

热波法导热系数测试中的正弦波温度控制解决方案

Sine Wave Temperature Control Solution for Thermal Conductivity Testing by Heat Wave Method

摘要：在传热学第三类边界条件下进行的热物性测试方法中，如Angstrom法、ISO 22007-3温度波法和ISO 22007-6温度调节比较法，会要求边界温度严格按照正弦波形式进行变化，但采用正弦波加热电流方式的现有技术很难实现准确稳定的正弦温度波输出。为此本文提出了相应的解决方案，方案的核心是采用具有远程设定功能PID控制器，并配套外置正弦波信号发生器或过程校验仪，通过不断改变PID控制器设定值来实现正弦温度波的准确输出。

1. 问题的提出

在一些导热系数或热扩散系数的热物理性能测试方法中，常会用到第三类正规热工况的边界条件，即边界温度按照相对恒定的平均值以正弦波周期规律变化。在实际应用中，采用这种第三类正规工况的测试方法主要有以下几种：

(1) 经典的Angstrom法。

(2) ISO 22007-3-2008：塑料 导热系数和热扩散系数的测定 第3部分 温度波分析法。

(3) ISO 22007-6-2014：塑料 导热系数和热扩散系数的测定 第6部分 采用温度调制技术的比较法用于低导热系数测量。

Angstrom法是一种经典的稳态测试方法，如图1所示，对线状或薄片状样品的一端进行周期性加热和冷却形成温度正弦波形式的温度波，并以一维热流方式进行传递。在达到稳态后通过样品上两个位置的温度波形关系，可根据测量公式得到样品长度或面内方向的热扩散系数。

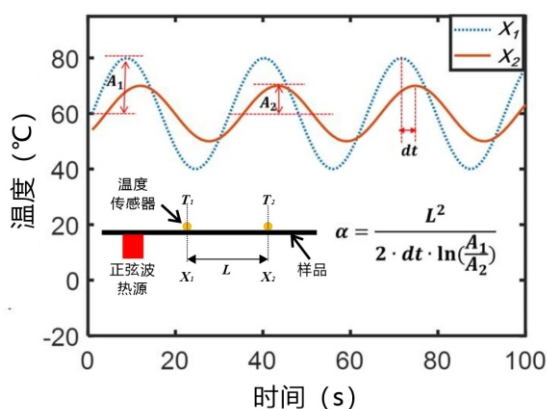


图1 Angstrom法原理图

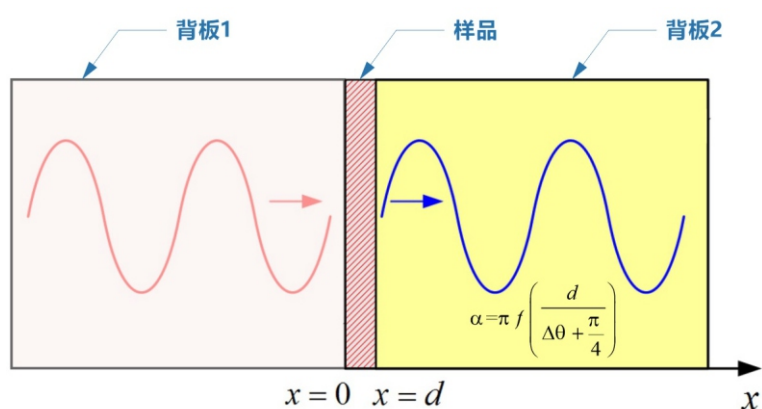


图2 ISO 22007-3温度波分析法原理图

ISO 22007-3温度波分析法也是一种稳态热扩散系数测试方法，如图2所示，在一维热传导模型中，薄样品夹持在两块半无限大厚度的背板之间。当在样品的前表面生成一个正弦温度波时，温度波将沿着样品厚度方向传播，并在样品的背面被检测到。通过所检测的样品前后两表面的温度波形关系，可根据测量公式得到样品厚度方向的热扩散系数。

ISO 22007-6温度调制比较法同样是一种稳态测试方法，如图3所示，其测量原理是采用具有一定厚度且热物性参数已知的探测材料与半无限大的样品材料进行对比测量。同样，也是通过所检测的样品前后两表面的温度或热流波形关系，可根据测量公式得到样品厚度方向的导热系数。

从上述三种不同的测试方法可以看出，其共性都是需要加载正弦波形式的温度变化，并在满足稳态一维热流的条件下进行线材、膜材和板材的热扩散系数和导热系数测试，而此正弦波温度实验条件的实现则是这些方法准确测量的关键技术。

