

# 新型三电炉结构平板式导热系数测定仪的设计

刘 芬<sup>1</sup>, 刘 兵<sup>2</sup>

(1. 天津机电职业技术学院, 天津 300131; 2. 北京时代集团, 北京 100085)

**摘要:**为实现导热系数的快速测定,基于一维无限大稳态导热原理,研制了一种新型三电炉结构平板式导热系数测定仪。它以 MSP430F147 单片机为测量控制核心,设计了相应的接口电路。相对于同类产品,在减少体积、减少测试过程中试件数量及利用 PID 温度控制等方面进行了良好的设计。实验结果表明,该仪器具有测试速度快、误差小、量程宽和造价低等特点。

**关键词:**导热系数;MSP430 单片机;PID

中图分类号:TH811;TK39

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)10-0058-04

## Design of a new type three electric stoves structure flat-plate thermal conductivity detector

LIU Fen<sup>1</sup>, LIU Bing<sup>2</sup>

(1. Tianjin Vocational College of Mechanics and Electricity, Tianjin 300131, China;

2. Beijing Time Group Inc., Beijing 100085, China)

**Abstract:** To achieve rapid measurement of thermal conductivity coefficient, a new type thermal conductivity detector with three electric stoves structure was developed based on the steady thermal conductivity theory of 1-D. The microcontroller MSP430F147 was used as foundation of measurement and control. The corresponding interface circuit was designed. Compared with similar products, it was done that the good design in reducing the size and the number of the specimen during testing and the use of PID temperature control. The experiment results show that the instrument has the advantage of rapid test, small error, wide rang and low cost and so on.

**Key words:** thermal conductivity coefficient; MSP430 microcontroller; PID

## 0 引 言

导热系数是衡量材料热物理性质的一个重要参数。导热系数测定仪用于测量建筑材料、保温材料或型砂材料的导热系数,广泛应用于航天、化工、能源和机械诸行业中的材料生产厂家和科研院所中<sup>[1]</sup>。

就现有平板式导热系数测量仪器而言,多数产品存在着如下一些问题<sup>[2-4]</sup>:

(1) 智能化程度低。某些仪器仍属于模拟式仪表,不论从信号的检测、测试值的离散程度和可比性,还是从数据的处理方式都落后于以微处理器为核心的智能测控系统。

(2) 体积大。某些仪器采用工控机进行数据采集和计算,体积大、成本高,不方便。

(3) 速度慢。有些仪器达到热平衡状态时间太长,测试过程甚至超过两小时。

(4) 产品价格高。仪器价格高达几万元。

基于上述问题,本研究开发了新型三电炉结构平板式导热系数测定仪。

## 1 一维稳态导热理论

笔者研究的是厚度比长度和宽度小很多的平板上的稳态导热过程。垂直放置的单层平板导热示意图如图 1 所示。其中  $\sigma$  为板厚,平板左右两外侧平面的温

度各自均匀,且分别恒温为  $t_1$  和  $t_2$ 。设  $t_1 > t_2$ , 导热沿厚度方向即  $x$  轴进行。此时平板内的各等温度面均为垂直于  $x$  轴的平面。

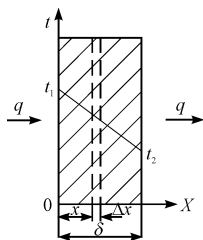


图 1 单层平板导热示意图

若在板内距离基准表面  $x$  外,以两个等温面为界,划分出一层厚度为  $dx$  的薄壁,对这层薄板运用傅里叶定律<sup>[5-7]</sup>,可列为:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

式中  $\lambda$ — $t_1 \sim t_2$  小温度范围内的平均导热系数,也可视为定值。

故对式(1)积分可得:

$$t = -\frac{q}{\lambda}x + c \quad (2)$$

将边界条件设为  $x = \sigma, t = t_2$  和  $c_1 = t_1$  并代入式(2),则得:

$$t_2 = -\frac{q}{\lambda}\delta + t_1 \quad (3)$$

因此,比热流量为:

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda}} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4)$$

实践经验表明,当长度与宽度均为厚度 8 ~ 10 倍以上时,平板边缘的影响可以忽略不计。若平板的导热面积为  $A$ ,则热流量为:

$$\Phi = Aq = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{A\lambda}} \text{ (W)} \quad (5)$$

在  $\Phi, \Delta t, A, \sigma, \lambda$  这 5 个量中只要知道其中 4 个量,就可求得第 5 个量。当  $\Delta t$  不变时,平板愈薄,面积愈大,导热系数愈大时,热流量  $\Phi$  也愈大,反之热流量  $\Phi$  就愈小。

