

# 模拟 PID 电路参数自整定温控系统设计

刘云芳<sup>1 2</sup> 张 晓<sup>1 2</sup> 李建伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

(<sup>2</sup> 中国科学院大学 北京 100049)

**摘 要:** 针对模拟 PID 电路的控制理论和机理,从简单、易用、直观的参数整定原则和切实改善系统控制性能的目的,设计了由电流源搭建的铂电阻测温电路、MSP430 主控电路、含数字电位器的模拟 PID 电路、串口通讯和上位机软件构成的模拟 PID 电路参数自整定温控系统。试验表明,自整定系统工作正常,整定后的温控系统在测温精度为 0.03 °C 的情况下能获得 0.1 °C 的温度稳定度。

**关键词:** 模拟 PID 电路 数字电位器 参数自整定

中图分类号: TB663 文献标识码: A 文章编号: 1000-6516(2013)02-0068-05

## Design of analog PID circuit system with parameter auto-tuning

Liu Yunfang<sup>1 2</sup> Zhang Xiao<sup>1 2</sup> Li Jianwei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on analog PID control theory, an analog PID circuit with auto-tuning parameter of temperature controlled system was designed on purpose of simple, easy to use, intuitive parameters setting principles and effectively improving the performance of auto-tuning system. The analog PID circuit consisted of temperature measure circuit with constant flow source, main control with MSP430, analog PID circuit with digital potentiometer, serial communication and PC software interface. Experiments with the analog PID circuit show that the auto-tuning system works well, the temperature control system can get a 0.1 °C temperature stability degree in measurement precision of 0.03 °C after auto-tuning parameters.

**Key words:** analog PID circuit; digital potentiometer; auto-tuning parameters

### 1 引 言

PID 控制是最常用的控制策略,在工业过程控制中 90% 以上的控制回路采用 PID 结构。而采用模拟 PID 进行系统控制时,仅需要将 PID 调节交给电路实现,为控制器节省了大量的运算时间。这有利于提高了系统的运行速率,简化系统程序的结构,减少程序运行出错几率,提高系统程序运行的可靠性。

由于环境的变化,使被控对象具有时变性,系统经过一段时间以后会出现性能欠佳、适应性变差、控制效果下降等情况。另外,模拟 PID 电路参数的设定一般要求调试人员具有丰富的模拟电路调试经验,需要人工反复调整电阻或电容的参数才能达到控制精度要求,调试过程非常繁琐、耗时。因此,寻求模拟 PID 参数自动整定技术,以适应复杂工况及高性能指标的控制要求,是实现节能优化控制的重要手段,具

收稿日期: 2012-09-04; 修订日期: 2012-12-27

作者简介: 刘云芳,男,28岁,博士研究生。

有重大的工程实践意义。

本文以一个半导体制冷温控系统为例,介绍了模拟 PID 电路参数自整定<sup>[1]</sup>系统的设计过程。特别对于如何实现 PID 电路参数自整定、铂电阻高精度测温、基于数字电位器<sup>[2]</sup>的 PID 整定过程等进行了详细介绍。整个温度控制系统的温控范围为 -50—40℃,测温精度为 0.03℃,温控稳定度为 0.1℃,满足一般半导体探测器对温度范围(-30—20℃)和稳定度(±0.5℃)的要求。

### 2 系统概述

自整定系统的框图如图 1 所示。以 TI 的低功耗

单片机为核心控制系统,测温电路包括恒流源电路、铂电阻、前置放大器。PID 控制器是由 2 个四运放、3 个数字电位器、一些电阻、电容搭建的减法、比例、积分、微分电路组成的。本方案利用了 MSP430 单片机内部的 12 位 A/D 来采集温度信号,内部 12 位 D/A 用来实现温控点的设置。另外,MSP430 还要对模拟 PID 电路中用到了 3 个数字电位器进行控制。MSP430 通过设定温度与 A/D 采集温度的差值大小来分段设置 PID 参数,实现模拟 PID 电路参数的自整定。MSP430 通过串口与上位机进行通信,实现了温度的采集、PID 参数的初始值设定、温控点及温度波动量的设定等控制。

