



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112445084 B

(45) 授权公告日 2021. 11. 30

(21) 申请号 202011513098.2

G05D 23/20 (2006.01)

(22) 申请日 2020.12.20

审查员 李培培

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112445084 A

(43) 申请公布日 2021.03.05

(73) 专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市珞喻路1037号

专利权人 武汉智能装备工业技术研究院有限公司

(72) 发明人 李小平 曹迪

(74) 专利代理机构 武汉华之喻知识产权代理有限公司

42267

代理人 邓彦彦 李欢

(51) Int. Cl.

G03F 7/20 (2006.01)

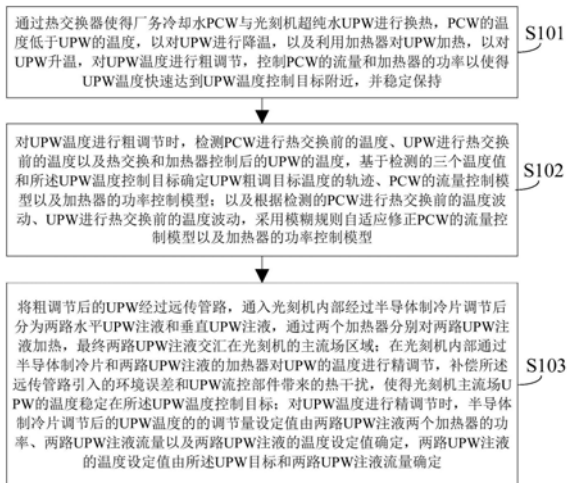
权利要求书6页 说明书15页 附图6页

(54) 发明名称

一种浸没式光刻机的温度控制方法及装置

(57) 摘要

本发明提供一种浸没式光刻机的温度控制方法及装置,包括:通过热交换器使得PCW与光刻机UPW进行换热,以及利用加热器对UPW加热,以对UPW升温,对UPW温度进行粗调节时,基于检测的三个温度值和UPW温度控制目标确定UPW温度的轨迹、PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;将粗调节后的UPW经过远传管路,通入光刻机内部经过半导体制冷片调节后分为两路UPW注液,通过两个加热器分别对两路UPW注液加热;对UPW温度进行精调节时,制冷片的调节量由两路UPW注液两个加热器的功率、两路UPW注液流量以及两路UPW注液的温度设定值确定。本发明提高了光刻机的温度控制精度。



1. 一种浸没式光刻机的温度控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

通过热交换器使得厂务冷却水PCW与光刻机超纯水UPW进行换热,所述PCW的温度低于UPW的温度,以对UPW进行降温,以及利用加热器对UPW加热,以对UPW升温,对UPW温度进行粗调节,控制PCW的流量和加热器的功率以使得UPW温度快速达到UPW温度控制目标附近,并稳定保持;

对UPW温度进行粗调节时,检测PCW进行热交换前的温度、UPW进行热交换前的温度以及热交换和加热器控制后的UPW的温度,基于检测的三个温度值和所述UPW温度控制目标确定UPW粗调目标温度的轨迹、PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;以及根据检测的PCW进行热交换前的温度波动、UPW进行热交换前的温度波动,采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;所述采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型,具体为:确定PCW温度波动和UPW温度波动,将两个温度波动作为模糊规则的输入,按照预设的模糊规则输出PCW的流量控制模型的参数,使得PCW的流量控制模型考虑PCW温度波动和UPW温度波动;其中,PCW的流量控制模型的参数为初始增益随扰动变化的倍数 δ ; $\widetilde{A}_1 = \delta A_1$; \widetilde{A}_1 为修正后的伺服阀控制阶跃响应矩阵, A_1 为初始化的伺服阀控制的阶跃响应矩阵;所述伺服阀控制阶跃响应矩阵对应PCW的流量控制模型;

将粗调节后的UPW经过远传管路,通入光刻机内部经过半导体制冷片调节后分为两路水平UPW注液和垂直UPW注液,通过两个加热器分别对两路UPW注液加热,最终两路UPW注液交汇在光刻机的主流场区域;在光刻机内部通过半导体制冷片和两路UPW注液的加热器对UPW的温度进行精调节,补偿所述远传管路引入的环境误差和UPW流控部件带来的热干扰,使得光刻机主流场UPW的温度稳定在所述UPW温度控制目标;对UPW温度进行精调节时,半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值由两路UPW注液两个加热器的功率、两路UPW注液流量以及两路UPW注液的温度设定值确定,两路UPW注液的温度设定值由所述UPW温度控制目标和两路UPW注液流量确定;具体为:基于两路UPW注液的流量、先验实验确定的伺服阀发热带来的温升与流量的关系、加热器额定功率对应的温升与流量的关系以及两路UPW注液温度的设定值确定半导体制冷片调节后的UPW温度设定值的上限和下限,并基于UPW温度设定值的上限和下限确定所述UPW温度设定值;其中,所述两路UPW注液温度的设定值分别由两路UPW的实际注液流量和UPW温度控制目标的先验关系式确定。

2. 根据权利要求1所述的浸没式光刻机的温度控制方法,其特征在于,所述UPW温度控制目标由光刻机主流场的工作需要设定。

3. 根据权利要求1所述的浸没式光刻机的温度控制方法,其特征在于,对UPW温度进行粗调节,具体包括如下步骤:

S1, 避免粗调节控制过程中出现UPW温度设定值输入和UPW温度控制量输出的急剧变化,利用松弛因子 α 对UPW粗调目标温度的轨迹进行柔化处理:

$$y_r(k+i) = (1-\alpha^i) * SV + \alpha^i y(k)$$

其中, $\alpha \in (0, 1)$, SV 为UPW温度控制目标, $y_r(k+i)$ 为第 i 个采样周期时的UPW温度设定值, $y(k)$ 为当前UPW温度控制量输出;

S2, 预测域 P 个采样周期的预测值 $\widetilde{Y}_{PM}(k)$ 由 P 个零输入响应 $\widetilde{Y}_{P0}(k)$ 叠加零状态响应 $A_j \Delta U_{M,j}(k)$ 得到:

$$\tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + A\Delta U_M(k)$$

$$\tilde{Y}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \tilde{y}_M(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}; \quad \tilde{Y}_{P0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \tilde{y}_0(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}$$

其中, $\tilde{y}_M(k+j|k)$ 为预测模型得出的第 $k+j$ 个输出值, $\tilde{y}_0(k+j|k)$ 为第 $k+j$ 个时刻的零状态值, $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器在 k 时刻的控制量, A_j 为对应执行器单位阶跃响应模型, $\Delta U_{M,j}(k)$ 为对应执行器控制量的变化量, A 为对应执行器单位阶跃响应模型, $\Delta U_M(k)$ 为所有执行器控制量的变化量; $j \in 1, 2$;

在粗调节设置热交换器以及加热器两个执行器, 两个控制量共同作用于粗调模块反馈点的温度, 此时 $j=1, 2$ 分别代表热交换器伺服阀和加热器两个执行器 A_j 矩阵是对应执行器单位阶跃响应模型:

$$A_j = \begin{bmatrix} a_j(1) & 0 & \dots & 0 \\ a_j(2) & a_j(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(M) & a_j(M-1) & \dots & a_j(1) \\ a_j(M+1) & a_j(M) & \dots & a_j(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(P) & a_j(P-1) & \dots & a_j(P-M+1) \end{bmatrix}; \Delta U_{j,M}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_j(k) \\ \Delta u_j(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u_j(k+M-1) \end{bmatrix}$$

在控制域等于 M 的 M 个采样周期的控制量作用下, 预测域 P 个采样周期的预测值为:

$$\tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + \sum_{j=1}^2 A_j \Delta U_{M,j}(k)$$

S3, 预测模型构建之后开始求解控制量, 目标函数 J 表示为:

$$\min J(k) = [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)]^T R [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)] + \Delta U_M^T(k) Q \Delta U_M(k)$$

其中, R 和 Q 分别为考虑跟踪效果和执行器输出量的权重矩阵, $W(k)$ 为预测域 P 内的所有设定值 $y_r(k+i)$ $i=1, 2, \dots, P$; $\Delta U_M^T(k)$ 为 $\Delta U_M(k)$ 的转置;

利用梯度下降法求得目标函数最小时的控制量改变量;

$$\text{令 } \frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0; \text{ 可求得:}$$

$$\Delta u_j(k) = d_j [W(k) - \tilde{Y}_{P0}(k)] \quad j = 1, 2$$

$$u_j(k) = u_j(k-1) + \Delta u_j(k) \quad j = 1, 2$$

其中, $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器在 k 时刻控制量的变化量, d_j 是由已知 A_j , R 和 Q 构成的矩阵, $u_j(k)$ 对应执行器控制量, 最终求解出每一时刻每个执行器的控制量 $u_j(k)$;

S4, 对预测误差的连续采样矫正等效于脉冲影响的叠加; 模型参数摄动来源于输入 UPW 和 PCW 的温度波动, 采用模糊规则以经过滤波得到的 PCW 温度偏差 E_p 以及 UPW 温度偏差 E_u 作为模糊规则的输入确定模型参数, 热交换器伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简化为一阶时滞模型;

对采样的PCW和UPW进行滑动滤波,滤波采用近十次采样值的平均;

判断当前采样时刻经滤波之后的 E_p 、 E_u 与上一次触发模型参数调节时的PCW温差 E_{p0} 、UPW温差 E_{u0} 求偏差,判断是否超出了限定偏差 E_m ;如果超出 E_m 则按照模糊规则更新模型参数,并记录该次 E_p 、 E_u 的值将其赋值于 E_{p0} 、 E_{u0} ,否则不进行模糊规则调节,初始化 E_{p0} 和 E_{u0} 为0。

4. 根据权利要求1所述的浸没式光刻机的温度控制方法,其特征在于,当经粗调节后的UPW温度与设定值的差小于预设值 E_c 时,开始对UPW精调节;

环境温度对所述远传管路温度影响,半导体制冷片对环境温度升高或降低带来的UPW温度波动进行控制,其设定值由末端两路UPW注液的设定值和加热器功率以及调节流量的伺服阀发热功率来确定;

两路UPW注液流量分别为 Q_1 、 Q_2 ;由先验实验确定伺服阀发热带来的温升和流量的关系为 $f(Q)$,已知加热器额定功率对应温升和流量的关系为 $H(Q)$, ϵ 是确保系统冗余度的安全系数;

精调节半导体制冷片调节后的UPW温度设定值 r_y 区间的上限 $r_{y_{max}}$ 为: $r_{y_{max}} = \min(r_{z1} - \epsilon f(Q_1), r_{z2} - \epsilon f(Q_2))$;

下限 $r_{y_{min}}$ 要保证在加热器额定功率下输出的温度要不小于两路UPW注液温度的设定值 r_{z1} 、 r_{z2} ;

$$r_{y_{min}} = \max(r_{z1} - \epsilon H(Q_1), r_{z2} - \epsilon H(Q_2))$$

$$r_y \in [r_{y_{min}}, r_{y_{max}}];$$

兼顾伺服阀的热干扰和加热器功率范围,取可调区间的均值作为半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值;

两路UPW注液温度设定值需结合实际注液流量 Q_1 、 Q_2 和UPW温度控制目标SV分解得到:

$$r_{z1} = T_1(SV, Q_1)$$

$$r_{z2} = T_2(SV, Q_2)$$

其中, $r_{z1} = T_1(SV, Q_1)$ 、 $r_{z2} = T_2(SV, Q_2)$ 分别为通过先验知识得到的两路UPW注液温度的设定值 r_{z1} 、 r_{z2} 与SV和各路流量 Q_1 、 Q_2 之间的关系式;

