $R_{stack}$ :

[0065]

$$R_{stack} = N \times \left[ \frac{R}{\alpha n F i \times \exp(\frac{1}{T_{stack}} - \frac{1}{T_0})} + \frac{t_m}{[5.139\lambda - 3.26] \times 10^{-3} \times \exp[1268 \times (\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{stack}})]} + \frac{RT_{stack} \delta}{SC_g D_{eff} n^2 F^2} \right] \quad (4)$$

[0066] 其中N为单片电池数,n为氢氧电化学反应电子迁移系数;

[0067] 步骤二:建立热管理模型。在电堆运行过程中会伴随着热量的生成与散失,如图1所示引起电堆内部热量变化的主要原因有:电堆电化学反应生成的热量 $\Delta Q_1$ 、冷却水带走的热量 $\Delta Q_2$ 、尾气排放带走的热量 $\Delta Q_3$ 。假设控制器采样时间为t、尾气排放间隔时间为 $t_p$ 、尾气排放时间为 $t'$ 。

[0068] 则在单个采样周期t内电堆内部热平衡方程为:

$$[0069] \quad \Delta Q = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 - \Delta Q_3 \quad (5)$$

[0070] 根据比热容公式可知,单个采样周期t内的电堆内部温度变化为:

$$[0071] \quad \Delta T_{stack} = \frac{\Delta Q}{m_{stack} * C_{stack}} \quad (6)$$

[0072] 电堆输出功率的大小直接反应了电化学反应生成热量的多少,输出功率越大、生成热量越多。由电化学及能量守恒原理,电化学反应生成热量 $\Delta Q_1$ 为:

$$[0073] \quad \Delta Q_1 = N * iA * (1.2 - U) * t \quad (7)$$

[0074] 为了保证电堆内部温度处于相对稳定状态,向电堆供给循环冷却水,通过循环水带走电堆内部过剩热量。若循环冷却水进电堆温度为 $T_{in}$ 、出电堆温度为 $T_{out}$ ,冷却水质量流量为 $q_f$ ,换热效率为k,则t时间内冷却水带走热量 $\Delta Q_2$ 为:

$$[0075] \quad \Delta Q_2 = kq_f t * C_{H_2O,l} (T_{out} - T_{in}) \quad (8)$$

[0076] 电堆的尾气排放包括气液两相物质——液态水和水蒸气。因此,电堆通过尾气排放带走的热量 $\Delta Q_3$ 为:

$$[0077] \quad \begin{aligned} \Delta Q_3 = & m_{H_2O,l} * C_{H_2O,l} (T_{stack} - T_e) + m_{H_2,a} * C_{H_2,a} (T_{stack} - T_e) \\ & + m_{air,c} * C_{air,c} (T_{stack} - T_e) - \frac{m_{H_2O,v}}{M_{H_2O}} * r \end{aligned} \quad (9)$$

[0078] 尾气排放带走液态水质量 $m_{H_2O,l}$ 与尾气排放时间内生成水质量 $m_{H_2O,g}$ 、汽化水质量有关 $m_{H_2O,v}$ 。单个尾气排放周期( $t_p + t'$ )内,尾气排放带走液态水质量 $m_{H_2O,l}$ 为:

$$[0079] \quad m_{H_2O,l} = m_{H_2O,g} - m_{H_2O,v} \quad (10)$$

[0080] 根据电路电量计算原理,在单个尾气排放周期( $t_p + t'$ )内,电堆电化学反应转移电荷量Q为:

$$[0081] \quad Q = NiA * (t_p + t') \quad (11)$$

[0082] 由此可以计算得到在单个尾气排放周期内,生成水的质量 $m_{H_2O,g}$ 为:

$$[0083] \quad m_{H_2O,g} = \frac{Q}{2eN_A} * M_{H_2O} \quad (12)$$

[0084] 根据饱和湿度的定义,尾气排出时伴随着液态水的流出;因此,尾气排放气的湿度 $RH_{c,out}$ 为100%。由此可计算得到电堆在t时刻内汽化为水蒸气的水的质量 $m_{H_2O,v}$ 为:

$$[0085] \quad m_{H_2O,v} = (\rho_{\omega,max}^{T_{stack}} * v_c - RH_{c,in} * \rho_{\omega,max}^{T_e} * v_c) * t' \quad (13)$$

