

2008 年 第一届“数学中国杯” 数学建模网络挑战赛

题 目 A 题 自适应温控系统

关 键 词 PI 控制 模糊 PI 控制 史密斯预估控制 灰色预测 神经网络
预测

摘 要：

温度控制系统往往具有大延时、慢时变、非线性等特性，因此给一般的控制算法带来了一定的困难。为了使控制达到很好的效果，所采用的算法必须要具有强的自适应性，和鲁棒性。本文就从实际的工程算法设计出发，首先对此系统用机理建模和试验建模的方法进行了分析，并且根据这些特性采用和设计了不同的算法，最后就一般性的温度控制系统特性，假设了此冷库模型。此冷库体系模型为一阶惯性带延时的模型结构，并且选择了常规的 PI 控制、基于灰色改进的（最小二乘法）预测与 PI 控制结合，和史密斯预估控制算法对这三种控制系统来进行仿真性能测试。

在模拟仿真中，假设延时为 4 秒：常规的 PI 控制基本能满足控制要求，能在 40 秒（我们模拟时间以秒为单位，最大长度为 200 秒），十倍的延时的时间内从 230K 达到了 180K 稳定，但温度仍然因为冷库体系微扰而有所细微的波动，难以达到很高精度的控制。然后我们在后备制冷系统的反馈部分加入了灰色（最小二乘法）预测系统，以使得系统对简单的 PI 控制无法克服的温度波动问题进行改善，最后在模拟结果中我们看到了控制性能的明显改善，但时间内从 230K 达到了 180K 稳定仍然消耗了 40 秒，系统冷却速度没有明显提高。

参赛队号 1084

所选题目 A

参赛密码 _____
(由组委会填写)

报名号 #1084

正文

问题重述：在很多的方面需要对温度进行实时监控。如对一个保存材料的冷库进行监控时，温度超过规定的范围时，常规制冷系统失效，而备用制冷系统就会开始工作，使得冷库中的温度达到规定值。在制冷过程中，为了使得温度能在更短的时间里恢复到规定范围内，且尽量地减少温度的波动，这些都有关于冷库的具体环境以及存放物品的多少。由于事先并不知道备用制冷系统以多大的功率可以似的温度恢复到规定，加上如果以过大的功率运转时，温度传感器的读数降到规定值时，而实际的冷库整体温度就已经过低了。因此需要设定一个算法，使计算机能自动地调节备用制冷系统的功率，即设定的算法必须能自动地适应不同的情况，尽快使冷库的温度恢复到规定值，并且尽量减少温度的波动。

问题假设：

- 1 正常情况下在主制冷系统调节下，仓库处于热平衡，这样的系统是不适合“超调”的情况（温度在制冷过程中低于目标温度）。因为我们研究的体系（仓库）是没有加热系统的，并且跟外界几乎处于绝热状态，一旦低于 180k，无法通过加热或者跟外界热传递来回归到目标温度。
- 2 由一些突发情况造成温度大幅度变化是小概率事件，即外部不发生温度的剧烈变化，通过仓库跟外界传热所产生的影响只是微扰；
- 3 模拟的时间以秒为单位；
- 4 采样时间是离散的；
- 5 最后平衡时的温度在允许的误差范围内即可（因为系统的温度差是客观存在的，但由于制冷器附近的温度会比传感器附近的低，因而只要功率调整合理并且传感器附近的温度比目标温度稍高，这样条件下停止后备制冷器，最终冷冻库的温度自动平衡后温度会在目标温度范围内）
- 6 假设温度梯度是均匀的，即单位距离内的温差是一致的；
- 7 假设冷库中两端（制冷器和传感器）的温度差成与后备制冷器输出功率成正比；

解题方法基本介绍

由于温度控制系统是一个大的延时系统，在实际的工程应用采用常规的 PID 控制很难到达很好的控制效果，随着智能控制的发展，对于大延时系统一般采用模糊算法与预测相结合的方法来控制，而且在实际的应用中也取得了巨大的成功。

因为制冷系统启动后，冷库中的温度下降需要一个时间，在这段时间里温度有可能下降到比规定值低的多一个温度，于是在制冷系统工作的时候需要对温度做一个预测，防止上述所说的情况的发生。首先对制冷过程中的温度进行预测，以此来弥补温度达到平衡所带来的延时的影响。根据此系统的特性，所设计的控制方框图如下：