UPW精调节的控制器皆采用PID控制器完成对设定值的跟踪调节。

5. 根据权利要求3所述的浸没式光刻机的温度控制方法,其特征在于,所述伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简化的一阶时滞模型为:

$$G(s) = \frac{\delta K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

其中, K 为初始化状态的增益, T 为惯性时长, τ 为纯延时, s 为拉普拉斯算子, $G(s)$ 为伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数模型。

6. 一种浸没式光刻机的温度控制装置,其特征在于,包括:粗调节模块和精调节模块;

所述粗调节模块置于光刻机外部厂务中,包含四个流体接口,分别为:厂务冷却水PCW循环回路中PCW输入接口、PCW循环回路中PCW输出接口、超纯水UPW循环回路中UPW输入接口以及UPW远传保温管路的接口;所述光刻机外部厂务包括:PCW循环回路、UPW循环回路以及UPW远传保温管路;所述UPW循环回路流出的UPW经UPW远传保温管路流向光刻机;

从光刻机中回收的UPW流入所述UPW循环回路,PCW循环回路中PCW的温度可调,PCW循环

回路和UPW循环回路通过热交换器进行热交换;通过热交换器使得厂务冷却水PCW与光刻机超纯水UPW进行换热,所述PCW的温度低于UPW的温度,以对UPW进行降温,以及利用加热器对UPW加热,以对UPW升温,对UPW温度进行粗调节,控制PCW的流量和加热器的功率以使得UPW温度快速达到UPW温度控制目标附近,并稳定保持;对UPW温度进行粗调节时,检测PCW进行热交换前的温度、UPW进行热交换前的温度以及热交换和加热器控制后的UPW的温度,基于检测的三个温度值和所述UPW温度控制目标确定UPW粗调目标温度的轨迹、PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;以及根据检测的PCW进行热交换前的温度波动、UPW进行热交换前的温度波动,采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;所述采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型,具体为:确定PCW温度波动和UPW温度波动,将两个温度波动作为模糊规则的输入,按照预设的模糊规则输出PCW的流量控制模型的参数,使得PCW的流量控制模型考虑PCW温度波动和UPW温度波动;其中,PCW的流量控制模型的参数为初始增益随扰动变化的倍数 δ ; $\widetilde{A}_1 = \delta A_1$; \widetilde{A}_1 为修正后的伺服阀控制阶跃响应矩阵, A_1 为初始化的伺服阀控制的阶跃响应矩阵;所述伺服阀控制阶跃响应矩阵对应PCW的流量控制模型;

所述精调节模块置于光刻机内部,包含三个流体接口,分别为:接收所述UPW远传保温管路的UPW的接口和注入光刻机主流场的两路UPW的接口;将粗调节模块调节后的UPW经过远传管路,通入光刻机内部经过半导体制冷片调节后分为两路水平UPW注液和垂直UPW注液,通过两个加热器分别对两路UPW注液加热,最终两路UPW注液交汇在光刻机的主流场区域;在光刻机内部通过半导体制冷片和两路UPW注液的加热器对UPW的温度进行精调节,补偿所述远传管路引入的环境误差和UPW流控部件带来的热干扰,使得光刻机主流场UPW的温度稳定在所述UPW温度控制目标;对UPW温度进行精调节时,半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值由两路UPW注液两个加热器的功率、两路UPW注液流量以及两路UPW注液的温度设定值确定,两路UPW注液的温度设定值由所述UPW温度控制目标和两路UPW注液流量确定;具体为:基于两路UPW注液的流量、先验实验确定的伺服阀发热带来的温升与流量的关系、加热器额定功率对应的温升与流量的关系以及两路UPW注液温度的设定值确定半导体制冷片调节后的UPW温度设定值的上限和下限,并基于UPW温度设定值的上限和下限确定所述UPW温度设定值;其中,所述两路UPW注液温度的设定值分别由两路UPW的实际注液流量和UPW温度控制目标的先验关系式确定。

7. 根据权利要求6所述的浸没式光刻机的温度控制装置,其特征在于,所述UPW温度控制目标由光刻机主流场的工作需要设定。

8. 根据权利要求6所述的浸没式光刻机的温度控制装置,其特征在于,所述粗调节模块对UPW温度进行粗调节,具体包括如下步骤:

S1, 避免粗调节控制过程中出现UPW温度设定值输入和UPW温度控制量输出的急剧变化,利用松弛因子 α 对UPW粗调目标温度的轨迹进行柔化处理:

$$y_r(k+i) = (1-\alpha^i) * SV + \alpha^i y(k)$$

其中, $\alpha \in (0, 1)$, SV 为UPW温度控制目标, $y_r(k+i)$ 为第*i*个采样周期时的UPW温度设定值, $y(k)$ 为当前UPW温度控制量输出;

S2, 预测域*P*个采样周期的预测值 $\widetilde{Y}_{PM}(k)$ 由*P*个零输入响应 $\widetilde{Y}_{P0}(k)$ 叠加零状态响应 A_j

$\Delta U_{M,j}(k)$ 得到:

$$\tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + A\Delta U_M(k)$$

$$\tilde{Y}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \tilde{y}_M(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}; \quad \tilde{Y}_{P0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \tilde{y}_0(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}$$

其中, $\tilde{y}_M(k+j|k)$ 为预测模型得出的第 $k+j$ 个输出值, $\tilde{y}_0(k+j|k)$ 为第 $k+j$ 个时刻的零状态值, $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器在 k 时刻的控制量, A_j 为对应执行器单位阶跃响应模型, $\Delta U_{M,j}(k)$ 为对应执行器控制量的变化量, A 为对应执行器单位阶跃响应模型, $\Delta U_M(k)$ 为所有执行器控制量的变化量; $j \in 1, 2$;

在粗调节设置热交换器以及加热器两个执行器, 两个控制量共同作用于粗调模块反馈点的温度, 此时 $j=1, 2$ 分别代表热交换器伺服阀和加热器两个执行器 A_j 矩阵是对应执行器单位阶跃响应模型:

$$A_j = \begin{bmatrix} a_j(1) & 0 & \dots & 0 \\ a_j(2) & a_j(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(M) & a_j(M-1) & \dots & a_j(1) \\ a_j(M+1) & a_j(M) & \dots & a_j(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(P) & a_j(P-1) & \dots & a_j(P-M+1) \end{bmatrix}; \Delta U_{M,j}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_j(k) \\ \Delta u_j(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u_j(k+M-1) \end{bmatrix}$$

在控制域等于 M 的 M 个采用周期的控制量作用下, 预测域 P 个采样周期的预测值为:

$$\tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + \sum_{j=1}^2 A_j \Delta U_{M,j}(k)$$

S3, 预测模型构建之后开始求解控制量, 目标函数 J 表示为:

$$\min J(k) = [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)]^T R [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)] + \Delta U_M^T(k) Q \Delta U_M(k)$$

其中, R 和 Q 分别为考虑跟踪效果和执行器输出量的权重矩阵, $W(k)$ 为预测域 P 内的所有设定值 $y_r(k+i)$ $i=1, 2, \dots, P$; $\Delta U_M^T(k)$ 为 $\Delta U_M(k)$ 的转置;

利用梯度下降法求得目标函数最小时的控制量改变量;

$$\text{令 } \frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0; \text{ 可求得:}$$

$$\Delta u_j(k) = d_j [W(k) - \tilde{Y}_{P0}(k)] \quad j = 1, 2$$

$$u_j(k) = u_j(k-1) + \Delta u_j(k) \quad j = 1, 2$$

其中, $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器控制量的变化量, d_j 是由已知 A_j, R 和 Q 构成的矩阵, $u_j(k)$ 对应执行器控制量, 最终求解出每一时刻每个执行器的控制量 $u_j(k)$;

S4, 对预测误差的连续采样矫正等效于脉冲影响的叠加; 模型参数摄动来源于输入 UPW 和 PCW 的温度波动, 采用模糊规则以经过滤波得到的 PCW 温度偏差 E_p 以及 UPW 温度偏差 E_u 作为模糊规则的输入确定模型参数, 热交换器伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简

化为一阶时滞模型；

对采样的PCW和UPW进行滑动滤波,滤波采用近十次采样值的平均；

初始化 E_{p0} 和 E_{u0} 为0,判断当前采样时刻经滤波之后的 E_p 、 E_u 与上一次触发模型参数调节时的PCW温差 E_{p0} 、UPW温差 E_{u0} 求偏差,判断是否超出了限定偏差 E_m ;如果超出 E_m 则按照模糊规则更新模型参数,并记录该次 E_p 、 E_u 的值将其赋值于 E_{p0} 、 E_{u0} ,否则不进行模糊规则调节。

9. 根据权利要求6所述的浸没式光刻机的温度控制装置,其特征在于,当经粗调节后的UPW温度与设定值的差小于预设值 E_c 时,所述精调节模块开始对UPW精调节;环境温度对所述远传管路温度影响,精调节模块中的半导体制冷片对环境温度升高或降低带来的UPW温度波动进行控制,其设定值由末端两路UPW注液的设定值和加热器功率以及调节流量的伺服阀发热功率来确定;两路UPW注液流量分别为 Q_1 、 Q_2 ;由先验实验确定伺服阀发热带来的温升和流量的关系为 $f(Q)$,已知加热器额定功率对应温升和流量的关系为 $H(Q)$, ϵ 是确保系统冗余度的安全系数;精调节半导体制冷片调节后的UPW温度设定值 r_y 区间的上限 $r_{y\max}$ 为:

$r_{y\max} = \min(r_{z1} - \epsilon f(Q_1), r_{z2} - \epsilon f(Q_2))$; 下限 $r_{y\min}$ 要保证在加热器额定功率下输出的温度要不小于两路UPW注液温度的设定值 r_{z1}, r_{z2} ; $r_{y\min} = \max(r_{z1} - \epsilon H(Q_1), r_{z2} - \epsilon H(Q_2))$; $r_y \in [r_{y\min}, r_{y\max}]$; 顾伺服阀的热干扰和加热器功率范围,取可调区间的均值作为半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值;两路UPW注液温度设定值需结合实际的注液流量 Q_1 、 Q_2 和UPW温

度控制目标SV分解得到:
$$\begin{aligned} r_{z1} &= T_1(SV, Q_1) \\ r_{z2} &= T_2(SV, Q_2) \end{aligned}$$
 其中, $r_{z1} = T_1(SV, Q_1)$ 、 $r_{z2} = T_2(SV, Q_2)$ 分别为通

过先验知识得到的两路UPW注液温度的设定值 r_{z1} 、 r_{z2} 与SV和各路流量 Q_1 、 Q_2 之间的关系式;UPW精调节的控制器皆采用PID控制器完成对设定值的跟踪调节。

10. 根据权利要求8所述的浸没式光刻机的温度控制装置,其特征在于,所述粗调节模块中伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简化的一阶时滞模型为:

$$G(s) = \frac{\delta K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

其中, K 为初始化状态的增益, T 为惯性时长, τ 为纯延时, s 为拉普拉斯算子, $G(s)$ 为伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数模型。

一种浸没式光刻机的温度控制方法及装置

技术领域

[0001] 本发明属于浸没式光刻机的温控领域,更具体地,涉及一种浸没式光刻机的温度控制方法及装置。

背景技术

[0002] 浸没式光刻机由于在最后一块投影物镜和硅片之间浸满了浸没液。根据瑞利判据 $R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$,浸没液的温度变化将直接引起浸没液体的折射率和粘度的变化,从而导致曝光焦面偏移,引起数值孔径NA值的变化,进而使得光刻机分辨率降低和焦深的增大;另一方面,浸没液体温度变化将导致硅片和投影物镜温度变化,引起光学成像像差,最终将进一步降低浸没式光刻机的分辨率。因此,如何控制好浸液的温度并保持其稳定性是光刻机能正常工作的至关重要的因素。根据实际光刻机浸液流场温控需求,要求装置浸液温控精度达到 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。

