恒温水浴温度复合智能控制方法与实现

杨艳华，汪鲁才，艾琼龙，林海军
（湖南师范大学工学院，湖南长沙 410081）

摘要：恒温水浴对温度性能要求严格，为此将改进型 Bang-Bang 控制、自组织模糊控制与 PID 控制有机结合，并结合 DSP 的 PWM 控制方式，设计并实现了一种水浴温度复合智能控制方法：当目标温度与水浴实际温度误差很大时，系统采用改进型 Bang-Bang 控制以减少温度上升时间；当温度误差较小时，系统采用自组织模糊控制以减少温度超调量；当误差小于自组织模糊控制的静态误差时，系统采用 PID 控制以减少温度的稳态误差。同时给出了恒温水浴温度采集与控制的硬件设计。实验表明：采用这种方法的恒温水浴温升时间短、超调小等优点，达到了稳态误差 0.05 ℃的控制要求。

关键词：恒温水浴；温度；复合智能控制；DSP；PWM 控制
中图分类号：TP273　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002－1841(2010)08－0085－04

Control Method and Implementation of Complex Intelligent Temperature Control for Constant Temperature Water Tank

YANG Yan-hua, WANG Lu-cai, AI Qiong-long, LIN Hai-jun
(**Polytechnic College, Hunan Normal University, Changsha 410081, China**)

Abstract: A complex intelligent control method with DSP's PWM control for water tank temperature was designed, which combined improved Bang-Bang control, self-organizing fuzzy control with PID control, and it is implemented by DSP. When the temperature error between the desired temperature and actual temperature in the water tank is large, improved Bang-Bang control is employed to rapidly reduce the rise time. When the temperature error is small, self-organizing fuzzy control is applied to decrease the system overshoot. When the temperature error is smaller, i. e., it is less than the static error of self-organizing fuzzy control, the PID control is used. All experimental results show that the overshoot of constant temperature water tank with this proposed method is small and its rise time is short, while its steady-state error is not more than 0.05 ℃.

Key words: constant temperature water tank; temperature; complex intelligent control; DSP; PWM control

0 引言

恒温水浴广泛应用于食品、化工、医药、石油等领域。如用于某些化纤原料黏度测量的重力式毛细管黏度仪，其水浴温度稳定度应小于 0.1 ℃[1]。Bang-Bang 控制是一种基于时间最优的控制方法，它能实现使系统从一个初始状态转到另一状态所经历的过渡时间最短，但其超调量大，稳定精度差[2]。PID 控制因原理简单而广泛用于过程控制等，但单纯的 PID 控制存在调节时间长、控制效率低等缺点[3]。模糊控制具有响应较快、鲁棒性较好、对系统数学模型依赖性小等优点[4-5]，因而在温度控制中得到了广泛应用。一般来说，考虑实现的简易性和快速性，模糊控制器普遍采用二维结构形式，以系统误差和误差变化率为输入变量，具有类似常规 PD 控制器的作用，因而无法消除系统静差，即存在一个控制死区[5]。为此，文中将改进型 Bang-Bang 控制、自组织模糊控制和 PID 控制有机融合，结合 DSP 的 PWM 方式，构建了一种复合智能控制方法。当目标温度与水浴实际温度误差大时，系统采用改进型 Bang-Bang 控制以减少温度上升时间；当目标温度与水浴实际温度误差较小时，系统采用自组织模糊控制以减少温度超调；当目标温度与水浴实际温度误差处于模糊控制的控制死区时（即温度误差小于等于模糊控制的静态误差），系统采用 PID 控制以减少自组织模糊控制的静态误差。以 TMS320LF2407 为水浴温度采集器和控制器，实现了水浴温度的高精度控制。

1 恒温水浴工作原理

图 1 为恒温水浴的原理框图。系统以 DSP 为控制和信息处理核心，主要完成水浴温度采集和控制、水浴外部环境温度采集、加热与制冷工作方式判决、LCD 显示、目标温度输入、与 PC 机通信、水浴装置自检和故障自诊断等功能。

