

# 基于 STM32 的智能鞋控制系统的设计与试验

徐慧, 唐火红, 常晓婷, 朱红生

(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 现有电热鞋温控系统采用传统比例积分微分 (proportion, integration, differentiation, PID) 控制算法, 温湿度控制精度低, 无法满足消费者对鞋子舒适性的要求。本文运用一种模糊 PID 控制算法, 设计了以 STM32 系列的单片机为核心处理器的智能鞋温湿度调控系统, 研制出样机, 并进行了仿真与试验。试验表明: 与传统 PID 相比, 模糊自整定 PID 控制算法适应性强, 参数整定简单, 系统的动态响应能力和稳定性获得了提高。设计可以满足消费者自行设定温度、湿度的需求, 具有智能安全的特点, 有较高的应用前景和 market 价值。

**关键词:** 温度; 湿度; 模糊 PID; Simulink 仿真; STM32 微控制器

**中图分类号:** TM925

## experiments of control system for smart shoes based on STM32

XU Hui, TANG Huohong, CHANG Xiaoting, ZHU Hongsheng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

**Abstract:** The temperature control system of existing electric heating shoe adopts the traditional PID control algorithm. Due to its low precision of temperature and humidity control, it cannot meet the customers' requirements for shoes comfort. In our study, the fuzzy PID control algorithm is utilized in temperature and humidity control system for smart shoes taking STM32 Micro Control Unit (MCU) as the core processor. The prototype is developed to do simulation and experiments. The results show that the fuzzy PID control algorithm, compared with traditional PID algorithm, has a stronger adaptability with simpler parameter tuning process. Its dynamic response ability and system stability are also improved. The design can meet the requirements of customers for setting temperature and humidity of the smart shoes. It's intelligent and safe, which leads to better application prospect and larger market value.

**Key words:** temperature; humidity; fuzzy PID; Simulink simulation; STM32 microcontroller

## 0 引言

随着社会的发展, 人们对鞋的舒适性要求越来越高, 而脚部的干爽和温度适宜是脚部舒适的重要指标<sup>[1]</sup>。研究表明: 鞋腔温度 24-33℃湿度在 60-73%, 脚部皮肤温度在 28-33℃之间最感舒服。如果温度低于 22℃就会影响局部血液循环, 使人感到不舒服。脚部越湿, 热量散失也越多, 便会导致抵抗力下降, 病毒、病菌大量滋生, 引发各种疾病, 因此脚部保暖和透气的重要性不言而喻。目前市场上逐步的开发了一些采用内部电源供电或者外部充电达到保温作用的电热鞋以及通过采用透气材料和加气囊等方式达到透气效果的透气鞋<sup>[2-4]</sup>。

但市场上的电热鞋多为只设有手动按钮调节高低两档温度, 或用遥控器远程开关<sup>[5-7]</sup>。但不停的弯腰手动调节或者随身携带红外开关器都极不方便。且市场上电热鞋作为冬季专用鞋都未考虑透气性, 而且每个人对脚部温度要求不同, 故只设有两档温度调节的电热鞋不能满足

**作者简介:** 徐慧 (1991-), 女, 硕士研究生, 先进制造技术

**通信联系人:** 唐火红 (1973), 男, 副教授, 先进制造技术. E-mail: tanghh@ustc.edu.cn

所有人的需求。

ARM 公司生产的 ARM 嵌入式微处理器，具有低功耗、低成本、数据处理能力强和实时操作性强等优点<sup>[8]</sup>。一般的温度控制系统使用常规 PID 控制算法，其参数不能随温度变化实时改变，只能通过将温度区间分段处理，设定不同的参数值来实现温度的精确控制<sup>[9]</sup>，模糊控制的优点是不依赖被控对象的精确模型，能够对难以建立精确数学模型的对象实现有效控制。因此，为了解决常规 PID 控制不具有自适应能力，对于时变、非线性系统控制效果不佳等问题，本系统采用了将模糊技术与 PID 控制相结合的控制方法，提高了温度控制系统的性能。试验表明该系统可以根据用户需求通过手机客户端自行设定鞋内温湿度值，设定值通过蓝牙对接传送给鞋内的 STM32F103 微控制器实现温湿度的智能调控，同时客户端可以实时显示鞋内的温湿度状况和历史状态。满足了人们对鞋子舒适性和个性化设定的需求，具有很强的使用价值。

