

基于PID控制的可拆分恒温暖菜板

林书乐, 韩国瑞*

山西大学物理电子工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年9月18日; 发布日期: 2025年9月26日

摘要

针对食物降温致口感流失问题, 研发了一款基于PID控制的可拆分恒温暖菜板。该暖菜板采用模块化可拆分设计, 配置PID控温算法实现精准温控。系统以STM32F103C8T6为主控芯片, 通过实时温度采集与PID运算, 动态调节PWM占空比驱动PTC加热单元, 快速达到目标温度。各加热模块通过CAN总线实现智能组网通信, 主控单元内置蓝牙模块可与手机互联, 支持实时显示设备ID、当前温度, 并可通过移动端远程设置目标温度及加热时长。测试表明, 该装置可在10秒内升温10°C(26°C至36°C), 稳态误差 $\leq 3^{\circ}\text{C}$, 为行业研发提供技术参考。

关键词

正温度系数, 意法半导体32位微控制器, 暖菜板, 比例积分微分控制, 无线控制

PID-Controlled Detachable Constant-Temperature Food Warming Plate

Shule Lin, Guorui Han*

School of Physical and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan Shanxi

Received: August 4, 2025; accepted: September 18, 2025; published: September 26, 2025

Abstract

To address the issue of food cooling leading to loss of taste, a detachable constant temperature warming plate based on PID control was developed. This warming plate adopts a modular and separable design, equipped with a PID temperature control algorithm to achieve precise temperature

*通讯作者。

regulation. The system uses the STM32F103C8T6 as the main control chip. Through real-time temperature acquisition and PID calculations, it dynamically adjusts the PWM duty cycle to drive the PTC heating unit, quickly reaching the target temperature. Each heating module achieves intelligent networking communication via the CAN bus. The main control unit has a built-in Bluetooth module for mobile connectivity, supporting real-time display of device ID and current temperature, and allowing remote setting of target temperature and heating duration via a mobile terminal. Tests show that the device can heat up by 10°C (from 26°C to 36°C) within 10 seconds, with a steady-state error of $\leq 3^\circ\text{C}$, providing technical reference for industry research and development.

Keywords

PTC, STM32, Warming Plate, PID, Wireless Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入冬季时节, 温度逐渐降低, 人们在就餐过程中难免会遇到饭菜变凉导致肉类食物油脂凝固, 米饭与面皮冷却变硬等问题, 而微波炉不能满足一些场景的使用需求。设计一款可以满足多种菜肴的持续加热, 同时具备温度调节的功能, 可以确保菜肴随时处于最佳食用期的器具迫在眉睫, 为了满足这一需求, 暖菜板应运而生。相对于传统的加热方式, 暖菜板更加便捷高效, 能够满足大部分家庭的生活需要, 它满足了人们对于菜肴加热的需求, 同时具备烘干, 暖奶, 暖茶, 暖面膜, 解冻, 防烫垫等多项功能, 从而提升消费者的使用体验[1]。现如今, 暖菜板已经从最初的奢侈品逐渐转变为家庭必备品, 并在家用电器市场占据了一席之地。

但是, 市面上的暖菜板仍存在“供需不对等”的情况, 大部分暖菜板一般只能盛放 6 道标准餐盘大小的菜肴, 若单次烹饪的菜肴数量少于 6 份, 则会有多余的电量消耗; 若单次烹饪的菜肴数量在 8 份左右, 则会使部分菜肴温度无法维持在一定的范围, 进而导致菜肴的品质参差不齐, 更有甚者可能会因为短期食用具有不同温差的菜肴而影响胃的消化功能。为了解决上述问题, 本文旨在利用 STM32 和 PTC 加热板设计并制作基于 PID 控制的可拆分恒温暖菜板。该暖菜板能够实现单个菜肴加热甚至是烹煮, 加热单元可拆分等功能, 真正做到“按需分配”, 尽可能减少电量的浪费。

2. 可拆分暖菜板的总体软件设计

系统控制架构的算法流程如图 1 所示, 其核心程序设计模块涵盖以下几个关键环节: 首先, 针对热场感知与功率调节, 实现了基于多传感器融合的温度监测算法及脉宽调制输出机制; 其次, 为保障数据传输的稳定性, 实现人机交互并进行多个暖菜板的加热, 开发了适用于串行通信的数据交互协议以及 CAN 总线收发协议; 最后, 在温控优化方面, 构建了完整的 PID 闭环调节算法, 确保温度调控的精确性。

2.1. 温度数据采集程序设计

本文使用热敏电阻 R_T 与普通 10 k 电阻 R_L 串联分压, 并使用 STM32F103C8T6 的 ADC 测量热敏电阻的分压值并通过热敏电阻 - 温度转换表实现对暖菜板表面的温度采集[2], 其中, 该电路的输入端电压 V_{VCC} 为 3.3 V。同时, 通过对热敏电阻的电压值进行多次采样并取平均[3], 精准获取电路中热敏电阻的分压值

V_{ADC} ，并在检测过程中自动剔除数值差异较大的电压值，防止电路中多余的噪声对分压产生影响[4]的同时，减小温度检测误差。在热敏电阻测量电路中，热敏电阻电压值 V_{ADC} 与电阻值 R_T 之间的关系如(1)式所示[5]:

$$R_T = \frac{R_L V_{ADC}}{V_{VCC} - V_{ADC}}$$

(1)

