



1. 一种基于卡尔曼滤波的原子气室温控装置,其特征在于:包括:原子气室(1)、加热测温电路模块(2)、信号放大电路(3)、模数/数模转换模块(4)、功率放大电路模块(5)、高频逆变电路模块(6)、主控模块(7);

原子气室(1)与加热测温电路模块(2)相连,原子气室(1)内填充有铷原子气体和作为淬灭气体的氮气;

加热测温电路模块(2)的加热电阻条通电后产生电流热加热原子气室(1),原子气室(1)的温度发生变化使得加热测温电路模块(2)的贴片式热电偶冷端和热端间产生电势差,通过测量电势差测定原子气室(1)温度;

加热测温电路模块(2)与信号放大电路(3)连接,贴片式热电偶冷端和热端间产生电势差作为输入的模拟电压信号传输至信号放大电路(3),信号放大电路(3)放大模拟电压信号,输出温度电压;

信号放大电路(3)与模数/数模转换模块(4)相连,信号放大电路(3)输出温度电压至模数/数模转换模块(4)通过模数转换将温度电压转换为数字信号输出;

模数/数模转换模块(4)与主控模块(7)相连,模数/数模转换模块(4)将数字信号输送至主控模块(7),主控模块(7)接收输入信号,经分析处理后,输出系统控制量至模数/数模转换模块(4);

模数/数模转换模块(4)还与高频逆变电路模块(6)相连,模数/数模转换模块(4)输出低压直流电信号至高频逆变电路模块(6),所述高频逆变电路模块(6)将低压直流电信号转换为高频低压交流电信号;

高频逆变电路模块(6)与功率放大电路模块(5)相连,所述功率放大电路模块(5)接收高频逆变电路模块(6)输出的高频低压交流电信号,并对其进行功率放大后,输出加热信号;

功率放大电路模块(5)与加热测温电路模块(2)相连,所述加热测温电路模块(2)接收功率放大电路模块(5)的加热信号,加热测温电路模块(2)控制加热线圈加热或降温。

2. 如权利要求1所述的一种基于卡尔曼滤波的原子气室温控装置,其特征在于:主控模块(7)包括扩展卡尔曼滤波器(8)、PID控制器(9),主控模块(7)做如下信息处理:

步骤1:将输入的温度电压数值,根据热电偶电动势计算公式计算出测量温度值 $Z_k$ ,测量温度值 $Z_k$ 为保留3位小数的浮点型数据格式;

步骤2:将测量温度值 $Z_k$ 输入扩展卡尔曼滤波器(8),计算出后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ ,计算所述后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ 与参考温度值 $T_{ref}$ 的差值 $T_{off}$ ;

步骤3:将上述差值 $T_{off}$ 作为PID控制器(9)的输入,通过PI算法计算出系统控制量 $U_k$ ,作为PID控制器(9)的输出值;

步骤4:将输出值 $U_k$ 通过SPI串口电路传输至模数/数模转换模块(4),将输出值 $U_k$ 通过数模转换输出低压直流电信号。

3. 使用如权利要求1所述的一种基于卡尔曼滤波的原子气室温控装置的基于卡尔曼滤波的原子气室温控方法,包括如下步骤:

步骤S1:首先设置参考温度值 $T_{ref} = 140^\circ\text{C}$ ,再通过测得k时刻的电压值数据,换算得到测量温度值 $Z_k$ ;确定温控扩展卡尔曼滤波器(8)的预测模型的非线性表达式为:

$$T_k = f(T_{k-1}, U_{k-1}, W_{k-1}) \quad (1)$$

$$Z_k = h(T_k, V_k) \quad (2)$$

其中,式(1)为k时刻原子气室1的温度与输入电流的非线性表达式,式(2)为k时刻原子气室1的温度的测量公式; $T_k$ 为k时刻原子气室1的温度的预测真实值, $Z_k$ 为k时刻原子气室1的温度的测量真实值; $U_{k-1}$ 为k-1时刻的控制向量, $W_{k-1}$ 为k-1时刻的过程噪声, $V_k$ 为k时刻的测量噪声,两者都符合一元高斯分布:

$$P(W) \sim N(0, Q), P(V) \sim N(0, R)$$

上述过程噪声和测量噪声在实际工作中,期望都为0,符合正态分布; $Q$ 为估计的过程噪声的协方差矩阵, $R$ 为测量的高斯噪声的协方差矩阵,其值通过加热测温电路模块(2)的噪声具体决定;