## 1 工作原理及功能设计

智能型透气电热鞋是由鞋体和温湿度控制系统两部分组成。为了实施精确有效控制，首先要实施温湿度信息采集，其次要实现实时调控。智能鞋的控制系统是以 STM32F103 微控制器为核心，根据手机客户端设定的温湿度，结合温湿度传感器采集到的温湿度实时状态实现智能调控。鞋的温湿度控制电路的架构如图 1 所示。它是基于 STM32F103 微控制器进行外围电路的扩展，包括蓄电池、温湿度传感器、电热片、小风扇、蓝牙 4.0 模块和按钮开关及充电模块。

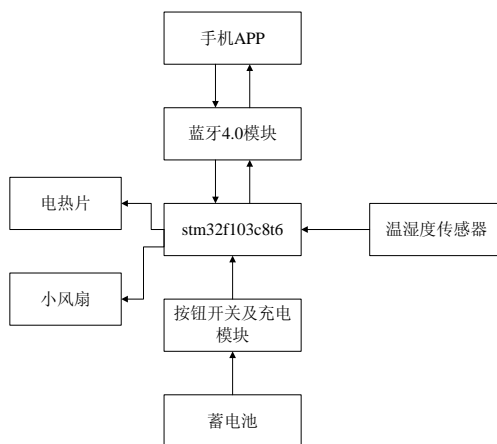


图 1 系统架构示意

Fig. 1 System architecture diagram

主控制芯片根据手机 APP 设定的温湿度值和温湿度传感器检测到的实时温湿度，对小风扇和电热片智能通断，实现鞋子的智能调温和排湿。在手机客户端不仅可以设定温湿度值还可以查看鞋内的实时温湿度状态和电量反馈以及对过去 24 小时温湿度状态的存储。

## 2 系统的硬件设计

本系统的硬件电路是由 stm32f103c8t6 微控制器单元、温湿度检测单元、蓝牙通信单元、按钮及充电单元、小风扇单元和电热片单元组成。

### 2.1 stm32f103c8t6 微控制器系统

本系统选用了 stm32f103c8t6 微控制器，该微控制器是一款基于 ARM 32 位的 Cortex M3 内核的单片机，2.0 ~3.6 V 的宽电压供电范围，CPU 工作频率最大可达 72 MHz，具有单

周期的乘法指令和硬件除法，以及优先级可编程的中断系统。同时它还具有 64 KB 的 Flash 存储器与 20KB 的 SRAM 存储器，另外还集成了非常丰富的片内外设，如 2 个 12 位的 ADC、3 个通用 16 位定时器和 1 个 PWM 定时器，还包含标准和先进的通信接口：多达 2 个 I2C 接口和 SPI 接口、3 个 USART 接口、一个 USB 接口和一个 CAN 接口等，具有成本低、速度快、性价比高等优点<sup>[10]</sup>。可见此配置完全可以满足本系统的设计要求。本系统采用的主控芯片 STM32F103CBT6，使用了两路 ADC 数据采集功能，两路开关控制电路，两路串口功能，两个指示灯功能。可以实现温湿度信号的采集、处理，控制电热丝加热与风扇的运行，同时采用蓝牙 4.0 实现下位机与上位机之间的数据通讯。