式中 R_L 是分压电路基准电阻，其阻值恒定且已知， V_{ADC} 是热敏电阻两端的实测电压， V_{VCC} 是输入的电压值。

基于上述电参数测量结果，即可通过查表优化法实现热敏电阻特性数据的温度转换。

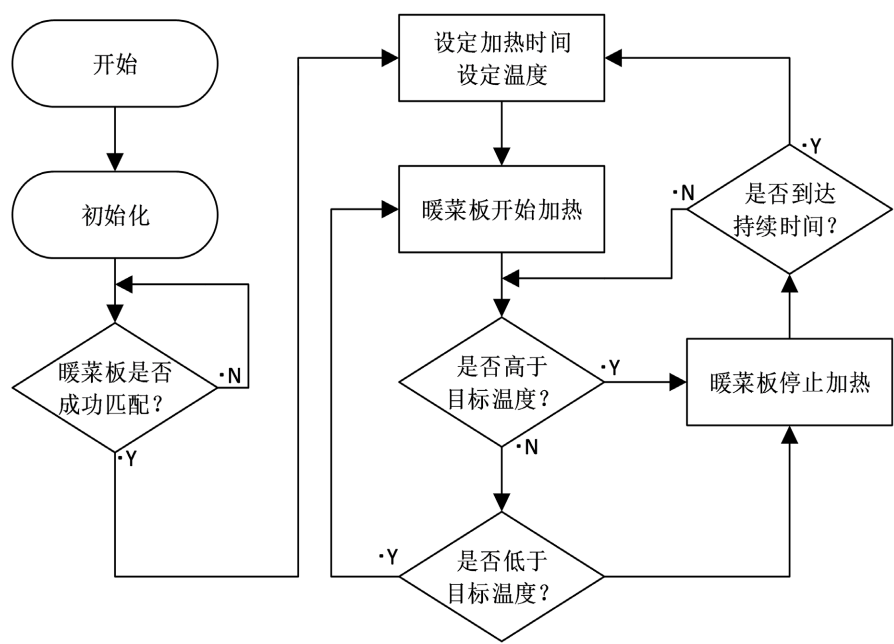


Figure 1. Algorithm flow of system control architecture
图 1. 系统控制架构的算法流程

2.1.1.1. PWM 输出程序设计

在 PWM 输出程序设计方面，本文选择 1 kHz 的 PWM 脉冲信号进行输出。同时，对加热温度设定一定的上限，降低加热板的加热过程可能出现的风险，若加热板加热温度高于这个温度，则会自动将 PWM 的占空比设置为 0。

2.1.1.2. 蓝牙通讯协议

本文通过编写串口协议激活蓝牙模块，并通过设置蓝牙指令快捷键，使用户实现“一键加热”，减少用户的操作流程，实现人机交互。本产品以“W”和“S”作为起始符，“Z”作为结束符进行串口协议的编写。其中不同的起始符将表示不同的功能，“W+数字+Z”的指令符表示设定的档位，“S+ 数字+Z”的指令符表示设定的时间，同时蓝牙将会定时发送暖菜板的当前温度和暖菜板的当前状态。而所有非预期或非规范化的输入数据将被系统归类为异常数据类型。这些指令将会被集成在不同的按键中，能够有效减轻用户的操作难度，以设定的温度为例，在用户的手机中将会分为 8 个档，不同的档位代表着不同的设定温度[6]。图 2 是用户交互界面，用户可以通过点击下方对应的按键快速发送响应的指令信号，并实现相应的设定功能。

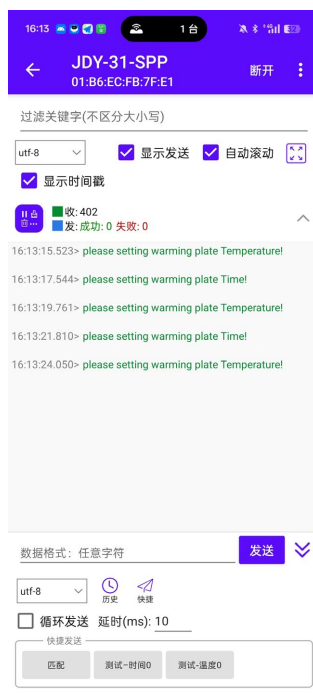


Figure 2. User interface
图 2. 用户交互界面

2.1.3. CAN 总线通信协议

本文通过编写 CAN 通信协议中的数据帧激活不同的暖菜板加热单元, 实现多个暖菜板的识别与加热, 减少用户的操作流程, 使用户实现“一键识别”。在数据帧中最常用的即为 Data 数据段以及 ID 标识符: 前者用于传输暖菜板加热的目标温度以及时间; 后者则是传输不同的加热模式。在本产品中, ID 号为“111”的标识符表示暖菜板单独加热, 而 ID 号为“000”的标识符表示暖菜板整体加热。其中, 在 ID 号为“111”的条件下, 除了主暖菜板仍能进行加热外, 其他的暖菜板单元的加热时间以及温度均会被设置为 0。同时, 主暖菜板将会定时发送暖菜板的当前温度和暖菜板的当前状态。若暖菜板处在“000”状态下, 暖菜板则会整体进行加热, 且不同的暖菜板均会显示对应的当前温度和当前状态。同时, 本产品以“P”作为匹配的起始符, 并以“Z”作为结尾, 即“P+ 数字 +Z”的指令符表示设定的档位。该指令能够实现暖菜板的匹配, 并减轻用户的操作难度, 这些指令将会被集成在不同的按键中, 以本产品的匹配暖菜板过程为例, 在用户的手机中将会分为 2 个档, 不同的档位代表着不同的匹配情况。

2.2. PID 控制程序设计

2.2.1. PID 控制基础

为了实现 PID 恒温控制, 需要先了解 PID 控制的原理, 它是通过比例系数, 积分系数以及微分系数进行的基于误差的调控[7], 在工业控制中, 它的基本公式见(2)式:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

在该控制模型中, K_p 、 $\frac{1}{T_i}$ 、 T_d 分别代表比例调节增益参数、积分时间常数以及微分时间常数, 其中 $e(t)$ 表示系统设定值与实际输出之间的偏差量。可以将 K_p 乘进去, 则有(3)式:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

其中 $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, $K_d = K_p T_D$ 。而在微处理器中无法对这种连续的函数做出有效的处理, 因此需要将上述的公式离散化, 而 PID 的离散化公式共有两种, 分别是位置式 PID 控制和增量式 PID 控制, 文中主要使用了位置式 PID 控制, 该控制方式公式及程序框图分别见(4)式及图 3:

$$u_k = K_p \cdot e_k + K_i \sum_{j=0}^k e_j + K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (4)$$