步骤S2:确定温控扩展卡尔曼滤波器(8)预测模型的先验估计温度值和测量温度值公式为:

$$\tilde{T}_k^- = f(\tilde{T}_{k-1}, U_{k-1}, 0) \quad (3)$$

$$\tilde{Z}_k = h(\tilde{T}_k^-, 0) \quad (4)$$

其中 $\tilde{T}_k^-$ 是k时刻原子气室1的温度的先验估计温度值, $\tilde{Z}_k$ 为k时刻先验测量值;

步骤S3:更新预测模型的先验状态误差协方差矩阵 $P_k^-$ ,其更新公式为:

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + W_k Q W_k^T \quad (5)$$

其中, $A$ 为雅可比矩阵。

步骤S4:更新温控扩展卡尔曼滤波器(8)的卡尔曼增益 $K_k$ ,其更新公式为:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + V_k R V_k^T)^{-1} \quad (6)$$

其中, $H$ 为转换矩阵;

步骤S5:通过信息融合的方法,校正最优的后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ ,后验校正公式为:

$$\tilde{T}_k = \tilde{T}_k^- + K_k (\tilde{Z}_k - h(\tilde{T}_k^-)) \quad (7)$$

步骤S6:更新后验状态误差协方差矩阵预测值 $P_k$ ,更新公式为:

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (8)$$

步骤S7:设置上述最优的后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ 作为k时刻的气室外温度,计算与上述参考温度值 $T_{ref}$ 的温度偏移量 $T_{off} = T_{ref} - \tilde{T}_k$ ,作为PID控制器(9)的输入量;一般PID控制的计算方程为:

$$u(t) = K_p [T_{off} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{dT_{off}}{dt}] \quad (9)$$

其中, $K_p$ 为PID控制器(9)的比例系数, $T_i$ 为PID控制器(9)的积分时间, $T_d$ 为PID控制器(9)的微分时间, $u(t)$ 为输入 $T_{off}$ 经过PID控制器(9)进行线性组合构成的系统控制量;上述

公式无法通过编程在FPGA内编程实现,对其进行离散化处理,将积分部分换算为求和公式,公式为:

$$U_k = K_p T_{off} + K_i \sum_{j=0}^k T_{off} + K_d [T_{off}(k) - T_{off}(k-1)] \quad (10)$$

上述 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为积分和微分控制系数, $U_k$ 为离散化的系统控制量,比例控制 $K_p$ 可以快速响应系统误差,减少稳态误差,若 $K_p$ 过大,系统会不稳定;积分控制 $K_i$ 是温度偏移量进行不断叠加,用以消除稳态误差,若 $K_i$ 过大,会使系统超调,导致系统震荡;微分控制 $K_d$ 用以减小系统超调量,克服系统震荡,但微分项对高频噪音非常敏感,所以在本发明中不启用微分控制, $K_d=0$ ;

步骤S8:通过编程实现系统控制量 $U_k$ 的从主控模块数字化输出,经数模转换、高频逆变、功率放大后转变为加热信号至加热测温模块,改变加热功率实现气室内温度变化,再经过温度测量后更新 $k+1$ 时刻的测量温度值 $Z_{k+1}$ ,重复扩展卡尔曼滤波和PID控制,直至原子气室1温度到达参考温度值并稳定。

4.如权利要求1所述的方法,其特征在于,在完成一次完整的原子气室的温控加热后,获得新的数学模型,对扩展卡尔曼滤波器(8)的预测模型进行更新。

## 基于卡尔曼滤波的原子气室温控装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及SERF磁力仪的铷原子气室的加热与温控技术领域,尤其是基于微处理器的PID反馈控制器,基于扩展卡尔曼滤波处理,精准控制加热功率,调节气室温度的装置和方法。