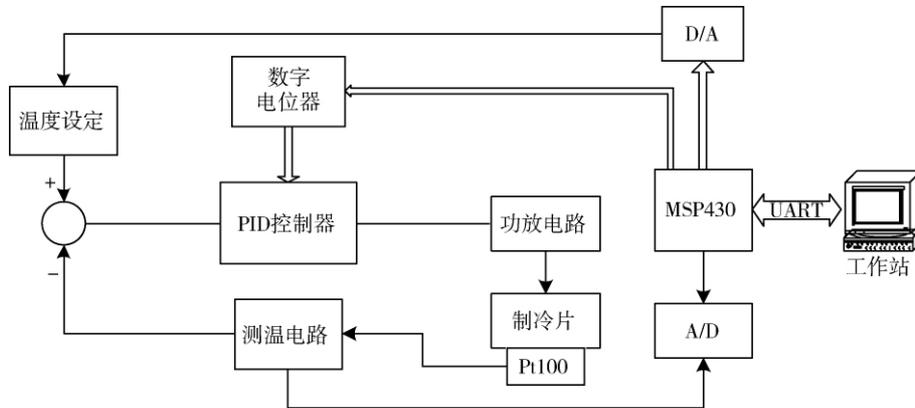


图 1 模拟 PID 自整定半导体制冷温控系统框图

Fig. 1 Frame of cooler temperature control system with analog PID auto-tuning

### 3 系统组成

#### 3.1 测温电路

为了使温控系统温控精度和稳定性高,选择最为合适的温度传感器和高精度的测温方式是必不可少的。另外,还需要根据温度的变化特性对温度传感器测温进行校正。工业上常用的温度传感器<sup>[3]</sup>有 4 类:

即热电偶、热电阻 RTD、热敏电阻及集成电路温度传感器。本系统中选用热电阻 RTD 中的铂电阻作为温度传感器,原因是铂电阻的绝对精度高,对温度响应的线性度好,响应速度快。

常用的温度采集电路<sup>[4]</sup>有两种:一为桥式测温电路,一为恒流源式测温电路。本系统采用恒流源式测温电路,如图 2 所示,通过运放 U1A 将基准电压

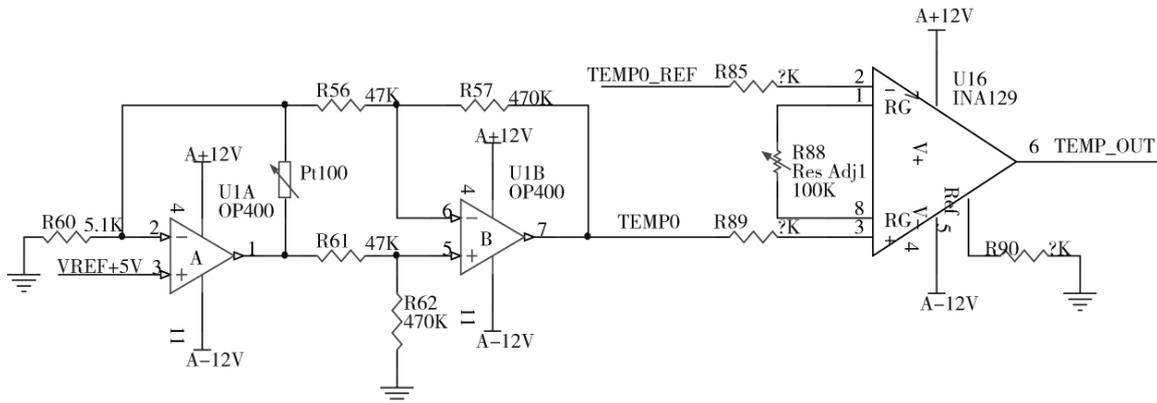


图 2 恒流源测温电路

Fig. 2 Measure temperature circuit with constant-current source

+5V 转换为恒流源,电流流过铂电阻时在其上产生压降,再通过运放 U1B 将该微弱压降信号进行放大(本系统放大倍数为 10),即输出期望的电压信号。为了减小由于铂电阻自热升温导致的测温不准,须保证流过铂电阻的电流小于 1 mA。

在本系统中,为了提高测温精度,有效利用 12 位 A/D,在信号进入 A/D 前,使用仪表运放 INA129 进行零位标定和放大,将温度 -50—40 °C 对应到 0—5 V 的电压范围。而 MSP430 内部 D/A 提供的温控

点电压范围也是 0—5 V,便于进行减法运算。从而使得系统的测温精度为 0.03 °C。

### 3.2 模拟 PID 整定电路

模拟 PID 电路主要由 3 个数字电位器、2 个四运放和一些电容、电阻构建的减法、比例、积分、微分、加法电路组成,如图 3 所示。图中 3 个可调电阻分别表示比例、积分、微分的整定,对数字电位器的阻值进行改变,从而改变 PID 电路中的参数。