(4)式建立了离散控制系统的位置式 PID 数学模型, 该式中 u_k 表征当前采样时刻的系统控制输出, e_k 代表当前时刻的设定偏差, $\sum_{j=0}^k e_j$ 则为系统从初始时刻至当前时刻的累积偏差量。

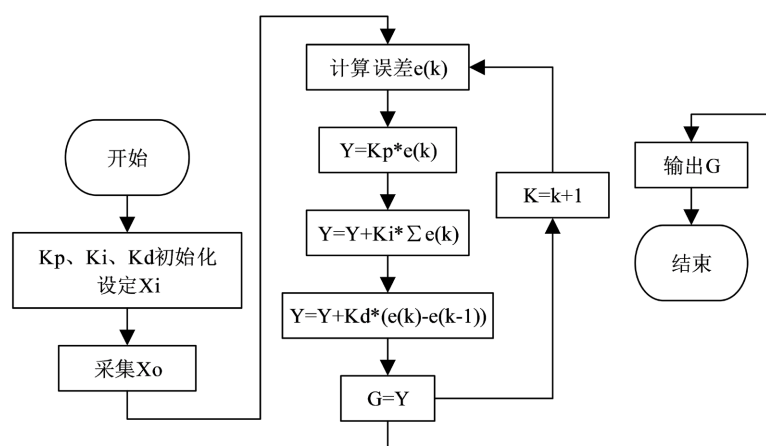


Figure 3. Positional PID diagram
图 3. 位置式 PID 程序框图

该算法的运算复杂度较低, 在工程应用中具有较高的可实施性。对于当前的两种离散 PID 算法, 可以近似分为比例、积分、微分三个板块[8]。其中, 比例板块是将误差放大一定的比例系数作为输出, 比例系数越大, 减小误差的速度就越快, 但一旦比例系数过大, 则会出现“超调”的状态, 实际值将会在目标值附近不断振荡, 无法维持恒定; 相反, 比例系数的过小选择将直接导致系统误差的累积效应增强。

同时, 本文通过加入一个积分系数, 有效改变了这种“超调”的状态, 减少甚至消除振荡。它将从前往后的误差值积累下来, 并反过来调整输出值, 实现误差的降低, 并对真实值的变化提前做出预判, 有效降低了输出值“滞后”所产生的影响, 即通过分析误差的变化率来进行调控。但赋予的积分系数值较大时, 则会对正常的输出值产生影响, 使真实值产生“滞后”, 即实际值已经到达目标值后仍在增加输出值, 使稳态误差增大, 对整个控制过程产生不可逆的效果。

最后, 本文通过对真实值的变化提前做出预判, 有效降低了输出值“滞后”所产生的影响, 即通过分析误差的变化率来进行调控。当真实值接近目标值而真实值的增长速率过快时, 则会按微分比例降低输出值, 使真实值的增长速率尽可能降低; 反之, 当真实值远离目标值而真实值的变化速率过慢时, 则会按微分比例增加输出值, 使真实值尽快接近目标值。而微分系数的过度调节会加剧输出值的衰减速率, 从而破坏系统的稳态性能, 使误差偏离目标值。

综上, 调节好比例、积分及微分系数能够使真实值更接近目标值。同时, 一个合适的更新周期能对

当前的数值变化做出快速的响应。若将更新一个周期所需的时间调节得过低, 则会增加 CPU 的计算负担, 增大积分和微分的误差。

2.2.2. PID 参数整定方法

在 2.2.1 中, 为了了解 PID 的具体作用, 就比例, 微分, 积分分别进行介绍与分析, 接下来则是对 PID 的参数进行调整, 在暖菜板的应用中, 需要确保暖菜板的稳态误差 $\leq \pm 3^\circ\text{C}$, 同时要避免温度过冲导致菜品变质或产生其他安全隐患。

在工程实践中, PID 参数整定主要通过试凑法和 Ziegler-Nichols 临界比例法来实现[9]-[11], 这两种方法各有特点, 适用于不同的场景。

试凑法主要应用于系统动态特性未知或难以建模的情况。其整定步骤如下:

- ① 初始化参数: 设 $K_p = 1$, $K_i = 0$, $K_d = 0$;
- ② 调整比例系数: 逐步增加 K_p , 直到系统输出出现轻微振荡, 此时系统进入临界稳定状态;
- ③ 引入积分环节: 为消除稳态误差, 设置积分时间 K_i 的初始值为 0.1, 并注意避免积分饱和现象;
- ④ 加入微分环节: 通过设置 K_d 的初始值为 0.05 来抑制超调, 并根据系统响应情况进一步微调。

而 Ziegler-Nichols 临界比例法适用于系统允许短时振荡的实验条件下, 它的操作步骤如下:

- ① 关闭积分($K_i = 0$)和微分($K_d = 0$), 仅保留比例控制;
- ② 逐步增大 K_p , 直至系统输出呈现等幅振荡(此时比例系数 K_u 称为临界增益), 记录振荡周期 T_u , 并计算振荡频率 ω_u ;

