

防护热板法导热仪中计量加热器任意设定温度及其加热电功率的超高精度PID恒定控制

Ultra High Precision PID Constant Control of the Arbitrarily Set Temperature of the Metering Heater and Its Heating Electric Power in the Thermal Conductivity Instrument of the Guarded Hot Plate Method

摘要：本文将针对上述防护热板法计量单元电功率精密控制中存在的问题，进行详细分析，并提出相应的解决方案。解决方案的基本内容是升级换代现有的工业用PID控制器，将PID控制器的模数转换（A/D）精度提高到24位，数模转换（D/A）精度提高到16位，增加浮点运算位数并将最小控制输出百分比（OP）提高到0.01%。通过此新一代工业用双通道超高精度PID控制器，可轻松将防护热板法计量单元电功率的准确度控制在0.1%以内，第二通道可以用于护热单元或冷板的温度跟踪和控制。同时，新一代PID控制器还保留了工业用PID控制器的常用规格尺寸，并具有很好的性价比。

一、问题的提出

在稳态法防护热板法导热系数测试过程中，要求在稳定状态下对加载在计量加热器上的电功率进行准确测量。在标准测试方法GB/T 10294中的具体规定是“测量施加于计量部分的平均电功率，准确度不低于0.2%，强烈建议使用直流电。推荐自动稳压的输入功率，输入功率的随机波动、变化引起的热板表面温度波动或变化应小于热板和冷板间温差的0.3%。”

由此可见，防护热板法导热仪计量单元上直流电功率的加载、控制和测量是保证导热系数测量准确性的关键因素之一。除了平均电功率准确度不低于0.2%之外，对于一般冷热板之间20℃温差的导热系数测试，热板表面温度波动或变化还应小于 $20^{\circ}\text{C} \times 0.3\% = 0.06^{\circ}\text{C}$ 。

为了满足稳态法防护热板法上述要求，多年来普遍采用的技术手段是采用直流恒流电源，即在计量加热器上施加高精度恒定的直流电流。尽管加载恒定直流电流可以达到标准方法的规定，但同时存在并带来一系列其他问题：

- (1) 热板温度无法实现10的整数倍温度精确控制。
- (2) 热板温度达到稳定时间长。
- (3) 现有工业用PID控制仪表无法达到电功率准确度要求。

(4) 采用高精度数字电压表和源表，并结合计算机软件进行电功率的PID控制，虽然完全可以解决上述问题，但整体造价十分昂贵。

本文将针对上述防护热板法计量单元电功率精密控制中存在的问题，进行详细分析，并提出相应的解决方案。解决方案的核心内容是升级换代现有的工业用PID控制器，将PID控制器的模数转换（A/D）精度提高到24位，数模转换（D/A）精度提高到16位，增加浮点运算位数并将最小控制输出百分比（OP）提高到0.01%。通过此新一代工业用双通道超高精度PID控制器，可轻松将防护热板法计量单元电功率的准确度控制在0.1%以内，第二通道可以用于护热单元或冷板的温度跟踪和控制。同时，新一代PID控制器还保留了工业用PID控制器的常用规格尺寸，并具有很好的性价比。

二、计量单元电加热功率和温度精密控制问题分析

在现有的防护热板法计量单元电加热功率和温度精密控制中，存在着以下几方面的矛盾。下文将对这些矛盾进行分析，并由此便于提出相应的解决方案。

2.1 热板加热功率精度与整10°C倍数设定温度控制的矛盾

在许多防护热板法导热仪中，为了满足测试方法对施加在计量单元上的加热电功率准确度要求，往往会按照标准方法推荐而采用高精度直流电源。尽管采用直流电源可保证加热电功率的准确度，但在实际测试过程中则还需凭借测试数据积累和经验总结，才能确定出不同热板温度所对应的一系列不同的加载电流值。

这种加热电流直接加载方式尽管能保证电功率的准确度，但最大的问题是无法将热板温度准确控制在任意所需的设定温度上，如无法准确控制整10°C倍数的设定温度，实际热板温度往往偏离设定温度而呈现为非整数形式。另外，在测试不同导热系数样品时，采用相同加热电流往往会表现出不同的热板温度。

直接加载直流电流方式，还存在一个严重问题是升温速度较慢，计量单元达到稳定温度需要漫长时间。特别是对于较大样品尺寸的防护热板法导热仪，相应的计量单元体积和热容都较大，往往需要更长的温度稳定时间。相比于低导热样品的较小热容，计量单元温度稳定所需时间占用了更多的整体达到稳态的时间。