### 背景技术

[0002] SERF磁力仪在测量生物磁场的有着广泛的应用,比如小鼠、果蝇,到人体大脑与心脏磁场。其优点在,生产成本远低于SQUID,且更加轻便,厘米级的体积使其在空间上具有很强的可移动能力。同时,SERF磁力仪的另一个优点在于能实现矢量测量,在解决脑神经相关疾病的溯源问题上潜力极大。

[0003] 碱原子气室是SERF磁力仪的重要组成部件,而通过加热碱原子气室至特定温度,并达到热平衡,来获得高密度的碱金属蒸汽。此时原子间的自旋交换碰撞频率远高于自身拉莫尔进动频率,在该条件下,原子由基态进入激发态,外场总自旋进动表现为平均拉莫尔频率,自旋交换弛豫被彻底消除。因此,原子气室的温度变化直接影响碱金属原子的状态,从而影响磁力仪的灵敏度。SERF磁力仪的开发工程通常对气室的加热方式和温度控制有着严格的要求。

[0004] 常规磁力仪气室的加热方式通常是在气室外壁缠绕加热线圈,温度传感器采集气室表面温度,并反馈至主控模块。PID控制器根据算法,将测量温度与目标温度的差值作为输入值计算输出值,实时反馈至加热信号产生模块,调整加热信号的幅值、频率、相位等参数,并最终通过加热线圈产生热量加热气室。但常规加热方式通常存在着气室加热不均匀,导致原子数密度分布不均匀,以及PID反馈控制滞后等问题,影响了磁力仪灵敏度,限制了SERF磁力仪在飞特(fT)量级的生物磁场的测量,比如测量人体大脑磁场。

### 发明内容

[0005] 为了克服上述现有技术存在的不足,针对碱金属气室加热不均匀的问题,以及考虑到SERF磁力仪的小型化和集成化,本发明提供基于卡尔曼滤波的原子气室加热测温装置及温控方法。

[0006] 本发明是一种原子气室加热测温及其驱动电路和PID温度控制系统的集成化设计方案;在硬件模块基础上,基于扩展卡尔曼滤波算法控制加热功率的实现方法,克服传统的PID反馈控温技术存在剩余误差和控制滞后的问题。

[0007] 为了达到上述的目的,本发明采用了以下的技术方案:

[0008] 一种基于卡尔曼滤波的原子气室温控装置,其中硬件模块包括:原子气室1、加热测温电路模块2、信号放大电路3、模数/数模转换模块4、功率放大电路模块5、高频逆变电路模块6、主控模块7;

[0009] 所述原子气室1,与加热测温电路模块2相连,原子气室1内填充有一定密度的铷原子气体和作为淬灭气体的氮气;

[0010] 所述原子气室1与加热测温电路模块2连接,加热测温电路模块2的加热电阻条通电后产生电流热加热原子气室1,原子气室1的温度发生变化使得加热测温电路模块2的贴片式热电偶冷端和热端间产生电势差,通过测量电势差测定原子气室1温度;

[0011] 所述加热测温电路模块2与信号放大电路3连接,贴片式热电偶冷端和热端间产生电势差作为输入的模拟电压信号传输至信号放大电路3,信号放大电路3放大模拟电压信号,输出温度电压;

[0012] 所述信号放大电路3与模数/数模转换模块4相连,信号放大电路3输出温度电压至模数/数模转换模块4,通过模数转换将温度电压转换为数字信号输出;

[0013] 所述模数/数模转换模块4与主控模块7相连,所述模数/数模转换模块将数字信号输送至主控模块7,作为主控模块7的输入信号;所述主控模块7接收输入信号,经分析处理后,输出系统控制量至模数/数模转换模块4;

[0014] 主控模块7的分析处理包括:

[0015] 步骤1:将输入的温度电压数值,根据热电偶电动势计算公式计算出测量温度值 $Z_k$ ,测量温度值 $Z_k$ 为保留3位小数的浮点型数据格式;

[0016] 步骤2:将测量温度值 $Z_k$ 输入扩展卡尔曼滤波器8,计算出后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ ,计算所述后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ 与参考温度值 $T_{ref}$ 的差值 $T_{off}$ ;

[0017] 步骤3:将上述差值 $T_{off}$ 作为PID控制器9的输入,通过PI算法计算出系统控制量 $U_k$ ,作为PID控制器9的输出值;