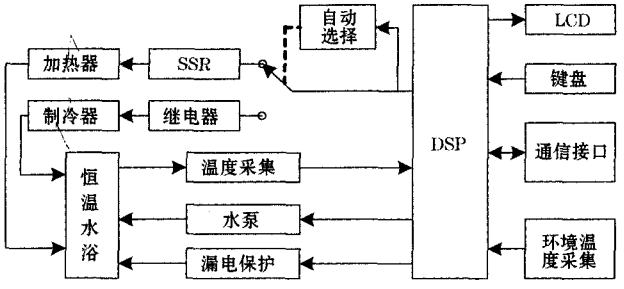

图 1　恒温水浴原理框图

DSP 根据设定的水浴目标温度和外部环境温度的差值进行加热与制冷工作方式判决，当目标温度高于外部环境温度时，DSP 通过固态继电器 SSR 控制加热装置工作；当水浴目标温度低于水浴外部环境温度时，DSP 通过继电器控制制冷装置

收稿日期：2009－12－20　**收修改稿日期**：2010－05－10

工作。水泵搅动水浴中的水,使水浴各处的温度相同。系统设有水浴漏电保护电路,当检测到水浴漏电时,保护电路切断电源并报警。

2 水浴温度的复合智能控制模型

复合智能控制将改进的 Bang-Bang 控制、自组织模糊控制和 PID 控制有机融合,以获得快速、稳定、超调量小的控制效果。以水浴目标温度 T_d、水浴实际温度 T 与水浴目标温度 T_d 的偏差 $e(e=T_d-T)$、温度偏差变化率 $\Delta e(\Delta e=e(n-1)-e(n))$、以及水浴目标温度 T_d 与水浴外部环境温度 T_c 的差值 $\Delta T_{dc}(\Delta T_{dc}=T_d-T_c)$ 为决策变量。当 $\Delta T_{dc}\geqslant 0$ 时,加热器工作,反之,制冷器工作。如果 $\Delta T_{dc}\geqslant 0$(即加热工作方式),当温度误差 e 大时,系统采用改进型 Bang-Bang 控制 $f_1(n)$;当温度误差 e 较小时,采用自组织模糊控制 $f_2(n)$;当温度误差小于自组织模糊控制器的静态误差时,系统采用 PID 控制 $f_3(n)$,则有

$$f_{heat}=\begin{cases}f_1(n) & |e|>M_1\\ f_2(n) & M_\varepsilon\leqslant|e|\leqslant M_1\\ f_3(n) & |e|<M_\varepsilon\end{cases}\tag{1}$$

式中:M_1、M_ε 为温度误差阈值。

$$f_1(n)=\begin{cases}P & e\geqslant M_0\\ P/2 & M_1<e<M_0\\ 0 & e<-M_1\end{cases}\tag{2}$$

$$f_2(n)=\begin{cases}[\alpha E+(1-\alpha)EC]\cdot L & M_\varepsilon\leqslant|e|\leqslant M_1\\ f_c(\Delta T_{ic},S,\beta) & (|e|<M_\varepsilon)\cap(|e(n-1)|\geqslant M_\varepsilon)\end{cases}\tag{3}$$

$$f_3(n)=f_3(n-1)+\{k_p\Delta e+k_ie(n)+k_d[e(n)-2e(n-1)+e(n-2)]\}\cdot L,|e|<M_\varepsilon\tag{4}$$

式(2)为 Bang-Bang 控制,P 为加热器全功率加热方式,$P/2$ 为加热器半功率加热方式,M_1、M_0 为温度误差阈值。

式(3)的自组织模糊控制以 E、EC 为决策变量,E 为温度偏差的模糊输入变量;EC 为偏差变化率的模糊输入变量,($E=\mathrm{INT}[\mathrm{Round}(e\cdot k_e)]$,$EC=\mathrm{INT}[\mathrm{Round}(\Delta e\cdot k_c)]$,INT 表示取整,Round 表示四舍五入,$k_e$、$k_c$ 分别为温度偏差 e、温度偏差变化率 Δe 的模糊化因子);L 为模糊控制步长;α 为自组织模糊控制的调节因子,与 e、Δe 有关,其可利用模糊决策的方法确定,α 的取值范围为 0~1。以 E、EC 为输入,采用常用的二维结构形式和 if…and…then…的控制规则,并考虑到控制器超调小和响应速度快的要求以及水的热惯性大等因素,α 模糊判决规则如表 1 所示。其中,{-3,-2,-1,0,1,2,3}分别表示{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}七级,当 $E=\mathrm{INT}[\mathrm{Round}(e\cdot k_e)]$,$EC=\mathrm{INT}[\mathrm{Round}(\Delta e\cdot k_c)]$ 的值小于 -3 或大于 3 时,E、EC 分别取 -3 或 3;F_α 为模糊判决输出,则 α 为

$$\alpha=\frac{F_\alpha}{\max(F_\alpha)}=\frac{F_\alpha}{3}\tag{5}$$

模糊判决规则表存入 DSP 中,通过查表,可得到相应的模糊判决输出。通过表 1 可知,自组织模糊控制的调节因子 α 随温度偏差 e 和温度偏差变化率 Δe 的改变而自适应调节,即水浴温度控制阶段不同,α 值不同,从而自适应改变温度的控制量,达到响应速度快、超调小的控制目的。