[0086] 其中: $\rho_{\omega,max}^{T_e}$ 为环境温度饱和蒸汽密度, $kg/m^3$ ;  $\rho_{\omega,max}^{T_{stack}}$ 为电堆内部饱和蒸汽密度, $kg/m^3$ ;  $v_c$ 为进气流量, $L/min$ ;

[0087] 因此,在单个采样时间t内,电堆尾气排放带走的液态水质量为:



$$\begin{aligned}
m_{H_2O,l} &= m'_{H_2O,l} \times \frac{t}{t'+t_p} = (m_{H_2O,g} - m_{H_2O,v}) \times \frac{t}{t'+t_p} \\
[0088] \quad &= \left[ \frac{Nit}{2eN_A} \times M_{H_2O} - (\rho_{\omega,max}^{T_{stack}} \times v_c - RH_{c,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e} \times v_c) \right] \times \frac{t \times t'}{t'+t_p} \quad (14) \\
&= [a_1 \times it - (\rho_{\omega,max}^{T_{stack}} \times v_c - RH_{c,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e} \times v_c)] \times \frac{t \times t'}{t'+t_p}
\end{aligned}$$

[0089] 其中： $a_1 = M_{H_2O} / (2N_A \times e)$ ；

[0090] 而阳极排放气体质量 $m_{H_2,a}$ 及阴极排放的气体质量 $m_{air,c}$ 分别为：

$$[0091] \quad m_{H_2,a} = v_a \times \rho_{\omega}^a t - \frac{Q}{2eN_A} M_{H_2} = v_a \times RH_{a,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e} \times t - \frac{Q}{2eN_A} \times M_{H_2} = b_1 \times v_a t - b_2 \times Nit \quad (15)$$

$$[0092] \quad m_{air,c} = v_c \times \rho_{\omega}^c t - \frac{Q}{4eN_A} M_{O_2} = v_c \times RH_{c,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e} \times t - \frac{Q}{4eN_A} M_{O_2} = d_1 \times v_c t - d_2 \times Nit \quad (16)$$

[0093] 其中： $b_1 = RH_{a,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e}$ ； $b_2 = \frac{M_{H_2}}{2N_A \times e}$ ； $d_1 = RH_{c,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e}$ ； $d_2 = \frac{M_{O_2}}{4N_A \times e}$ 。

[0094] 将式(14)、(15)、(16)代入式(9)得,单个采样周期内电堆通过尾气排放带走的热量：

$$\begin{aligned}
\Delta Q_3 &= \{ [a_1 \times it - (\rho_{\omega,max}^{T_{stack}} \times v_c - RH_{c,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e} \times v_c)] \times \frac{t \times t'}{t'+t_p} \} \times C_{H_2O,l} \times (T_{stack} - T_e) \\
[0095] \quad &+ (b_1 \times v_a t - b_2 \times it) \times C_{H_2,a} \times (T_{stack} - T_e) \\
&+ (d_1 \times v_c t - d_2 \times it) \times C_{air,c} \times (T_{stack} - T_e) + \frac{m_{H_2O,v}}{M_{H_2O}} \times r
\end{aligned} \quad (17)$$

[0096] 将(7)(8)(17)代入(6)可知单位时间 $t$ 内电堆内部温度变化情况：

$$\begin{aligned}
\Delta T &= \{ N \times iA \times (1.2 - U) \times t \\
&+ \{ [a_1 \times iAt - (\rho_{\omega,max}^{T_{stack}} \times v_c - RH_{c,in} \times \rho_{\omega,max}^{T_e} \times v_c)] \times \frac{t \times t'}{t'+t_p} \} \times C_{H_2O,l} \times (T_{stack} - T_e) \\
[0097] \quad &+ (b_1 \times v_a t - b_2 \times iAt) \times C_{H_2,a} \times (T_{stack} - T_e) \\
&+ (d_1 \times v_c t - d_2 \times iAt) \times C_{air,c} \times (T_{stack} - T_e) \\
&+ \frac{m_{H_2O,v}}{M_{H_2O}} \times r + k \times q_f t \times C_{H_2O,l} (T_{out} - T_{in}) \} / (m_{stack} \times C_{stack})
\end{aligned} \quad (18)$$

