

# 基于PID的空间精密温控研究

杨政秋<sup>1,2</sup>, 李响<sup>1</sup>, 席隆<sup>1</sup>

(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100190)

**摘要:**为开展空间力学实验,文中介绍了一种基于DSP变PID算法的空间温度控制系统,应用于空间液桥模型。该方案利用DSP TMS320F2812作为微处理器,前端利用热电偶采集温度信号,经调理电路、AD转换后通过AD转换器自带SPI接口输入到DSP。DSP根据温度偏差值,运用PID算法控制PWM输出,PWM占空比直接决定驱动温度执行机构工作的桥电路功率,从而实现温度的闭环控制。实验结果证明,该系统稳定性能好、控制精度高,在液桥实验需求范围内控温精度能达到 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

**关键词:**温度控制;数字信号处理;变PID;PWM

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2014)08-0143-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.08.033

## Research on Precise Control in Space Temperature Based on PID

YANG Zheng-qiu<sup>1,2</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, XI Long<sup>1</sup>

(1. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Describe a space temperature control system based on DSP for PID algorithm in order to carry out the experiment of spatial mechanics, used in space liquid bridge experimental model. The program draws on TMS320F2812 as a microprocessor, the front-end uses thermocouple temperature for signal acquisition, after conditioning circuit, AD conversion input to the DSP by SPI. According to the temperature deviation, DSP uses PID algorithm to control PWM, and the PWM duty cycle directly determines the circuit power of bridge driver for the temperature actuator, in order to achieve closed-loop temperature control. Experimental results show that the system is stable, with high control precision, the temperature control precision can reach  $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$  within the scope of the demand for liquid bridge experiment.

**Key words:** temperature control; DSP; variable PID; PWM

## 0 引言

神州四号上完成的“微重力液滴热毛细迁移实验”项目<sup>[1]</sup>验证了微重力环境中液滴或气泡的热毛细迁移现象会影响到空间微重力环境下的材料加工、晶体掺杂、热和流体管理、焊接及电泳等过程。所以研究空间微重力环境下的热毛细迁移对将来材料等方面的研究夯实基础至关重要,由此产生了液桥模型<sup>[2]</sup>。如图1所示,两个同心圆盘之间充以液体,通过在流体两端进行加热和制冷使流体内部产生不同的温度场( $T_0$ 表示下桥面温度, $T_0+\Delta T$ 表示上桥面温度),以研究微重力环境下空间流体力学特性,因此对空间实验装置

提出了精密温度控制需求。

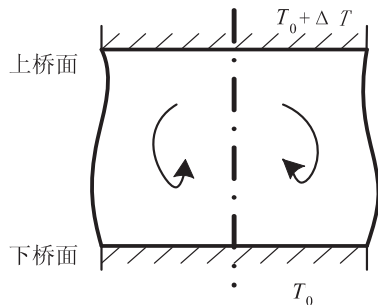


图1 液桥模型

纵观空间应用系统的多个科学研究领域,温控研

收稿日期:2013-10-10

修回日期:2014-01-16

网络出版时间:2014-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11032011,10972224);载人航天空间科学项目

作者简介:杨政秋(1990-),女,安徽泗县人,硕士生,研究方向为空间电子学;席隆,正高级工程师,硕士生导师,研究方向为空间电子技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140525.1242.002.htm>

究已经成为重要的工程需求。目前地面温控研究较多,文献[3]采用了分段式 PID 控制算法,控制快速,同时控制精度满足要求;文献[4]把模糊控制和神经网络技术引入 PID;文献[5]基于组合灰色预测提出的模糊专家控制方法有较好的控制品质;文献[6]分析了地面热毛细对流实验,系统采用集成温度调节器欧陆表控制温度,温度的稳定性为  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。文中主要介绍根据空间对象特点而设计的稳定可靠温控系统,该系统稳定性好、控制精度高,对空间实验具有重要意义。

系统主控芯片采用 TI 公司的数字信号处理器 (DSP) TMS320F2812,运算能力强大且该芯片具有大量外设资源,如: A/D、定时器、各种串口(同步和异步)、PWM 发生器等,是针对控制应用最佳的 DSP。温度控制算法,针对被控对象的惯性以及自平衡能力,采用变 PID 控制,减少超调并缩短调节时间,同时满足高精度要求。