[0018] 步骤4:将输出值 $U_k$ 通过SPI串口电路传输至模数/数模转换模块4,将输出值 $U_k$ 通过数模转换输出低压直流电信号;

[0019] 所述模数/数模转换模块4还与高频逆变电路模块6相连,模数/数模转换模块4输出低压直流电信号至高频逆变电路模块6,所述高频逆变电路模块6将低压直流电信号转换为高频低压交流电信号;

[0020] 所述高频逆变电路模块6与功率放大电路模块5相连,所述功率放大电路模块5接收高频逆变电路模块6输出的高频低压交流电信号,并对其进行功率放大后,输出加热信号;

[0021] 所述功率放大电路模块5与加热测温电路模块2相连,所述加热测温电路模块2接收功率放大电路模块5的加热信号,加热测温电路2模块控制加热线圈加热或降温。

[0022] 本发明的第二个方面涉及基于卡尔曼滤波的原子气室温控方法,包括如下步骤:

[0023] 步骤S1:首先设置参考温度值 $T_{ref}=140^{\circ}\text{C}$ ,再通过测得k时刻的电压值数据,换算得到测量温度值 $Z_k$ ;确定温控扩展卡尔曼滤波器8的预测模型的非线性表达式为:

$$[0024] \quad T_k = f(T_{k-1}, U_{k-1}, W_{k-1}) \quad (1)$$

$$[0025] \quad Z_k = h(T_k, V_k) \quad (2)$$

[0026] 其中,(1)式为k时刻原子气室1的温度与输入电流的非线性表达式,(2)式为k时刻原子气室1的温度的测量公式; $T_k$ 为k时刻原子气室1的温度的预测真实值, $Z_k$ 为k时刻原子气室1的温度的测量真实值; $U_{k-1}$ 为k-1时刻的控制向量, $W_{k-1}$ 为k-1时刻的过程噪声, $V_k$ 为k时刻的测量噪声,两者都符合一元高斯分布:

$$[0027] \quad P(W) \sim N(0, Q), P(V) \sim N(0, R)$$

[0028] 上述过程噪声和测量噪声在实际工作中,期望都为0,符合正态分布; $Q$ 为估计的过程噪声的协方差矩阵, $R$ 为测量的高斯噪声的协方差矩阵,其值通过加热测温电路模块2的噪声具体决定;

[0029] 步骤S2:确定温控扩展卡尔曼滤波器8预测模型的先验估计温度值和测量温度值公式为:

$$[0030] \quad \tilde{T}_k^- = f(\tilde{T}_{k-1}, U_{k-1}, 0) \quad (3)$$

$$[0031] \quad \tilde{Z}_k = h(\tilde{T}_k, 0) \quad (4)$$

[0032] 其中 $\tilde{T}_k^-$ 是k时刻原子气室1的温度的先验估计温度值, $\tilde{Z}_k$ 为k时刻先验测量值;

[0033] 步骤S3:更新预测模型的先验状态误差协方差矩阵 $P_k^-$ ,其更新公式为:

$$[0034] \quad P_k^- = AP_{k-1}A^T + W_k Q W_k^T \quad (5)$$

[0035] 其中,A为雅可比矩阵。

[0036] 步骤S4:更新温控扩展卡尔曼滤波器8的卡尔曼增益 $K_k$ ,其更新公式为:

$$[0037] \quad K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + V_k R V_k^T)^{-1} \quad (6)$$

[0038] 其中,H为转换矩阵;

[0039] 步骤S5:通过信息融合的方法,校正最优的后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ ,后验校正公式为:

$$[0040] \quad \tilde{T}_k = \tilde{T}_k^- + K_k (\tilde{Z}_k - h(\tilde{T}_k^-)) \quad (7)$$

[0041] 步骤S6:更新后验状态误差协方差矩阵预测值 $P_k$ ,更新公式为:

$$[0042] \quad P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (8)$$

[0043] 步骤S7:设置上述最优的后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ 作为k时刻的气室外部温度,计算与上述参考温度值 $T_{ref}$ 的温度偏移量 $T_{off} = T_{ref} - \tilde{T}_k$ ,作为PID控制器9的输入量;一般PID控制的计算方程为:

$$[0044] \quad u(t) = K_p [T_{off} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{dT_{off}}{dt}] \quad (9)$$

