

引用格式：李二伟, 刘国宾. 高精度原子陀螺仪温控电路设计与实现[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 270-278.

高精度原子陀螺仪温控电路设计与实现

李二伟, 刘国宾

中国科学院 国家授时中心, 西安 710600

摘要: 为满足原子磁力计和陀螺仪试验研究中对温度稳定性的要求, 本设计利用单片机、模数转换器采样技术和桥式推挽功率放大技术设计并研制了一种基于比例积分的改进控制算法和脉宽调制器输出控制的交流加热温控电路。试验结果表明: 该温控电路峰值加热功率可达40 W, 可在40 min内将目标温度加至150°C并进入稳态, 且温控精度 $< 0.02^{\circ}\text{C}$, 产生的剩磁对磁共振信号展宽几乎没有影响。该方案控制灵活、可靠性高, 为相关温控需求提供了一种新思路。

关键词: 温控电路; 比例积分; 桥式推挽放大电路; 脉宽调制器; 交流加热

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0270-09

Design and implementation of temperature control circuit for high precision atomic gyroscope

LI Er-wei, LIU Guo-bin

National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

Abstract: In order to meet the demands of temperature stability in atomic magnetometer and gyroscope experiments, an improved control algorithm based on PI and a PWM output control circuit for AC heating temperature control are designed and developed by using single chip microcomputer, AD sampling technology and bridge transformerless (BTL). Test results show that the peak heating power can reach 40 W, the target temperature can be increased to 150°C and into the steady state within 45 minutes, the temperature control precision is less than 0.02°C , the control is flexible, high reliability, and the residual field generated has little effect on the linewidth of the magnetic resonance signal. This scheme provides a new idea for related temperature control.

Key words: temperature control circuit; proportional-intergral (PI); bridge transformerless (BTL) circuit; pulse width modulation (PWM); AC heating

0 引言

在原子磁力计及陀螺仪试验研究中, 其关键部件原子气室的温度控制至关重要, 需具备精度高、温

度可调^[1]以及剩磁小的特点,才能使原子气室工作在更佳状态以促进实验的性能指标。与传统基于热原子气室的微波原子钟(如微波腔铷原子钟)和相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)芯片原子钟不同,高灵敏度的原子磁力计与陀螺仪要求更高的原子气室工作温度($\approx 120^\circ\text{C}$),更高的控温精度(达 0.01°C 量级)以及更小的加热电流剩余磁场,因而对原子气室的温度控制提出了更严格要求^[2-3]。

近年来数字恒温控制方法^[4]被大量应用于原子磁力计的温度控制^[5],它们以PID(proportional, integral, differential)技术,模拟-数字转换(analog digital converter, ADC)采样技术为基础,设计出了可控的数字控温系统。试验表明相同条件下交流信号产生的剩磁更小,而传统的温控驱动电路是利用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)脉冲信号作为开关信号^[6],通过三极管采用开环的驱动控制方式在直流电源上获取功率输送至加热线圈,因此输出的是直流信号,无法达到有效消除剩磁的目的^[7]。

本文设计了一种闭环全桥驱动加热电路^[8],采用差分输出的方式确保信号为交流信号,并采用双路PWM(pulse width modulation)进行控制,其中PWM为参与运算信号(非开关信号),并采用24位高精度ADC转换芯片ADS1260BIRHBR进行电压采集以及PI(proportional-integral)控制算法进行控制的思路,使得电路加热功率大、效率高、控温范围大和控制精度高,实现了室温到 150°C 的控温区间;温度上升至 150°C 并进入稳态所需时间 $< 40\text{ min}$,温控精度 $< 0.02^\circ\text{C}$ 。