## 1 系统总体设计

系统由三部分组成,首先是热电偶结合 ADS1258 的温度采集模块,接着是以 TMS320F2812 为核心的温度闭环控制模块,最后是 LabVIEW 图形界面的温度设定及显示系统。温度采集模块将采集的电压信号经 AD 转换后,通过 SPI 接口发送到 TMS320F2812, TMS320F2812 将滤波处理后的温度信号与温度目标值进行闭环 PID 运算,同时将温度实时信号通过串口发送至 LabVIEW 图形界面显示。在整个过程中,可以通过 LabVIEW 设定模块向 DSP 发送相应的控制指令来更新温度目标值及 PID 各个参数。总体架构如图 2 所示。

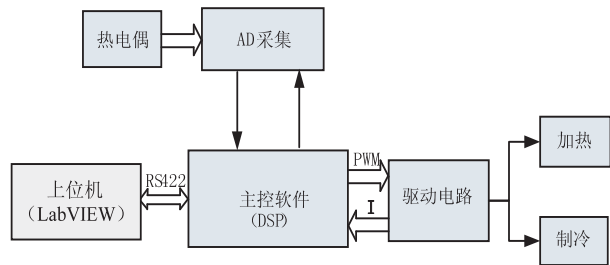


图 2 系统总体架构图

## 2 硬件设计

温度采集电路由热电偶、调理电路以及 AD 转换电路组成。热电偶具有测量温度范围广、坚固耐用、响应快和无自发热等优点<sup>[7-8]</sup>,更适于空间环境中液桥实验的传感器安装。热电偶采集液桥上下桥温度后,经滤波放大调理电路输入到 ADS1258。TMS320F2812 芯片本身集成了 12 位的 A/D 转换模

块,但分辨率不足,所以采用独立的 24 位 ADC 模块 ADS1258,分辨率高,可表示到  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

温度控制电路由主控芯片 DSP、桥驱动器以及执行机构组成。DSP 根据实际温度与目标温度运算后,输出赋值到自带的 EV(事件管理器)模块<sup>[9-10]</sup>,产生不同占空比的 PWM。PWM 直接输出到桥驱动器,从而驱动上桥加热膜以及下桥制冷片工作。另外,DSP 提供两路 I/O 信号控制执行机构的电流方向,保证加热制冷单极性。

## 3 软件设计

### 3.1 上位机软件设计

上位机控制软件由操作部分和参数显示部分组成。操作部分包括串口的配置、工程参数的设定等,核心功能是向下位机发送温度目标参数以及控制参数。显示部分包括温度图形、保存温度数据的文件以及其他的实验参数,如 PID 函数中的比例项、积分项和微分项。

### 3.2 下位机软件设计

下位机软件主要包含温度采集模块、温度控制模块、通信模块。软件设计毫秒计数采用中断累加,秒计数在主函数轮询计算,各模块采用轮询机制,并发进行。

在温度采集模块中,DSP 通过 SPI 接口访问 ADS1258,采集液桥上下桥热电偶温度数据。在采集温度函数中,对每路温度去除两个极值后进行了滑动平均滤波,将滤波后温度值与目标温度输入到 PID 温控模块。

在复杂系统的温度控制模块中,目前较多采用智能算法,文献[11]具体分析了模糊控制、神经网络以及遗传算法等五种智能算法,它们较 PID 算法具有自适应、自组织、自学习等优点,但设计复杂度比 PID 高,PID 算法适用于基本线性和动态特性不随时间变化的系统<sup>[12]</sup>。针对液桥实验空间环境的特殊性以及自身系统特点,在尽量减少软件复杂度的前提下,达到设计要求。采用的 PID 算法具有鲁棒性好、可靠性高的特点<sup>[13]</sup>,是本次温控系统的核心算法。系统采用位置式 PID 控制算法,500 ms 执行一次。工程应用 PID 参数整定算法主要有 Z-N 算法、极点配置法、频率法等<sup>[14]</sup>,此次采用试凑法确定三个参数。系数传递函数首先采用比例模型确定,由式(1)知

$$\begin{cases} e = y_0 - y \\ y = k_p \cdot e \end{cases} \quad (1)$$

式中, $y_0$ 是目标值; $y$ 是实际值; $k_p$ 是比例模型中的比例系数,所以存在一个偏差

$$e = \frac{y_0}{k_p + 1}$$

(2)