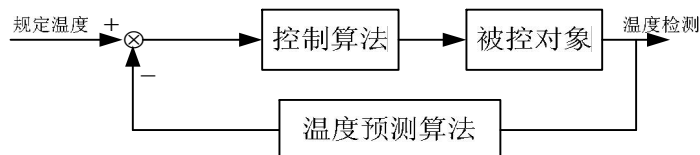


图 1 系统控制框图

报名号 #1084

结合实际的工程问题来解决此问题, 温度传感器所采样得到的温度数据必须经过一定的处理来送计算机运算, 并输出控制量。

温度预测算法

1) 最小二乘法温度预测

在上述的假设前提下, 冷冻库的两端温差(冷冻器和传感器两端)是跟冷冻器的功率成正比的; 而我们采取了一种“逼近”策略, 使冷冻库两端的温差逐渐减少(同时冷冻器的功率也逐渐减少, 这可以通过PID控制来实现), 最终传感器所显示的温度变化曲线就是一条按指数减少曲线, 并且向180K靠近。如下图:

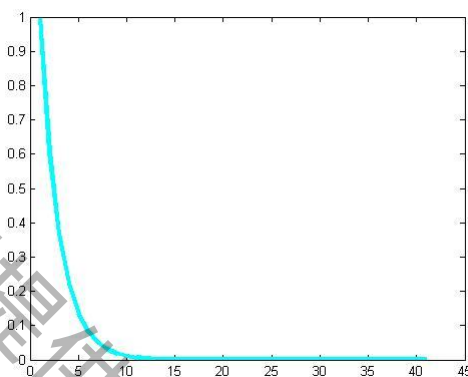


图2 最小二乘法温度拟合曲线示意图

因此我们可以对此进行最小二乘拟合, 每次对超前的时间点 t_{n+k} 进行预测。这样, 我们就能根据过去的历史时间序列 (t_1, t_2, \dots, t_n) 及其对应的历史温度序列 (T_1, T_2, \dots, T_n) 来预测预定的时间间隔系统值 (t_{n+k}, T_{n+k}) 。当预测值落入我们预定的停止后备制冷系统的温度范围, 停止后备制冷系统。以此来弥补系统热传递所造成的时间滞后。

2) 基于神经网络的温度预测^[1]

2.1) 神经网络预测控制理论

神经网络预测控制器是使用非线性神经网络模型来预测未来模型性能。控制器计算控制输入, 而控制输入在未来一段指定的时间内将最优化模型性能。模型预测第一步是要建立神经网络模型(系统辨识); 第二步是使用控制器来预测未来神经网络性能。

① 系统辨识

模型预测的第一步就是训练神经网络未来表示网络的动态机制。模型输出与神经网络输出之间的预测误差, 用来作为神经网络的训练信号。该过程如下图:

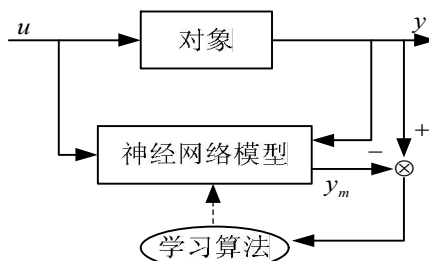


图3 训练神经网络

报名号 #1084

神经网络模型利用当前输入和当前输出预测神经网络未来输出值。神经网络模型结构如下图所示。该网络可以采用批量在线训练。

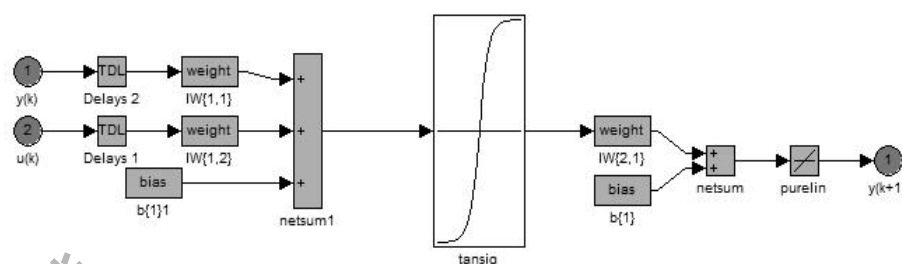


图 4 神经网络模型结构

② 模型预测

模型预测方法是水平后退的方法,神经网络预测在指定时间内预测模型响应。预测使用数字最优化程序来确定控制信号,通过最优化如下的性能准则函数,即:

$$J = \sum_{j=1}^{N_2} [y_r(k+j) - y_m(k+j)]^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} [u(k+j-1) - u(k+j-2)]^2$$

式中, N_2 为预测时域长度, N_u 为控制时域长度; $u(t)$ 为控制信号; y_r 为期望响应; y_m 为神经网络模型响应; ρ 为控制量加权系数。