[0003] 中国专利申请201020596742.2描述了一种浸没光刻机浸液温度控制装置,利用热电制冷的机制能保证浸液流场的温度稳定性要求,并实时测量浸液温度特性。在实际光刻机中,浸没式光刻机对浸液要求极高,一般采用去离子和去气体的超纯水,采用热电制冷的机制进行浸液温度控制不利于浸没液的污染控制。中国专利申请201020596742.2通过利用热交换原理,采用PFA材质的热交换器以及流量伺服阀对浸没液进行精密温度控制,减少了对浸没液的污染;而且专利201020596742.2主要通过TCU对浸没液进行温度控制,对末端浸没液缺乏二次温控的能力,缺乏温控的灵活性。

[0004] 中国专利申请201010143659.4描述了一种高精密度温度控制装置及其参数自整定方法,提供的装置和方法解决了温控参数与实际工况的匹配问题。该装置的温控方法是上一代光刻机整机温控的主要温控方法之一。这种方法对温控参数的测量要求高,整定的时间过长。

发明内容

[0005] 针对现有技术的缺陷,本发明的目的在于提供一种浸没式光刻机的温度控制方法及装置,旨在解决现有光刻机温度控制方法和装置对末端浸没液缺乏二次温控的能力,缺乏温控的灵活性,以及对温控参数的测量要求高,整定的时间过长的问题。

[0006] 为实现上述目的,第一方面,本发明提供了一种浸没式光刻机的温度控制方法,包括如下步骤:

[0007] 通过热交换器使得厂务冷却水PCW与光刻机超纯水UPW进行换热,所述PCW的温度低于UPW的温度,以对UPW进行降温,以及利用加热器对UPW加热,以对UPW升温,对UPW温度进行粗调节,控制PCW的流量和加热器的功率以使得UPW温度快速达到UPW温度控制目标附近,并稳定保持;

[0008] 对UPW温度进行粗调节时,检测PCW进行热交换前的温度、UPW进行热交换前的温度

以及热交换和加热器控制后的UPW的温度,基于检测的三个温度值和所述UPW温度控制目标确定UPW粗调目标温度的轨迹、PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;以及根据检测的PCW进行热交换前的温度波动、UPW进行热交换前的温度波动,采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;

[0009] 将粗调节后的UPW经过远传管路,通入光刻机内部经过半导体制冷片调节后分为两路水平UPW注液和垂直UPW注液,通过两个加热器分别对两路UPW注液加热,最终两路UPW注液交汇在光刻机的主流场区域;在光刻机内部通过半导体制冷片和两路UPW注液的加热器对UPW的温度进行精调节,补偿所述远传管路引入的环境误差和UPW流控部件带来的热干扰,使得光刻机主流场UPW的温度稳定在所述UPW温度控制目标;对UPW温度进行精调节时,半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值由两路UPW注液两个加热器的功率、两路UPW注液流量以及两路UPW注液的温度设定值确定,两路UPW注液的温度设定值由所述UPW目标和两路UPW注液流量确定。

[0010] 在一个可选的实施例中,所述UPW温度控制目标由光刻机主流场的工作需要设定。

[0011] 在一个可选的实施例中,对UPW温度进行粗调节,具体包括如下步骤:

[0012] S1,避免粗调节控制过程中出现UPW温度设定值输入和UPW温度控制量输出的急剧变化,利用松弛因子 α 对UPW粗调目标温度的轨迹进行柔化处理:

$$[0013] \quad y_r(k+i) = (1-\alpha^i) * SV + \alpha^i y(k)$$

[0014] 其中, $\alpha \in (0, 1)$,SV为UPW温度控制目标, $y_r(k+i)$ 为第i个采样周期时的UPW温度设定值, $y(k)$ 为当前UPW温度控制量输出;

[0015] S2,预测域P个采样周期的预测值 $\tilde{Y}_{PM}(k)$ 由P个零输入响应 $\tilde{Y}_{P0}(k)$ 叠加零状态响应 $A_j \Delta U_{M,j}(k)$ 得到:

$$[0016] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + A \Delta U_M(k)$$

$$[0017] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \tilde{y}_M(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}; \quad \tilde{Y}_{P0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \tilde{y}_0(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}$$

[0018] 其中, $\tilde{y}_M(k+j|k)$ 为预测模型得出的第k+j个输出值, $\tilde{y}_0(k+j|k)$ 为第k+j个时刻的零状态值, $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器在k时刻的控制量, A_j 为对应执行器单位阶跃响应模型, $\Delta U_{M,j}(k)$ 为对应执行器控制量的变化量,A为对应执行器单位阶跃响应模型, $\Delta U_M(k)$ 为所有执行器控制量的变化量; $j \in 1, 2$;

[0019] 在粗调节设置热交换器以及加热器两个执行器,两个控制量共同作用于粗调模块反馈点的温度,此时 $j=1, 2$ 分别代表热交换器伺服阀和加热器两个执行器 A_j 矩阵是对应执行器单位阶跃响应模型;

$$[0020] \quad A_j = \begin{bmatrix} a_j(1) & 0 & \dots & 0 \\ a_j(2) & a_j(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(M) & a_j(M-1) & \dots & a_j(1) \\ a_j(M+1) & a_j(M) & \dots & a_j(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(P) & a_j(P-1) & \dots & a_j(P-M+1) \end{bmatrix}; \Delta U_{j,M}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_j(k) \\ \Delta u_j(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u_j(k+M-1) \end{bmatrix}$$

[0021] 在控制域等于M的M个采样周期的控制量作用下,预测域P个采样周期的预测值为:

$$[0022] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + \sum_{j=1}^2 A_j \Delta U_{M,j}(k)$$

[0023] S3,预测模型构建之后开始求解控制量,目标函数J表示为:

$$[0024] \quad \min J(k) = [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)]^T R [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)] + \Delta U_M^T(k) Q \Delta U_M(k)$$

[0025] 其中,R和Q分别为考虑跟踪效果和执行器输出量的权重矩阵,W(k)为预测域P内的所有设定值 $y_r(k+i)$ $i=1,2,\dots,P$; $\Delta U_M^T(k)$ 为 $\Delta U_M(k)$ 的转置;

[0026] 利用梯度下降法求得目标函数最小时的控制量改变量;

[0027] 令 $\frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0$;可求得:

$$[0028] \quad \Delta u_j(k) = d_j [W(k) - \tilde{Y}_{P0}(k)] \quad j = 1,2$$

$$[0029] \quad u_j(k) = u_j(k-1) + \Delta u_j(k) \quad j=1,2$$

[0030] 其中, $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器在k时刻控制量的变化量, d_j 是由已知 A_j ,R和Q构成的矩阵, $u_j(k)$ 对应执行器控制量,最终求解出每一时刻每个执行器的控制量 $u_j(k)$;

[0031] S4,对预测误差的连续采样矫正等效于脉冲影响的叠加;模型参数摄动来源于输入UPW和PCW的温度波动,采用模糊规则以经过滤波得到的PCW温度偏差 E_p 以及UPW温度偏差 E_u 作为模糊规则的输入确定模型参数,热交换器伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简化为一阶时滞模型;

[0032] 对采样的PCW和UPW进行滑动滤波,滤波采用近十次采样值的平均;

[0033] 判断当前采样时刻经滤波之后的 E_p 、 E_u 与上一次触发模型参数调节时的PCW温差 E_{p0} 、UPW温差 E_{u0} 求偏差,判断是否超出了限定偏差 E_m ;如果超出 E_m 则按照模糊规则更新模型参数,并记录该次 E_p 、 E_u 的值将其赋值于 E_{p0} 、 E_{u0} ,否则不进行模糊规则调节,初始化 E_{p0} 和 E_{u0} 为0。

[0034] 在一个可选的实施例中,当经粗调节后的UPW温度与设定值的差小于预设值 E_c 时,开始对UPW精调节;

[0035] 环境温度对所述远传管路温度影响,半导体制冷片对环境温度升高或降低带来的UPW温度波动进行控制,其设定值由末端两路UPW注液的设定值和加热器功率以及调节流量的伺服阀发热功率来确定;

[0036] 两路UPW注液流量分别为 Q_1 、 Q_2 ;由先验实验确定伺服阀发热带来的温升和流量的

关系为 $f(Q)$ ，已知加热器额定功率对应温升和流量的关系为 $H(Q)$ ， ε 是确保系统冗余度的安全系数；

[0037] 精调节半导体制冷片调节后的UPW温度设定值 r_y 区间的上限 $r_{y\max}$ 为： $r_{y\max} = \min(r_{z1} - \varepsilon f(Q_1), r_{z2} - \varepsilon f(Q_2))$ ；

[0038] 下限 $r_{y\min}$ 要保证在加热器额定功率下输出的温度要不小于两路UPW注液温度的设定值 r_{z1}, r_{z2} ；

[0039] $r_{y\min} = \max(r_{z1} - \varepsilon H(Q_1), r_{z2} - \varepsilon H(Q_2))$

[0040] $r_y \in [r_{y\min}, r_{y\max}]$ ；

[0041] 兼顾伺服阀的热干扰和加热器功率范围，取可调区间的均值作为半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值；

[0042] 两路UPW注液温度设定值需结合实际注液流量 Q_1, Q_2 和UPW温度控制目标SV分解得到：

[0043] $r_{z1} = T_1(SV, Q_1)$

[0044] $r_{z2} = T_2(SV, Q_2)$

[0045] 其中， $r_{z1} = T_1(SV, Q_1)$ 、 $r_{z2} = T_2(SV, Q_2)$ 分别为通过先验知识得到的两路UPW注液温度的设定值 r_{z1}, r_{z2} 与SV和各路流量 Q_1, Q_2 之间的关系式；

[0046] UPW精调节的控制器皆采用PID控制器完成对设定值的跟踪调节。

[0047] 在一个可选的实施例中，所述伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简化的一阶时滞模型为：

$$[0048] \quad G(s) = \frac{\delta K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

$$[0049] \quad \widetilde{A}_1 = \delta A_1$$

[0050] 其中， K 为初始化状态的增益， δ 为初始增益随扰动变化的倍数， T 为惯性时长， τ 为纯延时， s 为拉普拉斯算子， $G(s)$ 为伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数模型， \widetilde{A}_1 为修正后的伺服阀控制阶跃响应矩阵， A_1 为初始化的伺服阀控制的阶跃响应矩阵。

[0051] 第二方面，本发明提供一种浸没式光刻机的温度控制装置，包括：粗调节模块和精调节模块；

[0052] 所述粗调节模块置于光刻机外部厂务中，包含四个流体接口，分别为：厂务冷却水PCW循环回路中PCW输入接口、PCW循环回路中PCW输出接口、超纯水UPW循环回路中UPW输入接口以及UPW远传保温管路的接口；所述光刻机外部厂务包括：PCW循环回路、UPW循环回路以及UPW远传保温管路；所述UPW循环回路流出的UPW经UPW远传保温管路流向光刻机；