1 总体方案

本文设计的温控电路原理框图如图1所示,首先使用单片机微处理器中的定时器产生两路PWM波,经跟随电路和运算放大电路将PWM波调理成两路反相的信号,经全桥推挽电路放大后对电热丝进行驱动加热。测温器件采用不含磁性材料的热敏电阻,经惠斯通电桥转换成电压信号,其中惠斯通电桥驱动电压采用REF5010AIDR芯片提供电压基准源来确保电压精度,而后将电桥电压进行滤波放大后使用模数转换器(TI公司的ADS1260BIRHBR)将电压转换成数字信号,在单片机中通过PI算法,根据实际温度与目标温度的差设定PWM波的占空比,实现对被加热体温度的负反馈控制。

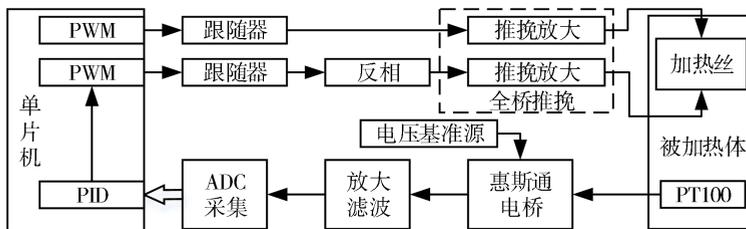


图1 温控电路原理框图

2 模块电路设计

2.1 微处理器电路

微处理器选用意法半导体STM32F407VGT6型单片机,时钟 168 MHz ,参与PWM发波的定时器时钟为 84 MHz ,用以产生 50 kHz 的PWM波,处理器电路参照芯片手册设计,此处不再赘述。

2.2 加热驱动电路

与文献[9]和[10]设计不同,本设计采用带有反馈的桥式推挽BTL电路作为驱动电路,且使用双电源供电。在相同的工作电压和相同的负载条件下,双电源供电的BTL通过桥臂作用提高电源在负载上的压差。采用电压负反馈原理将PWM波放大至理想状态(本设计放大至 $\pm 9.24\text{ V}$,最大为 $\pm 14.8\text{ V}$),电

路原理图如图 2 所示。采用该方法的好处在于可将输出电压用差分的方法提高至两倍的供电电压，有效地提高了电路的加热功率。本设计中的加热元件为传统加热器件康铜丝，有效负载约为 $20\ \Omega$ ，峰值功率为 $17.1\ \text{W}$ （最大可调节至 $40\ \text{W}$ ），由于 PWM 波频率为 $50\ \text{kHz}$ ，定时器时钟 $84\ \text{MHz}$ ，PWM 波每个周期含 1 680 个时钟周期，我们定义单位时钟对应的功率来表征功率分辨率，本电路为 $17.1\ \text{W}/1\ 680 \approx 0.01\ \text{W}$ ，即 PWM 脉宽步进一个单位，输出功率约增加或减小 $0.01\ \text{W}$ ，该指标对最终温控精度有着重要影响。