[0098] 步骤三：模型仿真得出结论。对总内阻模型(式4)进行仿真,分别选取温度值为323K、333K、343K、353K,其他变量设为定值,以总内阻值最小为寻优原则,通过对图1、图2、图3仿真结果图分析,得出活化段、欧姆段、浓差段最优操作条件分别为343K;343K;343K;对热管理模型进行仿真,由图7、8、9可知:以活化段为例,其它段结果相同,可知冷却水流量对温度影响较大,尾气排放时间与间隔时间对温度影响较小。

[0099] 步骤四：仿真结论为指导进行实验。通过仿真得到电堆不同工作阶段下最优操作调节虽具有指导意义,但不能等效电堆真实工况下最优操作条件,故以仿真结果为指导,在仿真得到的最优温度值的较小范围内通过实验数据再次进行寻优,通过对图4、图5、图6实验结果分析可得最优温度操作调节为:344K、343K、347K,通过实验得到数据,多模型参数进行拟合并分析误差,验证模型有效性。

[0100] 拟合使用MATLAB软件fit函数,对内阻模型、温度控制模型进行参数拟合,拟合结果为:

[0101] 内阻模型: $\alpha$ 为0.08, $\tau$ 为2.01, $\beta$ 为0.306。

[0102] 拟合残差 $e=0.023$ ,模型决定系数 $R^2=0.962>0.95$ ,即回归平方和/实验值离均差平方和达到了显著性水平,表明该模型具有较高的精度。

[0103] 热管理模型: $a_1$ 为 $9.38 \times 10^{-5}$ , $b_1$ 为0.0279, $b_2$ 为 $1.04 \times 10^{-5}$ , $d_1$ 为0.0378, $d_2$ 为 $8.33 \times 10^{-5}$ 。

[0104] 拟合残差 $e=0.624$ ,模型决定系数 $R^2=0.953>0.95$ ,即回归平方和/实验值离均差平方和达到了显著性水平,表明该模型具有较高的精度。

[0105] 步骤五:本发明系统结构图如图10所示,整体控制流程图如图11所示。

[0106] 信号发送器51先向电堆发射依次发射一组高频交流电信号 $f_1=3\text{kHz}$ 、 $f_2=6\text{kHz}$ 、 $f_3=9\text{kHz}$ 、 $f_4=12\text{kHz}$ (电堆转折频率为1.42kHz),交流阻抗测试仪52根据采集得到的响应信号,计算得到 $R_f$ 、 $R_m$ 、 $R_d$ 、 $R_{\text{stack}}$ ,并发送给信息处理器55,信息处理器55根据内阻模型(式1、2、3、4)计算得到当前电流密度下电堆内部温度值 $T_{\text{stack}}$ ,与最优温度值 $T_{\text{优}}$ 对比产生偏差 $\Delta T$ 发送给温度控制器53,由上述仿真结论,尾气排放时间 $t'$ 及间隔时间 $t_p$ 对温度影响较小,故先将其设为定值,在冷却水流量调节完毕后再做微调即可。温度控制器53根据热管理模型(式18)得到冷却水流量 $q_f$ 的调整值,生成控制信号作用于驱动电路54,驱动电路54输出能够驱动冷却水流量电磁阀45和尾气排放电磁阀46调整的信号,相应的调节冷却水阀门的开度和尾气排放时间及尾气排放间隔时间,在此过程中,信号处理器不停的采集电堆内部温度,将偏差信号传给温度控制器构成闭环负反馈。

[0107] 取一个电流输出点为例说明。

[0108] 实验点输出电流为5.76A( $i=0.072\text{A}/\text{cm}^2$ )、 $q_f=0.5\text{kg}/\text{min}$ 、 $t_p=30\text{s}$ 、 $t'=5\text{s}$ 。经过对比电流范围确定该工作点处于活化段,检测到该点 $R_f=15.591\text{m}\Omega$ 、 $R_{\text{stack}}=21.057\text{m}\Omega$ ,经内阻模型式计算得到此时堆内温度 $T_{\text{stack}}=334\text{K}$ ,工作温度需调节至347K。

