

# 人机可交互的水冷式温控实验系统设计

徐志宇<sup>1</sup>, 吴志良<sup>2</sup>, 余有灵<sup>1</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 慕尼黑工业大学 控制工程系, 慕尼黑 80333 德国)

**摘要:** 开发了一套具有人机实时交互功能的水冷式温控实验系统“iWater”。该系统控制部分采用闭环结构: 由 PTC 陶瓷片模拟发热对象, STM32 型微控制器根据 DS18B20 温度传感器提供的实时温度反馈, 经过 PID 运算, 对 H 桥驱动输出 PWM 指令, 从而对水冷机进行调压调速, 实现对温度的恒值控制。扩展多种人机交互功能: 通过红外遥控模块, 可实时设定温度、控制策略以及各类参数; 现场输出选取 TFT-LCD 屏, 可实时显示温度曲线; 实验数据通过 USART 通道, 在上位机的 VisualScope 界面实时绘制温度曲线, 完成对实验数据的观察、存储与分析。最终完成了样机制作, 实验结果验证“iWater”实验系统的有效性。

**关键词:** 水冷机; 温度控制; 人机交互; 实验教学系统

中图分类号: TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1006-7167(2017)05-0053-04



## Development of a Water-cooled Temperature Control Experimental System with Human-Machine Interaction

XU Zhiyu<sup>1</sup>, WU Zhiliang<sup>2</sup>, YU Youling<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;  
2. Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Technische Universität München, Munich 80333, Germany)

**Abstract:** The water-cooling unit is a device which utilizes water-circulation to accelerate the cooling process of CPU. This paper develops the “iWater” experimental system, and applies it to control temperature and realize real-time human-machine interaction. The closed-loop control mechanism is utilized. PTC ceramic plays the role of heat source; DS18B20 digital thermometer provides temperature feedback; STM32 MCU performs PID strategy and generates PWM command to H-bridge driver. Since the speed of water-cooling unit is controlled by applying a variable voltage, the temperature is regulated as constant. Multiple functions of human-machine interface are integrated. The infrared remote control is applied to set temperature reference, control strategy, and various parameters. TFT-LCD is adopted for on-spot display of temperature waveforms. The experimental data are transmitted via the USART channel, and the temperature trajectory is plotted in the VisualScope of host computer. A prototype is developed and test results validate the effectiveness of this “iWater” experimental system.

**Key words:** water-cooling unit; temperature control; human-machine-interaction (HMI); experimental education system

收稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(71401125); 上海市重点课程建设项目(沪教工委高(2015)29号文); 同济大学第11期实验教改项目(JJSHBC-2015JPSY-018); 同济大学第8期精品实验项目同济实(〔2015〕4号)

作者简介: 徐志宇(1982-), 男, 山西太原人, 高级工程师, 从事智能自动化应用研究。

Tel.: 021-69584663; E-mail: xuzhiyu@tongji.edu.cn

通信作者: 余有灵(1973-), 男, 重庆人, 副教授, 从事智能控制理论及应用研究。Tel.: 021-69585441; E-mail: yuyouling@tongji.edu.cn

## 0 引言

恒温控制是自动控制的经典研究课题之一, 在生产生活中应用极为广泛<sup>[1-6]</sup>。传统实验教学所采用的恒温控制系统, 往往属于主动加热方式, 即升温可控-降温自发<sup>[7-9]</sup>。通过控制电阻丝、发热陶瓷等加热器的

输出功率,维持对象的温度为恒值。

水冷机通过水循环将热源的热量搬到散热器上散发出去,根据其散热原理,可以分为主动式和被动式两种<sup>[10-11]</sup>。随着半导体制造和电子技术的飞速发展,计算机内部的CPU、GPU等处理器的主频不断提高,发热也增大,CPU/GPU的水冷散热技术受到日益重视,蓬勃发展<sup>[12-13]</sup>。

本文选用CPU水冷机作为执行机构,设计一套用于实验教学的温控系统,采取主动冷却方式,即降温可控-升温自发。通过动态调节水冷机的水泵转速,实现对热源对象的恒温控制。与传统的教学实验设备相比,具有以下突出特点:①对象的先进性和新颖性。采用家用电脑的水冷机,既贴近生活实际,又是以往实验中不曾用到过的新型装置,温控方式先进、设备新颖。②内容的趣味性和多样性。采用先进新型水冷式温控装置,并引入红外遥控、LCD屏现场监控、上位机远程监控等丰富人机交互方式,大大提高了项目的生动性、趣味性,激发学生进行学习、开发的主动性,设计出形式多样,各具特色,扩展丰富的控制系统。

