

基于单片机的自适应温度控制系统

叶 丹, 齐国生, 洪强宁, 李小舟

(清华大学 精密仪器及机械学系 北京 100084)

摘 要: 人体生物组织活性检测要求较高的温度准确度和稳定度, 针对该应用设计了一个温度控制器, 用现代控制理论分析了该系统, 建立了系统的数学模型, 并推导出其状态空间方程。从而提出了先使温度快速稳定在目标温度附近, 然后通过自调整参数达到目标温度的自适应温度控制方案。仿真计算的结果证明了方案的可行性和对环境温度变化的适应能力。最后以 PIC16C72A 单片机为核心, 具体实现了一个使用该控制方案的温度控制系统。实验结果表明该方案可以取得满意的准确度和稳定度。

关键词: 单片机; 温度控制; 自适应控制

中图分类号: TP13; TP202+.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-978X(2002)03-0027-04

Adaptive temperature control system based on single chip processor

YE Dan, QI Guo-sheng, HONG Qiang-ning, LI Xiao-zhou

(Dept of Precision Instr and Mech, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A temperature control system meeting the required temperature accuracy and stability in examining the activity of living human tissue is designed and analyzed, its system mathematical model is established and its state space equations are deduced. A adaptive temperature control method for stabilizing the temperature quickly around the required temperature first, and then reaching the required temperature by automatically adjusting the parameters is given. The simulation result shows that this method is feasible and is adaptive to environment temperature fluctuation. Then an instance, with its result of implementing this method with a PIC16C72CA single chip processor is provided. The result of the experiment shows that this method can achieve satisfactory accuracy and stability.

Key words: single chip processor; temperature control; adaptive control

0 引言

在医疗仪器中, 对人体生物组织的活性测量必须与人的体温相同的恒温环境中进行。并且对于温度的准确度和稳定性均有较高的要求。然而由于医疗仪器本身的构造, 要求温度控制器的体积较小。且需要恒温的空间保温条件不太好, 易受环境温度影响。市售的温度控制器既无法在这样的空间中使用, 也无法达到所要求的准确度和稳定度。

针对这种应用设计了一个温度控制器, 对系统进行了分析, 建立了数学模型, 推导出该系统的状态空间方程, 从而提出了一种自适应温度控制方案, 并给出了该方案的仿真计算结果。又以 PIC16C72A 单片机为核心实现了该控制方案。这种温度控制器可以在保温条件并不太好的较小的空间中进行恒温控制。

1 硬件系统

硬件系统结构框图如图 1 所示。

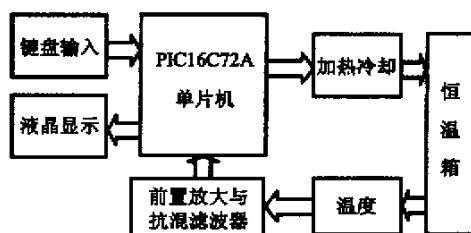


图 1 硬件系统结构框图

Fig 1 Block diagram of hardware structure

温度传感器测量恒温箱内的温度, 产生的信号经前置放大与抗混滤波器后输出为反馈信号。由单片机对该信号进行采样, 经过数字信号处理后, 一方面通过液晶显示恒温箱内的温度, 另一方面通过温

度控制算法形成控制信号,驱动加热冷却单元将热风送入恒温箱,使恒温箱内温度稳定在用户从键盘输入的目标温度上。加热冷却单元和恒温箱组成系统的被控对象。温度传感器和前置放大与抗混滤波器组成反馈环节。

所使用的单片机为 PIC16C72A,自带 5 路 A/D 转换部件、2K×14 位字长的 EPROM 程序存储器和 128 字节的数据存储器^[1]。

温度传感器采用 BTS1-2 电流型温度传感器,其在 0℃ 时输出电流 273 μA,温度系数为 (1±0.01)μA/℃。

2 系统的数学模型与控制方案

2.1 数学模型

设加热冷却单元、恒温箱、温度传感器、前置放大与抗混滤波器的传递函数分别为 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 。由实验可知,均可假设为一阶惯性环节,则

$$\begin{cases} G_1 = \frac{T_u(s)}{u(s)} = \frac{K_1}{t_1 s + 1} \\ G_2 = \frac{T(t)}{T_u(s)} = \frac{K_2}{t_2 s + 1} \\ G_3 = \frac{u_1(s)}{T(s)} = \frac{K_3}{t_3 s + 1} \\ G_4 = \frac{u_2(s)}{T_u(s)} = \frac{K_4}{t_4 s + 1} \end{cases},$$