## 2.2 温湿度采集系统

DHT11 数字温湿度传感器是一款含有已校准数字信号输出的温湿度复合传感器<sup>[11]</sup>。它应用专用的数字模块采集技术和温湿度传感技术，确保产品具有极高的可靠性与卓越的长期稳定性。传感器包括一个电阻式感湿元件和一个 NTC 测温元件，并与一个高性能 8 位单片机相连接。因此该产品具有品质卓越、超快响应、抗干扰能力强、性价比极高等优点。产品为 4 针单排引脚封装连接方便，只需占用单片机 1 个 IO 口。超小的体积、极低的功耗，应用在鞋底作为本系统的温湿度传感器完全满足性能要求。本系统通过 MCU 采集温湿度信息，根据采集数据判断风扇与加热丝的开断。当检测到温度低于设定值，MCU 给 HOT 端发送高电平信号，MOS 管 S4 上下导通加热片通电加热，整个电热过程采取模糊 PID 控制策略调控。同样若检测到湿度值大于设定值 MCU 给 MOTOR 端发送高电平，MOS 管 S3 导通，小风扇开启进行排湿。

## 2.3 充电及按键系统

本系统采用 3.7V 锂电池供电，为了提高加热片和小风扇供电电压，电热片和小风扇的电源直接采用锂电池供电。MCU 模块、蓝牙模块采用 3.3V 供电。采用 ME6211 作为降压芯片，该芯片输入电压为锂电池输出电压，芯片输出电压为 3.3V。系统还具有电量监控功能，由于 MCU 的 ADC 采集上限为 3.3V，故采用分压电压采集方法。整个系统采用 micro USB 充电接口，采用 TP4056 作为充电电路芯片，为了降低芯片充电时的发热现象，在充电芯片的 VCC 引脚接有 0.45Ω 的电阻，同时采用单触开关电路，可实现软件开关机。开关机检测电路如图 2。按键 S1 按一下，Q1 导通整个系统得电，MCU 给 CONTROL IO 端发送高电平，Q2 导通使整个系统连续供电。S1 再次按下，DETCET IO 端检测到低电平程序判断按键次数进行相应的高低温设定，当 S1 长按超过 1S，MCU 将 CONTROL IO 端置底，整个系统断电关机，这是通过按键实现相应的开关机及高低温设置。

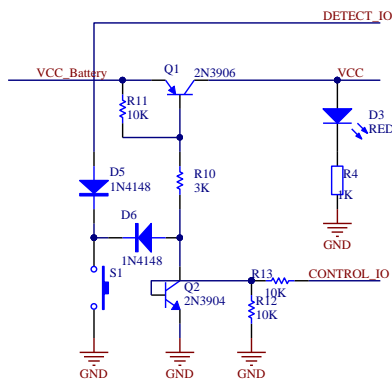


图 2 开关机控制电路原理图

Fig. 2 Switch machine control circuit principle diagram

### 3 系统的软件设计

本智能鞋的系统软件是基于 STM32f103c8t6 单片机的温湿度采集控制系统的模块化思想设计的, 本系统软件分为主程序和各个模块子程序。主程序是软件设计的核心, 主要是用来初始化和协调安排各子程序模块的运行关系。模块子程序主要是根据所要实现的功能来设计的<sup>[12]</sup>。

