

用于测量高灵敏度压电传感器频率温度特性的TEC半导体制冷加热型精密温控系统

TEC Semiconductor Refrigeration and Heating Precision Temperature Control System for Measuring Frequency and Temperature Characteristics of High Sensitivity Piezoelectric Sensor

摘要：为解决石英晶体微量天平这类压电传感器频率温度特性全自动测量中存在的温度控制精度差和测试效率低的问题，本文在TEC半导体制冷技术基础上，提出了小尺寸、高精度和全自动程序温控的解决方案，给出了温控装置的详细结构和实现高精度温度程序控制的具体手段。解决方案在为压电传感器频率温度特性测量提供精密温控能力的同时，关键是可快速进行全过程的自动温度程序运行，由此既保证精度又提高效率。

1. 问题的提出

石英晶体微天平 (Quartz Crystal Microbalance, QCM) 作为一种超高灵敏的质量检测装置，其测量精度可达纳克级，并广泛应用于化学、物理、生物、医学和表面科学等领域中，用以进行气体、液体的成分分析以及微质量的测量、薄膜厚度及粘弹性结构检测等。石英晶体微天平实际上是一种压电传感器，它利用了石英晶体的压电效应，将石英晶体电极表面质量变化转化为石英晶体振荡电路输出电信号的频率变化，进而通过计算机等其他辅助设备获得高精度的测量结果。石英晶体微天平除了具有高灵敏度高和高精度之外，最大特点是结构简单和成本低，它由一薄的石英片组成，两侧金属化，提供电接触。QCM的工作原理类似于用于时间和频率控制的晶体振荡器，但QCM表面常暴露在周围环境中，且对环境温度变化非常敏感，QCM的一个重要技术指标就是频率温度特性。在QCM的具体应用中，温度变化会严重影响QCM测量结果，因此准确测量频率温度特性是表征评价QCM的一项重要内容。但在目前的各种频率温度特性测试装置中，特别是高精度温度控制装置，还存在以下问题：

(1) 在常用的 $-10\sim+70^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内需要对QCM进行多个设定点的高精度温度控制和频率测量，而目前常用温控技术往往控制精度偏低，若提高控制精度又带来测试时间过长的问題。

(2) 专门用于压电晶体频率温度特性测试的恒温装置往往体积普遍偏大，内部温度均匀性较差，同样会带来温控精度差的问题，仅能用于批量压电晶体较低精度的频率温度特性测试。

(3) 尽管采用了TEC半导体制冷技术可实现QCM的高精度温度控制，实现了小型化和快速温控和频率测量，但存在的问题是多个温度点的自动化程序控制能力差，无法实现全温度区间内多个温度点的自动控制 and 频率测量。

为了解决QCM这类压电传感器频率温度特性全自动测量中存在的上述问题，本文在TEC半导体制冷技术基础上，提出了高精度和全自动程序温控的解决方案，给出了温控装置的详细结构和实现高精度温度程序控制的具体手段。解决方案在为压电传感器频率温度特性测量提供精密温控能力的同时，关键是可快速进行全过程的自动温度程序运行，由此既保证精度又提高效率。

2. 解决方案

为了进行石英精度微天平（QCM）的频率温度特性测量，需要将QCM放置在一个受控的热环境中。为了提高热环境的温度控制精度，热环境的尺寸空间较小，并采用TEC模组进行加热和制冷，整个热控装置的结构如图1所示。