表 1 调节因子 α 的模糊判决规则表

EC	F_α						
	$E=3$	$E=2$	$E=1$	$E=0$	$E=-1$	$E=-2$	$E=-3$
3	+3	+3	+2	+1	0	0	0
2	+3	+2	+2	+1	0	0	0
1	+3	+2	+1	0	0	0	0
0	+3	+1	+1	0	0	0	0
-1	+2	+1	0	0	0	0	0
-2	+2	+1	0	0	0	0	0
-3	+1	0	0	0	0	0	0

式(3)中的控制修正量 $f_c(\Delta T_{ic},S,\beta)$ 是 ΔT_{ic}、S、α 的函数,ΔT_{ic} 为水浴实际温度与水浴外部环境温度的偏差,S 为水浴槽的散热面积,β 为水浴槽的散热系数。

式(4)为 PID 控制。$f_3(n-1)$ 为上一次的控制量;K_p、K_i、K_d 分别为比例增益系数、积分系数和微分系数,适当调整 K_p、K_i、K_d,可实现控制量 $f_3(n)$ 的在线修改[6];L 为模糊控制步长。从式(3)、式(4)可知,$f_c(\Delta T_{ic},S,\beta)$ 实际上为 PID 控制提供了初值,即 $f_3(0)=f_c(\Delta T_{ic},S,\beta)$。

当水浴目标温度低于实际温度时,由于采用压缩机制冷不能频繁启动,无法通过制冷量控制,实现温度下降过程中的水浴温度准确控制,因此采用不间断制冷降温与加热升温相结合的方式,通过精确控制加热器的加热量,从而实现水浴温度的准确控制。式(1)~式(4)即为复合智能温度控制模型。文中建立的复合智能控制算法仅对加热器进行控制。

3 水浴温度复合智能控制的实现

3.1 基于 DSP 的水浴温度采集

恒温水浴通过 DSP 芯片 TMS320LF2407 配合温度传感器、信号调理电路和 A/D 转换电路等,完成水浴温度的实时采集。图 2 为水浴温度采集与控制电路原理图。图中,DSP(即 U1)、集成运放 U2、A/D 转换器 U3、集成运放 U4、温度传感器 PT100 等外围器件组成水浴温度采集电路。其中 PT100、R_1、R_2、R_0、W_1 等组成三线制桥式测温电路,以避免导线电阻 r_0、r_1、r_2 的影响;W_1 用于标定温度采集电路,即当温度为 0 ℃时,调节 W_1 使其满足 $W_1=900\ \Omega$,此时电桥输出电压为 0 V. 集成运放 U2A、U2B(OPA2227)等构成一个双端输入双端输出的仪用放大器,具有低噪声、高输入阻抗、低输出阻抗等特点;同时,R_5、R_6、R_7、C_1、C_2 还构成两个一阶低通滤波器,滤除干扰信号。AD7798 为 16 位 A/D 转换器,采用差分输入方式,与信号调理电路构成了 0~50 ℃范围内分辨率为 0.01 ℃的温度采集电路。AD7798 具有 3 总线型的 SPI 接口,能够很方便地与 DSP 实现通信。集成运放 U4、R_{11}、R_{12} 等组成 A/D 转换器的基准电压发生器,其输出 $V_{REF}=2.5$ V.