满足式(1),实验中逐渐增大比例参数,直至温度实际值在目标值附近震荡,渐渐存在稳态误差。如图3所示,比例系数为30时,温度目标值在实际值附近震荡,减小至25时,两者产生稳定偏差。

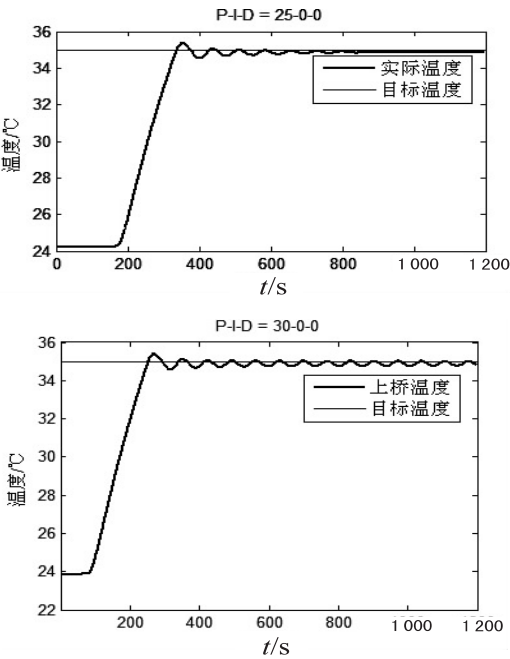


图3 纯比例控制温度曲线图

此时增加积分部分,积分项具有“记忆功能”—累积偏差,从而增大控制输出减小偏差,但同时会降低系统稳定性。在实际实验中,结合温度滤波带来的滞后,加入了微分部分。理想PID输出由三项组成,如公式(3)所示。

$$u_{PID}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

(3)

设计中结合实际情况对PID算法采取四项改进措施,使控制稳定度更高,也更适应于空间环境。改进后PID算法流程如图4所示,改善措施如下:

- (1)上桥面和下桥面均是单极性控温,针对位置式PID算法易在计算过程中产生积分饱和的特点,对偏差和进行了限幅保护,加热偏差和在0~800范围内,制冷偏差和在-800~0范围内。
- (2)温度是缓变信号,根据严格的PID算法,用相邻两次偏差变化斜率求微分项,对控制的作用很小。所以根据温度滤波后滞后情况,此次采取当前偏差与前第九次偏差斜率求微分,同时增大了微分系数,改善了系统动态特性。
- (3)PID计算出的数据即为输出“功率值”,“功率值”经方向判定同时幅度限定后,赋值到DSP PWM输出寄存器。由于加热、制冷执行机构的单极性控制,在温度实际值高于(低于)加热(制冷)目标值时,将一个

补偿常数(80)作为输出功率赋给PWM输出寄存器。

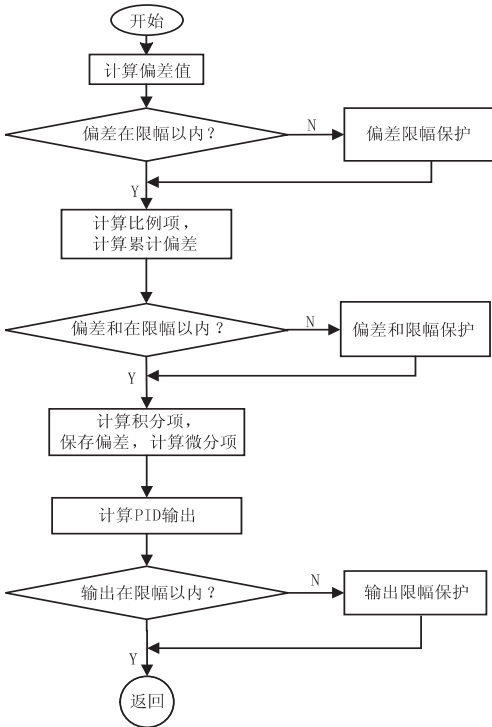


图4 PID算法流程

(4)PID参数可调性以及PWM的最大输出功率可调。由于空间环境的不可预知性,若出现环境温度异常,可以通过地面数据注入修改控制参数以及PWM最大输出功率,进而提高温度控制精度及稳定度。