[0053] 从光刻机中回收的UPW流入所述UPW循环回路，PCW循环回路中PCW的温度可调，PCW循环回路和UPW循环回路通过热交换器进行热交换；通过热交换器使得厂务冷却水PCW与光刻机超纯水UPW进行换热，所述PCW的温度低于UPW的温度，以对UPW进行降温，以及利用加热器对UPW加热，以对UPW升温，对UPW温度进行粗调节，控制PCW的流量和加热器的功率以使得UPW温度快速达到UPW温度控制目标附近，并稳定保持；对UPW温度进行粗调节时，检测PCW进行热交换前的温度、UPW进行热交换前的温度以及热交换和加热器控制后的UPW的温度，基于检测的三个温度值和所述UPW温度控制目标确定UPW粗调目标温度的轨迹、PCW的流量控

制模型以及加热器的功率控制模型；以及根据检测的PCW进行热交换前的温度波动、UPW进行热交换前的温度波动，采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型；

[0054] 所述精调节模块置于光刻机内部，包含三个流体接口，分别为：接收所述UPW远传保温管路的UPW的接口和注入光刻机主流场的两路UPW的接口；将粗调节模块调节后的UPW经过远传管路，通入光刻机内部经过半导体制冷片调节后分为两路水平UPW注液和垂直UPW注液，通过两个加热器分别对两路UPW注液加热，最终两路UPW注液交汇在光刻机的主流场区域；在光刻机内部通过半导体制冷片和两路UPW注液的加热器对UPW的温度进行精调节，补偿所述远传管路引入的环境误差和UPW流控部件带来的热干扰，使得光刻机主流场UPW的温度稳定在所述UPW温度控制目标；对UPW温度进行精调节时，半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值由两路UPW注液两个加热器的功率、两路UPW注液流量以及两路UPW注液的温度设定值确定，两路UPW注液的温度设定值由所述UPW目标和两路UPW注液流量确定。

[0055] 在一个可选的实施例中，所述UPW温度控制目标由光刻机主流场的工作需要设定。

[0056] 在一个可选的实施例中，所述粗调节模块对UPW温度进行粗调节，具体包括如下步骤：

[0057] S1，避免粗调节控制过程中出现UPW温度设定值输入和UPW温度控制量输出的急剧变化，利用松弛因子 α 对UPW粗调目标温度的轨迹进行柔化处理：

$$[0058] \quad y_r(k+i) = (1-\alpha^i) * SV + \alpha^i y(k)$$

[0059] 其中， $\alpha \in (0, 1)$ ，SV为UPW温度控制目标， $y_r(k+i)$ 为第i个采样周期时的UPW温度设定值， $y(k)$ 为当前UPW温度控制量输出；

[0060] S2，预测域P个采样周期的预测值 $\tilde{Y}_{PM}(k)$ 由P个零输入响应 $\tilde{Y}_{P0}(k)$ 叠加零状态响应 $A_j \Delta U_{M,j}(k)$ 得到：

$$[0061] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + A \Delta U_M(k)$$

$$[0062] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \tilde{y}_M(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}; \quad \tilde{Y}_{P0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \tilde{y}_0(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}$$

[0063] 其中， $\tilde{y}_M(k+j|k)$ 为预测模型得出的第k+j个输出值， $\tilde{y}_0(k+j|k)$ 为第k+j个时刻的零状态值， $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器在k时刻的控制量， A_j 为对应执行器单位阶跃响应模型， $\Delta U_{M,j}(k)$ 为对应执行器控制量的变化量，A为对应执行器单位阶跃响应模型， $\Delta U_M(k)$ 为所有执行器控制量的变化量； $j \in 1, 2$ ；

[0064] 在粗调节设置热交换器以及加热器两个执行器，两个控制量共同作用于粗调模块反馈点的温度，此时 $j=1, 2$ 分别代表热交换器伺服阀和加热器两个执行器 A_j 矩阵是对应执行器单位阶跃响应模型；

$$[0065] \quad A_j = \begin{bmatrix} a_j(1) & 0 & \dots & 0 \\ a_j(2) & a_j(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(M) & a_j(M-1) & \dots & a_j(1) \\ a_j(M+1) & a_j(M) & \dots & a_j(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(P) & a_j(P-1) & \dots & a_j(P-M+1) \end{bmatrix}; \Delta U_{M,j}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_j(k) \\ \Delta u_j(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u_j(k+M-1) \end{bmatrix}$$

[0066] 在控制域等于M的M个采样周期的控制量作用下,预测域P个采样周期的预测值为:

$$[0067] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + \sum_{j=1}^2 A_j \Delta U_{j,M}(k)$$

[0068] S3,预测模型构建之后开始求解控制量,目标函数J表示为:

$$[0069] \quad \min J(k) = [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)]^T R [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)] + \Delta U_M^T(k) Q \Delta U_M(k)$$

[0070] 其中,R和Q分别为考虑跟踪效果和执行器输出量的权重矩阵,W(k)为预测域P内的所有设定值 $y_r(k+i)$ $i=1,2,\dots,P$; $\Delta U_M^T(k)$ 为 $\Delta U_M(k)$ 的转置;

[0071] 利用梯度下降法求得目标函数最小时的控制量改变量;

$$[0072] \quad \text{令} \frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0; \text{可求得:}$$

$$[0073] \quad \Delta u_j(k) = d_j [W(k) - \tilde{Y}_{P0}(k)] \quad j = 1, 2$$

$$[0074] \quad u_j(k) = u_j(k-1) + \Delta u_j(k) \quad j=1, 2$$

[0075] 其中, $\Delta u_j(k)$ 为对应执行器控制量的变化量, d_j 是由已知 A_j ,R和Q构成的矩阵, $u_j(k)$ 对应执行器控制量,最终求解出每一时刻每个执行器的控制量 $u_j(k)$;

[0076] S4,矫正环节包含对预测误差的连续采样矫正以及对控制模型的矫正,对预测误差的矫正为将预测输出和实际输出的误差作为下一次预测的矫正参考,等效于脉冲影响的叠加;对控制模型的矫正考虑到模型参数摄动主要来源于输入UPW和PCW的温度波动,采用模糊规则以经过滤波得到的PCW温度偏差 E_p 以及UPW温度偏差 E_u 作为模糊规则的输入确定模型参数,热交换器伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简化为一阶时滞模型;

[0077] 对采样的PCW和UPW进行滑动滤波,滤波采用近十次采样值的平均;

[0078] 判断当前采样时刻经滤波之后的 E_p 、 E_u 与上一次触发模型参数调节时的PCW温差 E_{p0} 、UPW温差 E_{u0} 求偏差,判断是否超出了限定偏差 E_m ;如果超出 E_m 则按照模糊规则更新模型参数,并记录该次 E_p 、 E_u 的值将其赋值于 E_{p0} 、 E_{u0} ,否则不进行模糊规则调节,初始化 E_{p0} 和 E_{u0} 为0。

[0079] 在一个可选的实施例中,当经粗调节后的UPW温度与设定值的差小于预设值 E_c 时,所述精调节模块开始对UPW精调节;环境温度对所述远传管路温度影响,精调节模块中的半导体制冷片对环境温度升高或降低带来的UPW温度波动进行控制,其设定值由末端两路UPW注液的设定值和加热器功率以及调节流量的伺服阀发热功率来确定;两路UPW注液流量分别为 Q_1 、 Q_2 ;由先验实验确定伺服阀发热带来的温升和流量的关系为 $f(Q)$,已知加热器额定

功率对应温升和流量的关系为 $H(Q)$, ε 是确保系统冗余度的安全系数;精调节半导体制冷片调节后的UPW温度设定值 r_y 区间的上限 $r_{y\max}$ 为: $r_{y\max} = \min(r_{z1} - \varepsilon f(Q_1), r_{z2} - \varepsilon f(Q_2))$;下限 $r_{y\min}$ 要保证在加热器额定功率下输出的温度要不小于两路UPW注液温度的设定值 r_{z1}, r_{z2} ; $r_{y\min} = \max(r_{z1} - \varepsilon H(Q_1), r_{z2} - \varepsilon H(Q_2))$; $r_y \in [r_{y\min}, r_{y\max}]$; 顾伺服阀的热干扰和加热器功率范围,取可调区间的均值作为半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值;两路UPW注液温度设定值需结合实际注液流量 Q_1, Q_2 和UPW温度控制目标 SV 分解得到:

$$r_{z1} = T_1(SV, Q_1) \\ r_{z2} = T_2(SV, Q_2); \text{ 其}$$

中, $r_{z1} = T_1(SV, Q_1)$ 、 $r_{z2} = T_2(SV, Q_2)$ 分别为通过先验知识得到的两路UPW注液温度的设定值 r_{z1}, r_{z2} 与 SV 和各路流量 Q_1, Q_2 之间的关系式;UPW精调节的控制器皆采用PID控制器完成对设定值的跟踪调节。

[0080] 在一个可选的实施例中,所述粗调节模块中伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数简化的一阶时滞模型为:

$$[0081] \quad G(s) = \frac{\delta K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

$$[0082] \quad \widetilde{A}_1 = \delta A_1$$

[0083] 其中, K 为初始化状态的增益, δ 为初始增益随扰动变化的倍数, T 为惯性时长, τ 为纯延时, s 为拉普拉斯算子, $G(s)$ 为伺服阀流量改变对输出温度影响的传递函数模型, \widetilde{A}_1 为经模糊规则确定增益 δ 修正之后的伺服阀阶跃响应模型, A_1 为初始伺服阀阶跃响应模型。

[0084] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,具有以下有益效果:

[0085] 本发明提供一种浸没式光刻机的温度控制方法及装置,将观测得到的UPW和PCW扰动数据作为输入,经模糊规则转化为一阶惯性时滞控制模型的增益变化,以此来矫正预测控制中伺服阀-热交换器以及加热器控制的模型参数,实现双执行器控制的同时克服了PCW和UPW温度波动对粗调模块目标温度的影响,可以在小超调的情况下保证温控精度和稳定性和系统的鲁棒性。

附图说明

[0086] 图1为本发明实施例提供的浸没式光刻机的温度控制方法流程图;

[0087] 图2为本发明实施例提供的浸没式光刻机温度控制装置原理结构示意图;

[0088] 图3为本发明实施例提供的浸没式光刻机温度控制系统框图;

[0089] 图4为本发明实施例提供的 δ 自适应调节的 E_u 的隶属度函数图;

[0090] 图5为本发明实施例提供的 δ 自适应调节的 E_p 的隶属度函数图;

[0091] 图6为本发明实施例提供的浸没式光刻机的温度控制流程图;

[0092] 图7为本发明实施例提供的模型参数自适应的预测控制流程图;

[0093] 在所有附图中,相同的附图标记用来表示相同的元件或结构,其中:100为粗调节模块,200为精调节模块,1为热交换器,2为流量伺服阀,3为加热器,4为循环泵,5为温度传感器1,6为温度传感器2,7为微处理器1,8为微处理器2,9为温度传感器,10为远传保温管

路,11为半导体制冷片,12为缓冲罐,13为流量伺服阀2,14为流量伺服阀3,15为加热器2,16为加热器3,17为上位机,18为温度传感器3,19为温度传感器4,20为温度传感器5。

具体实施方式

[0094] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0095] 为此,本发明提供一种控制浸液温度的有效方法,利用多个热交换器以及多级伺服流量控制,达到 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 的稳态精度。

[0096] 具体地,图1为本发明实施例提供的浸没式光刻机的温度控制方法流程图;如图1所示,包括如下步骤:

[0097] S101,通过热交换器使得厂务冷却水PCW与光刻机超纯水UPW进行换热,所述PCW的温度低于UPW的温度,以对UPW进行降温,以及利用加热器对UPW加热,以对UPW升温,对UPW温度进行粗调节,控制PCW的流量和加热器的功率以使得UPW温度快速达到UPW温度控制目标附近,并稳定保持;