下图为模型预测控制的过程。控制器由神经网络模型和最优化方块组成,最优化方块确定 u (通过最小化 J), 最优 u 值作为神经网络模型的输入。控制器方块可用 Simulink 实现。

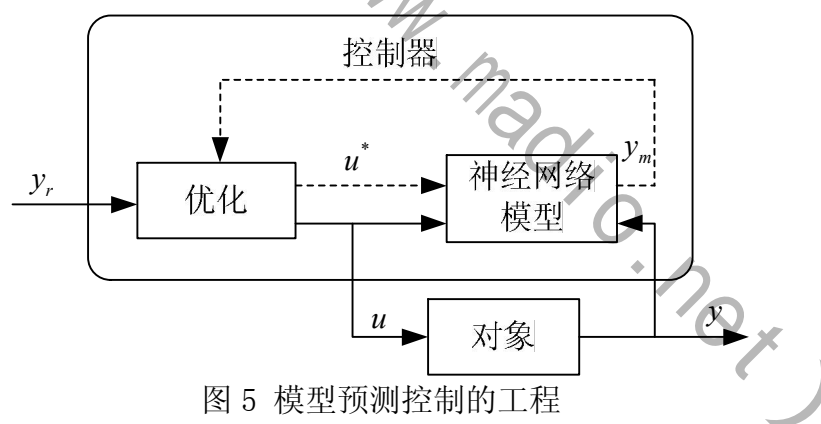


图 5 模型预测控制的工程

3) 灰色预测算法^[2]

灰色系统是指既含有已知信息、又含未知或非确定知信息的系统,也称为贫信息系统。在灰色系统理论中,称抽象系统的逆过程(由系统的行为确立模型)为灰色模型,亦称 GM。典型的灰色模型是 GM(1, 1) 模型。GM(1, 1) 模型设原始序列为:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$$

这是一组信息不完全的灰色量,具有很大的随机性,将其进行生成处理,以提供更多的有用信息。选用累加生成,则 m 次累加生成的结果为:

$$x^{(m)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(m-1)}(i) \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

报名号 #1084

在累加生成时一般用一次累加生成就能使数据呈现一定的规律,若规律不够,可以增加累加生成的次数。

在数据生成的基础上,用线形动态模型对生成数据拟合和逼近,其形式为:

$$\frac{dx^{(x)}}{d} + ax^{(m)} = b$$

微分方程的解为:

$$x^{(m)}(t+1) = [x^{(m-1)}(1) - b/a]e^{-at} + b/a$$

微分方程的序数可用最小二乘法求出,其向量形式为:

$$\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T \gamma_N$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -0.5[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & , & 1 \\ -0.5[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & , & 1 \\ \cdots & , & \vdots \\ -0.5[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & , & 1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma_N = [x^{(m-1)}(2), x^{(m-1)}(3), \cdots, x^{(m-1)}(n)]^T$$

按照 $\hat{x}^{(m-1)}(t+1) = \hat{x}^{(m)}(t+1) - \hat{x}^{(m)}(t)$

累减生成还原,即 $\hat{x}^{(0)}(t+1) = [x^{(0)}(1) - b/a](1 - e^{-at})$

通过计算以后得到预测数据。

由于采用上式时,需要用递推最小二乘或其他方法对参数进行在线辨识,因而计算复杂,运算量大,容易因干扰及环境和被控对象的时变性造成较大的辨识误差,甚至使预测完全失去意义。因此,这里提出以灰色累加生成数进行预测的简便计算方法。

考虑速度变化是个连续的变化,可以把灰色原理的累加生成再进行二次泰勒的展开式:

$$\hat{x}^{(1)}(k+m) = x^{(1)}(k) + \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{T_s}(t_{k+m} - t_k) + \frac{1}{2T_s^2}[x^{(1)}(k) - 2x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k-2)](t_{k+m} - t_k)^2 \quad \text{其中}$$

k 为第 k 个采样点, m 为预测的步长, $\hat{x}^{(1)}(k+m)$ 为在 $k+m$ 采样点的预测值, T_s 为采样周期(一般比系统所采用的采样周期大), $x^{(1)}(k)$ 为第 t_k 时刻的值, t_k 为第 k 采样点所对应的的时间。通过对原始数据进行还原,可以得出:

$$\hat{x}^{(0)}(k+m) = (m+1/2)x^{(1)}(k) - 2mx^{(1)}(k-1) + (m-1/2)x^{(1)}(k-2)$$