3.1.1 信号调理电路电压放大倍数的确定

参见图 2,由 U2A、U2B 等外围电路组成的信号调理电路的电压放大倍数为[7]

$$A_u=1+\frac{R_5+R_7}{R_6}\tag{6}$$

由 PT100 的 T - R_T 的关系[8](即温度与电阻的关系)可知,当温度变化 0.01 ℃时,R_T 的变化值 ΔR_T 约为 0.004 Ω,忽略导线 r_0、r_2 的电阻,由图 3 可知,测温电桥输出电压变化值 $\Delta V_{0.01}$ 为

$$\Delta V_{0.01} = \left(\frac{W_1 + (R_T + \Delta R_T)}{R_1 + W_1 + (R_T + \Delta R_T)} - \frac{W_1 + R_T}{R_1 + W_1 + R_T}\right) V_{ACC} \quad (7)$$

V_{ACC} 为 5 V,在 0 ~ 50 ℃时,当 $T = 50$ ℃时,$R_T \approx 119.7$ Ω,此时 $\Delta V_{0.01}$ 最小,即 $\Delta V_{0.01\,min} \approx 4.90$ μV;A/D 转换器能识别的最小输入电压 $V_{in\,min}$ 为

$$V_{in\,min} = \frac{V_{REF}}{2^{16} - 1} \approx 38.15\ \mu V \quad (8)$$

由以上分析可知,如果信号不放大,A/D 转换器 U3 将不能识别 $\Delta V_{0.01\,min}$. 因此,必须对电桥测温电路输出电压放大,其最小放大倍数 $A_{u\,min}$ 为

$$A_{u\,min} = \frac{V_{in\,min}}{\Delta V_{0.01\,min}} \approx 7.78 \quad (9)$$

同理,当 A/D 转换器 U3 满幅值输出时,$V_{in\,max} = V_{REF}$;当水浴温度为 50 ℃时,PT100 的阻值 $R_T \approx 119.7$ Ω,则根据图 3 有 $V_{50} \approx 0.024\,385$ V. 按照设计要求,当水浴温度为 50 ℃时,A/D 满幅值输出,则调理电路的最大放大倍数 $A_{u\,max}$ 为

$$A_{u\,max} = \frac{V_{in\,max}}{V_{50}} \approx 102.5 \quad (10)$$

考虑电路的抗干扰能力、温度数据采集的精度和电阻的标称值,取 A_u 为 67。将 A_u 代入式(6),令 $R_6 = 1$ kΩ,$R_5 = R_7$,则有 $R_5 = R_7 = 33$ kΩ.

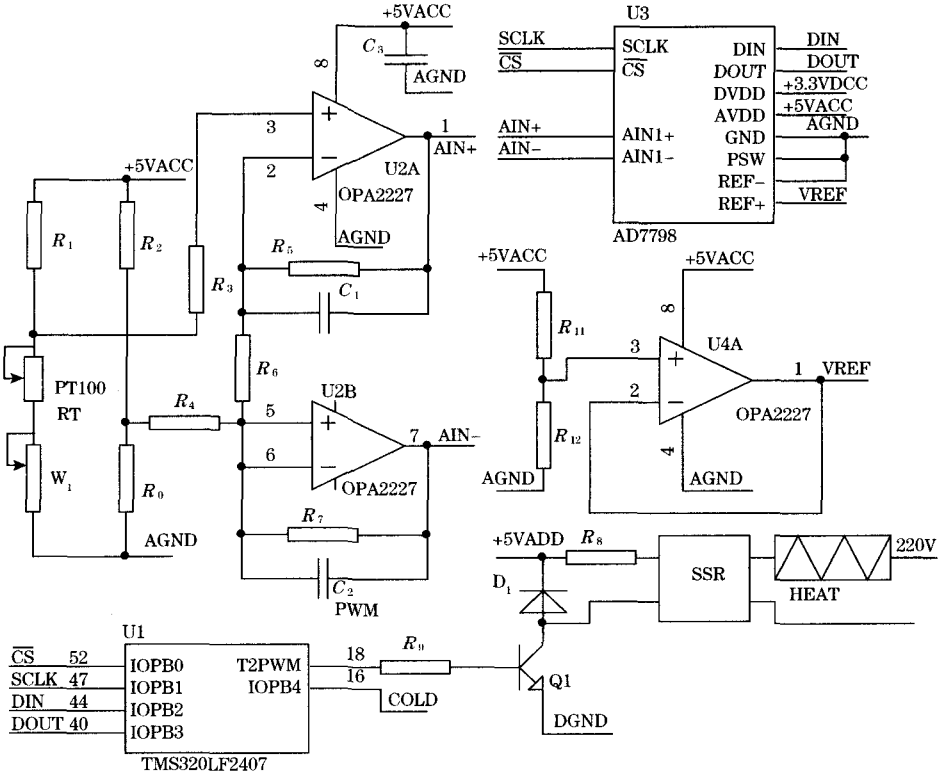

图 2　水浴温度采集与控制电路

3.1.2　*低通滤波器参数的确定*

参见图 2,R_5、R_6、R_7、C_1、C_2 构成两个一阶低通滤波器,用于滤出工频信号的干扰。由于温度信号为直流信号,考虑到滤波效果,取低通滤波器的截止频率为 $f_c = 10$ Hz,令 $C_1 = C_2$,则有

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{2\pi R_5 f_c} \approx 0.48\ \mu F \quad (11)$$

取标称值 $C_1 = C_2 = 0.51$ μF.