[0098] S102,对UPW温度进行粗调节时,检测PCW进行热交换前的温度、UPW进行热交换前的温度以及热交换和加热器控制后的UPW的温度,基于检测的三个温度值和所述UPW温度控制目标确定UPW粗调目标温度的轨迹、PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;以及根据检测的PCW进行热交换前的温度波动、UPW进行热交换前的温度波动,采用模糊规则自适应修正PCW的流量控制模型以及加热器的功率控制模型;

[0099] S103,将粗调节后的UPW经过远传管路,通入光刻机内部经过半导体制冷片调节后分为两路水平UPW注液和垂直UPW注液,通过两个加热器分别对两路UPW注液加热,最终两路UPW注液交汇在光刻机的主流场区域;在光刻机内部通过半导体制冷片和两路UPW注液的加热器对UPW的温度进行精调节,补偿所述远传管路引入的环境误差和UPW流控部件带来的热干扰,使得光刻机主流场UPW的温度稳定在所述UPW温度控制目标;对UPW温度进行精调节时,半导体制冷片调节后的UPW温度的设定值由两路UPW注液两个加热器的功率、两路UPW注液流量以及两路UPW注液的温度设定值确定,两路UPW注液的温度设定值由所述UPW目标和两路UPW注液流量确定。

[0100] 具体的控制方法参照以下实施例中的详细介绍:

[0101] 在一个具体的实施例中,如图2所示本发明提供了浸没式光刻机的浸液温控装置,使输入浸没单元的浸没液在不同流量,不同输入温度条件下能够实现解耦设定值,独立控制的分级分模块控制。在SUBFAB的粗调节模块中实现广域温度的调节,在FAB光刻机内部的精调节模块中针对两路注液的特异性进行独立控制并实现高温稳定性的控制。该装置在稳定状态的工况下能达到 $\pm 0.0025^{\circ}\text{C}$ 以内的温度控制精度。

[0102] 由于浸没式光刻机空间有限,本发明装置分两部分:粗调节模块100和精调节模块200。粗调节模块放置于SUBFAB中,如图2所示。精调节模块放置于光刻机内部。如图2所示,粗调模块有四个流体接口,包含厂务冷却水PCW的输入PCW IN、输出接口PCW OUT,用于温度控制的冷媒PCW从该对进出口进出,输入的温度范围在 $10^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$,被控温度的对象超纯水UPW输入接口UPW IN,输入温度为 $20^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$,以及通往精调模块200的两个模块之间的超

纯水UPW远传保温管路10。精调节模块200包含三个流体接口,接收粗调模块的UPW入口,以及注入浸没头的两路注液UPW OUT1、UPW OUT2。

[0103] 粗调节模块100位于SUBFAB(非洁净区域),该模块包含:调节流量伺服阀2控制通往热交换器1的PCW流量,利用热交换器1对纯水温度进行降温控制;调节加热器3的功率用来提供升温能力控制超纯水温度,循环泵4将受控之后的UPW形成回路,进一步提高管路中的温度均匀性并提高温度稳定性。温度传感器5用来采集粗调节模块输出的UPW温度用于该级温度控制中的轨迹柔化,反馈校正,温度传感器6和9分别用来监测输入UPW和PCW的温度,用于温度控制中的模型参数优化,MCU7作为粗调模块的微处理器借助内嵌A/D模块负责采集来自温度传感器5/6、9的温度信号,并通过控制器求解出伺服阀和加热器的调节量,通过内嵌D/A模块传输给伺服阀和加热器,起到温度调节的作用。

[0104] 精调节模块200位于FAB环境中的光刻机内部,用于最后一处温度控制提供给浸没头符合主流场温度梯度和稳定性的超纯水。半导体制冷片(TEC)11用于来自粗调节模块对经远传保温管路10传输的UPW进行升温或者降温控制。缓冲罐12用于对UPW的高频扰动进行抑制,进一步提高温度的稳定性。流量伺服阀13/14用于对两路注液的流量进行控制以满足浸没头的流量稳定性需求。加热器15/16用于两路注液的升温温度调节。温度传感器18用于该模块第一级温度控制,为反馈控制提供反馈信号。温度传感器19/20分别提供两路注液温度控制的反馈信号。微处理器MCU8用来采集温度传感器信号,并通过两级PID控制器计算出对应TEC的功率以及加热器的功率通过D/A模块进行模拟数字信号的转换。装置提供可视化装置,上位机17可通过TCP/IP协议与两个模块的MCU7/8进行通信,上位机17可提供可视化操作等功能。

[0105] 浸没式光刻机的温度控制装置采用分级控制,且模块之间相互独立采用独立的处理器进行控制,有利于故障诊断,且提供可视化操作接口。粗调节模块利用加热器和伺服阀协调控制同时实现浸没液UPW温度的升温 and 降温控制。精调节模块中的TEC模块可以同时实现加热和制冷控制,使经过远传管路受环境影响的UPW温度得到控制,并适应光刻机内部紧凑的空间;缓冲罐和泵产生的UPW循环都对温度波动进行了硬件滤波提高了稳定性。最后两级注液装置采用结合流量控制的执行器温度控制考虑到流量参量,使最终注入到浸没头的温度均值和稳定性更贴近最终端的需求。

[0106] 该温度控制装置采用热交换器进行UPW浸没液冷却温度控制,一旦出现温度超调情况,只能依靠UPW自身来提高温度。且为了适应输入UPW、温度或高或低于设定值的情况,提高系统的可控温范围,所以采用伺服阀控制PCW流量通过热交换器换热串联加热器直接加热的方式,同时提供升温和降温控制的能力。区别于多控制变量的多闭环控制或分级控制,该系统以预测控制为架构,硬件上仅采用粗调模块末端一个温度传感器作反馈点,算法上也仅采用该反馈变量作为控制器的输入,减小了系统的成本和复杂度,同时以改进的预测控制对温度粗调模块进行控制能够对双执行器进行协同控制。浸没头主流场对温度传感器5处温度精度和稳定性提出及其苛刻的要求,本温控装置需要在温度传感器6/9采集的UPW和PCW输入温度波动这些外部扰动的情况下保证预测控制模型的准确性和温控稳定性。

[0107] 具体地,本发明提供一种浸没式温度控制方法,将观测得到的外部扰动数据,经模糊规则转化为预测控制的模型参数,实现双执行器控制的同时克服了PCW和UPW温度波动对粗调模块目标温度的影响,可以在小超调的情况下保证温控精度和稳定性和系统的鲁棒

性。

[0108] 本发明实施例提供的精调模块为两级温度控制方法。两级温度控制方法是将最终控制端温度传感器19、20处的温度分两级实现：初级温度控制采用PI控制以保证控制系统的快速响应能力；次级温度控制采用稳定的PI控制，保证控制系统的精度。为了让控制系统的执行器具有较宽的可调空间，结合注液流量，伺服阀发热功率与温度变化相关的先验知识来确定最后两路注液温度控制的设定值和第一级温度控制的设定值。

[0109] 粗调节模块和精调节模块的控制系统框图见图3所示，其中：

[0110] 粗调模块中的模型参数自适应预测控制，为了实现加热器和伺服阀双执行器控制，以预测控制为算法框架对粗调模块的输出温度进行控制。如控制框图3所示，包括如下步骤：

[0111] X001:柔化轨迹

$$[0112] \quad y_r(k+i) = (1-\alpha^i) * SV + \alpha^i y(k)$$

[0113] 避免控制过程中出现设定值输入和控制量输出的急剧变化，利用松弛因子 α 对UPW粗调目标温度的轨迹进行柔化处理， $\alpha \in (0, 1)$ ，光刻机温控系统注重稳定性， α 越大稳定性越好，调节越缓慢，取 $\alpha = 0.8$ ；SV为最终温度目标值， $y_r(k+i)$ 为第 i 个采样周期时的温度设定值， $y(k)$ 为当前输出温度值。

[0114] 确定目标轨迹之后，接下来采用改进的动态矩阵控制方法，对目标轨迹进行跟踪控制。改进部分为动态矩阵的参数会随着温度扰动的观测而自适应修正。

[0115] X002预测模型：

[0116] 当前过程模型中的热交换器以及加热器的模型，经阶跃响应辨识可以得到在阶跃信号输入 N 个采样周期后达到稳定，所以以 N 作为动态矩阵控制的建模时长。

[0117] 所以预测域 P 个采样周期的预测值 $\tilde{Y}_{PM}(k)$ 可以由 P 个零输入响应 $\tilde{Y}_{P0}(k)$ 叠加零输入响应 $A_j \Delta U_{M,j}(k)$ 得到：

$$[0118] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + A \Delta U_M(k)$$

$$[0119] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \tilde{y}_M(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}; \quad \tilde{Y}_{P0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \tilde{y}_0(k+2|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}$$

[0120] 结合本文系统，在温度粗调模块设置冷却热交换器以及加热器两个执行器，两个控制量共同作用与粗调模块反馈点的温度，此时 $j=1, 2$ 分别代表伺服阀和加热器两个执行器 A_j 矩阵是执行的单位阶跃响应模型， $\Delta U_{M,j}$ 是执行器控制量的变化量。

$$[0121] \quad A_j = \begin{bmatrix} a_j(1) & 0 & \dots & 0 \\ a_j(2) & a_j(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(M) & a_j(M-1) & \dots & a_j(1) \\ a_j(M+1) & a_j(M) & \dots & a_j(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_j(P) & a_j(P-1) & \dots & a_j(P-M+1) \end{bmatrix}; \Delta U_{M,j}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_j(k) \\ \Delta u_j(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u_j(k+M-1) \end{bmatrix}$$

[0122] 所以在控制域等于M的M个采样周期的控制量作用下,求得的预测域P个采样周期的预测值可以由如下求得。

$$[0123] \quad \tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + \sum_{j=1}^2 A_j \Delta U_{M,j}(k)$$

[0124] X003滚动优化:

[0125] 预测模型构建之后开始求解控制量,考虑目标温度值的跟踪效果,需要预测域P内的控制偏差最小原则同时考虑执行器变动幅值不宜过大造成冲击,目标函数J可以表示为:

$$[0126] \quad \min J(k) = [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)]^T Q [W(k) - \tilde{Y}_{PM}(k)] + \Delta U_M^T(k) R \Delta U_M(k)$$

[0127] 其中Q和R分别为考虑跟踪效果和执行器波动的权重矩阵,W(k)为预测域P内的所有设定值。利用梯度下降法求得目标函数最小时的控制量改变量。

$$[0128] \quad \text{令 } \frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0 \text{ 可求得:}$$

$$[0129] \quad \Delta U_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [W(k) - \tilde{Y}_{P0}(k)]$$

$$[0130] \quad \Delta U_M(k) = D [W(k) - \tilde{Y}_{P0}(k)]$$

$$[0131] \quad D = L (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$$

$$[0132] \quad L = \begin{bmatrix} \theta & 0 \\ 0 & \theta \end{bmatrix}$$

$$[0133] \quad \theta = [1, 0, \dots, 0]$$

$$[0134] \quad \Delta u_j(k) = d_j [W(k) - \tilde{Y}_{P0}(k)] \quad j = 1, 2$$

$$[0135] \quad u_j(k) = u_j(k-1) + \Delta u_j(k) \quad j = 1, 2$$

[0136] 其中,D表示由 d_j 的集合,L表示由 θ 构成的转换矩阵, θ 表示要求解第几个采样周期的控制量,最终求解出每一时刻每个执行器的控制量 $u_j(k)$ 。