式中 $u(t)$ 为单片机输出的控制信号; $T_u(t)$ 为送入恒温箱的热风的温度; $T(t)$ 为恒温箱内的温度; $u_1(t)$ 为温度传感器测量恒温箱内的温度产生的信号; $u_2(t)$ 为 $u_1(t)$ 经前置放大与抗混滤波器后输出的信号; $u(s)$ 、 $T_u(s)$ 、 $T(s)$ 、 $u_1(s)$ 、 $u_2(s)$ 为以上各物理量的拉普拉斯变换; s 为拉氏变换中的复频率; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为比例系数; t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 为时间常数。

$$\text{这里取} \begin{cases} K_1 = 1 \\ K_2 = 2 \\ K_3 = 1 \\ K_4 = 1 \end{cases}, \text{由测定得} \begin{cases} t_1 = 30\text{s} \\ t_2 = 180\text{s} \\ t_3 = 14.6\text{s} \\ t_4 = 0.1\text{s} \end{cases}.$$

故状态空间方程为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{T}_u(t) \\ \dot{T}(t) \\ \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{1}{30} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{180} & -\frac{1}{180} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{14.6} & -\frac{1}{14.6} & 0 \\ 0 & 0 & 10 & -10 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_u(t) \\ T(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{30} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) \\ = Ax + Bu,$$

式中 $T_u(t)$ 、 $T(t)$ 、 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 分别为系统状态变量 $T_u(t)$ 、 $T(t)$ 、 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 对时间的一阶导数。 A 为系数矩阵; B 为输入矩阵。 $x = [T_u(t) T(t) u_1(t) u_2(t)]$ 为状态向量。 \dot{x} 为状态向量对时间的一阶导数。 $u = u(t)$ 为输入向量。

初始条件和约束为

$$\begin{cases} T_u(t_0) = T_{\min} \\ T(t_0) = T_{\min} \\ u_1(t_0) = T_{\min} \\ u_2(t_0) = T_{\min} \\ T_{\min} \leq T_u(t) \leq T_{\max} \end{cases},$$

式中 t_0 为初始时刻; T_{\max} 、 T_{\min} 分别为加热冷却单元输出热风的最高和最低温度,由环境温度和最大加热功率共同决定。

输出方程为

$$y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_u(t) \\ T(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = Cx,$$

式中 y 为输出向量; $y_1(t)$ 为恒温箱内的温度; $y_2(t)$ 为输出的反馈信号; C 为输出矩阵。

指标函数为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\dot{T}(t) - T_d)^2 dt, \quad (1)$$

其中 t_f 为计算指标函数的终止时刻; T_d 为用户输入的目标温度。

由现代控制理论可知对于有形如

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

的状态空间方程和输出方程的系统而言,其完全能控的充要条件是状态能控阵满秩;其完全能观的充要条件是状态能观阵满秩^[2]。

本系统中 $\text{rank}[B \ AB \ A^2B \ A^3B] = 4$,

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix} = 4$$

因此本系统完全能控能观。

2.2 控制方案

一种常用的控制方案是在目标温度区间内设置多个温度段^[3]。控制信号 u 与测量值 u_2 的关系为

$$u = \begin{cases} T_{\max}, & u_2 \leq u_2^* - \frac{\Delta}{2} \\ T_{\max} - \frac{u_2 + \frac{\Delta}{2} - u_2^*}{\Delta} (T_{\max} - T_{\min}), & u_2^* - \frac{\Delta}{2} \leq u_2 \leq u_2^* + \frac{\Delta}{2} \\ T_{\min}, & u_2 \geq u_2^* + \frac{\Delta}{2} \end{cases}$$

式中 u_2^* 是目标温度 T_d 所对应的测量值。 Δ 是设置的比例区间范围。

但是因为控制信号 u 只能取最大或最小,为了使加热单元输出最高和最低温度之间的热风,控制信号必须以固态继电器周波控制法给出^[4]。即控制信号为脉宽调制波,由脉宽控制每一周期加热脉冲的数量。这种方法不能直接实现输出某一特定温度的热风,但可以保证热风温度之间的相对大小。

由 u_2 估计 T ,将状态空间方程离散化得

$$T_k = [(1 + \frac{t_3 + t_4}{T_s} + \frac{t_3 t_4}{T_s^2})u_{2,k} - (\frac{2t_3 t_4}{T_s^2} + \frac{t_3 + t_4}{T_s})u_{2,k-1} + (\frac{t_3 t_4}{T_s^2})u_{2,k-2}] (K_3 K_4), \quad (2)$$