[0109] 根据热管理模型(式18),在单个采样周期1min内由电化学反应引起温度变化量为 $1.2^\circ\text{C}$ ,为保证超调量 $\pm 15\%$ 内,计算得到电堆冷却水流量需设定为 $0.27\text{kg}/\text{min}$ ,尾气排放间隔时间作为辅助控制量用作微调,当检测到电堆温度调节至预设值时,再调节尾气排放时间及间隔时间,经一步校准,此时, $t_p$ 调节为33s、 $t'$ 调节为8s。

[0110] 电堆温度控制模型结构图如图12所示,冷却水流量变化曲线图如图13所示,温度变化控制曲线如图14所示。由实验结果可知,当冷却水流量调整到设定值时,温度也相应调节到设定值附近,控制器能够较迅速调节电堆控制变量,温度控制超调量可以保证在 $15\%$ 范围内,控制精度在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内,故控制器具有较好的可靠性。同时实验结果也有力地验证了模型的正确性,方法的可行性,该方法能较好的满足堆内温度的控制要求。

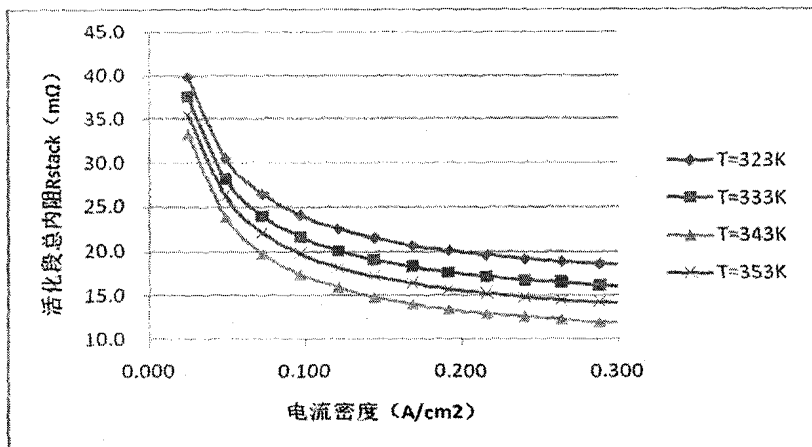


图1

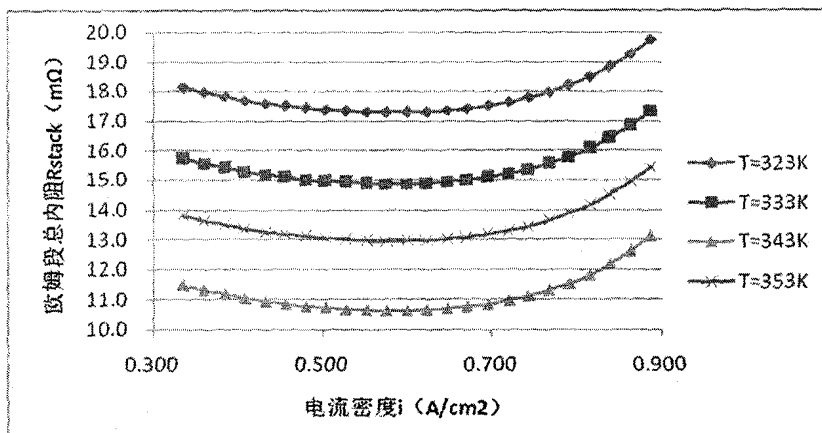


图2

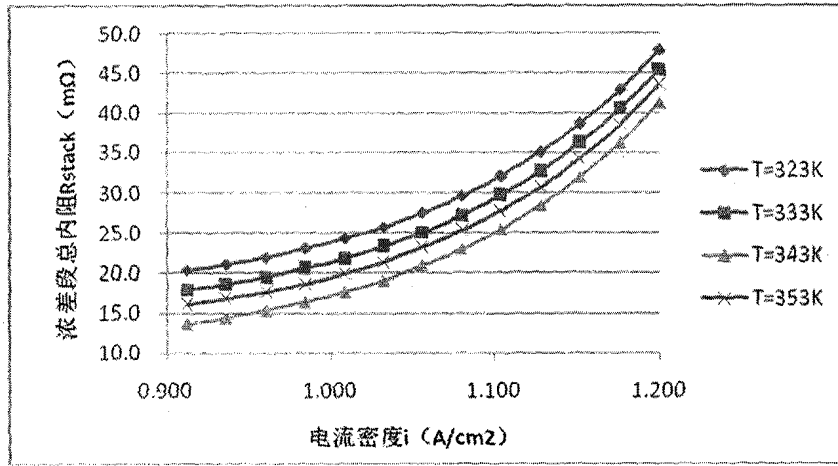


图3

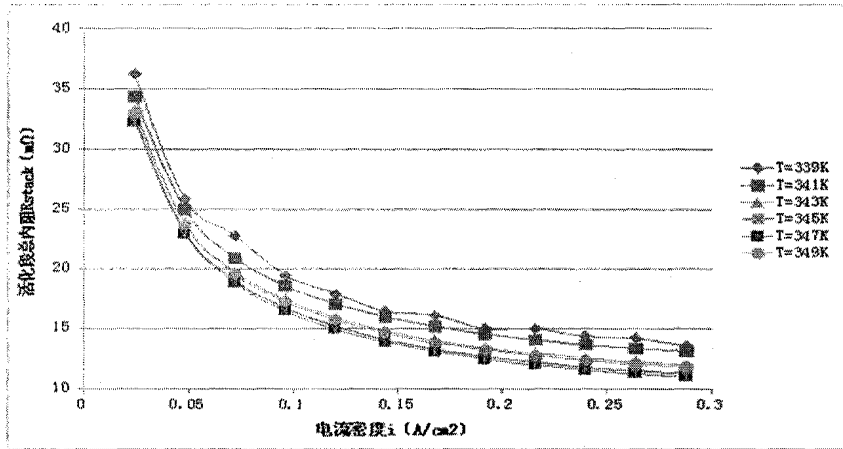


图4