控制算法

根据实际的应用背景介绍以下自适应算法:模糊 PID 控制算法和 Smith 预估器控制。

1) 模糊 PID 算法设计^[7]

模糊控制器与 PID 相结合的方式有很多,在此采用参数自调整结合方式。由于 PID 参数的整定,就是根据被控系统特性和从而使达到较好的自适应性和控制品质。

① 模糊控制器结构:

所希望的控制性能要求决定 K_p , K_i 两个参数。由于一般工业控制系统中,要获得较为精确的数学模型很困难,因此采用模糊参数自调整来实时在线调整 K_p , K_i 两个参数,模糊 PI 控制器结构如下图 6 所示。以误差 E 和误差的变化率 EC 作为模糊控制器的输入,根据 PI 参数 K_p 和 K_i 与 E 和 EC 之间的模糊关系,在运行中不断地检测 E 和 EC ,

报名号 #1084

根据模糊控制原理把 Δk_p , Δk_i 作为输出量, 从而对 2 个参数进行在线修改, 以满足不同的 E 和 EC 对 PI 控制参数的不同要求。达到在线对 PI 参数进行修改, 从而使系统具有良好的动、静态性能。

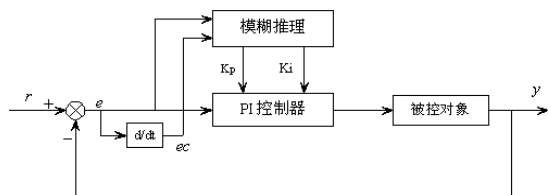


图 6 模糊 PI 控制器结构

采用参数自整定 PI 控制器的控制算式为：

$$u(t) = k_p e(k) + k_i \sum e(j)$$

其中： $k_p = k_{p0} + \Delta k_p$, $k_i = k_{i0} + \Delta k_i$, $e(k)$ 为偏差, $\sum e(j)$ 为偏差和

在实际中, 连续域的范围是 $X = [x_L, x_H]$, x_L 表示低限值, x_H 表示高限值。量化因子 ke, kec 可表示为 $k = \frac{2n}{x_H - x_L}$, 对于 X 论域的清晰量 a, 对应离散论域中的元素 b

为： $b = k(a - \frac{x_H - x_L}{2})$ 。通过这样的量化之后, $X = [x_L, x_H]$ 就转化成离散论域

^[8] $N = \{-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$ 。

②模糊控制器的规则库

Fuzzy Logic Control 的设计是将速度误差 e、误差变化量 e_c , 根据所假设模型相应的模糊变量 E 的论域量变化在 $[-60, 0]$, 共为 4 个等级, 取如下 4 个语言变量 {NB, NM, NS, ZO}。E_c 的论域量变化在 $[-3, 3]$, 共为 3 个等级, 取如下 5 个语言变量 {NB, ZO, PB}。在 MATLAB 命令窗口键入 Fuzzy 命令, 打开 FIS Editor, 进入 Membership Function Editor 编辑输入 (e, e_c), 输出变量 (k_p, k_i) 的论域和隶属函数。

控制规则是对专家的理论知识和实践经验的总结。此处共有 25 条模糊规则如下：

1. If (e is NB) and (ec is NB) then (kp is PB) (1)
2. If (e is NB) and (ec is ZO) then (kp is PM) (1)
3. If (e is NB) and (ec is PB) then (kp is PM) (1)
4. If (e is NM) and (ec is NB) then (kp is PB) (1)
5. If (e is NM) and (ec is ZO) then (kp is PS) (1)
-
12. If (e is ZO) and (ec is PB) then (kp is PS) (1)

根据此设计的规则生成的模糊控制的 GUI 图为：

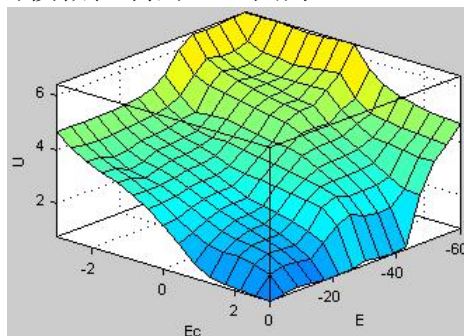


图 7 模糊控制规则输入输出图

2) 史密斯预估器控制算法：

报名号 #1084

史密斯预估器控制的基本思想是, 预先估计出过程在基本扰动下的动态特性, 然后由预估器进行补偿控制, 力图使被延时了 τ 的被调量提前反映到调节器中, 并使之动作, 以此来减小超调量与加速调节过程^[4]。