式中 T_s 为采样周期; $u_{2,k}$ 为采样所得的第 k 个 u_2 值。由估计得的 T_k 与目标温度 T_d 比较,确定控制信号,可进一步提高控制准确度。

当 Δ 值较大时,温度可以较快稳定,但是最终温度受加热的最高温度和冷却的最低温度影响较大,最终温度不准。当 Δ 值较小时,最终温度较准确,但过渡过程较长,且当 Δ 值过小时,将出现较大幅度的振荡。因此可通过对系统的数学模型进行仿真,依据式(1)计算目标函数 J 的值,选择使 J 值最小的最佳 Δ 值。

为了利用 Δ 较大时系统温度的稳定性又同时使最终温度较准确,引入一个修正参数 δ 。修正后的控制方案如下:

$$u = \begin{cases} T_{\max}, & T_k \leq (T_d + \delta) - \frac{\Delta}{2} \\ T_{\max} - \frac{T_k + \frac{\Delta}{2} - (T_d + \delta)}{\Delta} (T_{\max} - T_{\min}), & (T_d + \delta) - \frac{\Delta}{2} < T_k < (T_d + \delta) + \frac{\Delta}{2} \\ T_{\min}, & T_k \geq (T_d + \delta) + \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (3)$$

通过在安装系统时调整参数 δ 可使系统的最终

温度较准确。但当环境温度变化时,固定的 δ 就不适用了。这时可通过测量稳态温度与目标温度之差,缓慢自动调节 δ 值实现自适应温度控制。

该控制方案的系统方块图如图2所示。

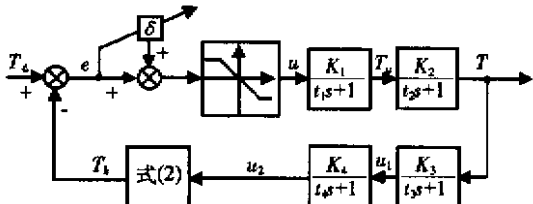


图2 系统方块图

Fig 2 System block diagram

2.3 控制方案仿真

应用如上所诉控制方案,对系统的控制过程进行仿真。假设目标温度为 37°C ,前20min环境温度为 20°C ,后20min环境温度突然降为 10°C 。则输出热风的最高和最低温度为

$$\begin{aligned} 0 \sim 20 \text{ min} : T_{\max} &= 373 \text{ K}, T_{\min} = 293 \text{ K}; \\ 20 \sim 40 \text{ min} : T_{\max} &= 363 \text{ K}, T_{\min} = 283 \text{ K}. \end{aligned}$$

系统参数如下:

- (1)由式(2)估计所得的变量 T_k ,依据式(3)确定控制信号 u 。其中 $T_d = 310$;
- (2)选用 $\Delta = 5$;
- (3)选择初始 $\delta = -1.6$;
- (4)每1s更新一次控制信号。当系统振幅小于 1°C 时,估算温度误差,自动调整 δ 值。

图3显示了仿真的结果。

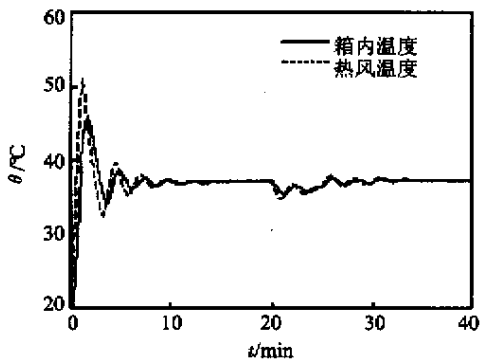


图3 恒温控制的仿真结果

Fig 3 Simulation result of thermostatical control

从仿真结果看,过渡过程约为10min。达到稳态状态后,系统温度在 $(37 \pm 0.2)^{\circ}\text{C}$ 之内,取得了满意的准确度和稳定性。当10min后环境温度突然降低,使系统稳态温度漂移时,系统自动调整参数,使系统稳态温度回到 37°C ,保证了系统的准确度。