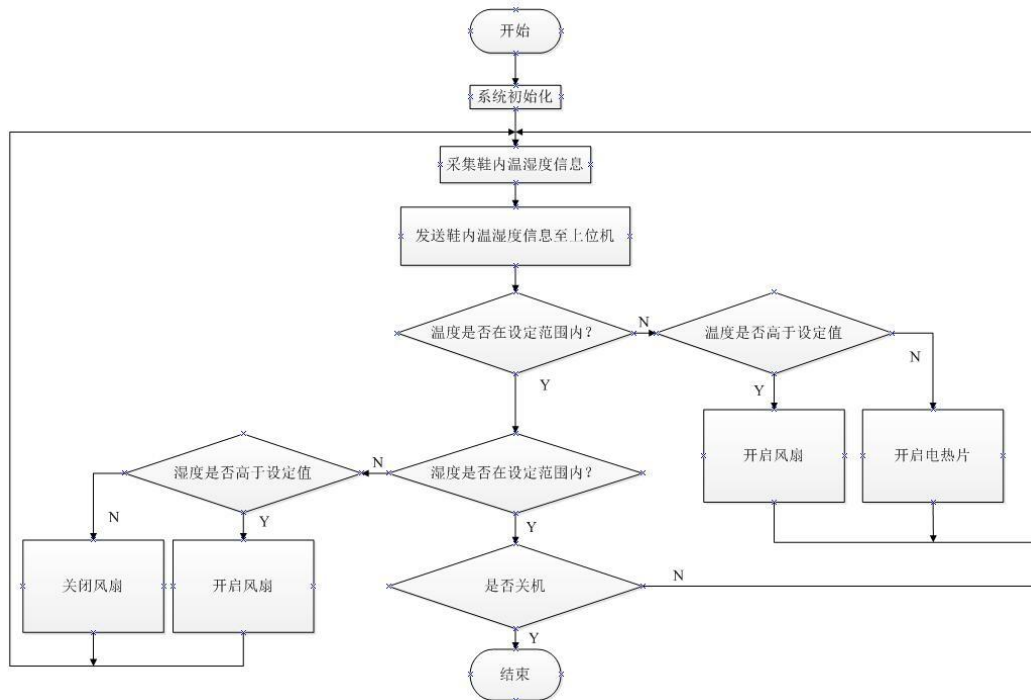


图 3 温湿度控制程序流程图

Fig. 3 Temperature and humidity control program flow chart

首先对指示灯, 存储芯片进行初始化, 一键启动后防止按键时间过长导致误关机, 接着读取 SPI 的 ID, 读取关机前的历史数值, 将读取的温湿度以及电量值每 10 分钟写入 RAM 一次。对定时器以及看门狗等进行初始化, 将关机前温湿度自动设定, 接着对串口通信和传感器初始化, 根据电压采集的按键次数及按下时间长短判断按键功能, 同时对电压模拟量进行采集在电压过低时对数据存储自动关机。最后对传感器实时检测到的温湿度以及设定的温湿度值进行比较, 若温度未达到设定值则发送高电平启动加热, 若湿度大于设定值则发送高电平启动风扇。由实时数据通过发送高低电平设置加热与排湿的通断。温湿度控制程序流程图如图 3 所示。

### 4 模糊 PID 控制算法仿真与试验

根据人们在实践中调整 PID 参数的经验, 将这些经验存入计算机, 由计算机根据现场实际情况自动调整比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$  和微分系数  $K_d$ , 进而实时调整控制器对被控对象的控制作用, 这就是自整定模糊 PID 控制<sup>[13]</sup>。

#### 4.1 模糊 PID 控制器的设计

本系统温度的模糊 PID 控制器是利用模糊控制规则, 根据检测温度与设定值间的误差  $E$  和误差变化率  $E_c$  的值, 在线调节修正 PID 参数, 实现变化的控制对象的快速平稳控制。模糊 PID 控制原理图如图 4 所示。模糊推理过程由模糊化、模糊控制规则、模糊推理和去模糊化 4 个环节来实现。

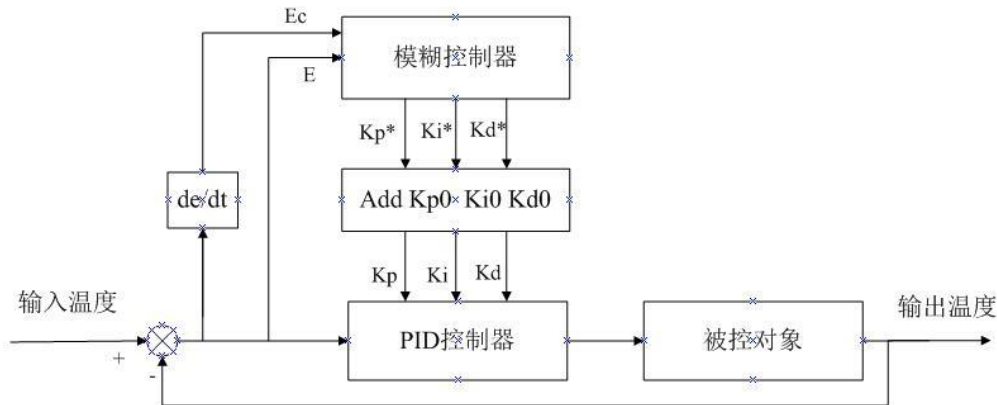


图4 模糊PID控制原理图

Fig. 4 Fuzzy PID control principle diagram

电加热装置是一个具有自平衡能力的对象，因而一般可用一阶惯性滞后环节来描述温控对象的数学模型<sup>[14]</sup>。目前工程上常用的方法是对过程对象施加阶跃输入信号，测取过程对象的阶跃响应，然后由阶跃响应曲线确定过程的近似传递函数。具体用科恩-库恩（Cohn-Coon）