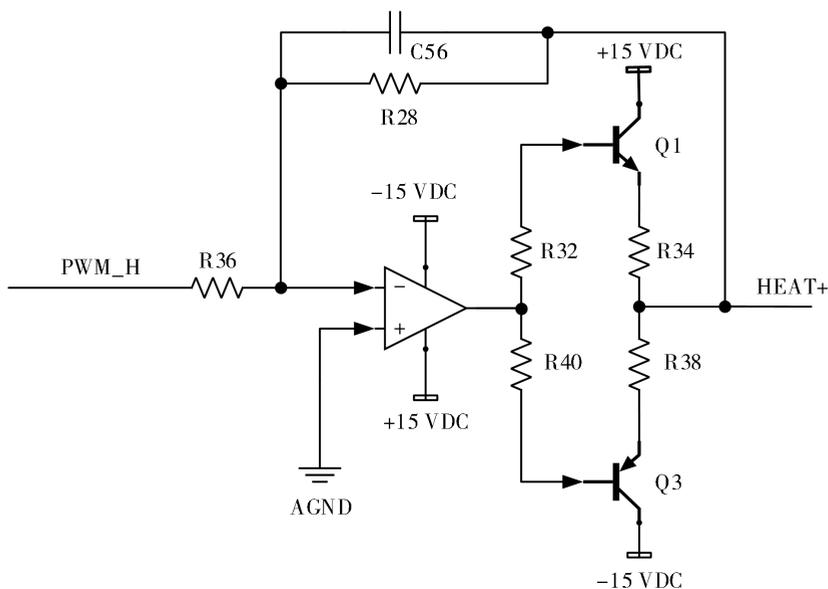
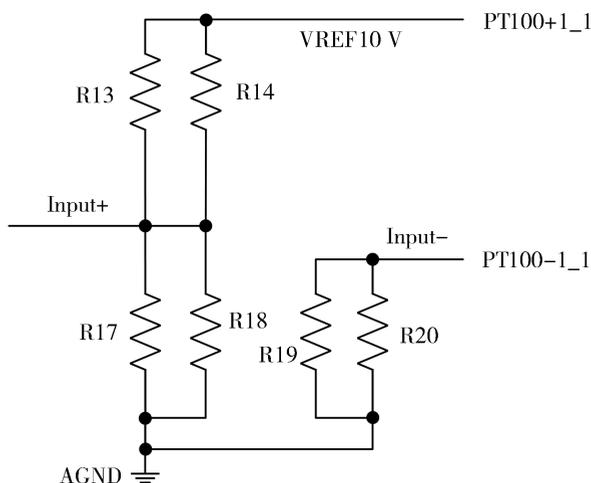


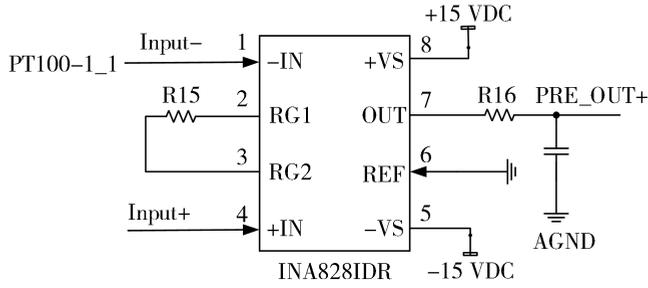
图 2 加热驱动电路原理图

2.3 PT100 解调电路

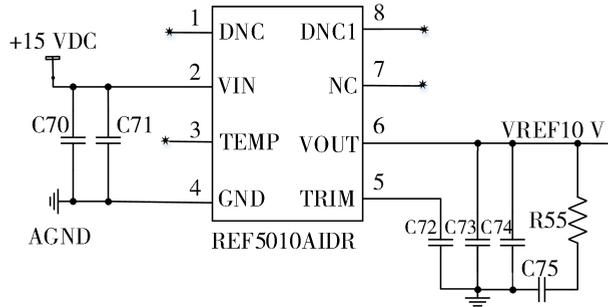
本设计中选用测温元件为 PT100 铂热电阻^[11-12]，采用惠斯通电桥进行电阻-电压转换，值得注意的是为保证解调精度，电桥驱动电压采用 $10\ \text{V}$ 电压基准源确保电桥电压的稳定性，同时采用仪表放大器结合无源低通滤波放大进行调理，PT100 解调电路和放大电路如图 3 (a) 和图 3 (b) 所示，电压基准源电路如图 3 (c) 所示。经过调理后的信号通过 ADS1260BIRHBR 采样芯片转换成数字信号进行运算。



(a) 惠斯通电桥电路



(b) 前置放大电路



(c) 电压基准源电路

图 3 PT100 解调电路

3 PI 控制算法

由于常规位置式 PID 在加热初期比例系数 K_p 不能太大^[4]，因此不能使用满功率加热，否则在达到设定位置时可能发散亦或是调整时间很长，不利于实验效率和节约时间，因此本文结合实际需求，提出了一种改进的 PI 控制算法，即先使用满功率加热至设定温度附近，然后进行 PI 调节，该方式可以将比例系数 K_p 极大提高使得温度发生小幅变化时输出可以快速响应，从而达到提高温控精度的目的。由于 PID 为传统控制方法，本文不再介绍原理，仅简单介绍该改进方法的参数整定方法：