## 2 专用电炉设计

仪器炉体部分的结构示意图如图 2 所示,其主体由 3 个电炉组成。主电炉固定在炉体中心一扁圆形区域,主电炉的四周则是一套边电炉,在一个平面内边电炉环绕着主炉。主电炉和边电炉的下方是底电炉。底电炉和主电炉、边电炉之间有一层匀温板。被测试件放置在 3 个电炉之上。

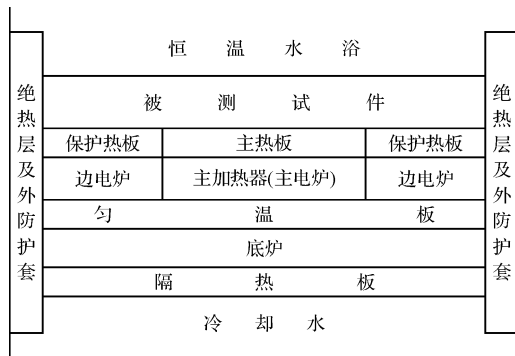


图 2 仪器炉体结构

此种结构,只要边电炉和主电炉的温度一致,则主电炉和边电炉之间则没有热量传递,主炉发出的热量只能沿垂直方向传播。如果底电炉和主电炉温度也相同,则主电炉和底电炉之间没有热量传递。因此在试件加热测试过程中,主电炉发出的热量则全部通过主热板传递给被测试块,而且传递的热量可以用主炉功率直接计算出来。因此,这种结构巧妙的把双平板结构装置所需的双试件改进到只需一个试件。

为了散热均匀和减少接触热阻,以保证在试件某个表面上温差为零、无热流通过,在加热单元与试件之间有一层一定厚度的两块钢板分别被称为主热板和保护热板。在冷却单元和试件之间也有一层较厚的钢板称为冷板。被测试件和恒温水浴之间有一层铜板,铜板由恒温水浴来冷却,使试件冷面保持恒定低温。底电炉下面是隔热层,以防止底电炉的热量散发太快而不利恒温。隔热板下是冷却水,其作用是保护炉体下表面不致过热。

在工作时,仪器控制 3 个电炉恒温在同一个温度下,通过主热板和保护热板给被测试件进行加热。保证主热板和围绕在主热板四周的保护热板总处于相同的温度,以减小侧面的热流量损失。使用热电偶分别测量 3 个电炉的温度和被测试件两表面的温差。这样试件单位时间内通过的热量在数值上就等于主加热器的功率。3 个电炉温度和主热板温度读数稳定时,则表明测试过程已进入热平衡状态。因此,根据式(5)可以计算出被测试件的导热系数  $\lambda$ 。

## 3 仪器智能测控系统设计

### 3.1 硬件设计

仪器智能测控部分主要功能有:人机对话、实时检测各路温度信号并控制炉体的加热、参数计算、各参量显示、稳态判断、计算结果等。仪器的测控系统的硬件结构框图如图 3 所示。

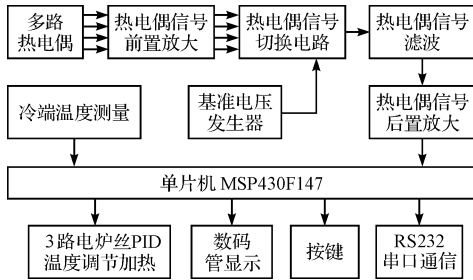


图 3 仪器测控系统硬件接口框图

(1) 微处理器。

本研究采用 TI 公司功能强大的低功耗、高集成度微控制器 MSP430F147,其内部集成了 8 通道、高精度、12 位 ADC<sup>[8-9]</sup>。

(2) 输入通道部分。

热电偶<sup>[10-11]</sup>测量的温度信号经过前置放大、后置放大后,经单片机的 12 位 A/D 转换器进行 A/D 转换。前置放大电路如图 4 所示,该电路采用差分放大形式对共模干扰有很强的抑制作用,大大减少了热电偶输出信号中的杂波干扰。 $W_5$  为运放 OP07 的调零电位器。 $R_9$  和  $W_4$  构成可调放大倍数的反馈电阻。 $D_{12}$ 、 $D_{13}$  为两个反相并联的普通二极管,实现运放输出限幅保护。 $R_{12}$ 、 $R_{13}$  两电阻之和为 200 k $\Omega$ ,用于平衡反馈电阻。