3 实际控制结果示例

以下为该温度控制器的一次实际控制的温度测量结果。初始环境温度为 24°C ,控制的目标温度为 37°C 。

恒温控制的前 10 min 的过渡过程如图 4 所示。

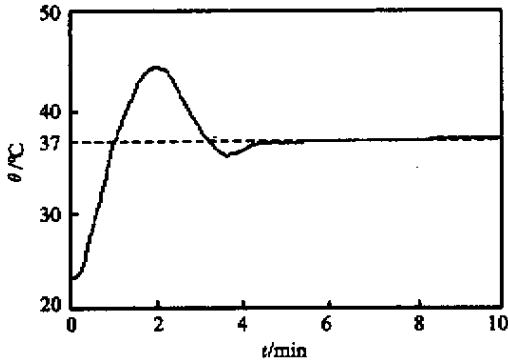


图 4 恒温控制前 10min 内的过渡过程

Fig 4 Transient in the first 10 minutes of the thermostatical control

实际的过渡过程时间约为 6 min ,且只有一次震荡 ,与仿真计算的结果大体吻合 ,快速性与稳定性更好。恒温箱内 3 h 的温度记录如图 5 所示。

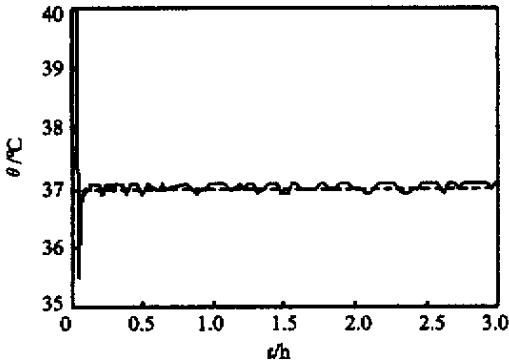


图 5 恒温箱内 3h 的温度记录

Fig 5 Temperature record over 3 hours in the calorstat

在温度稳定后温度计指示的波动幅度未超过 0.2 ℃。由实际测量结果可知该温度控制器的控制结果可以满足。

4 结 论

建立的数学模型和所得的状态空间方程 ,较好地反应了系统的实际情况 ,可以进行仿真计算 ,作为选择控制方案和参数的依据。应用文中提出的自适应温度控制方案实现的温度控制系统 ,可以使系统的温度波动在 ± 0.2 ℃ 之内 ,准确度和稳定性都可以令人满意 ,并且受环境温度的影响比一般的系统要小。这种温度控制器可以在保温条件并不太好、易受环境温度影响的条件下进行恒温控制。实际产品已被同方电子公司的医疗仪器所采用。

参考文献 :

[1] 龚振中 .PIC 系列单片机原理和程序设计[M].北京 :北京航空航天大学出版社 ,1998 .166 - 204 .
[2] 王孝武 .现代控制理论基础[M].北京 :机械工业出版社 ,1998 .71 - 114 .
[3] Moon U C , Lee K Y . Temperature control of glass melting furnace with fuzzy logic and conventional PI contro[A]. Proceedings of the American Control Conference 4 Jun 28 - Jun 30 2000[C]. Piscataway NJ : IEEE ,2000 .2720 - 2724 .
[4] Gawthrop P J ,Nomikos P E ,Smith L S P S .Adaptive temperature control of industrial processes :a comparative study[J]. IEE Proceedings D ,1990 ,137(3) :137 - 144 .

作者简介 :

叶 丹(1977 -) ,男 ,浙江永嘉人 ,清华大学精仪系精密仪器及机械专业硕士研究生 ,主要研究方向为信号处理、自动控制。

(上接第 26 页)

表 1 辐射敏感度试验

Tab 1 Radiation sensitivity test

频率(MHz)	标准极限场强(V/mm)	试验结果(V)
50	30	0.999
70	30	0.999
100	30	0.999
150	30	0.999
200	30	1.000
250	30	0.999
300	30	1.000
350	30	0.999
400	30	0.999
450	30	1.000

6 结束语

采用以上设计后 ,光电传感器既没有干扰

80C51 单片机实验系统 ,也没有干扰 F-40M 型 PLC。它在断路器严酷环境中能稳定地工作。经过电磁兼容设计 ,光电传感器可靠性及质量显著提高。

参考文献 :

[1] 黄继昌 ,徐巧鱼 ,张海贵 ,等 .传感器工作原理及应用实例[M].北京 :人民邮电出版社 ,1998 .160 .
[2] 雷玉堂 ,王庆有 .光电检测技术[M].北京 :中国计量出版社 ,1997 .236 - 238 .
[3] 白同云 ,吕晓德 .电磁兼容设计[M].北京 :北京邮电大学出版社 ,2001 .55 - 60 .
[4] 张国忠 ,赵家贵 .检测技术[M].北京 :中国计量出版社 ,1998 .378 - 382 .

作者简介 :

梁 轶(1965 -) ,男 ,湖南涟源人 ,工程师 ,1987 年毕业于昆明理工大学仪表专业 ,获工学学士学位 ,在读硕士研究生 ,主要从事传感器、智能控制的教学与研究。