改善后实际PID输出如公式(4)所示,软件的设计拓扑为分时计算并发运行,上下桥温度控制可以同时动作,并根据数据注入修改目标温度。

$$u_{PID}(t) = k_p e(t) + k_i \sum_{n=0}^t e(n) + k_d (e(t) - e(t-9))$$

(4)

4 实验结果分析

实验证明,硬件选择外部24位AD提高了系统的分辨率,间接提高了系统控制精度,同时软件对控制算法的改进措施,针对单极性控温设置补偿常数,避免温度惯性导致超调量太大,提高了系统控制稳定度。图5和图6是实验过程中上桥与下桥的温度显示截图,细线表示目标温度,粗线表示当前温度,其中纵轴表示扩大100倍后的温度(单位:℃),横轴表示采集点(\*10<sup>4</sup>\*0.5s/次)。图5(a)以及图5(b)分别表示上桥两种工况下的升温过程;图5(c)表示上桥温度达到目标值后温度稳定情况。图6(a)表示下桥的降温过程,图6(b)表示下桥温度达到目标值后温度稳定情况。实验结果见表1。验证了在液桥实验要求的温差范围内,设置不同的目标温度,系统均能满足高精度控制要求。

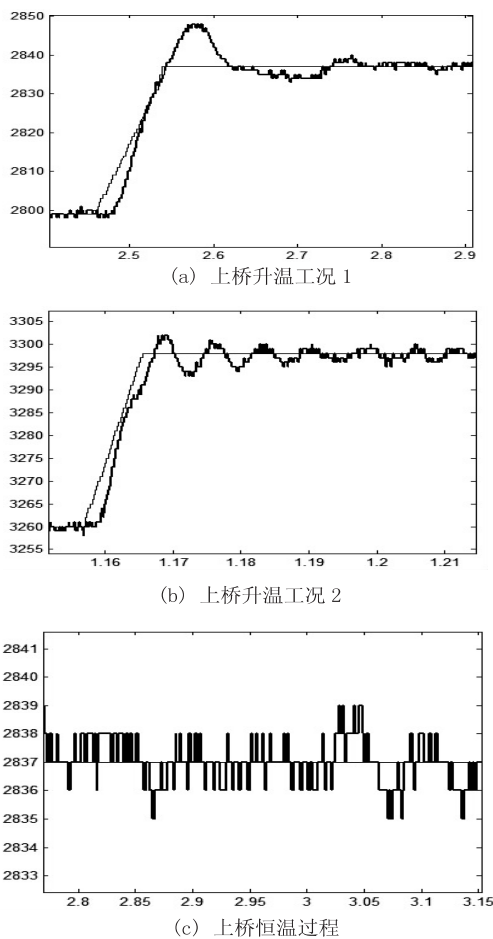


图 5 上桥升温及恒温过程

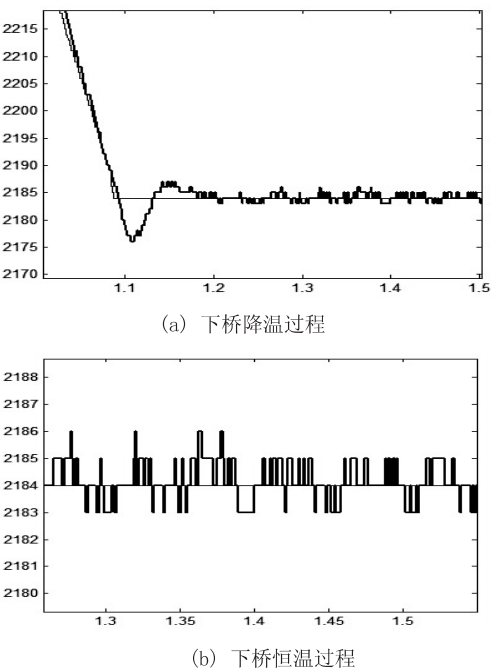


图 6 下桥升温及恒温过程

5 结束语

文中介绍了面向空间应用的液桥温度采集与控制系统的设计方案。该方案利用 TMS320F2812 并结合

LabVIEW 图形化编程语言设计了温度采集与控制系统。该系统实现了对温度的高分辨率采集,以及利用变 PID 实现了温度的高精度控制,同时系统兼具实时监控温度的能力。此次空间精密温控研究为微重力条件下完成大 Prandtl 液桥对流实验提供了温度条件。另外,空间基础物理科学研究中,部分载荷需要特殊的温度环境;空间材料科学中,研究材料特性变化也需要不同温度环境等,此次研究为对温度有精密需求的空间科学实验提供了研究基础,具有重要的意义。

表 1 液桥温度测试结果                      ℃

目标温度	实际温度	超调量	稳定度
21.84	21.81 ~ 21.87	0.1	0.03
28.37	28.34 ~ 28.40	0.1	0.03
32.98	32.95 ~ 33.01	0.04	0.03
35.50	35.47 ~ 35.53	0.04	0.03

参考文献:

[1] 赵建福.“神州 4 号”飞船搭载微重力流体物理实验获得圆满成功[J]. 力学进展,2003,33(1):153-154.

[2] 唐泽眉,阿 燕,胡文瑞.半浮区液桥热毛细振荡流[J]. 力学学报,1999,31(4):415-418.

[3] 吕占伟,戚晓晶.一种动态高精度温度控制系统研究[J]. 中国科技信息,2009(9):144-145.

[4] 王宪平,李圣怡.超精密环境温度控制及温度测量技术研究[J]. 中国机械工程,2000,11(8):869-871.

[5] 王 伟,吴 敏,曹卫华,等.基于组合灰色预测模型的焦炉火道温度模糊专家控制[J]. 控制与决策,2010,25(2):185-190.