[0045] 其中, $K_p$ 为PID控制器9的比例系数, $T_i$ 为PID控制器9的积分时间, $T_d$ 为PID控制器9的微分时间, $u(t)$ 为输入 $T_{off}$ 经过PID控制器9进行线性组合构成的系统控制量;上述公式无法通过编程在FPGA内编程实现,对其进行离散化处理,将积分部分换算为求和公式,公式为:

$$[0046] \quad U_k = K_p T_{off} + K_i \sum_{j=0}^k T_{off} + K_d [T_{off}(k) - T_{off}(k-1)] \quad (10)$$

[0047] 上述 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为积分和微分控制系数, $U_k$ 为离散化的系统控制量,比例控制 $K_p$ 可以快速响应系统误差,减少稳态误差,若 $K_p$ 过大,系统会不稳定;积分控制 $K_i$ 是温度偏移量进行不断叠加,用以消除稳态误差,若 $K_i$ 过大,会使系统超调,导致系统震荡;微分控制 $K_d$ 用以

减小系统超调量,克服系统震荡,但微分项对高频噪音非常敏感,所以在本发明中不启用微分控制, $K_d=0$ ;

[0048] 步骤S8:通过编程实现系统控制量 $U_k$ 的从主控模块数字化输出,经数模转换、高频逆变、功率放大后转变为加热信号至加热测温模块,改变加热功率实现气室内温度变化,再经过温度测量后更新 $k+1$ 时刻的测量温度值 $Z_{k+1}$ ,重复扩展卡尔曼滤波和PID控制,直至原子气室1温度到达参考温度值并稳定。

[0049] 进一步,在完成一次完整的原子气室的温控加热后,获得新的数学模型,对扩展卡尔曼滤波器8的预测模型进行更新。

[0050] 本发明的工作原理:通过测温传感器采集原子气室在当前时刻的温度信号,并信号放大、模数转换转换为数字信号,通过扩展卡尔曼滤波器分析得到最优温度估计值,与预设要达到的原子气室目标温度值做差值,输入PID控制器,经过PI控制输出系统控制值信号,再通过数模转换转换为模拟信号看,经过高频逆变电路转换为高频交流电,做功率放大后输出至加热电阻条,调节加热功率,进一步控制气室温度。

[0051] 本发明的优点是:本发明结构简明,经济实用,克服了以往原子气室加热不均,PID温度控制存在不稳定,存在剩余误差和控制滞后的问题,通过结合扩展卡尔曼滤波与PID控制器,解决了热电偶因阻值与温度非线性关系导致的测量误差。

## 附图说明

[0052] 图1为发明提供的用于原子气室的加热温控系统结构示意图;

[0053] 图2是本发明的加热测温电路模块2的矩形双层线圈结构;

[0054] 图3为发明提供的扩展卡尔曼滤波器的实现方法框图;

[0055] 图4为发明提供的基于扩展卡尔曼滤波的PID控制算法流程图;

## 具体实施方式

[0056] 下面将结合附图对本发明专利的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0057] 在本发明的描述中,需要说明的是,如出现术语“中心”、“上”、“下”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。此外,如出现术语“第一”、“第二”、“第三”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0058] 在本发明的描述中,需要说明的是,除非另有明确的规定和限定,如出现术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0059] 实施例一

[0060] 参见图1,本实施例涉及一种基于卡尔曼滤波的原子气室温控装置,其中硬件模块包括:原子气室1、加热测温电路模块2、信号放大电路3、模数/数模转换模块4、功率放大电路模块5、高频逆变电路模块6、主控模块7;

[0061] 所述加热测温电路模块2与原子气室1的表面连接。优选的,将加热测温电路模块2通过导热硅胶固定于原子气室1的外表面;

[0062] 所述加热测温电路模块2的加热电阻条选用纯铜材质,测温传感器选用T型贴片式热电偶,热电偶热端通过环氧树脂粘接剂固定于FPC软板上;