公式确定近似传递函数<sup>[15]</sup>。

所以，智能鞋温度系统模型的传递函数为  $G(S) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{TS + 1} = \frac{0.5 \cdot e^{-10s}}{29S + 1}$

式中  $K$  -对象的静态增益

$T$  -对象的时间常数

$\tau$  -对象的纯滞后时间

本系统的温度的PID控制采用增量式PID控制算法，增量式PID算法控制增量计算公式为： $\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$

$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$

$K_p, K_i, K_d$  的调整公式为：

$$K_p = K_{p0} + \{E, Ec\} K_p^* = K_{p0} + K_p^*$$

$$K_i = K_{i0} + \{E, Ec\} K_i^* = K_{i0} + K_i^*$$

$$K_d = K_{d0} + \{E, Ec\} K_d^* = K_{d0} + K_d^*$$

式中， $K_{p0}, K_{i0}, K_{d0}$  是  $K_p, K_i, K_d$  的初始参数，由常规方法得到。

模糊PID控制系统温度误差和误差变化率分别记为  $E$  和  $Ec$ ，模糊论域都取为  $[-3, 3]$ ，离散为7个等级，模糊语言值分别为{负大(NB)，负中(NM)，负小(NS)，零(Z)，正小(PS)，正中(PM)，正大(PB)}。模糊控制器的输出为PID参数的变化增量  $K_p^*, K_i^*$  和  $K_d^*$ ，模糊论域取为  $[0, 6]$ ，也离散为7个等级，模糊语言变量  $e$  与  $ec$  的隶属度函数相同如图5a所示，输出的PID参数的变化增量  $K_p^*, K_i^*$  和  $K_d^*$  隶属函数也相同如图5b所示。

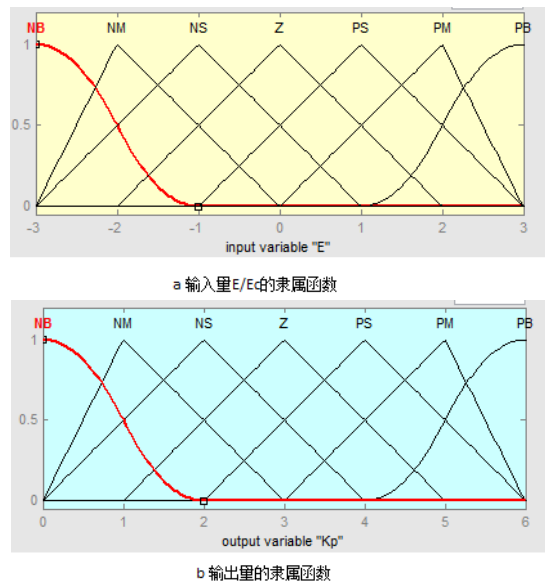


图5 输入与输出隶属度函数

Fig. 5 The input and output membership functions

## 4.2 模糊PID 仿真及分析

根据智能鞋的温度控制原理，同时考虑到在不同时刻PID 控制算法3个参数的作用以及相互之间的互联关系，通过计算当前系统误差E和误差变化率Ec，利用模糊规则推理，制定PID 控制器参数的模糊控制表。根据建立的模糊系统与传统的PID 控制器相结合，将建立的智能鞋系统模型加入到MATLAB Simulink中，同时加入模糊控制器，对设计的模糊PID 控制器进行仿真。为更好地显示模糊PID 控制的控制效果，将其仿真模型同PID 控制放在一起，得到两种控制方案系统的仿真模型如图6所示。