3.2　基于 DSP 的水浴温度复合智能控制

TMS320LF2407 具有 PWM 控制功能,内部定时器 T_2 具有 16 位的周期寄存器 T_2PR 和比较寄存器 T_2CMPR,T_2PR 用于设置 PWM 的周期,T_2CMPR 用于设置 PWM 的占空比[9]。设计恒温水浴时,通过 PWM 的周期恒定不变,在线修改 PWM 的占空比的方法(即 T_2PR 值恒定,在线修改 T_2CMPR 的值),改变水浴加热器在一个 PWM 周期内的加热时间,以达到温度的精确控制。

当 T_2CMPR = T_2PR 时,PWM 占空比为 1∶0,加热器在整个 PWM 周期内都加热,即全功率加热;当 T_2CMPR = T_2PR/2 时,PWM 的占空比为 1∶2,加热器在半个 PWM 周期内加热,即半功率加热;当 T_2CMPR = 0 时,即 PWM 的占空比为 0∶1,加热器整个 PWM 周期内都不加热。因此,结合 DSP 的 PWM,式(2)可改写为

$$T_2CMPR_I = \begin{cases} T_2PR & e \geqslant M_0 \\ \dfrac{T_2PR}{2} & M_1 < e < M_0 \\ 0 & e < -M_1 \end{cases} \quad (12)$$

对于式(3)所示的自组织模糊控制,α 由于采用了七级判决方式,同时考虑到 Bang-Bang 控制与自组织模糊控制良好的

"接口",自组织模糊控制的控制步长 $L=(T_2PR/2)/6=T_2PR/12$,结合 DSP 的 PWM,式(3)可改写为

$$T_2CMPR_2=\begin{cases}\frac{T_2PR}{12}[\alpha E+(1-\alpha)EC]\\ f_c(\Delta T_{ic},S,\beta)\end{cases}\quad(13)$$

对于式(4)的 PID 控制,结合 DSP 的 PWM,式(4)可改写为

$$T_2CMPR_3(n)=T_2CMPR_3(n-1)+\{k_d[e(n)-2e(n-1)+e(n-2)]\}*\frac{T_2PR}{12}\quad(14)$$

式中:$T_2CMPR(n-1)$ 为 $n-1$ 时刻的控制量。

为实现 PID 控制与模糊控制良好"接口",必须满足 PID 控制的最大输出控制量不大于自组织模糊控制的控制步长,即 $f_3(n)<T_2PR/12$。

水浴内部温度经 DSP 实时采集后,根据外部环境温度、目标温度,按照复合模糊控制算法推理、决策后,结合 DSP 的 PWM 功能,输出温度控制信号,通过 Q1 驱动,由固态继电器 SSR,控制水浴加热器在一个控制周期内(即 PWM 周期)的加热时间,以实现水浴温度的精确控制。

4 恒温水浴温度控制实验

在构建了水浴温度复合智能控制算法的基础上,对水浴温度控制进行了大量的实验研究,考虑到水浴温度上升时间、超调量、控制精度和控制裕量,确定修正量 $f_c(\Delta T_{ic},S,\beta)=T_1PR/36$,取 $M_0=3$ ℃,$M_1=0.75$ ℃,$M_e=0.125$ ℃时,计算得到 $k_e=4$,$k_c=24$,$k_p=1.2$,$k_i=1.65$,$k_d=0.65$,获得了满意的温度控制精度。

当水浴外部环境温度、水浴初始温度为 5 ℃,水浴目标温度为 20 ℃时,图 3 为水浴温度的基本模糊控制、PID 控制、Bang-Bang 控制和复合智能控制曲线比较;图 4 为不同水浴目标温度下,水浴温度的复合智能控制曲线。由图 3 可以看出,