① 确定 PWM 每个周期时钟数。设定定时器时钟频率为 f_t ，目标频率为 f_g ，则目标频率 f_c 的一个周期对应的时钟数如式 (1) 所示：

$$N_c = f_t / f_g \quad (1)$$

本设计中目标频率为 $f_g = 50 \text{ kHz}$ ，定时器时钟为 $f_t = 84 \text{ MHz}$ ，则一个周期对应的时钟为 $N_c = 84\,000\,000 / 50\,000 = 1680$ (定时时间)。

② 在室温环境下，测量占空比 C_d 和温度 T 的关系。分别测量 $10\% N_c$ 和 $90\% N_c$ 占空比对应的稳态加热温度 T_{S1} 和 T_{S2} ，得到关系式 (2)：

$$C_d = \frac{0.9N_c - 0.1N_c}{T_{S2} - T_{S1}} T \quad (2)$$

③ 整定比例系数 K_p 。假设设定温度为 T_{set} ，进入 PI 控制时温度为 T_{pre} 。当温度加热到 T_{pre} (本设计 $T_{pre} = T_{set} - 2$) 时进入 PI 环节，则 PI 参数中比例系数计算如式 (3)：

$$K_p = \frac{N_c}{T_{set} - T_{pre}} \quad (3)$$

经试验反复验证, 使用该方法得到的 K_p 可保证系统快速稳定的进入稳态。

④ 整定积分系数 K_i 。得到 K_p 后, 将 K_i 设定为 0, 运行电路, 观测积分值 E_i 接近设定温度 T_{set} 时的大小, 那么根据第二步预测占空比 C_d , 预设温度对应大致占空比计算如式 (4):

$$C_{set} = \frac{0.9N_c - 0.1N_c}{T_{S2} - T_{S1}} T_{set} \quad (4)$$

可初步得积分常数 K_i 的值, 其计算如式 (5):

$$K_i = \frac{C_{set}}{E_i} \quad (5)$$

由于积分因子介入后, 加热至目标值时误差积累将减小, 可根据实际情况适当增大 K_i (增加 2~8)。自此 PI 参数整定完毕, 为了更好地完成控制, 可在程序中界定 PWM 占空比, 以防止意外扰动使得系统发散而失败, 本设计的程序框图如图 4 所示。

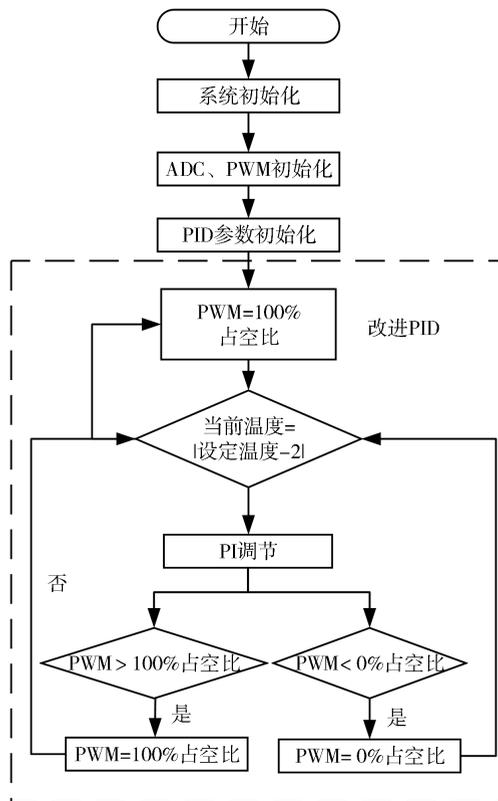


图 4 温控系统程序控制框图

4 测试结果及分析

基于本设计实现的温控电路实物如图 5 所示。该电路为 24 V 直流供电, 不同 PWM 占空比电源电流大小如图 6 所示, 其中占空比为 0 时为电路空载电流, 可见本电路输出功率线性度较好, 为精确控制做了良好铺垫。