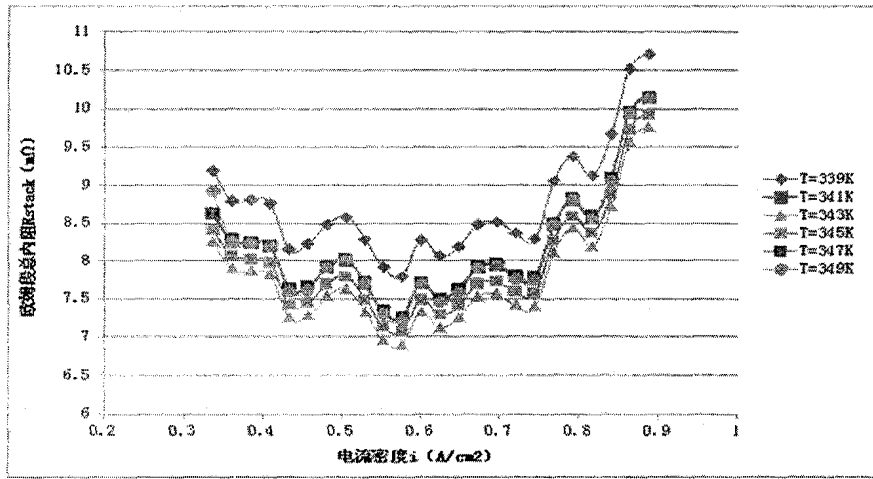


图5

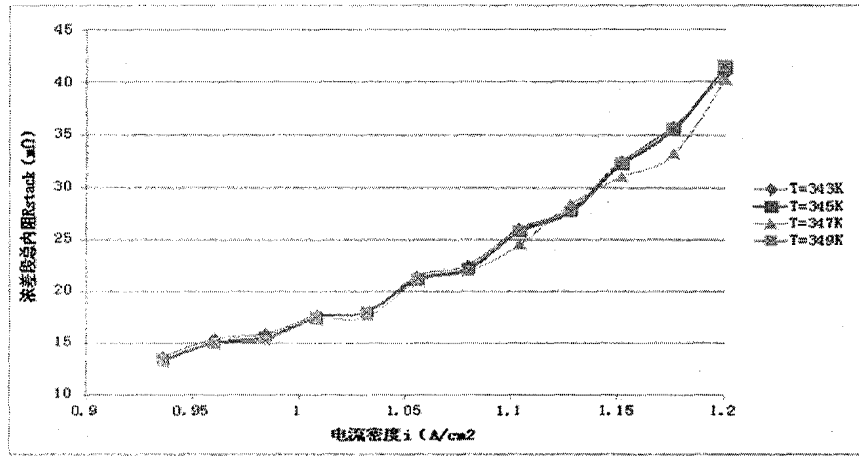


图6

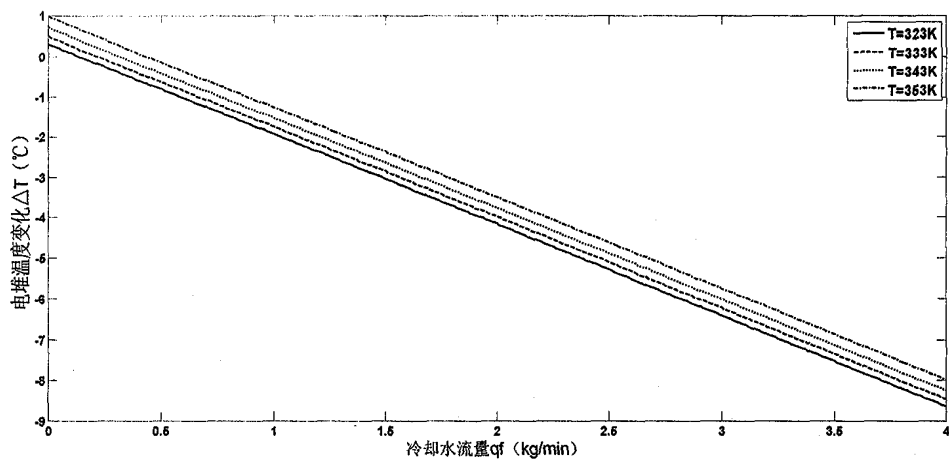


图7

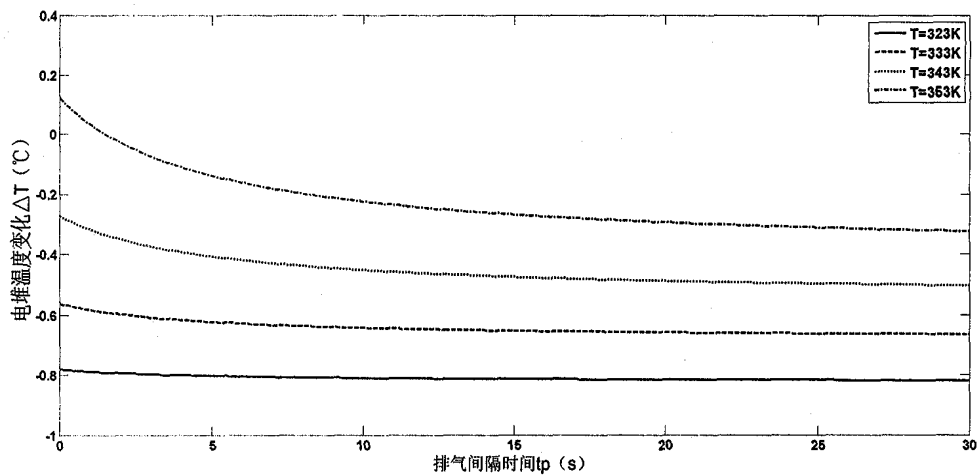


图8

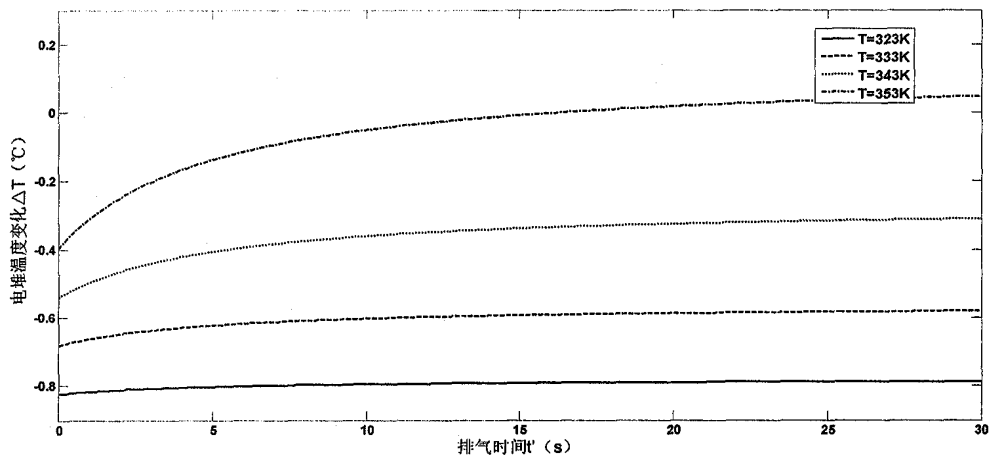


图9