[0063] 参见图2,所述加热测温电路模块2为矩形双层线圈结构,热测温电路模块包括加热电阻条和贴片式热电偶;加热电阻条通过MEMS技术打印在柔性印刷电路板(FPC)柔性基底基片上,双层线圈上下层导线之间通过的电流平行反向,产生磁场相互抵消,进一步抑制线圈加热引入的三维空间磁场;

[0064] 上述T型贴片式热电偶的输出电压与温度的在0°C至200°C区间内的塞贝克系数为38.74 $\mu$ V/°C,在实际工作中需要对电压/温度的斜率进行测量标定;

[0065] 所述T型贴片式热电偶的输出电压通过信号放大电路3进行放大,放大倍率可通过有源器件调节;

[0066] 所述模数/数模转换模块4设置采样频率为1samples/s,一个采样周期为1秒,将数据存储在EEPROM中,每个周期结束后将所有数据发送至主控模块7处理;优选的,所述模数/数模转换模块4的AD转换芯片为AD7606;

[0067] 所述主控模块7包括主控芯片及其电源电路、晶振电路、复位电路、PCIe接口电路、SPI串口电路;所述主控芯片为FPGA芯片XC7A100T;

[0068] 所述高频逆变电路模块6的作用是将模数/数模转换模块4输出的低压直流电转换为高频交流电,降低加热线圈带来的磁场,保证原子气室1内的拉莫尔进动不受磁场的干扰;

[0069] 所述的扩展卡尔曼滤波器8和PID控制器9,算法程序都通过在主控模块7的芯片里通过编程实现;

[0070] 实施例二

[0071] 本实施例涉及使用实施例一的基于卡尔曼滤波的原子气室温控装置的基于卡尔曼滤波的原子气室温控方法,参见图3,扩展卡尔曼滤波器8对原子气室1温度进行最优估计,改进PID控制器9,包括以下步骤:

[0072] 步骤S1:首先设置参考温度值 $T_{ref}=140^{\circ}\text{C}$ ,再通过测得k时刻的电压值数据,换算得到测量温度值 $Z_k$ ;确定温控扩展卡尔曼滤波器8的预测模型的非线性表达式为:

$$[0073] \quad T_k = f(T_{k-1}, U_{k-1}, W_{k-1}) \quad (1)$$

$$[0074] \quad Z_k = h(T_k, V_k) \quad (2)$$

[0075] 其中,(1)式为k时刻原子气室1的温度与输入电流的非线性表达式,(2)式为k时刻原子气室1的温度的测量公式; $T_k$ 为k时刻原子气室1的温度的预测真实值, $Z_k$ 为k时刻原子气室1的温度的测量真实值; $U_{k-1}$ 为k-1时刻的控制向量, $W_{k-1}$ 为k-1时刻的过程噪声, $V_k$ 为k时刻的测量噪声,两者都符合一元高斯分布:

$$[0076] \quad P(W) \sim N(0, Q), P(V) \sim N(0, R)$$

[0077] 上述过程噪声和测量噪声在实际工作中,期望都为0,符合正态分布;Q为估计的过

程噪声的协方差矩阵,R为测量的高斯噪声的协方差矩阵,其值通过加热测温电路模块2的噪声具体决定;

[0078] 步骤S2:确定温控扩展卡尔曼滤波器8预测模型的先验估计温度值和测量温度值公式为:

$$[0079] \quad \tilde{T}_k^- = f(\tilde{T}_{k-1}, U_{k-1}, 0) \quad (3)$$

$$[0080] \quad \tilde{Z}_k = h(T_k, 0) \quad (4)$$

[0081] 其中 $\tilde{T}_k^-$ 是k时刻原子气室1的温度的先验估计温度值, $\tilde{Z}_k$ 为k时刻先验测量值;

[0082] 步骤S3:更新预测模型的先验状态误差协方差矩阵 $P_k^-$ ,其更新公式为:

$$[0083] \quad P_k^- = AP_{k-1}A^T + W_k Q W_k^T \quad (5)$$

[0084] 其中,A为雅可比矩阵。

[0085] 步骤S4:更新温控扩展卡尔曼滤波器8的卡尔曼增益 $K_k$ ,其更新公式为:

$$[0086] \quad K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + V_k R V_k^T)^{-1} \quad (6)$$