## 1 硬件选型与设计

### 1.1 水冷机

本文采用的BigWater-760 Pro型主动式水冷机作为温控系统的执行机构。如图1所示,该水冷机由镜面铜底水冷头、冷却水容器、水泵、散热排、风扇、旋钮控制面板等组成,可方便地安装于台式PC机,用于CPU、GPU等高耗能高发热处理单元的强制冷却。



图1 BigWater-760 Pro型CPU水冷机

BigWater-760 Pro型水冷机可通过调节水泵/风扇转速2种方式调节散热功率。通过机理分析和实测,前者调温及时、效果显著,故本文采用固定风扇转速,单一改变水泵转速的调温方案。其中水泵采用调压调速方式:由L298N电动机驱动板接受微控制器的PWM指令,输出一个幅值可调的直流电压,施加于水泵电动机的电枢两端。

### 1.2 发热体

发热体是温控系统中的受控对象。为确保实验的可重复性,选取的发热体应具有自主升温能力,即要求水冷机关机或低功率输出时,发热体能够再次升温至

超过预设值;为确保实验的易观测性,选取的发热体应具有与水冷机散热能力相匹配的热惯性,即要求水冷机的运行既不能瞬间改变发热体的温度,也不会长时间无法改变发热体的温度;为确保实验的安全性,选取的发热体应具有安全稳定的温度上限,避免师生在实验过程中发生烫伤事故。综合以上考量及实测,本文最终采用市售的PTC发热陶瓷片<sup>[14]</sup>(见图2)作为发热体,其最大发热功率为50W,最高工作温度70℃。经实验辨识,其温度特性可近似为一阶惯性环节。



图2 具有恒温控制功能的PTC发热陶瓷片

### 1.3 温度传感器

温控系统采用闭环反馈机制,控制量的给出取决于检测值与设定值的偏差。因此传感器的检测误差直接影响到整个系统的精度,且无法通过闭环本身加以克服。本文选用DS18B20型数字温度传感器,可将温度直接转化数字信号,测温范围为-55~125℃,分辨率达到0.0625℃,检测及转换时间仅为200ms,在各种温控系统中得到广泛使用<sup>[3,15-17]</sup>,能够满足iWater实验系统在温度检测方面的功能需求。

### 1.4 微控制器

微控制器是所有控制策略、算法的载体,接受温度的预设值、实测值,经过运算给出合理占空比的PWM指令作用于电动机驱动板,在温控系统中居于核心地位。STM32系列微控制器基于ARM Cortex-M3内核,适用于高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用。本文选用市售的STM32F103RCT6的通用开发板,主频72MHz,可扩展多种外设,可满足温控系统在处理能力方面的功能需求。

### 1.5 人机交互模块

人机交互为实验人员提供观察或干预实验装置运行的渠道。具体包括以下2个方面:

(1) 控制程序和参数整定的效果测试。本文设计温控系统主要用于教学实验,应当具备灵活选择策略、设定参数的功能。在设计过程中,先后尝试了矩阵键盘触控和红外遥控2种输入方案。考虑到矩阵键盘需采取去抖动措施,且按键数量受限于I/O口资源,本文采用了基于NEC协议的红外遥控方案。

(2) 实验数据的采集、可视化及分析处理。在设计过程中,先后尝试了OLED、LCD1602、TFT-LCD等3种显示方案(见图3)。其中OLED用于调试程序时各种参数的显示,LCD1602用于温度值的显示。但上述方

案占用 I/O 资源较多,且无法记录历史数据、动态显示温度曲线;而 TFT-LCD 显示区域较大,并可编程实时绘制曲线。因此本文最终采用 TFT-LCD 作为显示屏。

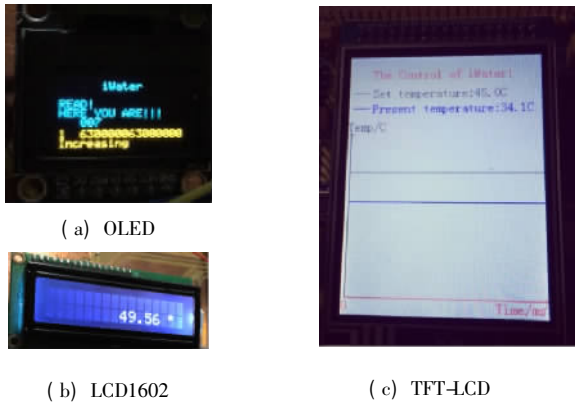


图 3 实验数据的可视化方案

## 2 软件开发

### 2.1 软件部分的架构

采用 ARM 公司的 Keil  $\mu$ Vision5 集成开发环境进行 STM32 程序开发。编写项目工程文件,经调试、编译、连接,生成 axf 文件,再通过 Jlink 下载至 STM32 的 Flash 中。

软件在硬件基础上运行,是温控系统的灵魂,大致分为 5 个功能模块:

- (1) 数据采集与转换。完成对 DS18B20 温度传感器的初始化,对输入温度数据的格式转换。
- (2) 执行控制策略。运行控制程序,实现砰砰控制、PID 控制、模糊控制等算法。
- (3) 输出 PWM 指令。对 L298N 驱动板输出 PWM 信号,使之产生可调电压控制水泵转速。
- (4) 人机交互。接收并识别红外遥控指令,输出数据于 TFT 屏幕显示。
- (5) 对上位机的串口通信。在上位机 PC 上以 VisualScope 界面实时绘制温度曲线。

如图 4 所示,为“iWater”温控系统的工程文件目录,其中\CORE、\FWLIB 直接来源于 ST 官方固件库,\USER、\HARDWARE 涉及本文个性化内容。

### 2.2 控制算法

PID 控制是在工业控制中应用最为广泛的控制算法,具有结构简单、鲁棒性好、可靠性高、调整方便等突出优势。PID 综合偏差的现状、历史、变化趋势,给出控制量。在数字式应用中,往往采用增量式 PID 控制<sup>[2,9,17]</sup>:

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]$$

其中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  依次为比例、积分、微分增益; $\Delta u(k)$  和  $\Delta e(k)$  分别为  $k$  时刻相对于  $k-1$  时刻的控制增量

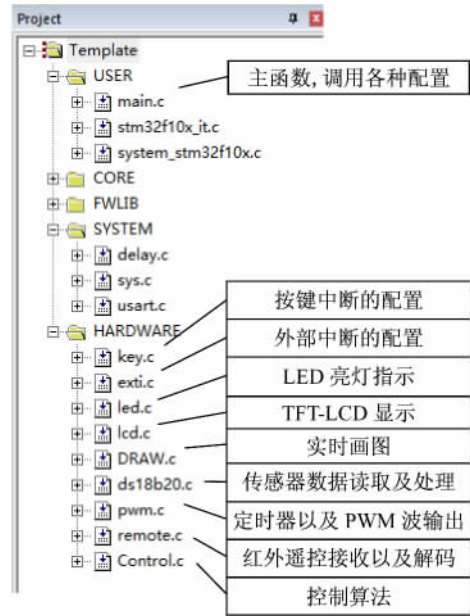


图 4 “iWater”温控系统的工程文件架构

和偏差增量。

为克服纯线性 PID 控制的不足,本文设计了 Bang-Bang 与 PID 相结合的分段式控制算法:将实际温度与设定温度的偏差分为 3 个区间,当温度低于下限时,水泵停机;温度高于上限时,水泵全开;温度处于设定值附近时,采取 PID 策略。

### 2.3 实时绘图算法

本文采用基于数组的动态绘图算法。由于 TFT-LCD 屏幕可显示 235 个点,故开辟一个 2 倍大小的数组(含 470 个单元)。不“搬移”数据,而是直接改变数组中的单元序号,实现温度曲线的实时绘制。因 STM32 具有丰富的闪存资源(512 KB),故上述以内存换效率的方案是比较合理可行的。

## 3 样机制作与测试结果

为确保实验的稳定与可重复运行,并提高实验的展示度,定制丙烯酸塑料(俗称“亚克力”)材质的透明箱,可靠固定水冷式温控系统。样机外观见图 5,主要参数如下:规格 350 mm  $\times$  250 mm  $\times$  200 mm,净重 1.95 kg,箱体材料为丙烯酸塑料(亚克力),控制器为基于 STM32F103RCT6 的开发板,电动机驱动为基于 L298N 的双桥驱动板,水冷机为 BigWater 760 Pro,直流电源为基于 LM2596S 的电源模块,传感器为 DS18B20,遥控器为 HS0038,显示屏为 TFT-LCD。

由于该水冷仪器有风扇装置,当其固定于实验箱内时,需特别考虑排气问题。因此在实验箱底部四周安装铜柱,使得底板腾空,在亚克力板上靠近风扇的部分打孔,以此保证了气流的顺利排出。

图 6(a) 为采用单一比例控制(P)时的阶跃响应曲线。依次设定温度为 40  $^{\circ}$ C、41  $^{\circ}$ C、45  $^{\circ}$ C、50  $^{\circ}$ C,可

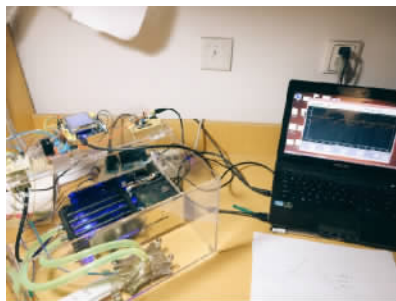


图5 “iWater”温控系统样机及功能测试

见系统响应始终有静差,且随着设定温度的提高,静差越来越大,振荡也越发加剧。

图6(b)为采用分段式PID控制时的阶跃响应曲线。依次设定温度为40℃、42℃、45℃。在图中所示区域内的系统响应均已消除静差,且由于引入了微分环节,振幅明显减小,但频率提高。