根据 Z-N 公式计算初始参数, 由(5)、(6)、(7)式有:

$$K_p = 0.6K_u \quad (5)$$

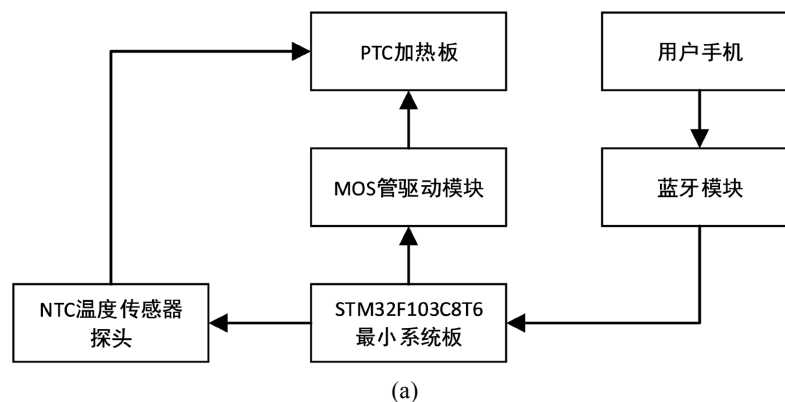
$$K_d = \frac{K_p \pi}{4\omega_u} \quad (6)$$

$$K_i = \frac{K_p \omega_u}{\pi} \quad (7)$$

- ③ 通过微调优化动态性能。

3. 可拆分暖菜板的总体硬件设计

该控制系统主要由以下功能模块构成: 基于 MP359 和基于 MP-H72SXX-FT 的电源管理单元、JDY31 蓝牙通信模块、采用热敏电阻的温度传感模块、基于光耦管与 IRF3205 的 PTC 加热驱动模块、以及 CAN 总线收发模块。系统总体设计如图 4 所示。



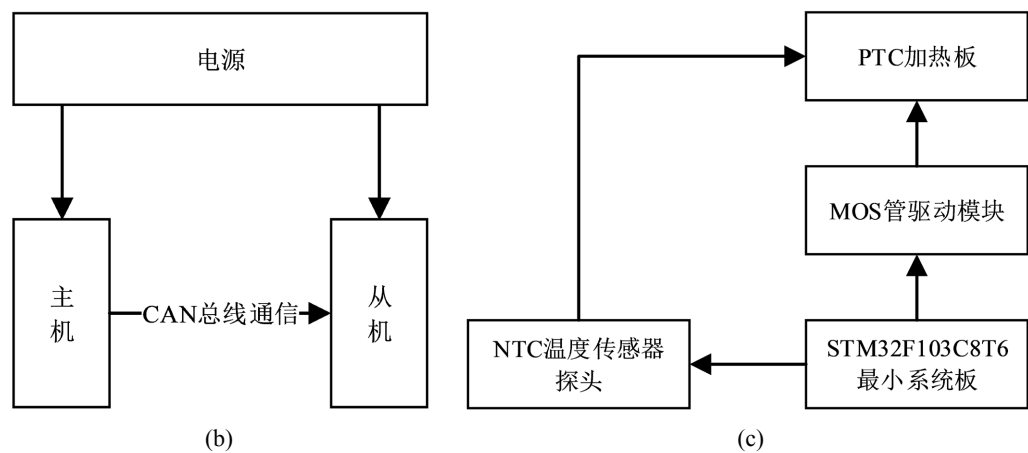


Figure 4. Hardware system. (a) Host module connection diagram; (b) Host-slave module connection diagram; (c) Slave module connection diagram

图 4. 硬件系统设计。(a) 主机模块连接图；(b) 主从机模块连接图；(c) 从机模块连接图

3.1. 电源设计

本文采用了 MP-H72SXX-FT 反激电源将 220 V 市电转为 24 V，该方案可以极大满足加热板的大功率需求。同时，本文利用锂电池连接 MP2359 和 AMS1117 稳压电源芯片用以输出 3.3 V 的电压，用于给控制器供电，维持 STM32 的 PWM 脉冲波形输出以及热敏电阻电压值的检测，同时为蓝牙通信以及 CAN 收发模块提供 5 V 的电压，确保系统的正常运行。MP2359 稳压电源电路的原理图以及 PCB 如图 5 所示：

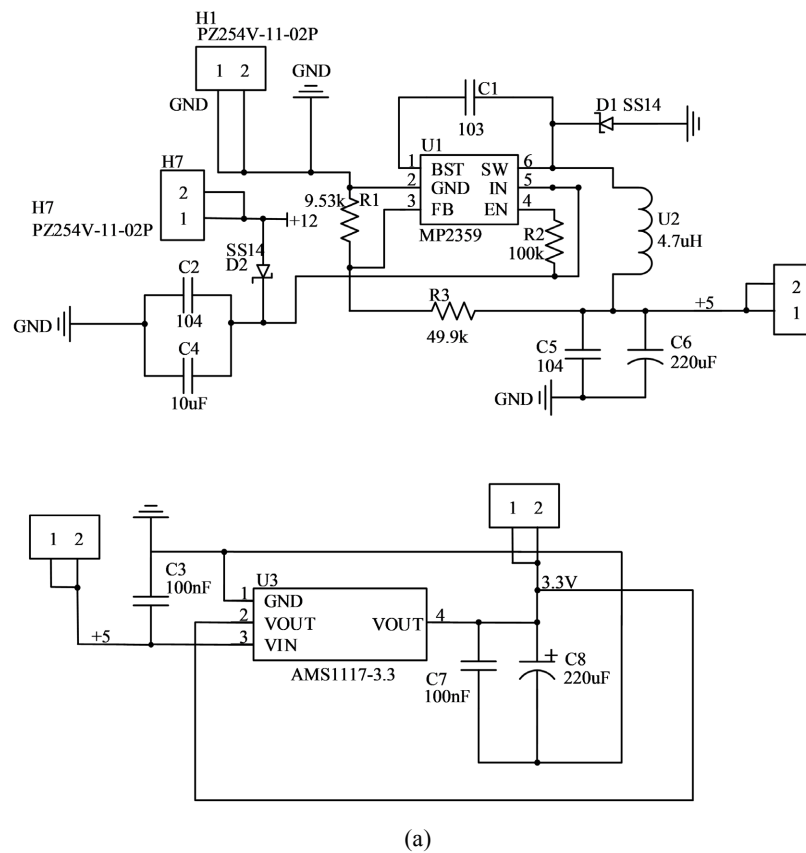
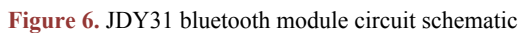