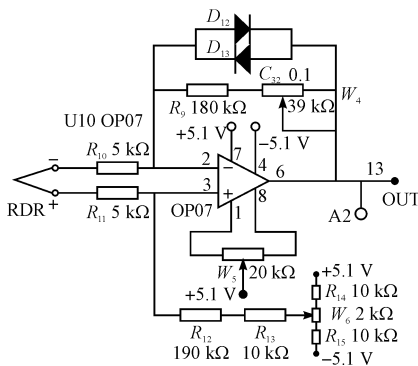


图 4 前置放大电路

滤波和后置放大电路如图 5 所示,滤波电路由运放 U14-1 和 U14-2 组成,由双 T 带通滤波器改变而成。除去其中的高频通路,就得到一个低通滤波器。这个电路性能良好,对 50 Hz 及其以上频率的干扰信号有很强的抑制作用。后置放大器中采用 AD620,AD620 为 AD 公司生产的仪用放大器,具有低漂移、低噪声的特性<sup>[12]</sup>。信号经过前置放大、后置放大后,送到单片机的 12 位 A/D 转换器进行 A/D 转换。

(3) 输出通道部分。

电炉控制电路如图 6 所示。经 A/D 转换后结合冷端温度传感器测量结果,计算出热电偶测量端的实

际温度,根据 PID 控制算法实时控制电炉的升温过程。三电炉的加热时间量由脉宽调制信号控制。

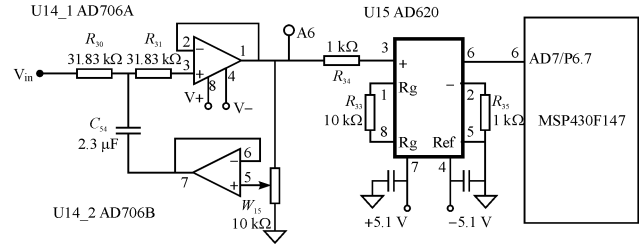


图 5 滤波和后置放大电路

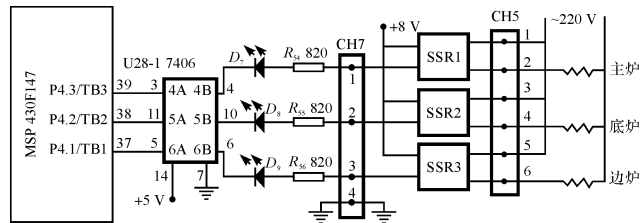


图 6 电炉控制电路

(4) 其它电路设计。

热电偶冷端温度补偿传感器采用数字式传感器 MAX6577,其输出量为数字量,直接被单片机采集,大大减化了模拟检测电路的设计。在测试过程中如出现异常,例如某个电炉出现温度异常等,则蜂鸣器可以立即发出报警信息。串口通讯电路可用来把测量数据发送到主机上,由主机上的相应程序给出导热系数随温度变化的函数曲线,或通过打印机把信息打印出来。数码管显示、按键和蜂鸣器构成了人机交互接口。

3.2 软件设计

软件采用模块化程序结构,由主程序和参数设定、异常报警、数据采集、控制决策、串口通讯、按键、显示等子程序组成。整机软件流程图如图 7 所示。

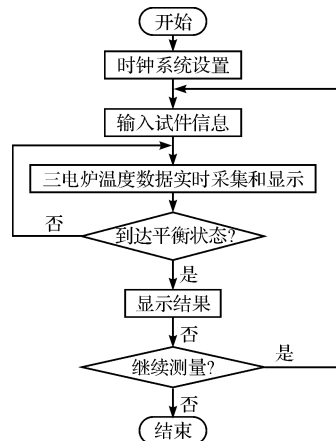


图 7 软件流程图

## 4 实验测试

经过多次实验,主炉 PID 参数  $K_p = 500$  比较适合本系统作为温度控制。因此本系统采用如下 PID 公式:

$$U_n = U_{n-1} + 500(2.45e_n - 3.5e_{n-1} + 1.25e_{n-2}) \quad (6)$$

整机三电炉升温控制曲线如图 8 所示,其中绘出了 4 个热电偶的测温曲线。从图 8 中可以发现,主炉、边炉、底炉第一次到达目标温度的时间都有缩短,但底炉升温较慢,这是因为底炉的散热较快,从而使之到达设定目标温度的时间较长,但仅需 6 min 左右,是一个很满意的升温恒温过程。