[0087] 其中,H为转换矩阵;

[0088] 步骤S5:通过信息融合的方法,校正最优的后验估计温度值

[0089]  $\tilde{T}_k$ ,后验校正公式为:

$$[0090] \quad \tilde{T}_k = \tilde{T}_k^- + K_k (\tilde{Z}_k - h(\tilde{T}_k^-)) \quad (7)$$

[0091] 步骤S6:更新后验状态误差协方差矩阵预测值 $P_k$ ,更新公式为:

$$[0092] \quad P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (8)$$

[0093] 步骤S7:参见图4,设置上述最优的后验估计温度值 $\tilde{T}_k$ 作为k时刻的气室外部温度,

计算与上述参考温度值 $T_{ref}$ 的温度偏移量 $T_{off} = T_{ref} - \tilde{T}_k$ ,作为PID控制器9的输入量;一般PID控制的计算方程为:

$$[0094] \quad u(t) = K_p [T_{off} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{dT_{off}}{dt}] \quad (9)$$

[0095] 其中, $K_p$ 为PID控制器9的比例系数, $T_i$ 为PID控制器9的积分时间, $T_d$ 为PID控制器9的微分时间, $u(t)$ 为输入 $T_{off}$ 经过PID控制器9进行线性组合构成的系统控制量;上述公式无法通过编程在FPGA内编程实现,对其进行离散化处理,将积分部分换算为求和公式,公式为:

$$[0096] \quad U_k = K_p T_{off} + K_i \sum_{j=0}^k T_{off} + K_d [T_{off}(k) - T_{off}(k-1)] \quad (10)$$

[0097] 上述 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为积分和微分控制系数, $U_k$ 为离散化的系统控制量,比例控制 $K_p$ 可以快速响应系统误差,减少稳态误差,若 $K_p$ 过大,系统会不稳定;积分控制 $K_i$ 是温度偏移量进行不断叠加,用以消除稳态误差,若 $K_i$ 过大,会使系统超调,导致系统震荡;微分控制 $K_d$ 用以

减小系统超调量,克服系统震荡,但微分项对高频噪音非常敏感,所以在本发明中不启用微分控制, $K_d=0$ ;

[0098] 步骤S8:通过编程实现系统控制量 $U_k$ 的从主控模块数字化输出,经数模转换、高频逆变、功率放大后转变为加热信号至加热测温模块,改变加热功率实现气室内温度变化,再经过温度测量后更新 $k+1$ 时刻的测量温度值 $Z_{k+1}$ ,重复扩展卡尔曼滤波和PID控制,直至原子气室1温度到达参考温度值并稳定;

[0099] 进一步,在完成一次完整的原子气室的温控加热后,获得新的数学模型,对扩展卡尔曼滤波器8的预测模型进行更新;

[0100] 本说明书实施例所述的内容仅仅是对发明构思的实现形式的列举,本发明的保护范围不应当被视为仅限于实施例所陈述的具体形式,本发明的保护范围也及于本领域技术人员根据本发明构思所能够想到的等同技术手段。