图5. MP2359 稳压电源电路设计图。(a) MP2359 稳压电源电路原理图; (b) MP2359 稳压电源电路 PCB



DOI: 10.12677/sea.2025.145089 1005 软件工程与应用

3.3. 驱动电路设计

本文采用开关电路控制的方案, 利用 STM32 输出 PWM 脉冲波形, 该信号在通过光耦管实现电压的放大后通过 MOS 管, 当信号处于高电平时, 在该电压满足 MOS 管的阈值电压的前提下, 此时 MOS 管的漏极与源极连通, 位于源极的 24 V 电压则可连接至 PTC 加热板进行加热; 反之, 当信号处于低电平时, 此时 MOS 管的漏极与源极断开, PTC 加热板停止加热。因此, 可以通过调节 PWM 输出的占空比实现 PTC 加热板加热量的控制, 可以实现温度的自由调控, 符合暖菜板使用的日常需求。图 7 为驱动电路的原理图及 PCB 电路板见图 7 所示。

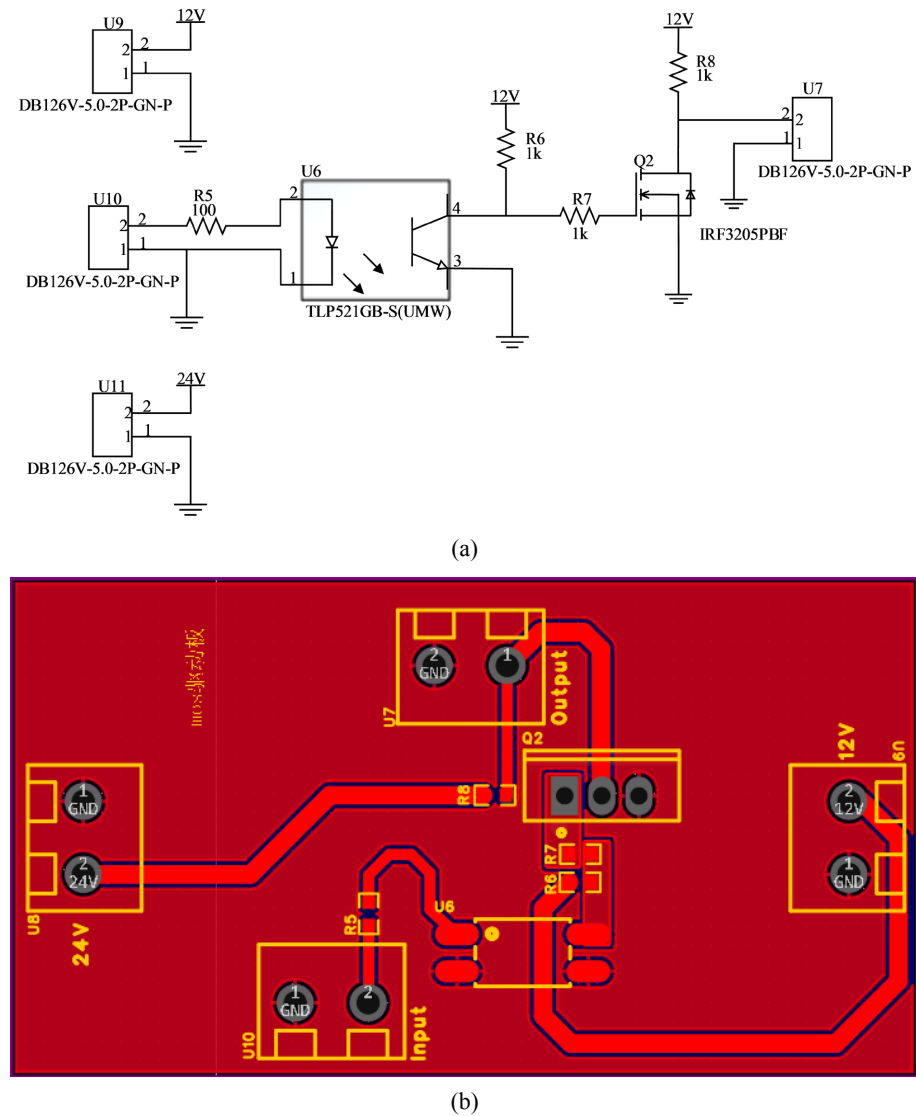


Figure 7. MOS drive circuit diagram. (a) MOSFET driver circuit schematic; (b) MOSFET driver circuit PCB

图 7. MOS 驱动电路设计图。(a) MOS 驱动电路原理图; (b) MOS 驱动电路 PCB 设计

3.4. CAN 总线通信电路设计

本文通过手机控制主控单元发送广播, 用以实现多个暖菜板加热单元的识别与匹配。同时, 其他加

热单元在预设好的程序中对广播信号的 ID 标识符进行判断, 若满足条件, 则可读取后续发送的目标温度及加热时间并进行相应的加热。反之, 若不满足条件, 则暖菜板不进行加热活动, 加热时间以及目标温度均为 0。CAN 总线收发电路原理图及其 PCB 电路板见图 8 所示。