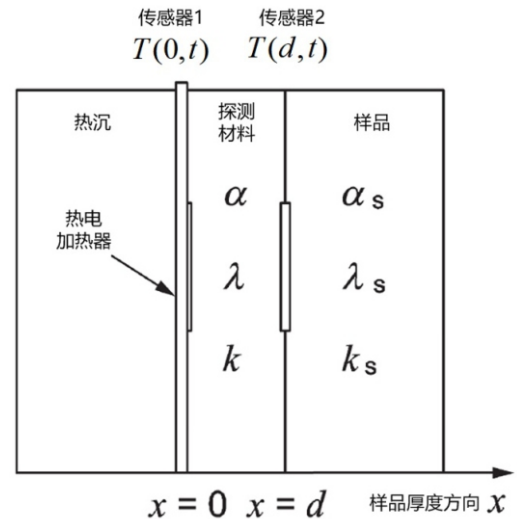


图3 ISO 22007-6 温度调制比较法原理图

正弦波温度这一实验条件实际上是上述测试方法的重要边界条件，正弦波温度的波形准确性和稳定性决定了这些测试方法的测量精度，如何形成准确和稳定的正弦波温度具有很大的技术难度，还未见得相关的研究报告。目前常用的比较简陋的正弦波温度实现方法有以下两种：

(1) 采用正弦波形式的加热电流来使得加热温度也具有正弦波形式，但这种纯电流加热形式只能在较高温度下实现，以在高温下利用自然（或强制）冷却降温来形成正弦波温度，由此所形成的温度波形存在很大的畸形和不规则性。

(2) 采用具有加热和制冷功能的TEC半导体制冷技术进行温度交变控制，虽然输出的温度波形具有很好的一致性和稳定性，但同样存在较大的畸形和不规则性，很难实现正弦温度波输出。

由此可见，目前的正弦波温度的形成存在很大问题，这是造成上述测试方法存在较大误差的主要原因。为了解决这些问题，实现正弦温度波的准确稳定输出，本文提出了以下解决方案。

2. 解决方案

分析正弦波温度形成的机理以及现有技术存在的问题，若想实现准确、稳定、可任意设定和调节的正弦波温度输出，需要解决以下三方面的问题：

(1) 直接对温度进行控制，能按照所设定幅度和频率变化直接输出正弦形式的温度波。

(2) 对于具有自然冷却和强制冷却（如水冷和风冷）的热环境，由于冷却功率基本为恒定值，这就需要具备正弦波温度输出过程中的反馈控制，能根据设定的正弦温度波曲线以及反馈信号自动调节加热功率，使输出的温度变化与设定曲线一致。

(3) 对于具有主动加热和制冷能力的热环境，如TEC半导体制冷器，同样需要具备正弦波温度输出过程中的反馈控制，能根据设定的正弦温度波曲线以及反馈信号自动调节加热和制冷功率，使输出的温度变化与设定曲线一致。

针对上述三方面的问题，我们提出的解决方案包括以下几项技术内容：

(1) 采用具有PID自动调节功能的闭环控制技术和相关仪器，能根据设定波形和测量得到的温度或热流传感器信号进行反馈控制，同时具有PID参数自整定能力。

(2) PID自动调节技术和相关仪器除了具备单通道调节功能以实现纯加热控制之外，还采用了双通道调节技术以能对加热和制冷进行独立控制，以实现TEC半导体制冷器进行控制。

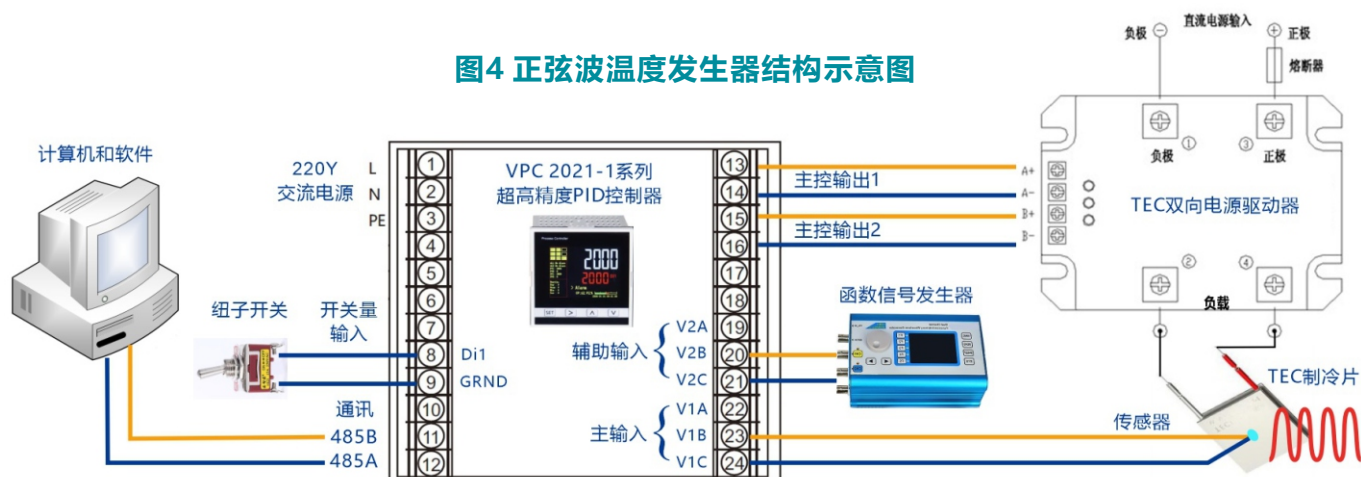
(3) 关键技术是采用了具有外部设定功能PID调节器，即PID调节器能接收外部任意波形信号作为设定值，使得PID调节器能始终按照随时间快速变化的设定值（如正弦波）进行控制而形成准确和稳定的正弦温度波。