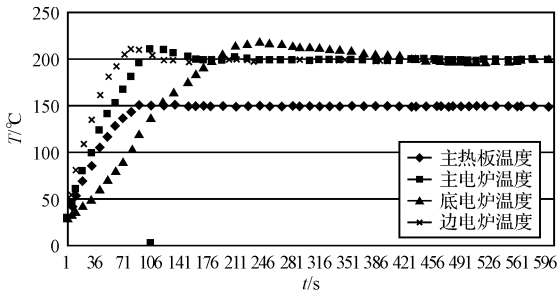


图 8 电炉升温控制曲线

本研究对某航空材料进行了测量,试块厚度 10.0 mm,试块预置温度 420 °C,最终测量结果如表 1 所示。

表 1 测量结果

主炉温度	490 °C	底炉温度	490 °C
边炉温度	492 °C	试块下表面温度	480 °C
试块上表面温度	350 °C	室温	20 °C
恒温水浴温度	35 °C	升温时间	09 分 45 秒
恒温时间	06 分 12 秒	第 1 次测量	$\lambda_1 = 3.477 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
第 2 次测量	$\lambda_2 = 3.480 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	第 3 次测量	$\lambda_3 = 3.482 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
均值	$\lambda = 3.479 \text{ W/m} \cdot \text{K}$		

其结果表明仪器稳定性和重复性满足航空用相应标准,快速升温效果良好。经多次实验,该测试仪器可达到的主要技术指标如表 2 所示。

表 2 主要技术指标

量程	$\lambda = 0.4 \text{ W/m} \cdot \text{K} \sim 50 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	
主炉升温上限	1 000 °C	
试块标准尺寸(固体金属或非金属)	直径 $\phi = 100 \text{ mm}$ 厚度 $\delta = 0.2 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$	
升温时间	$\leq 25 \text{ min}$	
恒温误差	600 ~ 1 000 °C	$\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$
	300 ~ 600 °C	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
	300 °C 以下	$\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

## 5 结束语

本设计属于典型的稳态法平板式导热系数法。对

试件和专用电炉的应用来说,符合无限大平板式稳态测量原理,满足稳态傅里叶导热公式的应用条件。

首先电炉设计合理,尤其是升温速率很快,可以大大缩短测量周期;其次,应用了单片机技术,可以测量各种金属、非金属的导热系数,其量程广,完成炉内各区域范围内的多路温度数据采集,实现 3 个电炉同时数字 PID 温度调节;最后,整机体积小且把测量过程中试件的数量由两件减少为一件,同时降低产品价格,提高了仪器的性价比。

本仪器开始测试时,压一次启动键,样机就开始为 3 个电炉分别供电,实现连续的 PID 控制,判断 3 个电炉的恒温状态,并且测量和打印显示测得的导热系数之值。可见,样机是一台全自动化的测量仪器,避免了人工干预过程。

总之,本仪器是一台高质量,高速度和全自动化的新产品,在各行各业中具有广泛的应用前景。

## 参考文献(References):

- [1] 禹国强,刘安伟. 恒功率平面热源法智能热物理参数测试系统[J]. 仪器仪表学报,2000,21(1):98-100.
- [2] 耿世钧,刘伟玲,赵海文,等. 基于虚拟仪器平台的导热系数测定仪的设计[J]. 仪器仪表学报,2000,21(5):464-467.
- [3] 刘 兵. 材料导热系数测定方法的研究[D]. 天津:河北工业大学机械工程学院,2007.
- [4] 宋丽薇,李艳宁,李 英,等. 基于 ARM 的双平板导热系数测定仪的研制[J]. 电子测量技术,2007,30(9):81-83.
- [5] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [6] KHORUNZHII I, GABORA H, JOBA R, et al. Steady-state thermal conductivity measurements of super-hard materials [J]. *Measurement*,2002,32(3):163-172.
- [7] GALL E S. Thermal conductivity measurements using the flash method[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*,2004,78(1):185-189.
- [8] 沈建华,杨艳琴. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 陈岁生,卢建刚. 基于智能检测技术的室内照明系统[J]. 机电工程技术,2008,37(5):53-55.
- [10] RAMALINGAM A, PAN D Z, LIU F, et al. Accurate Thermal Analysis Considering Nonlinear Thermal Conductivity[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Quality Electronic Design,2006:644-649.
- [11] WANG T P. Thermocouple selection and maintenance—part 2 [J]. *Instrument Society of America*, 1991, 38(6):37-38.
- [12] 曹茂永,王 霞. 仪用放大器 AD620 及其应用[J]. 电测与仪表,2000,418(37):50-53. [编辑:张 翔]