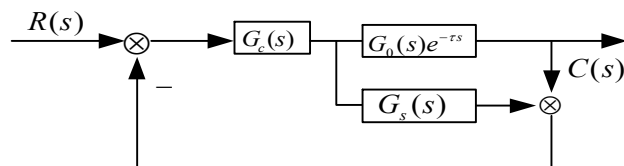


图 8 史密斯预估器控制原理图

图中, $G_0(s)e^{-\tau s}$ ——广义对象的数学模型, 其中 $G_0(s)$ 为不包含时间延迟 τ 的对象模型;

$G_c(s)$ ——系统的一般 PID 调节器;

$G_s(s)$ ——史密斯预估补偿器;

若史密斯预估补偿器的传递函数为:

$$G_s(s) = G_0(1 - e^{-\tau s})$$

则上图中系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0}$$

与上式对应的动态结构图如下图所示:

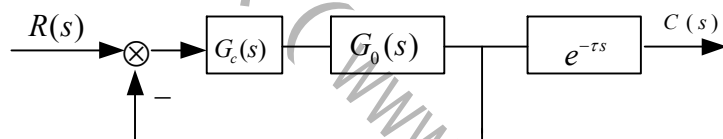


图 9 史密斯预估器控制简化原理图

解题部分

模型描述

根据题目提供的信息和我们所作的假设, 冷库整个热力学系统模型可以由以下动力学方程来描述:

$$\frac{dQ_{\text{系统}}}{dt} = \frac{dQ_{\text{热交换}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{主制冷系统}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{微扰}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{突变}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{备用制冷系统}}}{dt}$$

其中, $\frac{dQ_{\text{系统}}}{dt}$ ——为整个冷库的热量变化;

$\frac{dQ_{\text{热交换}}}{dt}$ ——为冷库跟外界的热交换, 因为冷库不是百分百绝热的, 与外界环境存在微量的热交换;

$\frac{dQ_{\text{主制冷系统}}}{dt}$ ——为主制冷系统为冷库抽走的热量;

$\frac{dQ_{\text{微扰}}}{dt}$ ——为因为环境的细微变化而造成的冷库体系的热量的微小变换;

报名号 #1084

$\frac{dQ_{\text{突变}}}{dt}$ ——为一些突然因素（如更换货物等）所造成的系统的温度忽然升高的热量交换因素；

$\frac{dQ_{\text{备用制冷系统}}}{dt}$ ——备用制冷为系统启动而造成的热量变化；

我们的目标是尽量使得系统的温度保持在 180K，也就是说系统尽量在这个温度达到热平衡，方程左边 $\frac{dQ_{\text{系统}}}{dt} = 0$ 。

而正常情况下 $\frac{dQ_{\text{热交换}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{主制冷系统}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{微扰}}}{dt}$ 这三项的加和是几乎接近于 0 的系统，基本处于平衡状态，温度为 180K（剩下两项 $\frac{dQ_{\text{突变}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{备用制冷系统}}}{dt}$ 在这种情况下均为 0，因为没有突然的温度变化而且备用系统也没有启动）。当系统出现突变（ $\frac{dQ_{\text{突变}}}{dt}$ 不为零的时候），后备制冷系统随之启动使得 $\frac{dQ_{\text{突变}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{备用制冷系统}}}{dt}$ 这两项的积分和最终接近 0，使得整个冷冻库处于热力学平衡，并且温度处于 180K。

对系统的动态方程进行拉普拉斯变换得到以下结果：
在平衡状态时由能量守恒得到如下的方程：

$$\frac{dQ_{\text{突变}}}{dt} = -\frac{dQ_{\text{备用制冷系统}}}{dt}$$

$$\text{即： } -p\Delta t = cm\Delta T \quad (1)$$

将 (1) 拉普拉斯变换得： $sD(s) - T(0) = -P(s)/(cm)$

$$\text{化简可得： } D(s) = \frac{-P(s)/(cm) + T(0)}{s}$$

其中 p 为输出功率；

Δt 为时间微元；

c 为加入的物质的热容；

ΔT 为在时间微元里温度的变化

T 拉普拉斯变换后为 $D(s)$ ；

p 拉普拉斯变换后为 $P(s)$ ；

这样，我们就可以近似的得出了冷库系统为一个传递函数为一阶的延时模型。因而在工程实现上，我们用传递函数 $G_0(s) = \frac{K}{Bs+1} e^{-\tau s}$ 来近似系统模型（后面的测试结果也表明，这跟我们对系统的假设是一致的）。