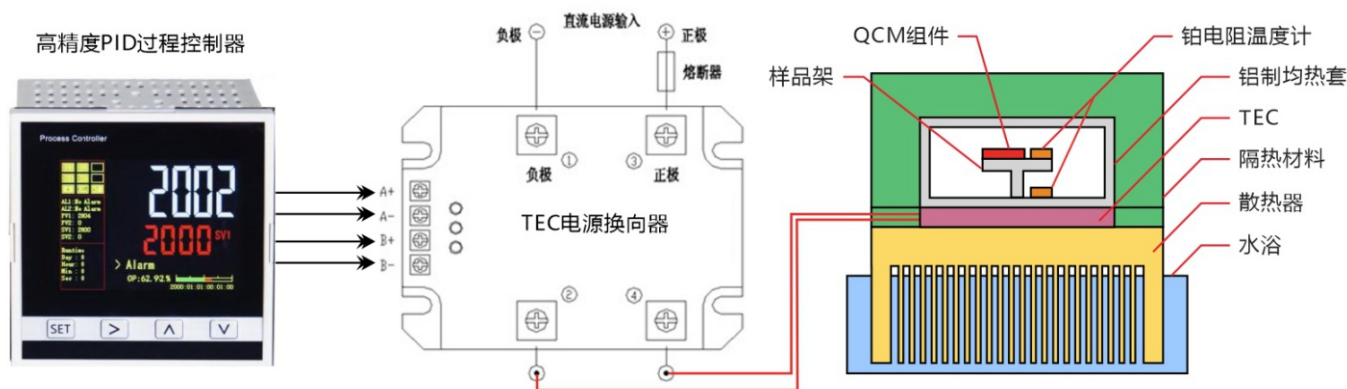


图1 石英精度微天平频率温度特性温控装置结构示意图

如图1所示，TEC被放置在铝制均热套和散热器之间，铝制均热套作为热稳定工作的密闭腔体，为整个腔体提供均匀的温度环境。散热器直接浸泡在水浴中使得TEC的工作表面达到较低的负温度，散热器也可以直接采用水冷板，水冷板内通循环冷却水。

另外，在频率温度特性测试过程中，TEC要提供高低温范围内温度控制，那么在高低温运行时，TEC工作表面和散热器之间存在较大差异，因此，在TEC周围布置隔热材料以减少其两侧之间的热流，从而增加TEC工作面的温度均匀性。

铝制均热套放置在TEC工作表面的顶部，在均热套与TEC之间采用银胶以减小均热套与TEC工作表面之间的接触热阻，铝制均热套被隔热材料包裹以减少与环境的热交换。

在铝制均热套内布置了两只电阻型温度传感器，其中一只安装在铝制均热套的侧壁上作为控温传感器，此温度信号提供给超高精度的PID控制器进行温度自动控制。另一只用来测量固定在铝制支架上的QCM组件温度。

在图1所示的温控装置中，为满足不同尺寸和结构的TEC温控装置，采用了独立的TEC换向电源以满足不同加热功率的需要。在温控器方面，则采用了超高精度的PID控制器，可直接对TEC进行加热制冷双向控制，其中AD为24位，DA为16位，最小输出百分比为0.01%，PID参数自整定，可编程程序控制，由此可实现高精度的温度控制。

对于图1所示结构的温控装置，在全温区范围内设定点从-10变化到+70℃，步进5℃，其温度控制可实现±12mK的温度稳定性和±15mK的设定值精度。

3. 总结

上述压电传感器频率温度特性测试的温控解决方案，主要具备以下几个特点：

(1) 采用了TEC半导体制冷组件，可低成本地实现压电传感器频率温度特性测试过程中的精密温度控制，并使得整个频率温度特性测试装置的体积非常小巧。

(2) 整个温控结构的设计简便，但可以实现 0.02°C 以内的控制精度和重复性，完全能满足各种压电传感器的频率温度特性测试需要。

(3) 由于采用了目前最高精度的工业级可编程PID控制器，具有24位AD、16位DA和0.01%的最小输出百分比，这是实现高精度TEC温度控制的必要条件。

(4) 高精度的可编程PID控制器可按照设定程序进行全测试过程的温度自动控制，设定程序可通过随机的计算机软件进行编辑和修改，控制过程参数可自动进行显示和存储。

总之，本文为实现高精度、简便小巧和低价格的压电传感器频率温度特性测试中的温度控制提供了切实可行的解决方案，为单个或少量压电传感器稳频特性评价提供了有效的技术途径。