图 5 温控电路实物图

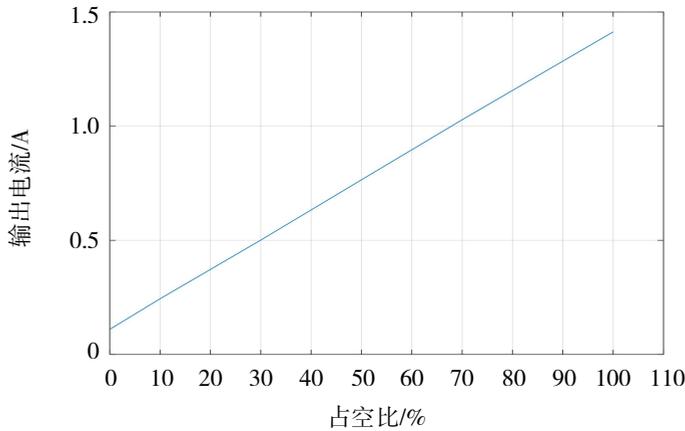
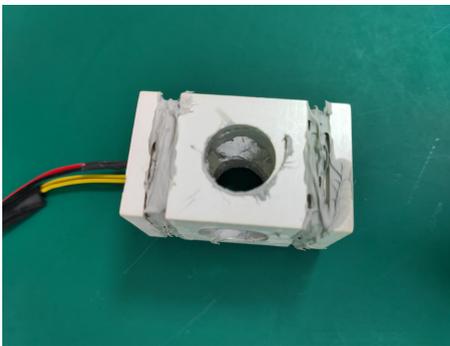


图 6 温控电路电源电流随占空比变化关系

被加热装置如图 7 所示，其中图 7 (a) 所示为被加热体，由氮化硼陶瓷材料加工而成，使用线径为 0.3 mm、长度为 3 m ($\pm 3\%$) 康铜丝 ($6.65 \Omega/\text{m}$) 紧密双绞的方式进行绞合，绞合后加热丝电阻值约为 19.95Ω 。然后使用制成的双绞康铜丝再被加热体上下槽环绕，并将 PT100 和绕成的康铜丝用导热硅胶进行固定。为防止热量损失和外界气流干扰，使用聚四氟乙烯 (特氟龙) 筒进行包裹，如图 7 (b) 所示，并在实验前将筒上的孔密封，在室温环境下 ($10\sim 23^\circ\text{C}$) 进行温控效果测试。



(a) 加热丝绕制及 PT100 嵌入



(b) 加热空间密封

图 7 被加热装置

分别对目标加热体进行 50 、 100 和 150°C 的实验测试，每个温度点测试两小时，得到图 8~图 10 所示的结果。从图中可以看出， 50°C 加热仅需 11 min 即可进入稳态， 100°C 加热仅需 20 min 即可进入稳态，

150℃加热仅需 40 min 即可进入稳态, 且误差皆 < 0.02℃。由于本设计采用双电源 ($\pm 15\text{ V}$) 供电, 放大电路输出最大电压达 14.8 V, 在差分模式下加热丝两端压差为 29.6 V, 因此最大输出功率达 43.9 W。相比传统温控电路, 本设计实现了相对快速且高精度的温控目标。