仿真试验

为了验证以前的算法对大延时系统的有效性，采用了 MATLAB/Simulink 进行了仿真试验。并且我们经过筛选，选择了简单的 PI 控制、灰色（最小二乘）预测反馈与 PI 控制结合和模糊 PI 控制这三种控制系统来进行性能测试，以供实际应用时选择。

使用简单的 PI 控制器对系统进行控制的一阶仿真模块结构如下：

报名号 #1084

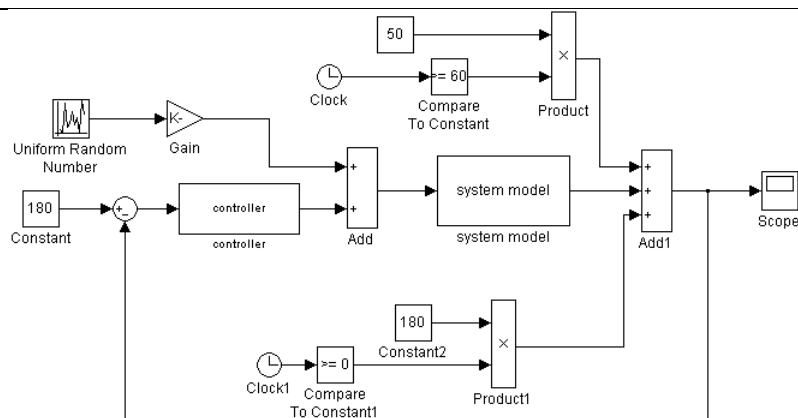


图 10 Matlab 仿真模块构造图

说明：其中常数 Constant: 180 是我们系统的目标温度；Uniform Random Number 为系统提供一个随机扰动，扰动水平由增益（Gain）大小来控制（初步测试调节为 0 没微扰，和有 1.8K 的微扰的两种情况来对比，结合假设：这是一个温度扰动为正的系
统，即正常情况下系统存在 0~1.8K 的温度波动）；controller 为常规的 PI 控制器，其方程为 $P = 0.07e + 0.03 \int edt$ ；system model 为冷库系统，假设此系统带有延时的一阶传递函数为 $G_0(s) = \frac{2}{4s+1}e^{-4s}$ ，延时时间为 4 秒；系统始状态由下面常数（constant2）来决定，这里假设系统在 $t=0$ 的时候处于 180K 的稳定状态；然后，在 $t=60$ 秒的时候，系统处于 230K，此时开始检验后备制冷系统（controller）的性能。

没有微扰和存在微扰的情况下仿真的结果如下图

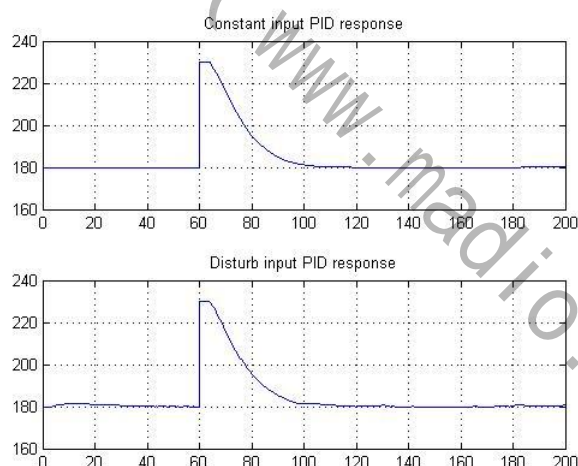


图 11 常规 PI 控制器仿真结果

可以看出即使存在 4 秒的延时的情况下,系统无论在没有微扰,还是在有微扰的情况下,都能很快的回到系统的稳定值(约四十秒)。简单的 PI 控制器基本满足要求。

使用灰色（最小二法）预测改善延时、微扰等对制冷系统的影响：

我们在系统反馈部分加入了一个基于灰色（最小二乘法）改进预测模块，希望藉此来改善延时、微扰水平等对制冷系统的性能影响。

系统仿真模块结构如下:

报名号 #1084

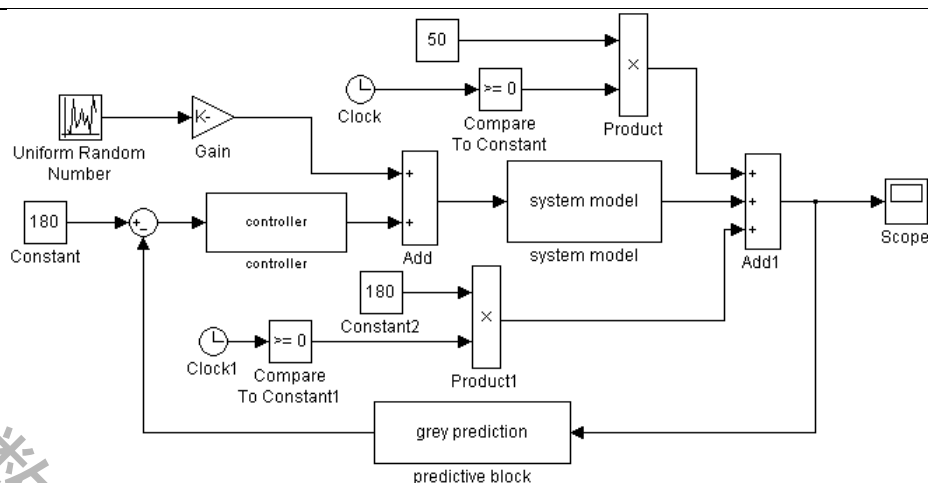


图 12 加入预测模块的 PI 系统模拟结构图

在常规的PI控制器的基础上,我们在反馈部分加入了预测模块 (predictive block)。其原理是,我们根据此刻采样和过去历史的两个(一共三个)温度值(采样间隔 $\Delta t=0.002s$),采用最小二乘法进行二阶拟合($y=ax^2+bx+c$),将对往后 $M \times \Delta t$ 的时刻($M=30$)的温度预测值来超前反馈给PI控制器。但由于 $M \times \Delta t$ 的值不能设置过大,否则将引起系统的不稳定,因而无法补偿过多的系统延时,但对于微扰的温度波动,我们这种方法能够很好的克服。最终结果是,灰色(最小二乘)预测模块很好的克服了系统的微扰,然而还无法补偿延时对系统的影响。系统从 250K 回归到 180K 的时间花费变化不大,仍是 40 秒左右。系统性能模拟结果如下图:

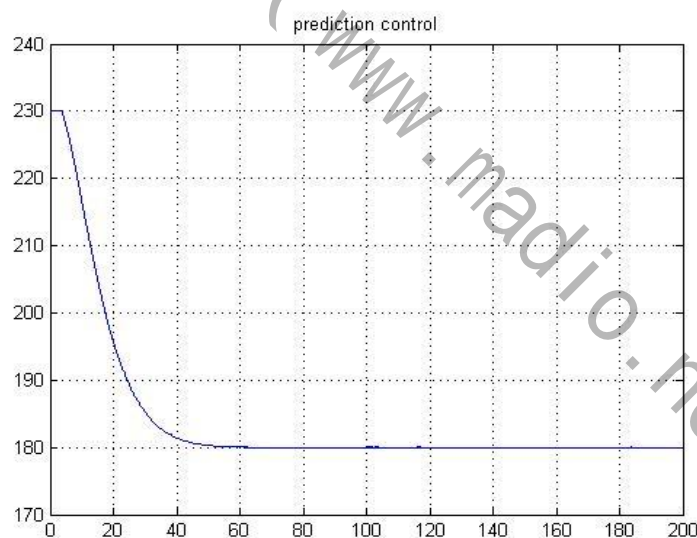


图 13 预测 PI 仿真结果

说明:系统温度在开始时就设定为 230K,然后在 40 秒内回归到 180K 的稳定状态,而且最大程度的减少了系统的微扰波动。

使用史密斯控制算法对系统的延时进行有效控制:

通过对假定的模型,构建史密斯预估传递函数,并且通过简化,可以将此系统的传递函数化为: $\Phi(s) = \frac{0.14s + 0.06}{4s^2 + 1.14s + 0.06} e^{-4s}$ 通过对预估器的仿真可以看出,其极大改善了