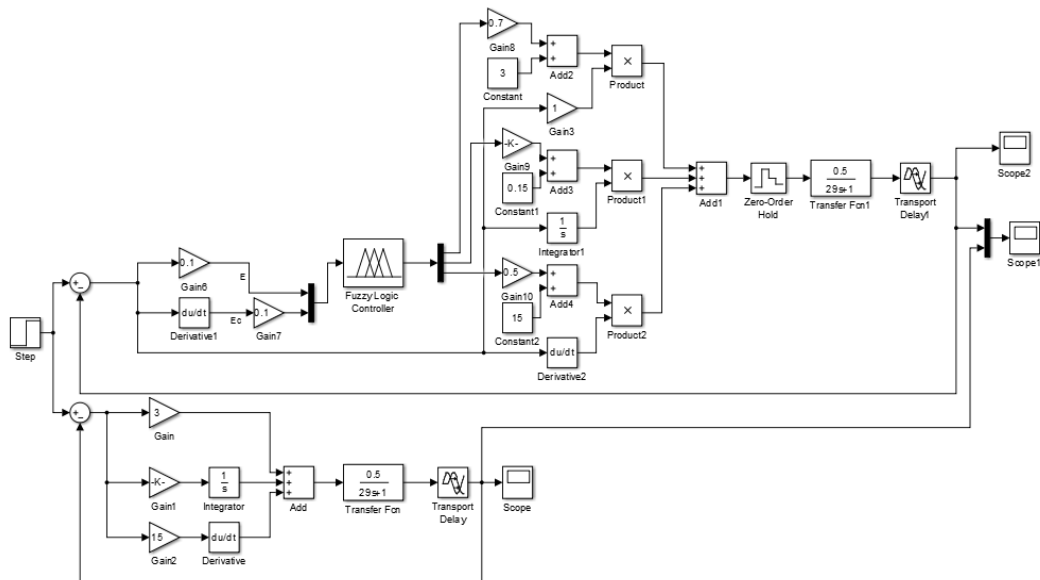


图6 两种控制方案 Simulink 仿真框图

Fig. 6 Two kinds of control scheme Simulink block diagram

在环境温度为15℃时，输入控制温度值为30℃，通过预整定确定P、I和D参数的初始值： $K_p0 = 3$ ， $K_i0 = 0.15$ ， $K_d0 = 15$ 分别使用常规PID控制和自整定模糊PID控制，仿真结果如图7所示。