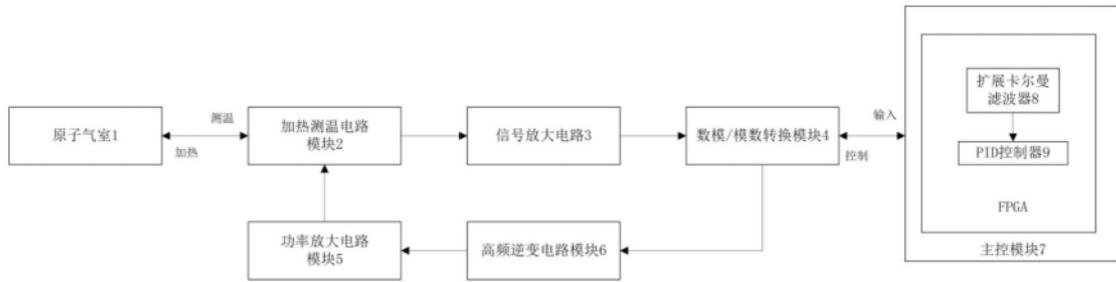


图1

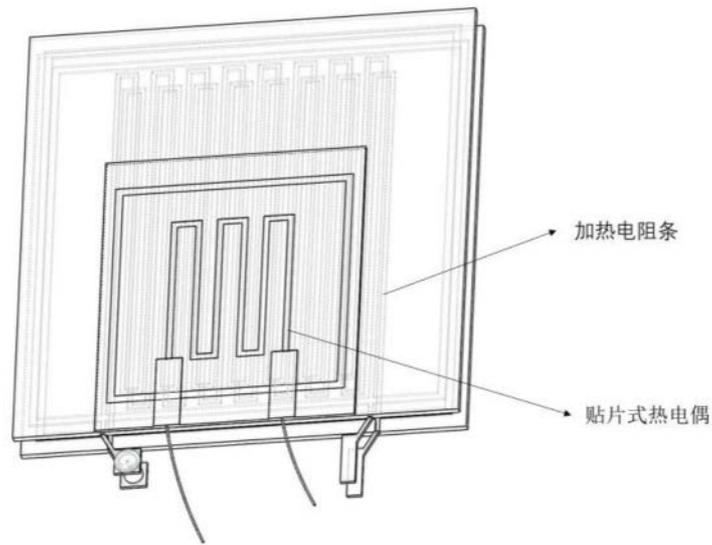


图2

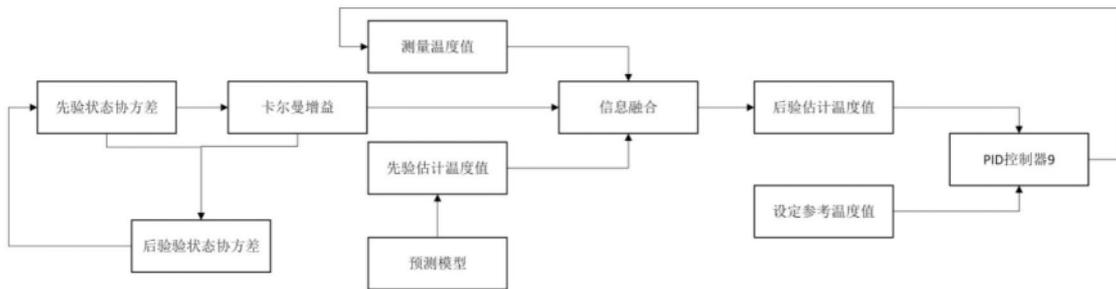


图3

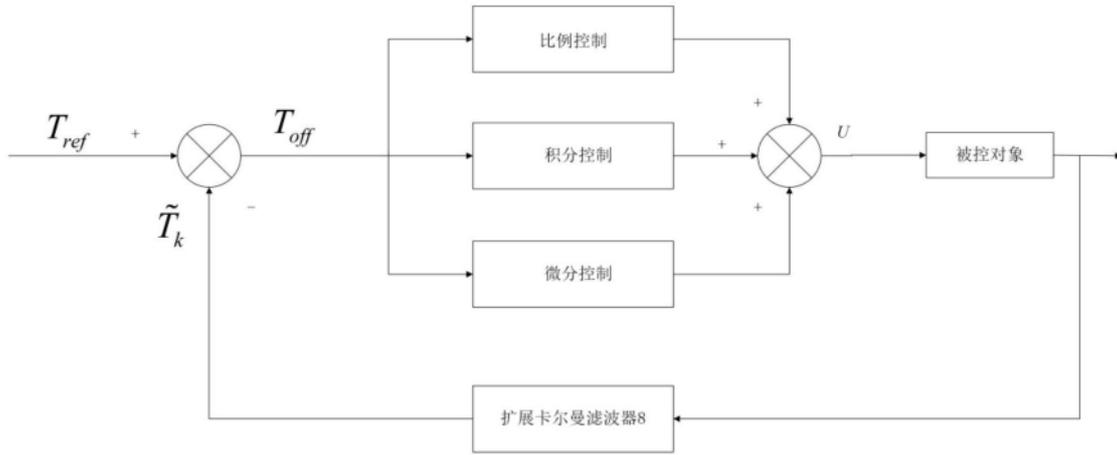


图4