[6] 吴勇强,段 俐,李永强,等.大普朗特数大液桥浮力-热毛细对流地面实验[J]. 力学学报,2012,44(6):981-989.

[7] 陆建东.热电偶的测温原理及误差分析[J]. 宁夏电力,2007(A02):76-81.

[8] 王魁汉.温度测量实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,1991.

[9] 苏奎峰,吕 强,邓志东,等. TMS320x28xxx 原理与开发[M]. 北京:电子工业出版社,2009.

[10] 顾卫钢.手把手教你学 DSP-基于 TMS320X281x[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[11] Saini S, Rani S. Temperature control using intelligent techniques[C]//Proc of 2012 second international conference on advanced computing & communication technologies. Rohtak, Haryana:IEEE,2012:138-145.

[12] 黄宴委,李 竣,吴登国.基于 PID 的轿车空调系统设计[J]. 控制工程,2012,19(1):9-12.

[13] 李建海,张大为,张 凯,等.数字 PID 控制器在温度控制系统中的应用[J]. 电子测量技术,2009,32(4):100-103.

[14] 齐乃明,宋志国,秦昌茂.基于最优 Oustaloup 的分数阶 PID 参数整定[J]. 控制工程,2012,19(2):283-285.

基于PID的空间精密温控研究

作者:	<a href="#">杨政秋</a> , <a href="#">李响</a> , <a href="#">席隆</a> , <a href="#">YANG Zheng-qiu</a> , <a href="#">LI Xiang</a> , <a href="#">XI Long</a>
作者单位:	<a href="#">杨政秋, YANG Zheng-qiu(中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 中国科学院大学, 北京 100190)</a> , <a href="#">李响, 席隆, LI Xiang, XI Long(中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京, 100094)</a>
刊名:	<a href="#">计算机技术与发展</a> 
英文刊名:	<a href="#">Computer Technology and Development</a>
年, 卷(期):	2014(8)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjz201408033.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201408033.aspx)