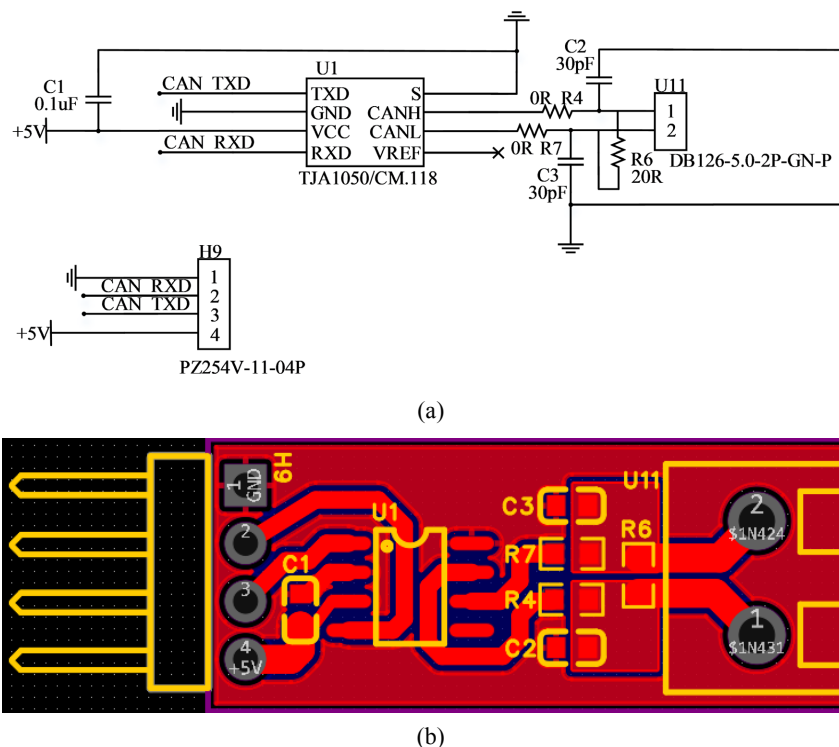


Figure 8. CAN bus communication circuit. (a) CAN bus transceiver circuit schematic; (b) CAN bus transceiver circuit PCB

图 8. CAN 总线收发电路。 (a) CAN 总线收发电路原理图; (b) CAN 总线收发电路 PCB 设计

4. 测试与分析

4.1. 仿真分析

智能温度控制仿真

(a) 仿真目的

PTC 加热板是一种常用的加热元件, 其电阻随温度升高而增大, 具有自限温特性[12]。在基于 STM32 的恒温暖菜板控制系统设计中, PTC 加热板作为核心加热元件, 需要通过 PID 控制算法实现精确的温度控制, 其中, 进行智能温度控制仿真的作用有: 验证 PID 控制算法在 PTC 加热板温度控制的性能, 减少实物温度控制中的比例、积分、微分系数的调节次数; 优化系统参数, 不断调整 PTC 加热板的热阻和热电容; 预测该恒温控制系统在不同条件下的变化情况, 减少实际调试所需的成本。

(b) 仿真方式

本次仿真基于 MATLAB 进行非线性系统下的仿真, 通过修改 MATLAB 代码中的参数来不断调整 PTC 加热板的温度变化曲线, 尽可能减少温度变化导致的振荡。

(c) 仿真步骤

在本次仿真过程中的主要步骤如下:

- ① 建立数学模型：根据 PTC 加热板的物理特性，建立温度变化的非线性常微分方程(ODE)模型。
- ② PID 控制器的设计：采用 PID 控制算法进行加热功率的计算，以达到对设定温度的精准调控。
- ③ 数值求解：使用 MATLAB 的 ode45 函数对 ODE 进行数值求解，模拟温度随时间的变化。
- ④ 基于温度曲线的可视化分析：借助图形化方法，研究系统在多种参数配置下的动态特性。

(d) 仿真结果

当设定目标温度为 60℃时，系统仿真结果如图 9 所示：

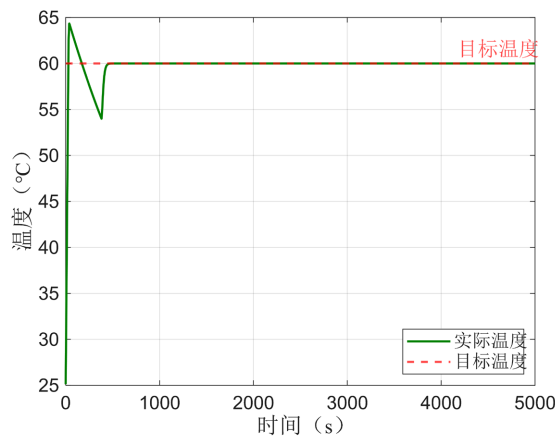


Figure 9. System simulation results at 60℃
图 9. 60℃下系统仿真结果

当环境温度发生变化时，暖菜板温度控制策略也会发生改变。图 10 给出当系统运行至 2500 秒时，若温度值由 25℃跃升至 30℃，其温度响应过程及环境温度变化仿真结果如图 10 所示：

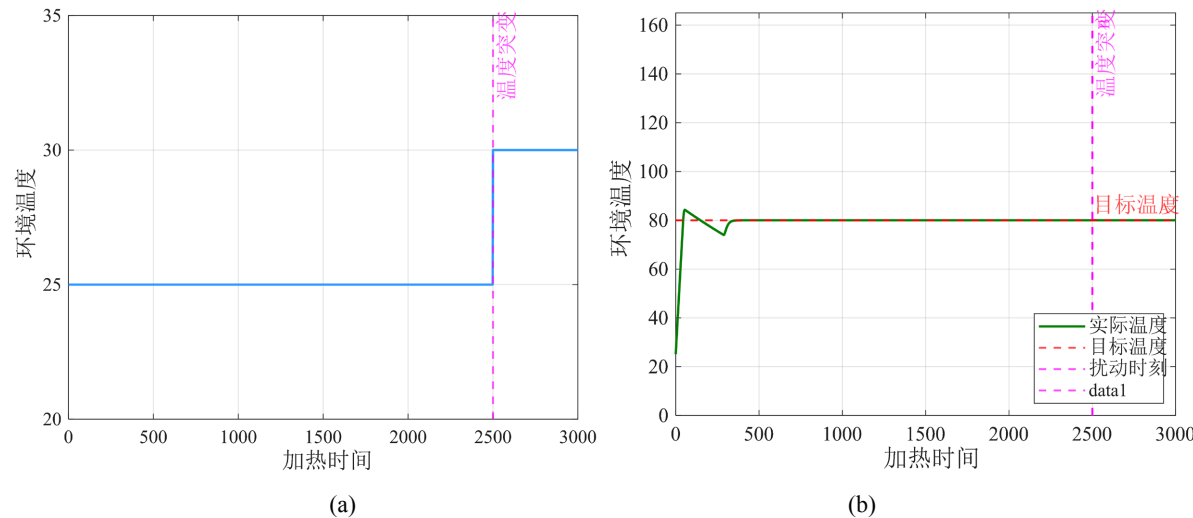


Figure 10. PID step disturbance test. (a) Ambient temperature step change simulation; (b) PID simulation curve under sudden ambient temperature change