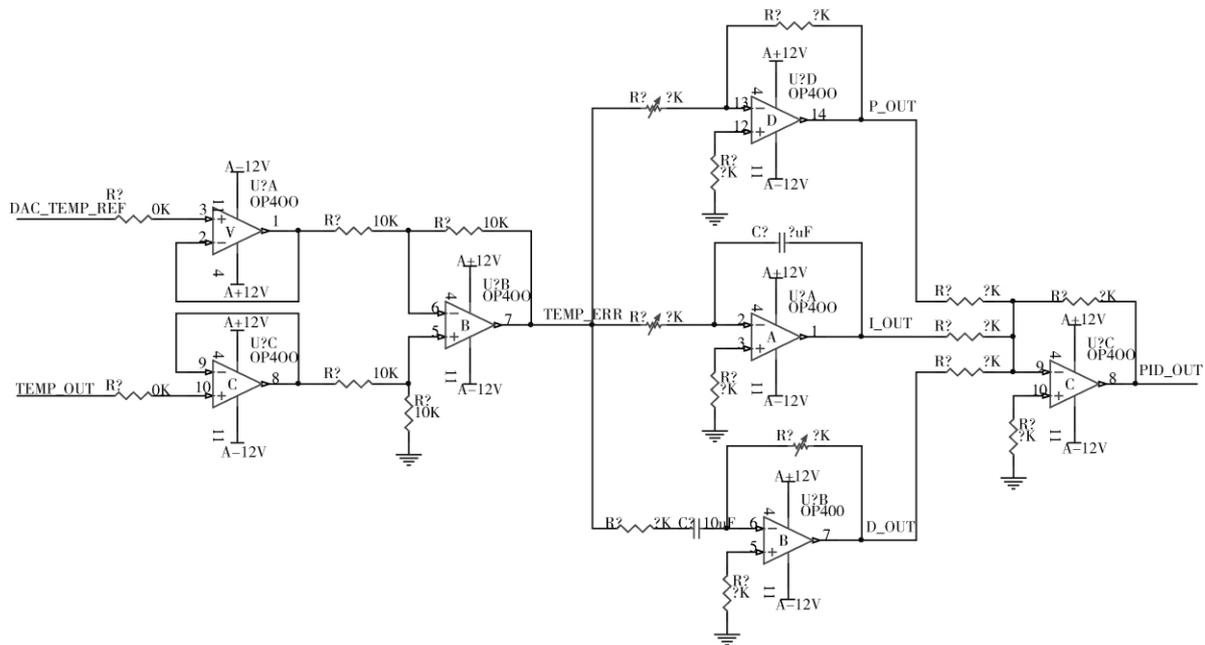


图 3 模拟 PID 电路  
Fig. 3 Analog PID circuit

本系统中模拟 PID 电路参数的整定,是通过测量输入量和输出的值,加入一定的整定算法,对系统中的比例、积分、微分参数进行调整,使得整定后的 PID 电路能稳定的控制制冷系统。整定算法是按照常规 PID 参数整定方式进行的,即先调节比例电阻,然后是积分电阻,最后是微分电阻。具体的整定流程见图 4 所示。

值得注意的是,由于数字电位器滑动端抽头不是连续的,其微调电阻的阻值,即 PID 参数值受总阻值和抽头个数的影响,使用中需根据被控对象特性进行合理选择。

本系统的被控对象是一个温控系统,可看作是一个二阶迟滞系统,对比例和积分参数的要求比较高,而微分参数的整定可以忽略。因此,选用了总阻值分别为 10 kΩ、1 MΩ、1 kΩ,抽头均为 256 个的数字电

位器分别作为比例电阻、积分电阻、微分电阻。因此,每个 LSB 值对应的阻值分别为 40Ω、4 kΩ、400Ω。需要注意的是,整定的时间长短与给定的 3 个电位器初始值有很大的关系。

### 3.3 TEC 驱动电路

热电制冷器(TEC)的驱动电路如图 5 所示。温差信号经过模拟 PID 电路调节后通过一个负反馈积分电路驱动一个功率 MOS 管实现 TEC 制冷电流大小的控制。其中在 MOS 管的栅极加入了一个程控开关来实现制冷关断和打开。反馈调节电路提供了闭环系统中的并联反馈回路,它一方面将电压反馈形成了局部的反馈,保证后级调节的稳定性,更为重要的是它改善了温控系统总体传递函数。另外,增加了一级积分电路,使系统的稳态性能得以改善,同时增加了静态增益。但是,系统的快速性降低,动态性能变差了。