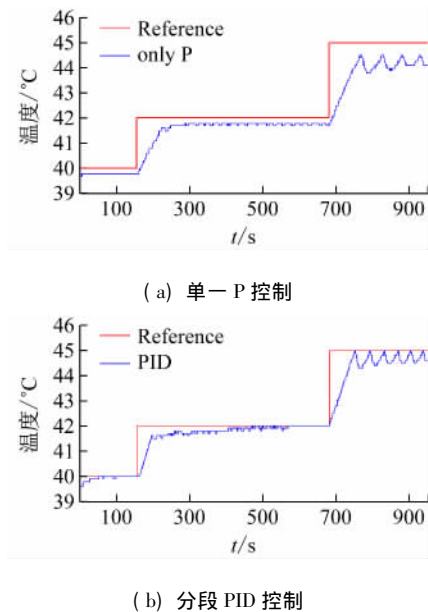


图6 “iWater”温控系统的阶跃响应曲线

测试结果显示,该样机作为一套用于实验教学的温控系统,可方便地调整策略、参数,直观地观察、分析实验数据。

## 4 结语

本文开发了一套具有人机交互功能的温控实验系统“iWater”。在反馈闭环中,PTC陶瓷片作为温控对象,STM32为控制器,DS18B20作为温度传感器,BigWater-760Pro型水冷机及驱动电路作为执行器。控制策略采用分段式PID算法。参数设定采用红外遥控方式;温度数据采用TFT-LCD屏现场显示和上位机

VisualScope界面两种显示方式。样机制作及实验结果验证系统的有效性。

“iWater”系统综合运用了自动控制、传感检测、直流调速、计算机编程、嵌入式开发等软硬件知识与技能,具有综合性;选用CPU水冷机作为执行装置,构成散热控制型温控系统,具有新颖性;可结合先进的信息与人机交互技术,具有丰富的可扩展性。利用该实验系统还开展教研探索:给学生更加充分的时间,展开课内外一体化的分组研讨和科技创新,教师则扮演参与讨论、启发思考、规范实验过程的角色,实现了学生主导、教师引导的新型教学模式。

## 参考文献(References):

- [1] 李昌禄,尹昭杨,卢天宇,等.一种高精度半导体激光器恒温控制系统设计[J].实验室研究与探索,2014,33(10):76-81.
- [2] 尹淑娟.大型电力机组的恒温控制方法研究与仿真[J].电气应用,2014,33(24):72-75.
- [3] 李荫康.高精度高稳定度钟房恒温控制研究[J].天文研究与技术,2015,12(2):243-246.
- [4] 马骏.蔬菜大棚温度电控系统的模糊控制研究[J].中国农机化学报,2015,36(1):128-131.
- [5] 刘玉,司玉洁,赵宇梅,等.温度控制对分光光度法测定pH的影响[J].海洋技术学报,2016,35(3):94-97.
- [6] 姜子运,牛小飞,张鹏,等.加速器驱动次临界系统注入器II低温恒温器控制系统[J].原子能科学技术,2016,50(7):1314-1319.
- [7] 张业明,王帅,李博,等.基于Matlab的恒温控制系统研究[J].实验技术与管理,2016,33(3):75-77.
- [8] 胡陟,蔡萍,武博,等.水温测控教学实验设计与开发[J].实验室研究与探索,2012,31(6):14-18.
- [9] 陈卫红,邓晓刚.适合实践教学的新型温控系统设计[J].实验技术与管理,2015,32(11):94-98.
- [10] 张程,张卓.IGBT大功率模块水冷散热系统的设计[J].自动化应用,2016(5):9-12.
- [11] 余军,马雅青,赵振龙,等.电动汽车用水冷散热器的设计及仿真[J].大功率变流技术,2015(3):51-54.
- [12] 吕玉坤,刘海峰,徐国涛.CPU水冷系统散热实验研究[J].电子工业专用设备,2012(8):62-66.
- [13] 王玉珏,杜雪涛.水冷式热管散热器在服务器中的应用研究[J].机械设计与制造,2015(5):39-43.
- [14] 宋嘉梁.常温PTC热控材料及其热控方法研究[D].合肥:中国科技大学,2016.
- [15] 吕淑平,王潇.水温控制实验系统设计[J].实验室研究与探索,2013,32(1):60-63.
- [16] 王瑾,袁战军,李小斌.智能温度控制系统的设计[J].自动化与仪器仪表,2016(8):175-177.
- [17] 李昌禄,王李坤,张华健.基于PID算法的水温控制系统的设计[J].实验室科学,2014,17(5):41-44.