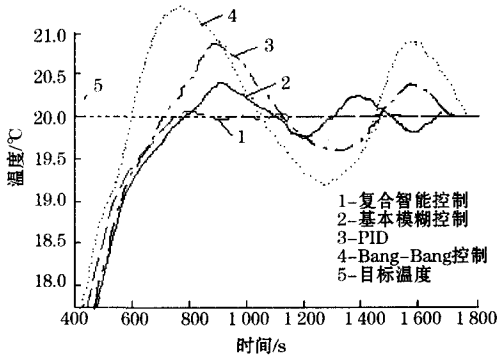

图 3 基本模糊控制与复合智能控制比较

复合智能控制的温度控制性能优于基本模糊控制、PID 控制和 Bang-Bang 控制,其超调量小,稳态误差很小;由图 5 可以看出,不同目标温度下复合智能控制的性能基本一致,都能获得很小的稳态误差且超调量都很小。

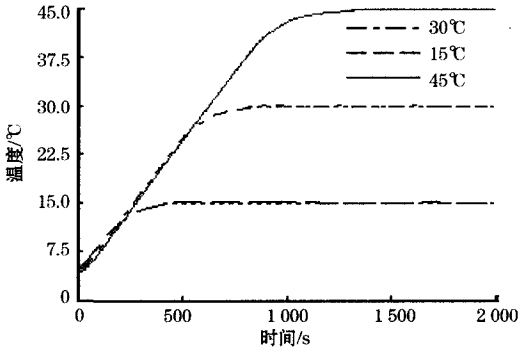

图 4 不同目标温度下复合智能控制实时温度曲线

5 结束语

通过将改进型 Bang-Bang 控制、自组织模糊控制和 PID 控制的有机融合,结合 DSP 的 PWM 功能,提出了一种恒温水浴温度的复合智能控制方法,并给出了系统硬件设计方法。实验表明,采用该方法的恒温水浴温度超调量小、稳态误差 0.05 ℃.

参考文献:

[1] 粘度测试方法 GB10247—88.

[2] 刘燕,滕召胜,林海军. 基于时间最优模糊 PID 温度控制的水分测定电子天平. 电子测量与仪器学报,2008,22(4):90-94.

[3] 李界家,马斌,叶选,等. 参数自调整模糊控制器在空调控制系统中的应用. 仪表技术与传感器,2005(6):15-16.

[4] WANG J,ZHANG Y,QIN T G. Application of self-adjusting parameter fuzzy controller in the temperature control system with moisture analyzer. IEEE International Conference on Control and Automation,China,2007: 1139-1142.

[5] 诸静. 模糊控制原理与应用. 北京: 机械工业出版社,1995:220-222.

[6] ASTROM K J,HAGGLUND T. The future of PID control. Control Engineering Practice,2001,20(9): 1163-1175.

[7] Analog Devices Inc. AD7798 Datasheet[EB/OL]. http://www.analog.com/static/ imported-files/data_sheets/AD7798_7799.pdf.

[8] 刘少强,黄惟一. 基于插值计算与优化的铂电阻非线性校正方法. 仪器仪表学报,2003,24(2): 215-217,220.

[9] Texas Instruments Inc. TMS320LF2407 Datasheet[EB/ OL]. http://focus.ti.com /lit/ds/symlink/tms320lf2407a.pdf.

作者简介:杨艳华(1983—),研究生,研究方向为智能控制与智能信息处理。E-mail: sunshinexsm@126.com

(上接第 51 页)应用于人员不宜进入和现场布线困难的场合。

(3) 无线传感器节点、数据测量分析软件均独立制作。拥有自主知识产权。

在今后的工作中,将对该网络的低能耗控制问题做进一步的研究。

参考文献:

[1] 严普强,乔陶鹏. 工程中的低频测量与其传感器. 振动测试与诊断,2002, 22(4):247-253.

[2] 李文仲,段朝玉. 短距离无线数据通信入门与实战. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.

[3] 张学飞,蒋益兴,李健. 基于 C8051F350 型单片机的振动信号采集系统. 仪表技术与传感器,2009(10):52-53.

[4] 孙玉国. 物体动态倾角的测量装置:中国, 200720072708.3 [P]. 2008-05-21.

作者简介:孙玉国(1973—),副教授,博士,主要研究领域: 无线测控,光机电一体化。E-mail:sunyuguo@usst.edu.cn