图 10. PID 阶跃扰动测试。(a) 环境温度突变仿真曲线；(b) 环境温度突变下的 PID 仿真曲线

通过图 10 的阶跃扰动测试可以看出，系统始终处于稳态，表明控制算法具备良好的抗干扰能力。

通过上述的仿真结果，可以得出 PID 温度控制算法具有响应速度快，温度控制稳定等优点，可以用

于 PTC 加热板的实物设计中, 同时, 实物中热阻 R_{th} 的微小变化可能导致稳态温度偏移, 需硬件校准; 并且比例系数, 积分系数以及微分系数也会随着温度的变化而变化, 故无法实现仅通过一个 PID 参数来控制整个温度范围内 PTC 加热板的恒温。

5. 测试与分析

最终的实物如图 11 所示, 其中 8 节锂电池共 12 V, 用于连接降压稳压电路模块, 为 STM32 提供 3.3 V 的电压, 维持单片机的正常工作, 并为外设提供 5 V 的工作电压[13]; 而 STM32 在正常工作且蓝牙模块匹配成功后, OLED 则会显示当前的温度, 目标温度以及加热时间, 这些参数均可通过手机蓝牙加以调节; 在设置完毕后, STM32 则会连接 MOS 管驱动电路, 通过调节输出 PWM 的占空比来控制连接 220 V 转 24 V 的电压的通断[14], 因此可用来进行 PTC 加热板的恒温控制; 同时, 热敏电阻粘接在铝基板上用于测量当前菜肴的加热温度。

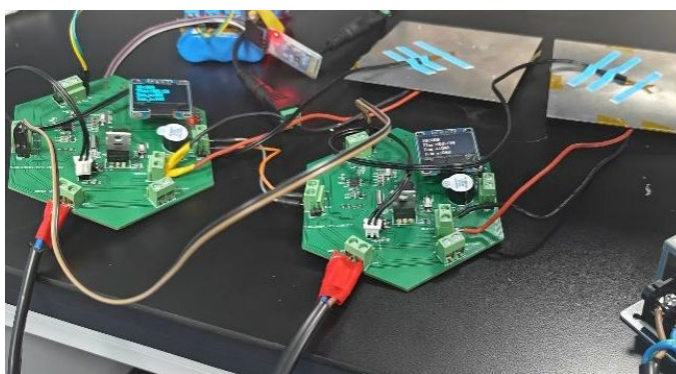


Figure 11. Final prototype
图 11. 最终实物图

该设计分别对不同设定温度下响应时间、加热过程中出现的稳态误差, 加热范围等情况进行检测, 同时将该产品与市面上常见的暖菜板进行对比。具体测试内容如下:

- ① 在 22 度的室温下暖菜板的加热温度设定为 60℃, 其中的加热稳态曲线如图 12 所示:

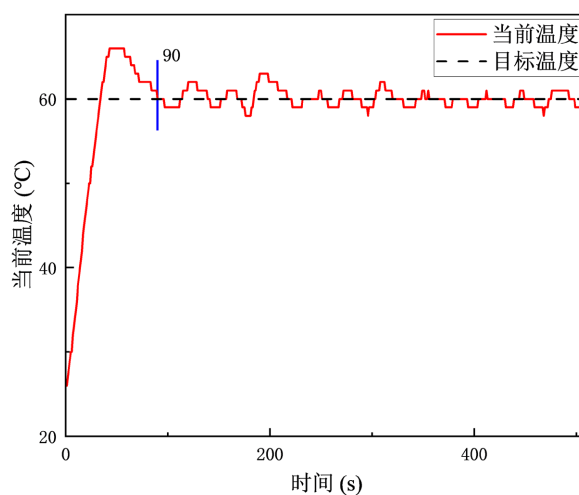


Figure 12. PID control curve at 60°C
图 12. 目标温度 60℃下的 PID 控制曲线图

在图 12 中, 图示曲线采用三色标识: 红色曲线表征实时温度数据, 绿色曲线反映加热功率的 PWM 占空比, 而图 12 中蓝色曲线表示温度到达 60℃ 后维持稳态所需的时间, 每秒采样对应的温度值。由图 12 可以看出, 暖菜板的设定温度在从室温升高为 60℃ 时, 暖菜板能够在 90 s 以内到达 60℃ 并维持恒温状态, 并且在 60℃ 的条件下, 该暖菜板的稳态误差基本不超过 $\pm 3^\circ\text{C}$, 完美满足暖菜板的基本功能, 此时暖菜板的 $K_p = 6$ 、 $K_i = 0.5$ 、 $K_d = 2$ 。

② 当系统运行至 261 秒时, 若温度值发生突变, 其动态响应过程如图 13 结果所示:

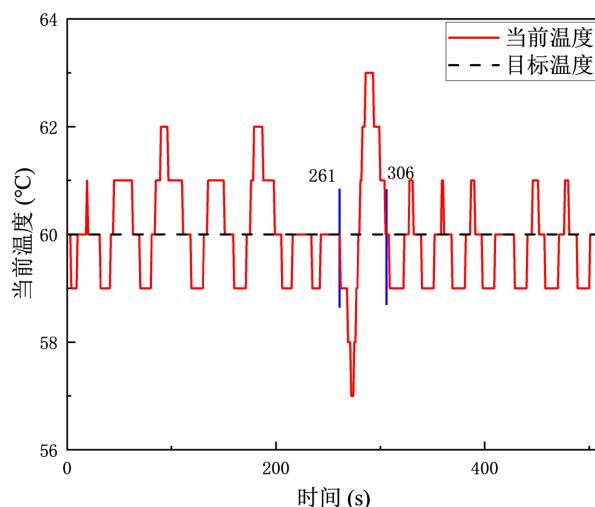


Figure 13. PID control under step disturbance
图 13. 阶跃扰动下的 PID 控制曲线

图 13 中各曲线的颜色标识与时间轴意义与图 1 一致, 且图 13 中蓝色曲线表示温度发生突变后回到稳态的时间。从图 13 中可以发现, 该系统在温度值突然下降后仍能在 44 秒内做出调整, 使其稳态温差控制在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 之间, 具有良好的响应速度。