[0137] X004误差校正

[0138] 对预测控制的反馈校正环节常直接对预测误差进行补偿即将该时刻采样后得到的预测误差视为对预测模型的脉冲激励,对此时刻之后P个预测周期的预测值进行校正;对模型参数进行校正有区别于对预测误差进行补偿校正,对模型进行优化更能从机理分析上体现预测误差的补偿。本文诉述系统采用对预测误差进行补偿叠加预测模型参数修正的方式来应对预测误差和模型扰动。

[0139] X004_A预测误差校正

[0140] 对预测误差的连续采样校正等效于脉冲影响的叠加,具体公式构成为: $e(k+1)$ 为下一时刻预测误差, $y(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的输出值, $\tilde{y}_1(k+1|k)$ 为 k 时刻预测的 $k+1$ 时刻的输出值。

$$[0141] \quad e(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}_1(k+1|k)$$

[0142] 所以修正之后的 P 个采样周期的输出预测值 $\tilde{Y}_{\text{cor}}(k+1)$ 为:

$$[0143] \quad \tilde{Y}_{\text{cor}}(k+1) = \tilde{Y}_{PM}(k) + he(k+1)$$

[0144] 其中误差校正矩阵 h 为零输入响应对未来 P 个建模周期的影响矩阵,可由前文单位阶跃响应 A_j 转化得到,在经过了预测模型校正更新了 A_j 之后,误差校正矩阵 h 也随之改变。进一步地:

$$[0145] \quad \tilde{Y}_{\text{cor}}(k+1) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{\text{cor}}(k+1|k+1) \\ \vdots \\ \tilde{y}_{\text{cor}}(k+P|k+1) \end{bmatrix}$$

[0146] 所以经修正之后,进行下一时刻迭代时的整个预测域 P 个采样周期的零输入响应 $\tilde{Y}_{P0}(k+1)$ 可由 $\tilde{Y}_{\text{cor}}(k+1)$ 乘系数矩阵 S 得到:

$$[0147] \quad \tilde{Y}_{P0}(k+1) = S\tilde{Y}_{\text{cor}}(k+1)$$

$$[0148] \quad S = \left. \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \right\} P$$

[0149] X004_B预测模型校正

[0150] 不同半导体厂所具备的厂务条件不同,供应的UPW以及PCW的波动情况不同,现有条件为UPW温度在 $20^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ 和PCW温度在 $10^{\circ}\text{C} \sim 18^{\circ}\text{C}$ 之间波动,理想条件UPW稳定在 22°C 附近,PCW稳定在 14°C 附近。对系统进行分析,得出模型参数摄动来源于输入UPW和PCW的温度波动,对热交换器模型分析得出,UPW和PCW的温度影响传递函数中的增益环节。阶跃响应模型和传递函数在时域特性一致。取自适应参数 δ 表征UPW温度在 $20^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ 和PCW温度在 $10^{\circ}\text{C} \sim 18^{\circ}\text{C}$ 之间波动对伺服阀+热交换器模型的阶跃响应模型的影响,由于二者温度对模型增益的影响单调但非线性,PCW温度越高增益越小,UPW温度越高增益越大,且还有其他诸如输入PCW和UPW的微小流量波动干扰,所以无法准确在实际控制中按照线性对应关系确定模型参数。故采用X003模糊规则以经过滤波得到的PCW温度偏差 E_p 以及UPW温度偏差 E_u 作为模糊规则的输入,针对这两个主要扰动,修正模型参数。控制伺服阀流量经热交换器换热对输出温度影响的传递函数可以简化为一阶时滞模型,其中 K 为初始化状态的增益, δ 为初始增益随扰动变化的倍数, T 为惯性时长, τ 为纯延时。如下所示:

$$[0151] \quad G(s) = \frac{\delta K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

$$[0152] \quad \widetilde{A}_1 = \delta A_1$$

[0153] 以UPW输入温度22℃,PCW14℃作为初始化的基准值, $E_p(k)$ 和 $E_u(k)$ 分别是当前采样的UPW温度、PCW温度与初始化UPW温度值22℃,以及PCW初始化温度14℃的差值,对采样的PCW和UPW进行滑动滤波,滤波采用近十次采样值的平均:

$$[0154] \quad E_p = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} E_p(k-i)$$

$$[0155] \quad E_u = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} E_u(k-i)$$

[0156] 初始化 E_{p0} 和 E_{u0} 为0。判断当前采样时刻经滤波之后的 E_p 、 E_u 与上一次触发模型参数调节时的 E_{p0} 、 E_{u0} 求偏差,判断是否超出了限定偏差 E_m ;如果超出 E_m 则按照下述模糊规则更新模型参数,并记录该次 E_p 、 E_u 的值将其赋值于 E_{p0} 、 E_{u0} ,否则不进行模糊规则调节。

[0157] 经先验实验测试,若PCW和UPW温度经滤波后若有超出 $E_m=0.5^\circ\text{C}$ 会对输出的温度波动会产生较大的波动,所以将 E_p 、 E_u 是否大于 E_m 作为模糊规则整定模型参数的判断阈值,若 $E_p > E_m$ 或 $E_u > E_m$ 则对模型参数进行调整,来适应模型变化。

[0158] 以下是采用模糊逻辑来自适应调节 δ 的大小。将 δ 的当前状态划分为最大、偏大、合适、偏小、最小5个状态,对应的 δ 分别为PB,PM,PS,ZO,NS,NM,NB,对应 δ 的值分别为5,2.5,1.6,1,0.6,0.4,0.2。其中, E_u 为UPW的当前采样温度值和初始值22℃的差值,对 E_u 进行了限幅 $E_{u_{\max}}=2^\circ\text{C}$, $E_{u_{\min}}=-2^\circ\text{C}$,波动区间 $\overline{E_u} = E_{u_{\max}} - E_{u_{\min}} = 4^\circ\text{C}$ 。如果 $E_u < -25\%\overline{E_u}$,则 δ 偏大;如果 $E_u > 25\%\overline{E_u}$,则 δ 偏小。同样的, E_p 为PCW的当前采样温度值和初始值14℃的差值,对 E_p 进行了限幅 $E_{p_{\max}}=4^\circ\text{C}$, $E_{p_{\min}}=-4^\circ\text{C}$,波动区间 $\overline{E_p} = E_{p_{\max}} - E_{p_{\min}} = 8^\circ\text{C}$ 。对于 $E_u < -12.5\%\overline{E_u}$ 且 $E_p < -12.5\%\overline{E_p}$ 和 $E_u > 12.5\%\overline{E_u}$ 且 $E_p > 12.5\%\overline{E_p}$, δ 具有确定的大小状态,即前者最大PB,后折最小PS,并由先验实验整定了有限个工况下的模型参数,确定输入条件下符合实际模型的 δ 值。但是,对于已知参数之外的中间状态, δ 的状态具有不确定性。所以采用模糊逻辑可以解决这一问题。

[0159] E_u 、 E_p 采用的隶属度函数如图4,图5所示。对应的不确定状态,采用如表1所示的模糊规则,其中 δ 为流量伺服阀-热交换器的传递函数增益调节因子。例如,如图4、图5虚线图示当前采样UPW和PCW的温度相对于初始值分别偏大0.5℃和1.5℃时,对应 E_u 50%的可能性为PS和50%的可能性为Z;对应 E_p 为75%PS和25%的PB,按照线性插值法和表1的模糊规则,最终的 δ 的计算方法为:

$$[0160] \quad \delta = 50\% \times 75\% \text{PS} : \text{PS} + 50\% \times 25\% \text{PS} : \text{PB} + 50\% \times 75\% \text{Z} : \text{PS} + 50\% \times 25\% \text{Z} : \text{PB} = 0.475。$$

[0161] 表1 E_u 和 E_p 对应 δ 模糊规则表

$E_p \backslash E_u$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	$\text{PB}\delta=5$	$\text{PM}\delta=2.5$	$\text{PM}\delta=2.5$	$\text{PS}\delta=1.6$	$\text{Z}\delta=1$
NS	$\text{PM}\delta=2.5$	$\text{PM}\delta=2.5$	$\text{PS}\delta=1.6$	$\text{Z}\delta=1$	$\text{NS}\delta=0.6$
Z	$\text{PM}\delta=2.5$	$\text{PS}\delta=1.6$	$\text{Z}\delta=1$	$\text{NS}\delta=0.6$	$\text{NM}\delta=0.4$

PS	PS $\delta=1.6$	Z $\delta=1$	NS $\delta=0.6$	NM $\delta=0.4$	NM $\delta=0.4$
PB	Z $\delta=1$	NS $\delta=0.6$	NM $\delta=0.4$	NM $\delta=0.4$	NB $\delta=0.2$

[0163] 通过上述得出的 δ ,当前的伺服阀预测模型整定为:

$$[0164] \quad \tilde{A}_1 = \delta A_1$$

[0165] 将更新的阶跃响应矩阵A带入预测模型,进入下一次循环。

[0166] 精调模块中的设定值优化:

[0167] 经粗调模块控制的UPW温度与设定值的差小于 E_c 时,开始精调模块调节。从粗调模块至精调模块需要经过一段远传管路,且粗调模块在subFAB区域,精调模块在Fab区光刻机内部。环境温度对管路温度的影响较为明显且存在过高温度和过低温度两个极性的影响,所以在精调模块的第一级加入半导体制冷片,其尺寸较小适应光刻机内部区域的空间约束不再依赖压缩机或者其他外部引入的冷媒等占用较大空间的执行器进行制冷,又能通过电流的双向调节既可加热又可制冷,能够对环境温度升高或降低带来的UPW温度波动进行控制。其设定值由末端两路注液的设定值和执行器功率以及调节流量的伺服阀发热功率来确定。注液流量 Q_1 、 Q_2 ;由先验实验确定伺服阀发热带来的温升和流量的关系为 $f(Q)$,已知加热器额定功率对应温升和流量的关系为 $H(Q)$ 。 ε 是确保系统冗余度的安全系数取1.5。

[0168] 所以精调模块第一级控制的半导体制冷片调节后的UPW温度设定值 r_y 区间的上限 $r_{y\max}$ 为: $r_{y\max} = \min(r_{z1} - \varepsilon f(Q_1), r_{z2} - \varepsilon f(Q_2))$;

[0169] 下限至少要保证在加热器额定功率下输出的温度要不小于设定值 $r_{z1}r_{z2}$;

$$[0170] \quad r_{y\min} = \max(r_{z1} - \varepsilon H(Q_1), r_{z2} - \varepsilon H(Q_2))$$

$$[0171] \quad r_y \in [r_{y\min}, r_{y\max}];$$

[0172] 兼顾伺服阀的热干扰和加热器功率范围,在有较大扰动时有较大的冗余度去调节,取可调区间的均值作为精调模块第一级控制的设定值 $r_y = \frac{r_{y\min} + r_{y\max}}{2}$ 。

[0173] 两路注液包含水平注液和垂直注液,两路经过流量和温度控制的液体流经浸没头腔体到达主流场区域的管路环境不同,但在最终交汇的主流场区域需要满足SV设定值需求,并保证温度梯度和稳定性在一定范围内。由于两路注液的流量不同,受相同功率大小环境带来的热负载反映到温度上的变化就有不同,意味着两路设定值需要结合实际的注液流量 Q_1 、 Q_2 和最终主流场温度的设定值SV分解得到。

$$[0174] \quad r_{z1} = T_1(SV, Q_1)$$

$$[0175] \quad r_{z2} = T_2(SV, Q_2)$$

[0176] 精调模块中的控制器皆采用PID控制器完成对设定值的跟踪调节。

[0177] 在一个具体的实施例中,本发明提供一种光刻机的温度控制流程,如图6所示,包括以下步骤:

[0178] 步骤S101:初始化粗调控制器,初始化参数包含伺服阀和加热器模型的阶跃响应矩阵 A_j 和误差修正的脉冲响应矩阵 h ,设定值SV,设定值柔化轨迹参数 α ,建模时域N,预测域P,控制域M,参数自适应调节阈值 E_{p0} , E_{u0} 以及增益调节因子 δ 。

[0179] 步骤S102:初始化设定值SV,给定的注液流量 Q_1 、 Q_2 ;冗余安全系数 ε ,伺服阀发热温升,加热器额定功率温升和流量的关联函数 $f(Q)$ $H(Q)$,主流场设定值和注液流量以及各

支路设定值与二者之间的关联函数 $R_{z1} = T_1(SV, Q_1)$ 以及精调节模块中第一二级控制器的 PID 参数。

[0180] 步骤S200:对粗调模块进行模型参数自适应的预测控制,控制流程见图7。其中,图7的流程参见前述方法实施例中的介绍。需要说明的是,图7中预测P步中P跟前面控制框图3中引出的预测域P是一个概念。图7中通过梯度下降得出使目标函数J最小的U,指的是前述步骤X003滚动优化中指出的:利用梯度下降法求得目标函数最小时的控制量改变量。步骤S103:判断粗调模块输出的温度是否在目标误差 $|SV-T_x| < \epsilon$ 内若是则进入步骤S104,否则重新进入步骤S200。

[0181] 步骤S104:获取精调模块第一级输出 T_y 。

[0182] 步骤S105:获取精调模块第二级输出 T_{z1} 、 T_{z2} 。

[0183] 步骤S106:根据主流场设定值和注液流量以及各支路设定值与二者之间的关联函数 $R_{z1} = T_1(SV, Q_1)$ $R_{z2} = T_2(SV, Q_2)$ 确定两路的设定值 R_{z1} 、 R_{z2} 。

[0184] 步骤S107:根据给定的注液流量 Q_1 、 Q_2 ;冗余安全系数 ϵ ,伺服阀发热温升,加热器额定功率温升和流量的关联函数 $f(Q)$ $H(Q)$,和已求出的两路设定值 R_{z1} 、 R_{z2} 。按照既定关系式确定设定值 R_y 。

[0185] 步骤S108:根据前述的初级温控设定值 R_y 、第一级温控PI参数计算半导体制冷片 TEC 的调节量。

[0186] 步骤S109:根据前述的初级温控设定值 R_{z1} 、 R_{z2} 、第二级温控的PI参数计算两路加热器的调节量。

[0187] 步骤S110:判断两路注液温度控制是否都满足 $|T_z - R_z| < 0.01^\circ\text{C}$,是则进入步骤S111,否则重新开始S200。

[0188] 步骤S111:判断两路注液温度控制是否都满足 $|T_z - R_z| < 0.0025^\circ\text{C}$,是则进入步骤S112,否则重新开始S104。

[0189] 步骤S112:是否结束算法运行,否则重新开始S200,是则结束。

[0190] 本发明提供一种浸没式光刻机的温度控制方法及装置,采用了粗调加精调模块进行温度控制,并在精调模块中设置两级调节。在粗调模块中,加热器和伺服阀双执行器通过模型参数自适应的预测控制进行调节,实现加热和制冷的控制。本装置采用的改进预测控制,可以考虑到模型参数优化的判定条件,以及参数优化采用的模糊规则可以更能根据扰动的变化自适应调整到合适的模型,参数解决传统预测控制模型失配的问题。在精调模块中的两级控制,结合注液流量不同,伺服阀调节过程的发热功率不同,以及浸没头环境不同对两路注液温度的设定值不同,利用先验知识求解两级控制的设定值,解决了相互协调控制,避免了前一级设定值过低或过高使后一级两路控制中有达不到设定值或超出设定值的问题。