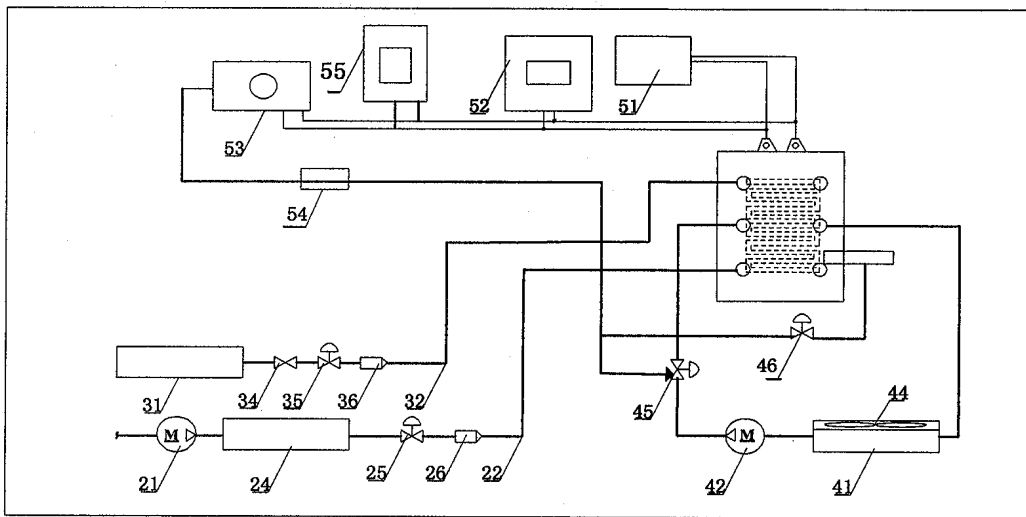


图10

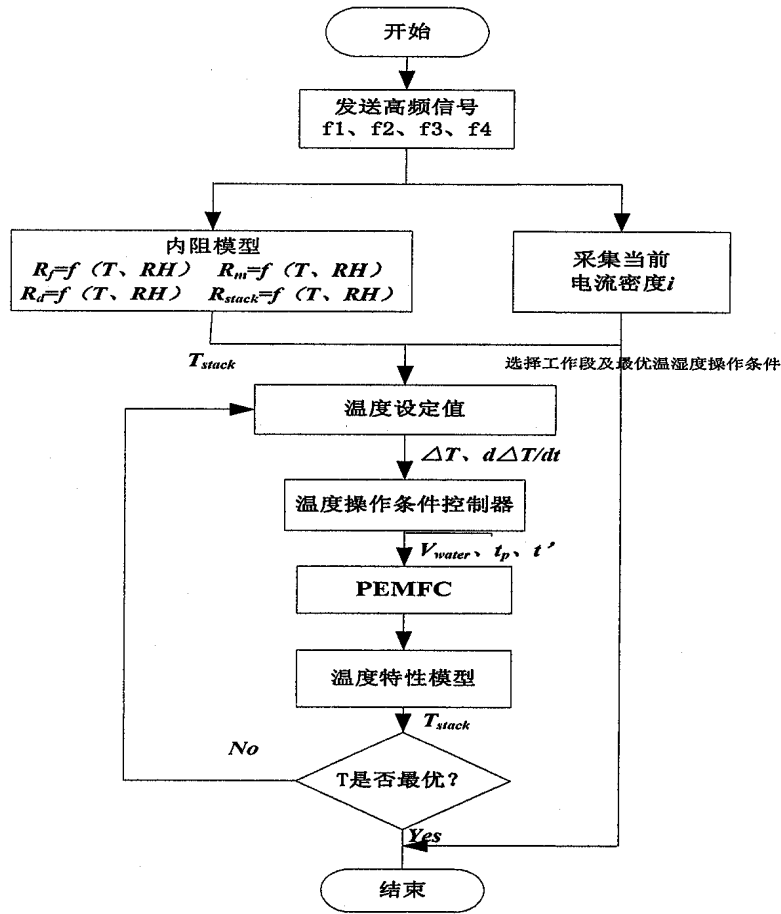


图11

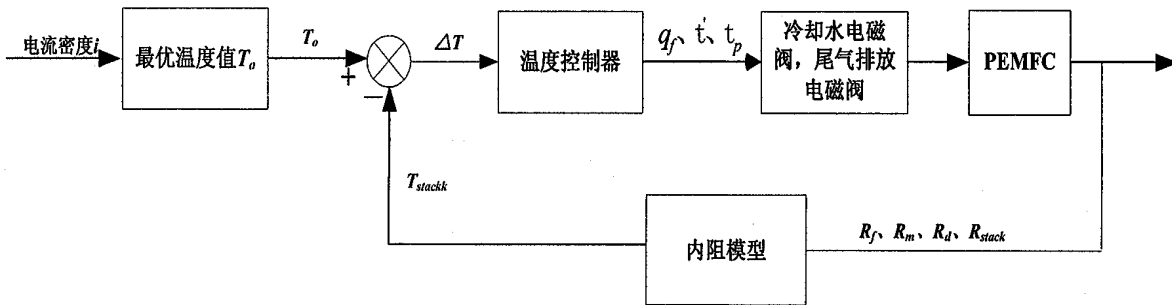


图12



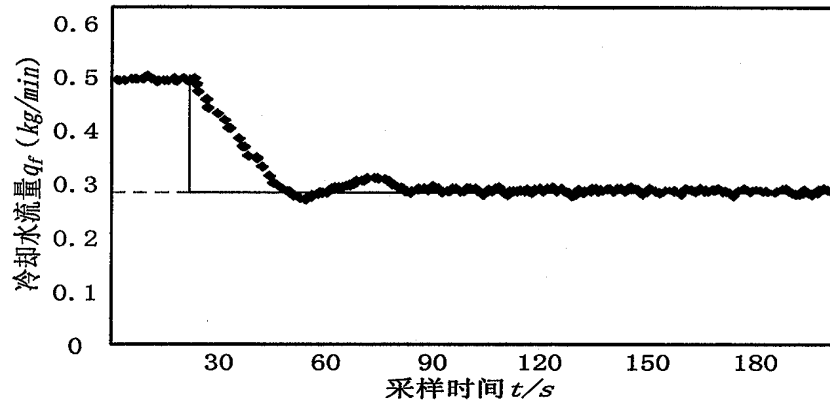


图13

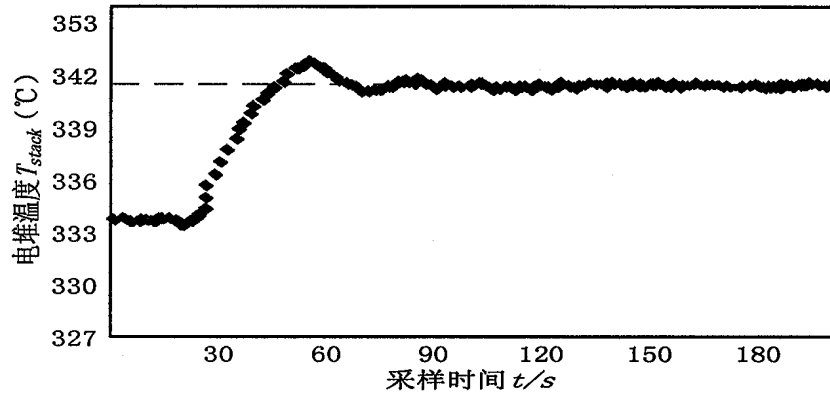


图14