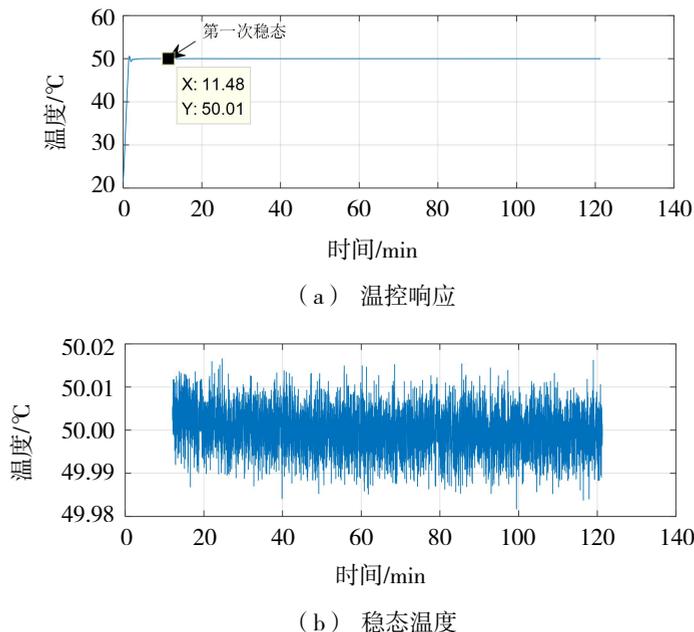


图 8 50℃加热测试结果

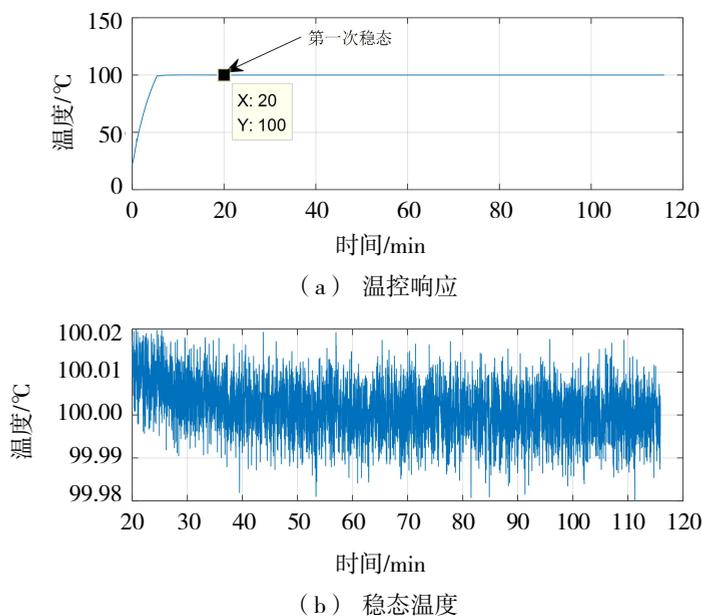
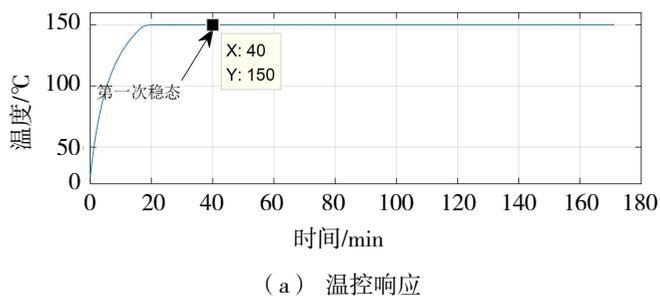
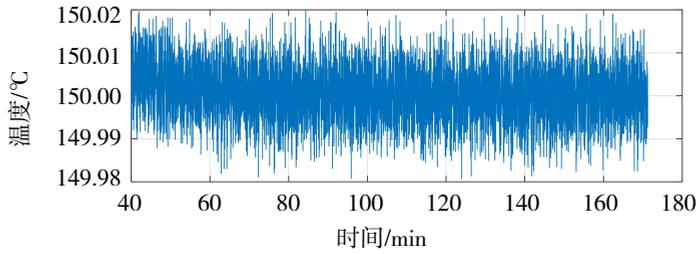