[0191] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

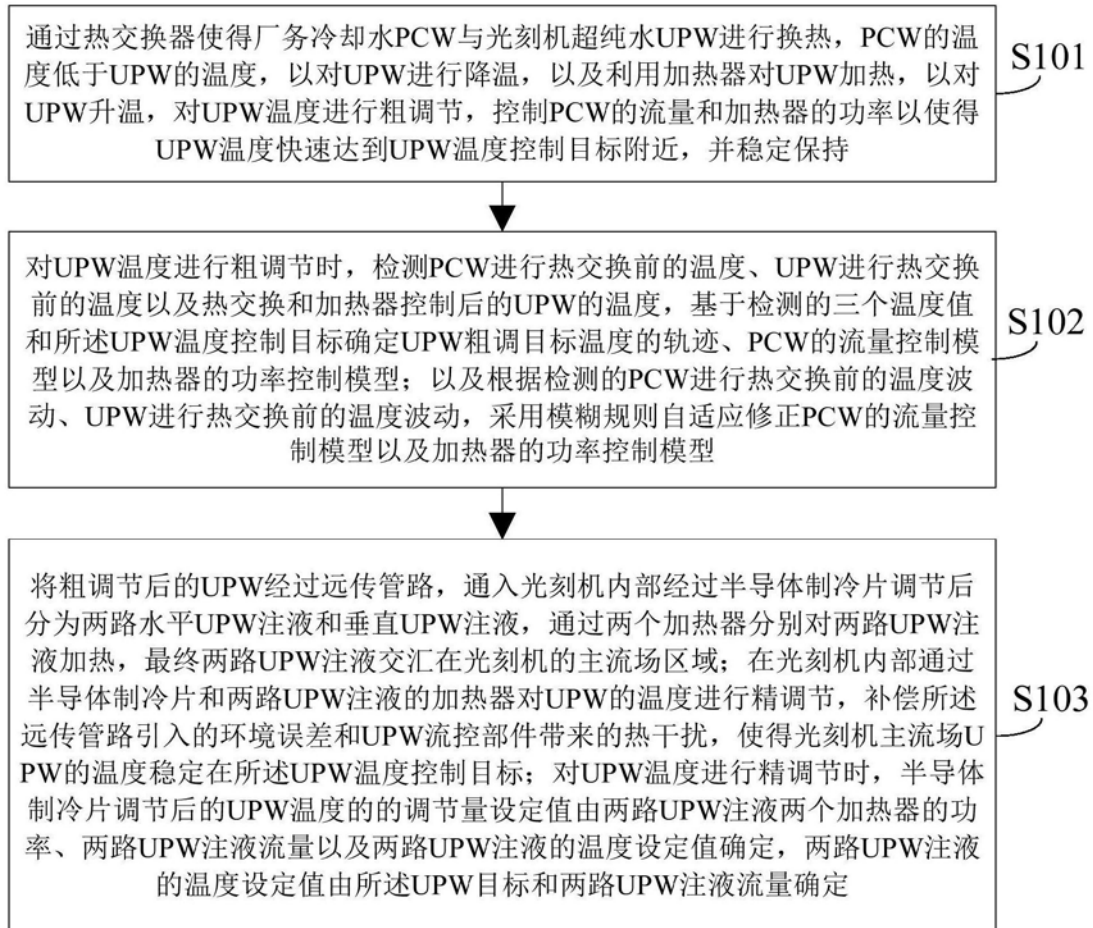


图1

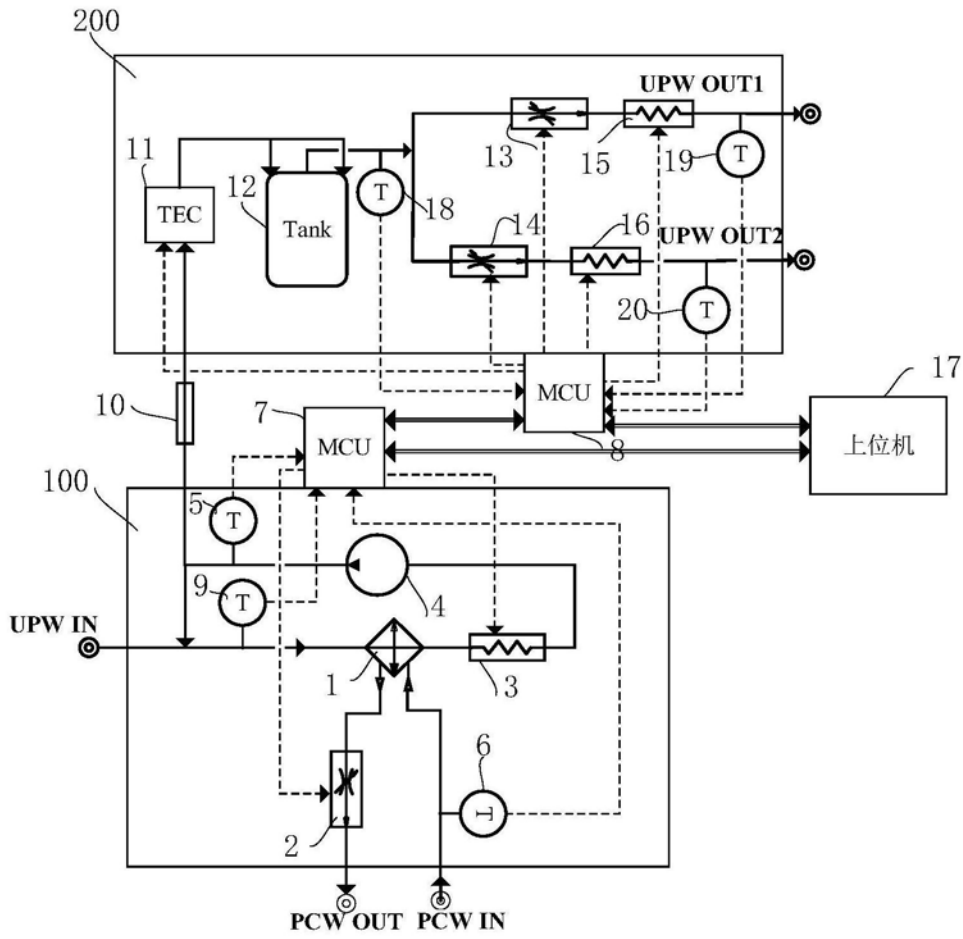


图2

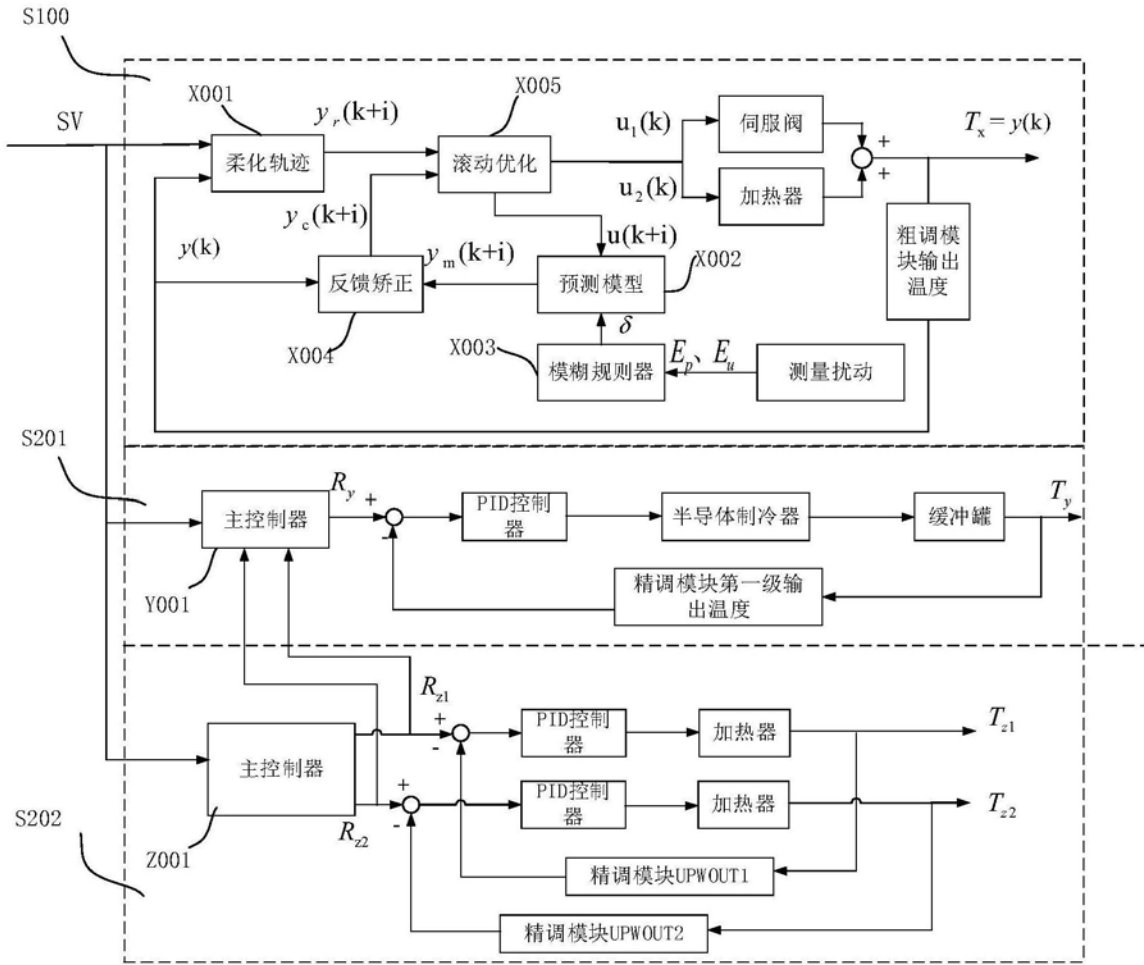


图3

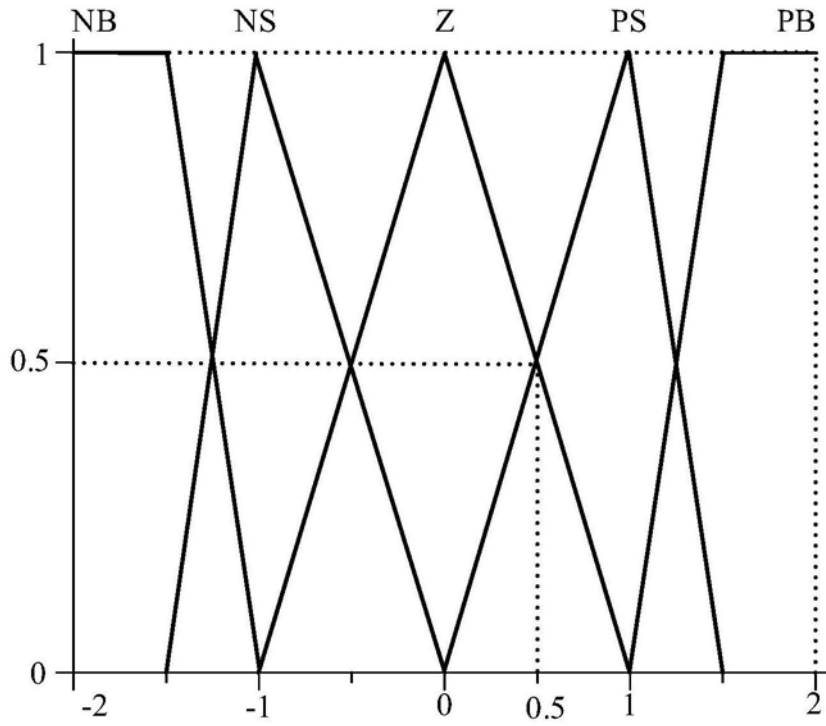


图4

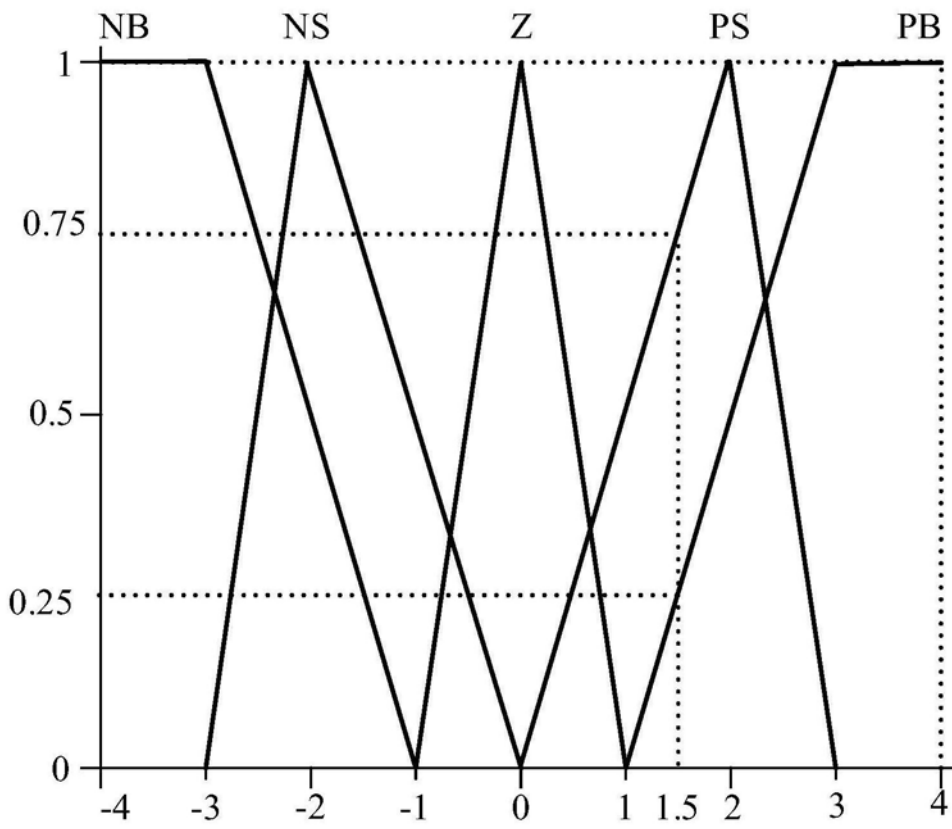


图5

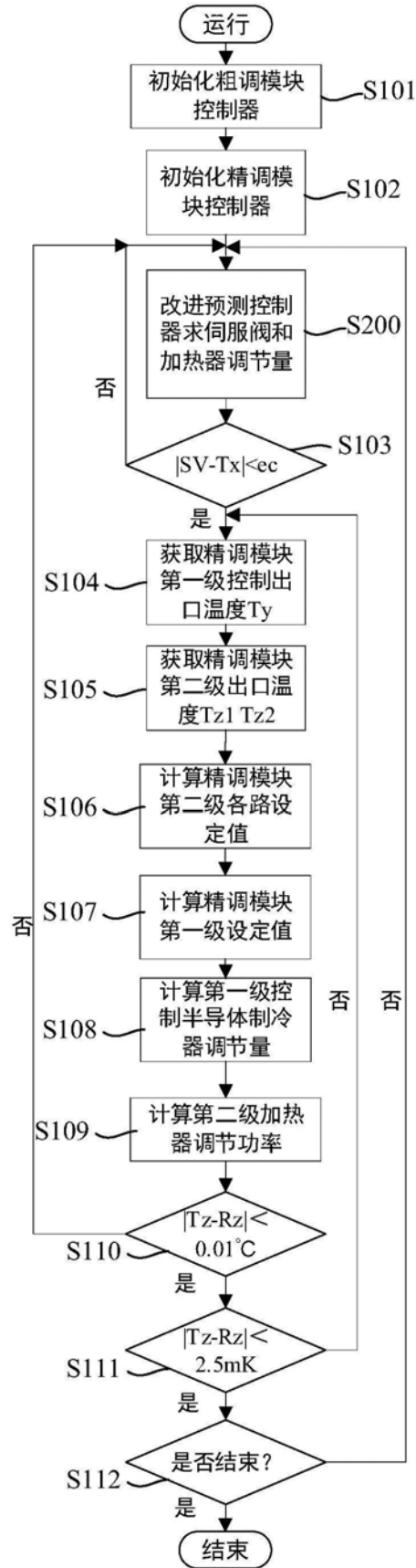


图6

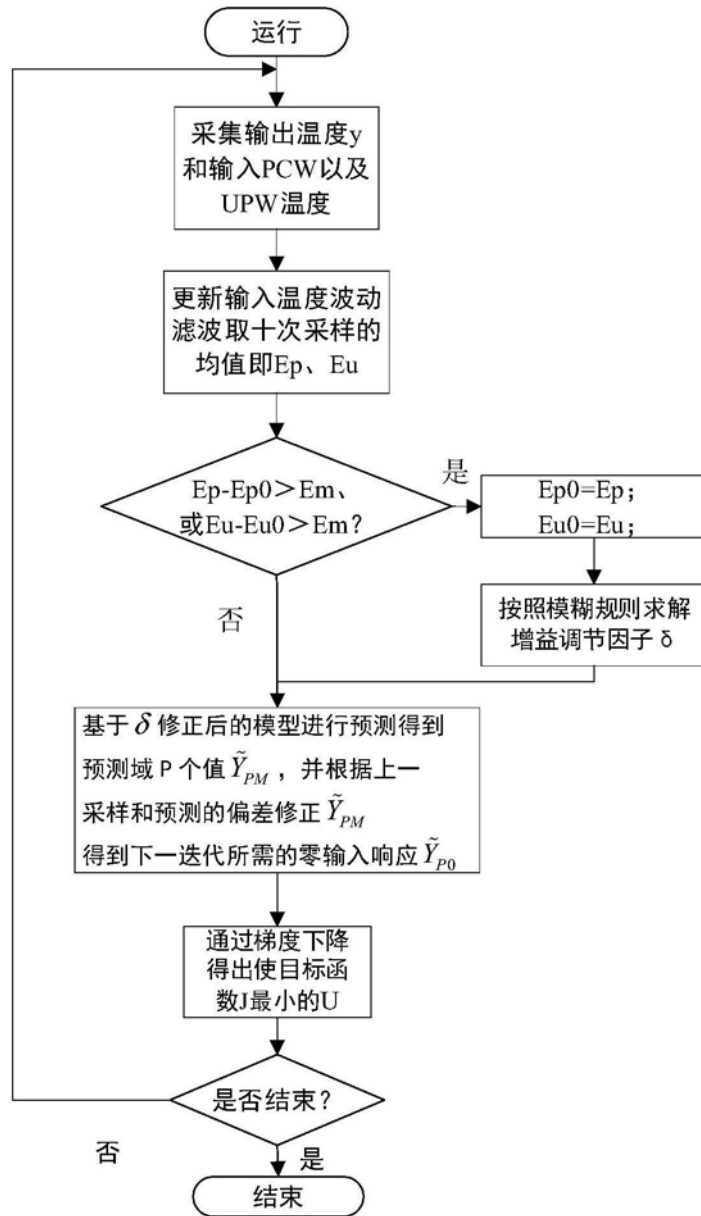


图7