由于上述问题的存在，这种直接加载直流电的加热方式很少在商业化导热仪上使用，一般用在早期热导仪和实验室自行搭建的导热系数测试设备上。

2.2 现有工业用PID控温仪无法满足准确度要求问题

为了解决上述直接加载直流电流加热方式存在的问题，并同时提高导热仪的自动化水平，目前大多数商业化防护热板法导热仪都采用了PID控温仪技术。采用PID控温技术是将温度传感器、调功器、直流恒流源和PID控制器组成闭环控制回路，通过PID算法将计量单元自动控制在任意设定温度点上。

采用PID控制技术，尽量在理论上可以完美的解决早期直接加载直流电流方式存在的问题，但带来的问题则是无法达到测试方法规定的加热电功率准确度要求，也就是使用工业PID控温仪势必要在测量精度上做出牺牲。出现不得不牺牲电功率控制精度的主要原因是目前的工业用PID控温仪存在以下几方面的问题：

(1) 采集精度不够：PID控制器的模数转换（A/D）精度大多都是8位或12位，极个别能达到16位，这明显不能满足高精度测量要求。

(2) 控制精度不够：PID控制器的数模转换（D/A）精度大多都是8位或12位，同样不能满足高精度控制要求。

(3) 浮点运算精度不够：PID控制器内微处理器运算一般都采用单精度浮点运算。对于较低位数的数模转换输出控制，单精度浮点运算已经足够，对应的最小输出百分比为0.1%。但对于防护热板法计量单元电加热功率的高精度控制，0.1%的最小输出百分比显然已经无法满足要求。

2.3 能满足准确度要求的专用PID控制设备但造价昂贵问题

为解决上述PID控制中存在的问题，目前比较成熟的技术是采用高精度的专用仪器和仪表，并结合计算机组成超高精度的PID控制系统来实现防护热板法计量单元电加热功率的控制，并在任意温度设定上实现超高精度的长时间恒定控制。

这种超高精度的PID温度控制系统采用了分体式结构搭建而成，分别采用独立的五位半/六位半的数字电压表和数控直流电源来实现高精度的数据采集和控制输出功能，PID运算处理则采用计算机或微处理器实现双精度浮点运算，并将最小输出功率百分比提高到0.01%甚至更低。

通过这种分体式结构的PID温度控制系统，同时完美的解决了上述防护热板法导热仪中计量单元电加热功率和温度的高精度控制问题，同时也可以大幅度缩短测试时间。

尽管这种分体结构的PID温度控制系统满足了精密测量的各种技术要求，但同时带来的主要问题是造价太高，同时还需进行编程和复杂的调试，因此这种PID温控系统和控制技术在国内外多用于计量机构和对测量精度有较高要求的研究部门，并不适用于对价格比较敏感的商业化防护热板法导热仪，更不适合工业应用中的普通导热仪使用。

三、工业用高精度PID控制器解决方案

上述保护热板法导热仪计量单元的电加热功率和温度精密控制问题的分析以及相应的技术改进，也是多年来保护热板法导热系数测试技术进步的一个典型过程。从上述分析可以看出，这个测试设备的技术迭代过程显然还未真正达到更理想化的水平。

为了既要满足计量单元电加热功率和温度高精度控制要求，又要实现PID控制、运行操作简化和具有较低的制作成本。我们提出了新的解决方案，即在现有的工业用PID控制器（调节器）技术基础上进行升级，充分发挥工业用PID调节器的运行操作简便、集成化程度高、体积尺寸小安装方便和价格上的优势。核心升级技术的具体内容如下：

- (1) PID调节器的模数转换（A/D）直接升级到24位，大幅提高采集精度。
- (2) PID调节器的数模转换（D/A）精度升级到16位，大幅提高控制输出精度。
- (3) 采用双精度浮点运算提高计算精度，并将最小输出百分比降低到0.01%，充分发挥数模转换的16位精度。
- (4) 保持传统工业PID调节器的标准尺寸，如96×96、96×48和48×96规格，而屏幕显示采用真彩色IPS TFT全视角液晶显示，数字全5位显示。
- (5) 全新的PID调节器具有单通道VPC 2021-1和VPC 2021-2两种规格系列，可满足不同变量（如真空、压力、温度和电压等）的高精度调节和控制。

升级前后的PID调节器如图1和图2所示。



图1 升级前的双通道PID调节器



图2 升级后的单通道PID调节器

综上所述，解决方案通过对模数转换、数模转换、浮点运算精度和最小输出百分比的全面升级，可完美的实现防护热板法计量单元的电加热功率和温度的超高精度控制。同时，这种全新的超高精度工业用PID调节器也可能用于其他参数的精密控制，并具有很好的性价比。