报名号 #1084

滞后系统控制性能，但是缺点是要能建立起系统的精确数学模型。

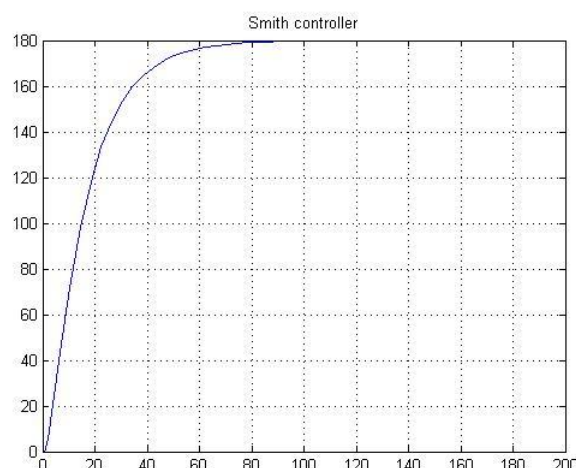


图 14 史密斯控制器性能

使用模糊 PI 算法的 MATLAB 仿真结构图如下：

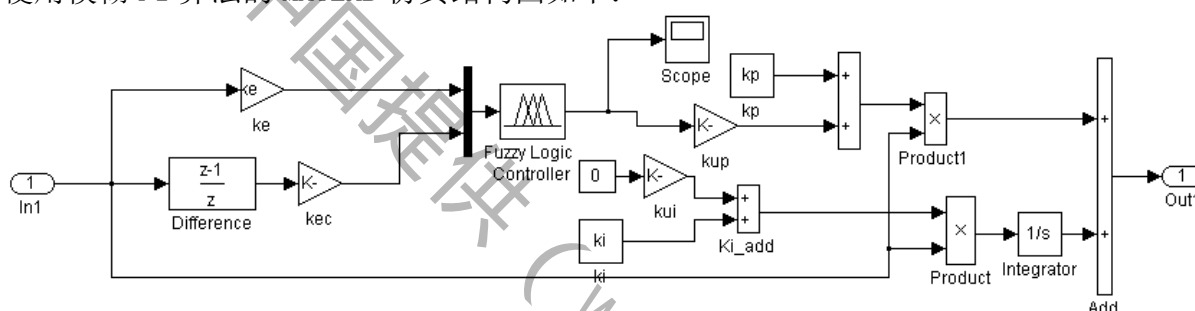


图 15 模糊 PI 算法仿真结构图

由于参数和模糊规则需要调整, 这阶段没有调到很好结果, 希望在下一阶段把此算法得到更好的优化, 使得得到好的控制效果。

模型评价与改进

根据仿真的结果, 在 4 秒的系统延时的条件下, 我们通过简单的 PI 控制、PI 控制与预测器结合、史密斯控制算法这三种方法逐步实现了对系统稳定性控制, 以克服延时使系统最快达到目标稳定状态, 并且作了性能参照。仿真的效果还是令人满意的, 而且系统的波动比较小, 精度很高。这也说明了 PI 控制与预测器结合、史密斯控制算法都是可取的实际应用方法。

由于题目没有具体给出冷库的参数, 我们也只能停留在对系统进行一种近似的经验估计, 包括仿真时间设置、延时等参数都还停留在假设阶段, 离实际应用还很远。根据具体的冷库, 其延时的差异、温度分布等特点都有具体差异, 我们还无法系统的给出合理的参数调节方案。这是这篇论文还未做到位的地方。

最后, 因为实际的冷库是一个巨大体系, 其延时可能是巨大的, 这也给我们的后备制冷控制系统提出了一个暂时还无法估计的挑战。同时也因为这阶段时间有限, 我们未能对模糊控制、神经网络控制等方法进行测试和讨论, 今后模型的改进方向可能会是向着模糊控制、神经网络控制等高智能方向改进。同时, 冷库配置有空气对流系统也是一个有效减少系统延时的现实方法, 这也可能为控制系统减轻不稳定因素, 使得控制更加高效准确, 降低成本。所以, 我们希望能在第二阶段继续对这个问题进行思考改进。

报名号 #1084

参考文献

- 【1】李国勇编著. 智能控制及其 MATLAB 实现. 北京：电子工业出版社, 2005
- 【2】郭一凡. 灰预测控制器的 MATLAB 研究[D]. 华中科技大学硕士学位论文, 2004
- 【3】张利萍. 灰色理论在智能控制中的应用[D]. 北京化工大学硕士学位论文, 2005.
- 【4】黄忠霖编著. 控制系统 MATLAB 计算及仿真. 北京：国防工业出版社, 2001
- 【5】侯志林编著. 过程控制与自动化仪表. 北京：机械工业出版社
- 【6】李士勇编著. 模糊控制·神经控制和智能控制论. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社, 1998
- 【7】陶永华编著. 新型 PID 控制及其应用. 北京：机械工业出版社, 2002
- 【8】易继锴编著. 智能控制技术. 北京：北京工业大学出版社, 2003
- 【9】熊和金,徐华中. 灰色控制[M]. 北京：国防工业出版社,2005: 1-2,88-97
- 【10】翁思义编著. 自动控制原理. 北京：中国电力出版社, 2001
- 【11】Richard C. Dorf 编著. 现代控制系统（第八版）. 北京：高等教育出版社, 2001