(4) 为配合具有外部设定功能PID控制器，还配套了一个函数信号发生器，以外置形式为PID控制器提供和传输所需的正弦波信号。

(5) 对于PID控制器和外置函数信号发生器，配套有相应的计算机软件，可通过上位机以通讯方式操作软件进行各种参数设置和运行操作。

具有上述技术内容的解决方案如图4所示，其相关部分的详细内容如下。

图4 正弦波温度发生器结构示意图



2.1 具有远程设定功能的PID控制器

解决方案中所用的VPC 2021-1系列PID控制器，是一种符合上述1、2和3条技术要求的同时具有内部设定值和外部远程设定值功能的PID控制器，可通过软件或外部开关进行内部和远程设置值功能之间的切换，通过此远程设定值功能使得PID控制器的能力更加强大。

这种具有远程设定功能的PID控制器配置有两个输入通道，第一主输入通道作为测量被控对象的传感器输入，第二辅助输入通道用来作为远程设定点输入。与主输入信号一样，辅助输入的远程设定点同样可接受47种类型的输入信号，其中包括10种热电偶温度传感器、9种电阻型温度传感器、3种纯电阻、10种热敏电阻、3种模拟电流和12种模拟电压，即任何信号源只要能转换为上述47种类型型号，都可以直接接入第二辅助输入通道作为远程设定点源。

与两个输入通道相对应的有两个输出通道，如果仅用第一输出通道则仅能单独实现加热功能，而如果同时采用两个输出通道分别作用于TEC半导体制冷片，则通道1作为加热的正向控制，通道2作为制冷的反向控制，由此可实现加热和制冷的自动控制。

需要注意的是，远程设定功能只能在单点设定控制模式下有效，即具有远程设定模式的高精度PID控制器不具备内部设定值的可编程程序控制功能，只能进行内部设定值的单点控制和外部设定值控制。当然，外部设置值控制也基本相当于一种周期信号的程序控制。

2.2 函数信号发生器

对于函数信号发生器的配置，除了需要具备正弦波信号输出功能之外，还满足以下要求：

(1) 对于采用热电偶作为温度传感器的温控系统，可直接采用普通的函数信号发生器即可，只是需要将发生器输出的电压值转换为相应的热电偶测温所对应的热电势。

(2) 对于采用热电阻作为温度传感器的温控系统，同样需要将信号发生器的电阻输出值转换为相应的热电阻测温所对应的电阻值，一般可选择用于热电阻校准的过程校验仪。

2.3 接线、参数设置和操作

在如图4所示的正弦温度波发生器中，主输入通道连接温度传感器，辅助输入通道连接函数信号发生器或过程校验仪，两路输出通道分别连接双向电源驱动器，电源驱动器连接TEC半导体制冷片。由此传感器、电源驱动器、PID调节器和TEC半导体制冷片组成标准的闭环控制回路，由此实现各种参数的正弦波形式的温度变化输出。

完成上述外部接线后，在进行正弦温度波控制输出之前，需要对PID控制器的辅助输入通道相关参数进行设置，需要满足以下几方面要求：

- (1) 接入辅助输入通道的远程设定点信号类型要与主输入通道完全一致。
- (2) 辅助通道的显示上下限也要与主输入通道完全一致。
- (3) 显示辅助通道接入的远程设定点信号大小的小数点位数要与主输入通道保持一致。

完成上述辅助输入通道参数的设置后，开始使用远程设定点功能时，还需要激活远程设定值功能。远程设定值功能的激活可以采用以下两种方式：

(1) 内部参数激活方式：在PID控制器中，设置辅助输入通道的功能为“远程SV”。

(2) 外部开关切换激活方式：如图4所示可连接一个外部开关进行切换来选择远程设定点功能。同时，还需在PID控制器中设置辅助输入通道的功能为“禁止”，然后设置外部开关量输入功能DI1为“遥控设定”。通过这种外部开关量输入功能的设置，就可以采用开关实现远程设定点和本地设定点之间的切换，开关闭合时为远程设定点功能，开关断开时为本地设定点功能。

需要注意的是，无论采用哪种远程设定点激活和切换方式，在输入信号类型、显示上下限范围和小数点位数这三个参数选项上，辅助输入通道始终要与主输入通道保持一致。

3. 总结

综上所述，本文提出的解决方案，可以彻底解决正弦波温度输出中存在的问题，而且使用简便和门槛较低，无需再进行复杂的程序编写。

另外，本解决方案还配备了相应的计算机软件，采用具有标准MODBUS协议的RS485通讯，通过计算机运行软件可非常方便的远程运行PID控制器以及进行控制器的各种参数设置，同时还可以采集、存储和曲线形式显示PID控制器的过程参数。