图 9 100℃加热测试结果

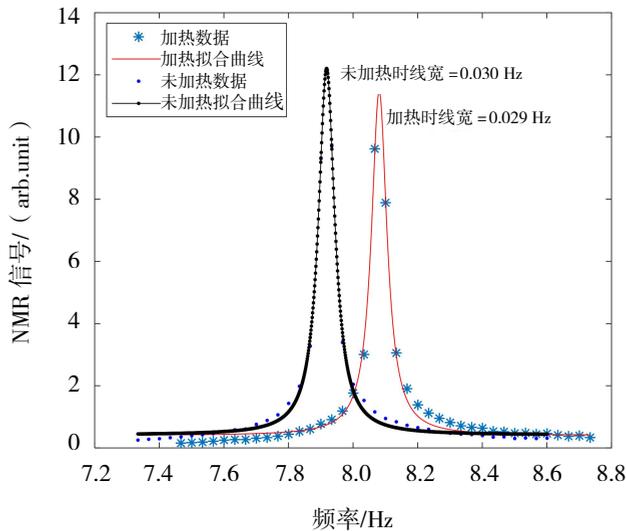




(b) 稳态温度

图 10 150°C加热测试结果

为了研究加热电路剩磁的影响，在原子陀螺仪实验中，使用 120°C 控温测试核磁共振信号，加热测试完毕后断掉加热电源，立刻开始采集无加热时的磁共振信号，如图 11 所示。从图 11 可以看出， ^{129}Xe 磁共振谱线展宽加热的情况下为 0.029 Hz，撤掉加热电流后为 0.030 Hz，差别较小，因此加热线圈产生的剩磁较小，对实验没有明显的影响。

图 11 ^{129}Xe 磁共振谱线在有加热（星号）和无加热（实心点）电流条件下的线宽比较

5 结语

本文设计了一种以 STM32F4 系列单片机为控制单元，以带有反馈的 BTL 电路作为驱动，基于 PI 控制的温度控制模块，实现了以交流驱动减小原子气室空间的剩磁的目的。控制系统功率随 PWM 占空比线性度好，步进分辨率为 0.01 W，响应速度快，控温范围为 30~150°C，控温精度 $< 0.02^\circ\text{C}$ ，且加热至 150°C 并进入 0.02°C 误差区间仅需 40 min。

实验结果表明 BTL 驱动加热可拓展电源电压范围以增加加热功率，PWM 波作为运算信号得到的加热效果在加热效率和精度方面效果显著。本文提出的改进型 PI 控制算法及参数快速整定方法可很好的适用于类似的试验研究，可有效削减系统开机时间，提高相关实验效率。该电路可应用于以热原子气室为核心器件的量子传感器，如原子磁力计与陀螺仪等研究领域。

参考文献：

- [1] 张敬兴, 王劲东, 薛洪波. 原子磁力仪传感器高精度温控技术研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(2): 126-130.

- [2] 何昌明, 张贤谊, 闫世栋, 等. 铷原子频标数字温控电路的设计[J]. 波谱学杂志, 2009, 26(3): 375-384.
- [3] 句博文, 云恩学. 一种应用于 CPT 原子钟的低相噪微波频率合成器[J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 151-155.
- [4] 肖娅聪, 刘昆, 刘洪康, 等. 喷泉钟驾驭恒温晶振方法研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 110-114.
- [5] 李庆萌. 磁场对原子磁力仪相关光谱影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [6] 郑本昌. 基于 PID 自动控制的高精度温控电路设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2020(11): 88-90.
- [7] 毛惊涛, 黄光明. 原子磁力仪温控电路的优化设计及评估方法[J]. 激光杂志, 2019, 40(9): 24-28.
- [8] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 周嘉鹏, 毛海岑. 用于原子陀螺仪的铷源温控系统设计[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(2): 88-91.
- [10] 罗亮, 胡佳成, 王婵媛, 等. 高精度半导体激光器驱动电源及温控电路设计[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 200-204.
- [11] WANG J F, SUN X D. Compatible component parameter selection plan of temperature sensing resistor in reciprocating temperature control circuit[C] // ICEESD 2011, International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, 2012.
- [12] 黄青川, 马静. 半导体激光器温控电路分析与测试[J]. 光学与光电技术, 2006(3): 46-48.