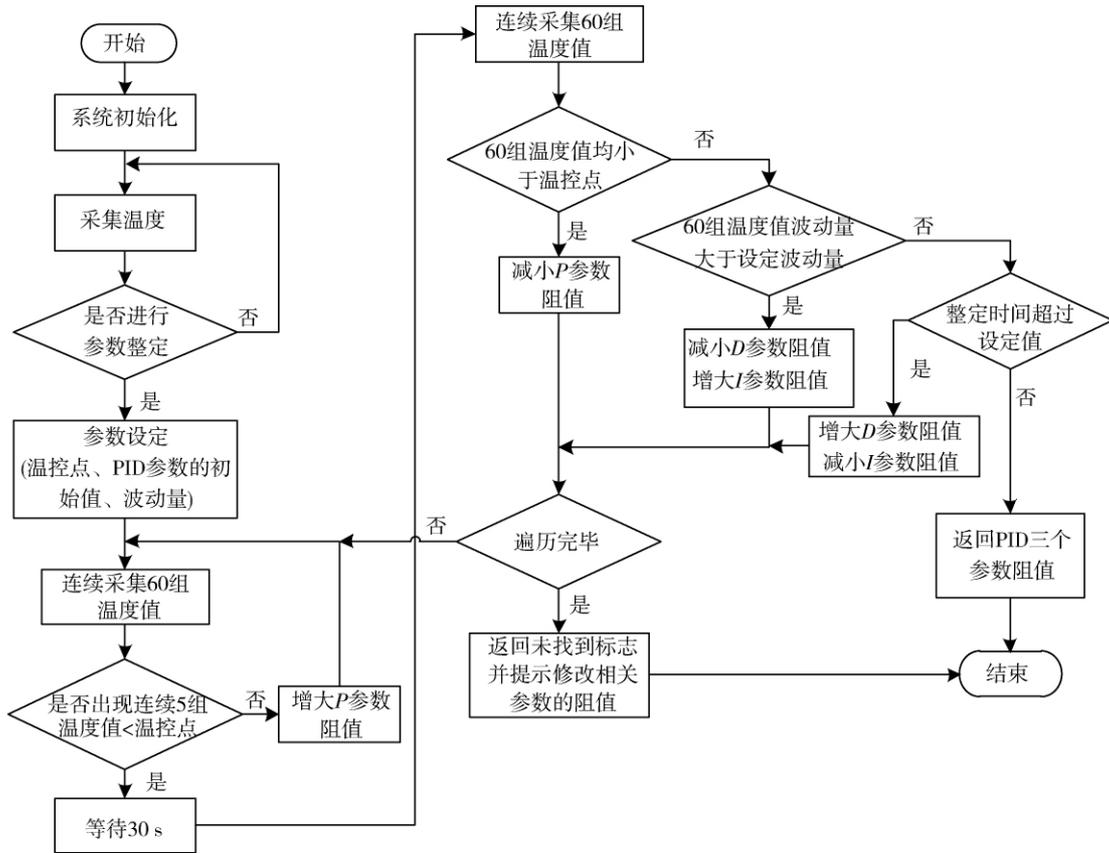


图 4 模拟 PID 参数自整定流程图

Fig. 4 Flow chart with analog PID circuit auto-tuning parameter

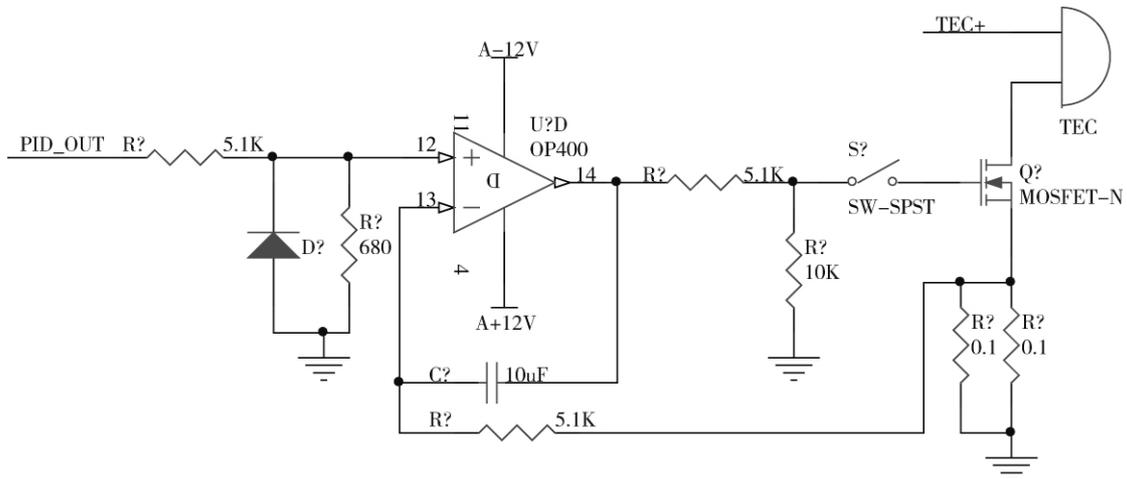


图 5 TEC 驱动电路

Fig. 5 TEC drive circuit

### 4 系统测试

为了验证系统功能,在环境温度为 26 ℃,目标温度设为 15 ℃,温度波动量设为 0.1 ℃,比例、积分、微分电阻的初始值分别设为 60 Ω、600 kΩ、0 Ω,阻值增