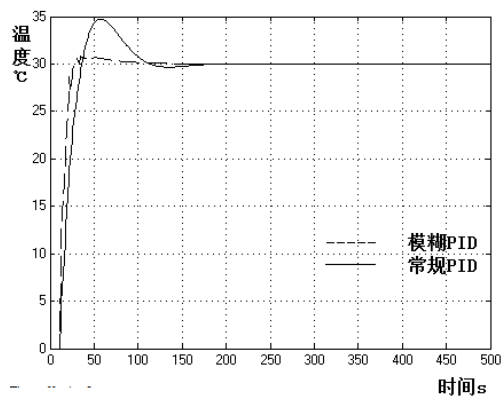


图 7 模糊 PID 和常规 PID 仿真结果图

Fig. 7 Fuzzy PID and conventional PID simulation results

### 4.3 试验验证

本系统根据设计要求加工出试验样鞋如图 8 所示。

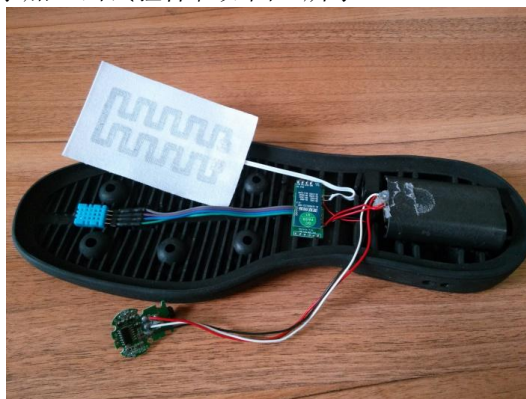


图 8 智能鞋样鞋试验

Fig. 8 Smart shoe test

根据现有样鞋与手机 APP 端联合测试, 对按键进行一系列操作后, 通过指示灯可以知道系统能够实现一键开机以及高低温按键, 通过 APP 设定具体的温湿度, 改变传感器周边环境的温湿度可以从 APP 端实时看到加热片以及小风扇的开启关闭状态, 其中加热效果明显, 排湿效果则采用 3D 打印的鞋底进行测试, 可以在鞋底的内部风道实现排湿。整个样机试验系统测试结果表明各个模块运行正常, 可以看到实时变化的温湿度, 电池电量以及加热通风的实时开关状态, 通过手机 APP 可以自定义设定温湿度, 能够实现电量不足自动存储数据关机, 在客户端可以看到历史 24 小时的温湿度曲线。通过实验分析, 该智能鞋的温湿度控制系统原理简单, 实现方便, 测量精度高, 在实际应用中具有很高的使用价值。

## 5 结论

智能排湿电热鞋采用 STM32f103c8t6 单片机为控制核心, 通过 DX-BT05 4.0 蓝牙模块实现单片机与手机 APP 进行通讯, 设计并实现了智能排湿电热鞋温湿度控制系统。该系统硬件设计和软件程序设计均满足控制设计要求, 能实现正常检测温湿度显示和温湿度智能调控功能, 具有原理简单、运行稳定、实现方便和硬件连线简单等特点。

智能鞋温度控制系统采用模糊 PID 控制算法, 具有可靠性高、成本低、能耗小和控制精度高等特点, 对智能排湿电热鞋的舒适性和经济性有较大的应用价值。

## [参考文献] (References)

- [1] 刘静民, 刘卉, 曲毅,等. 运动鞋温、湿度舒适性研究[J]. 体育科学, 2012, 32(6):50-54.
- 205 [2] 徐晓斌. 透气鞋技术的研究进展与应用前景[J]. 中国皮革, 2014(18). [3]牛皮棉鞋的吸湿和鞋腔湿度平衡研究\_王欣.
- [3] 单志华, 陈慧. 建立卫生性能标准 营造真皮制品优势[J]. 中国皮革, 2005, 34(7):13-14.
- [4] 范重山, 方婷, 周素静. 电加热鞋的研发及应用[J]. 中国皮革, 2011(8):144-145.
- [5] 林晓阳, 杨建清, 崔立人,等. 电子防寒保温鞋的研究[J]. 中国皮革, 1985(2).
- 210 [6] 佐富兴, 郑玉卿, 王海明,等. 新型电热保暖鞋的研发[J]. 机电工程技术, 2011, 40(11):88-90.
- [7] 姚文祥. ARM Cortex-M3 权威指南[M]. 清华大学出版社, 2014.
- [8] 汤运启, 弓太生, 李楠. 从专利看保暖鞋的发展[J]. 皮革科学与工程, 2008, 18(2):73-76.
- [9] Yan-Jun F U, Zou W D, Xiao H R, et al. Optic power control of LD drive circuit[J]. Infrared & Laser Engineering, 2005.
- 215 [10] 杨伟, 肖义平. 基于 STM32F103C8T6 单片机的 LCD 显示系统设计[J]. 微型机与应用, 2014(20):29-31.
- [11] 广州奥松电子有限公司.数字温湿度传感器 DHT110 说明书 [M] ,2009.
- [12] 王峰, 孟立凡, 王冲. 基于单片机的温室调温系统的设计与实现[J]. 电子世界, 2011(10):57-58.
- [13] Mansour S E, Kember G C, Dubay R, et al. Online optimization of fuzzy-PID control of a thermal process[J]. Isa Transactions, 2005, 44(2):305-314.
- 220 [14] 覃强. 模糊 PID 温度控制方案的仿真优选及其实现[D]. 中国科学院研究生院(电工研究所), 2002.
- [15] 李林静. 基于单片机的炉温控制系统[J]. 通用机械, 2004(1):50-52.