③ 在 22℃ 的室温下暖菜板的加热温度设定为 80℃, 其中的加热稳态曲线如图 14 所示:

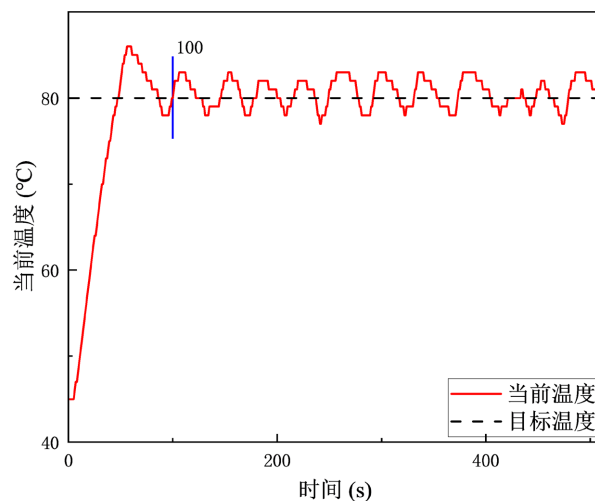


Figure 14. PID control curve at 80°C
图 14. 目标温度 80℃ 下的 PID 控制曲线图

图 14 中各曲线的颜色标识与时间轴意义与图 12 一致, 且图 14 中蓝色曲线表示温度到达 80℃ 后维持稳态所需的时间。从图 14 中可以发现, 暖菜板的设定温度在从室温升高为 80℃ 时, 暖菜板能够在 100 s 以内到达 80℃ 并维持恒温状态, 同时, 该系统的稳态温差控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 之间, 可以有效确保菜肴的温度不变。

④ 将该暖菜板产品与市面上常见的暖菜板进行性能对比, 其结果见表 1:

Table 1. Performance comparison of food warming plates on the market

表 1. 市面上常见的暖菜板性能对比

品牌/型号	加热方式	稳态误差
摩飞折叠款暖菜板	远红外加热技术	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
美的随心卷	PTC 加热板加热	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
可拆分恒温暖菜板	PTC 加热板加热	$\pm 3^{\circ}\text{C}$

从表 1 中可以看出, 本文所提出的可拆分恒温暖菜板与美的随心卷均采用 PTC 陶瓷发热技术, 该加热方式安全且稳定, 而可拆分恒温暖菜板的加热温度均匀, 稳态误差小, 功能更为完备, 与美的随心卷相比更具有优势; 而本文所提出的暖菜板在稳态误差方面比摩飞折叠款暖菜板的减少 60%。因此与摩飞折叠款暖菜板相比更具有优势。

6. 结束语

本文设计了基于 PID 控制的可拆分恒温暖菜板, 并验证了该暖菜板在不同温度下的加热效果及其鲁棒性, 可以实现对不同菜品的定时恒温加热, 同时通过设定温度阈值有效的避免暖菜板进行加热时的一些危险的情况发生, 通过线下对暖菜板的恒温控制检测证明其实验结果均满足需求。而在满足上述条件的基础上, 本文还扩展了如下功能:

- (1) 目标温度设定功能, 使该器件的加热温度灵活可变;
- (2) 人机交互功能, 可以有效增加暖菜板的使用方式;
- (3) 可拆卸用作单一加热单元, 可与其他加热单元连接共同加热。

未来可集成物联网功能并探索自适应 PID 算法, 进一步提升智能化水平与温控精度, 满足更广泛的用户多样化需求。

参考文献

- [1] 侯婷婷. 餐桌新物种可暖菜可烹煮的暖菜板[J]. 家用电器, 2023(1): 88-89.
- [2] 陈先樑, 姜钊, 张勇. 基于负温度系数热敏电阻温度采样精度研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 64-69.
- [3] 王志超, 张志杰, 张秋宁. 一种基于 FPGA 的瞬态温度采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19): 49-55.
- [4] 钟加勇, 程晓, 项波, 等. 高压断路器潜伏性故障自动预警系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 54-59+66.
- [5] 董雁楠, 李相俊, 韩子娇, 等. 整流器拓扑结构与电解特性对质子交换膜电解池比能耗影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4131-4141.
- [6] 欧阳武旻, 杨静. 基于联合分析法的 AR 家具交互界面设计[J]. 湖南包装, 2024, 39(4): 184-187.
- [7] 刘玉来, 李竹青, 卢芳草. 基于模糊 PID 控制的蔬果智能冷库保鲜系统[J]. 现代食品, 2025(2): 80-83.
- [8] 马明玉, 龙洗, 鲁宇轩, 李跃润, 刘昕. 闭环分段 PID 恒高温控制系统设计[J]. 电气工程, 2020, 8(2): 59-67.
- [9] 王子祺, 夏思成, 王宇辰, 孙亚菲, 王敬博, 陈亚茹. 基于人工蜂群算法优化 BP 神经网络的 PID 控制算法[J]. 嵌入式技术与智能系统, 2025, 2(1): 13-23.
- [10] 陈甲. 工业控制中 PID 的参数整定方法[J]. 自动化应用, 2023, 64(23): 50-52.

- [11] 吕畅. 基于多目标优化算法的主从 PID 控制参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [12] Brown, R.J. (2023) Characterization and Implementation of Screen-Printed, Flexible PTC Heaters for Portable Diagnostic Testing. Master of Science, Purdue University Graduate School.
- [13] 赵康, 董文博, 王善斌. 基于 STM32F4 和小波变换的智能环境辐射监测系统设计与实现[J]. 科技创新与用, 2025, 15(9): 46-49.
- [14] 何代杰. 电动轮椅车电机驱动控制系统的硬件电路设计[J]. 自动化应用, 2022(6): 141-144.