量设为 40 Ω。经过 376 s 后,系统将满足要求的比例、积分、微分电阻的阻值保存并显示出来,分别是 70 Ω、900 Ω、0 Ω。某次参数选定后,实验过程的温度曲线图如图 6 所示。

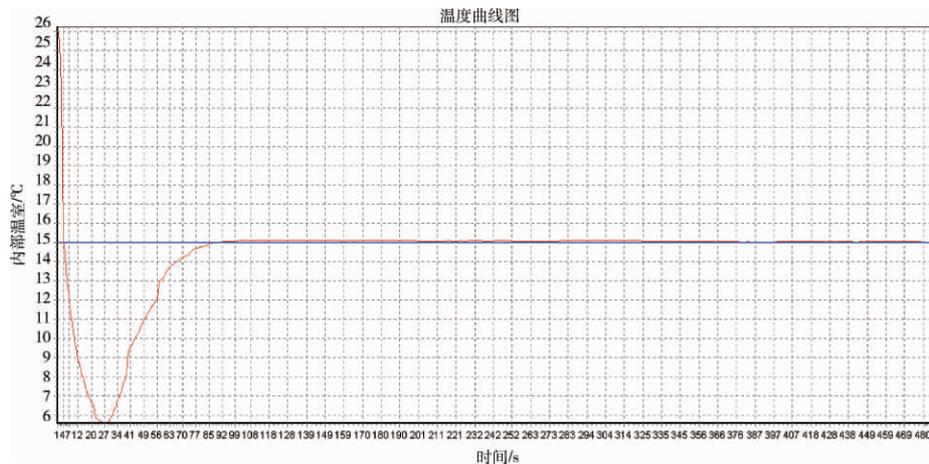


图6 温度曲线

Fig. 6 Diagram of temperature

## 5 结论

由于模拟 PID 电路相对数字 PID 电路来说,具有简单、可靠、廉价、噪声低等优势,在军事、航空、航天和民用领域都有极高的应用价值。本文采用数字电位器替代可调电阻,将人工整定模拟 PID 电路参数改为采用数字指令调整电路的电阻值进而改变 PID 参数,实现模拟 PID 参数的自整定。由于数字电位器的调整精度远大于可调电阻,避免了由于人工调整可调电阻造成的精度差、过程反复等缺点。通过实时测量模拟 PID 电路中各环节的输入输出量,实现了模拟 PID 电路参数的闭环自整定。

## 参考文献

- 1 Hang C C, Sin K K. An on-line auto-tuning method based on cross-correlation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1991, 38 (6): 428-437.
- 2 屈志磊. 理解和应用数字电位器 [J]. 电子设计工程, 2012, 4(7): 181-186.
- 3 任婷婷. 工业用温度传感器的自动批量校准 [J]. 计量与测试技术, 2011, 38(10): 20-23.
- 4 张震, 王剑, 黄国辉, 等. 高性能通用温度采集仪的研制 [J]. 机电工程, 2010, 27(3): 80-84.
- 5 余学锋. 新型直接数字转换器设计与分析 [J]. 电子测量技术, 2012, 35(1): 34-38.

## 关于与作者签订版权转让协议的启事

为了适应不断发展的学术期刊现代化出版与传播方式,进一步提高《低温工程》网络传播渠道的影响力,更好地为广大读者、作者、学者和科技工作者提供服务,《低温工程》已加入万方数据-数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中国知识资源总库-中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国科学引文数据库、美国《化学文摘》、波兰《哥白尼索引》等数据库,通过传统纸媒及国际互联网等形式进行国内外传播。为保护论文作者与编辑部的合法权益,根据《中华人民共和国著作权法》,自2013年起,《低温工程》编辑部需要与每篇被录用稿件作者签订《作者版权转让协议》,同时将著作权使用费与稿酬一次付清,希望广大作者予以理解、配合。

作者在向《低温工程》投稿时,必须确保所投稿件不涉及国家秘密和所在单位的技术秘密,未侵害其它单位和个人的利益,引用他人的成果部分都进行了必要的标注,不存在剽窃、抄袭行为。