

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.02.09

# 基于双半导体制冷器的谐振式露点仪 主控温系统设计

白雪松<sup>1</sup>, 王国华<sup>1</sup>, 刘嘉<sup>2</sup>, 李宁<sup>3</sup>, 任明虎<sup>1</sup>, 聂晶<sup>4\*</sup>

(1.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191;

2.郑州轻工业大学 计算机学院,河南 郑州 450002;

3.北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191;

4.北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院,北京 100191)

**摘要:** 针对高精度石英谐振式露点仪中所涉及的露点温度双闭环跟踪控制的问题,本文提出了一种基于双半导体制冷器的主控温系统,该系统采用STM32作为主控芯片,利用PID控制算法通过DAC分别对两路半导体制冷器进行驱动和温度跟随控制。该系统在-15~15℃温度范围内进行了控温效果试验,结果显示该主控温系统线性制冷速率误差不高于10%,连续线性控温精度高,可为基于双制冷面的高精度石英谐振式露点仪实现双闭环露点跟踪测量提供有效的温控解决方案。

**关键词:** 谐振式露点仪; 双半导体制冷器; 线性电压型驱动; 位置式PID

**中图分类号:** TB943 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)02-0073-06

## Design of main temperature control system of resonant dew point meter based on double TEC

BAI Xuesong<sup>1</sup>, WANG Guohua<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>2</sup>, LI Ning<sup>3</sup>, REN Minghu<sup>1</sup>, NIE Jing<sup>4\*</sup>

(1.School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2.School of Computer Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

3.School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

4.Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of double closed-loop tracking control of dew point temperature in high-precision quartz resonant dew point meter, a temperature control system of resonant dew point meter based on double semiconductor cooler was proposed. The system uses STM32 as the main control chip and uses PID control algorithm to drive and follow the temperature of two semiconductor coolers through DAC. The temperature control system is tested in the temperature range of -15~15℃. The results show that the linear cooling rate error of the main temperature control system is no more than 10%, and the continuous linear temperature control precision is high. It can provide an effective temperature control solution for the high-precision quartz resonant dew point meter based on double cooling surfaces to realize double closed-loop dew point tracking measurement.

**Key words:** resonant dew point meter; double TEC; linear voltage drive; location-PID

收稿日期: 2022-01-29; 修回日期: 2022-04-07

基金项目: 国家“十四五”基础科研项目(JCKY2021601B011)

引用格式: 白雪松, 王国华, 刘嘉, 等. 基于双半导体制冷器的谐振式露点仪主控温系统设计 [J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 73-78.

**Citation:** BAI X S, WANG G H, LIU J, et al. Design of main temperature control system of resonant dew point meter based on double TEC [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2): 73-78.



## 0 引言

在谐振式露点仪对露点的测量过程中,需使用半导体制冷器对石英晶体进行制冷,使其表面结露,从而使石英晶体处于液相环境,造成露点仪中谐振单元的停振,为露点识别提供敏感信号<sup>[1-2]</sup>。露点仪根据敏感信号控制半导体制冷器对石英晶体连续升降温,实现对露点的连续跟踪测量。如果制冷过快,石英晶体会由于过度制冷达到深度结露从而影响对露点的快速识别;如果制冷过慢,石英晶体表面温度需要很长时间才能达到露点,使得露点仪响应时间过长。因此,露点仪根据当前温度与露点之间接近程度以不同制冷速率对石英晶体升降温<sup>[3-11]</sup>可以大幅提高露点仪的响应时间和测量准确度。目前,王怀光等人<sup>[12]</sup>基于增量式PID算法实现了对半导体制冷器制冷速率的控制,但制冷速率不够稳定且只测试了常温范围内的降温,不能满足露点仪测量低露点的要求;徐颖达等人<sup>[13]</sup>利用单神经元PID算法实现了高精度的制冷速率控制,但由于使用单半导体制冷器进行制冷,制冷速率的线性度存在一定波动。本文提出一种基于双半导体制冷器的谐振式露点仪主控温系统,能够有效减少热量耗散,且具有制冷效率高、连续线性控温准确度高的优点。

## 1 系统设计

双半导体制冷器主控温系统由数控系统、制冷系统与温度反馈系统组成,如图1所示。

数控系统中单片机采用STM32作为主控芯片,其自带有DAC,可满足向驱动电路输出控制信号的要求;选用最大误差为 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的PT100铂热电

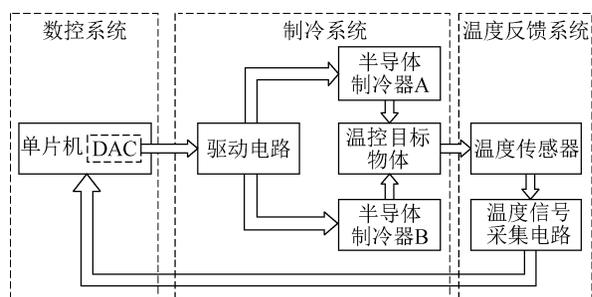


图1 双半导体制冷器主控温系统框图

Fig.1 Block diagram of main temperature control system of double semiconductor cooler

阻向数控系统反馈温度信号;半导体制冷器型号为TEC4-24603,其最大温差可达 $107\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大温差电流为 $3.1\text{ A}$ <sup>[14]</sup>。系统通过温度传感器测量温控目标物体的温度并反馈给单片机,单片机将温度反馈值与温度设定值做比较,利用PID算法,根据温度差值计算出控制量,通过DAC输出模拟电压信号控制驱动电路驱动半导体制冷器对温控目标物体制冷,实现对目标物体温度的闭环控制。本系统具有体积小、制冷效率高、制冷速度快等优点,且除半导体制冷器外不需要额外的散热装置。双半导体制冷器主控温系统实物图如图2所示。



图2 双半导体制冷器主控温系统实物图

Fig.2 Main temperature control system of double semiconductor cooler

## 2 硬件选取及电路实现

### 2.1 半导体制冷器驱动电路

半导体制冷器的驱动方式可分为电流型驱动与电压型驱动。电流型驱动采用电流源的方式,对制冷片的损害最小,可发挥半导体制冷器的最大功率,且驱动线性度好,但由于半导体制冷器额定电流一般为数安培,搭建可输出数安培的电流源不仅成本高,还需要大功率散热装置,使得设备整体体积很大,不利于设备的集成化。电压型驱动一般采用H桥驱动半导体制冷器,在要求不高的场合,H桥驱动半导体制冷器足够使用,但这种方式使用PWM信号直接驱动半导体制冷器,半导体制冷器长时间在这种条件下工作会损坏制冷单元,使得制冷效率下降。本系统采用数控开关电源的方式驱动半导体制冷器,实现半导体制冷器工作电压的平缓变化,延长了半导体制冷器的使用寿命,提高了制冷效率。半导体制冷器驱动电路如图3所示。

TPS54540为TI公司生产的一款DC-DC开关电

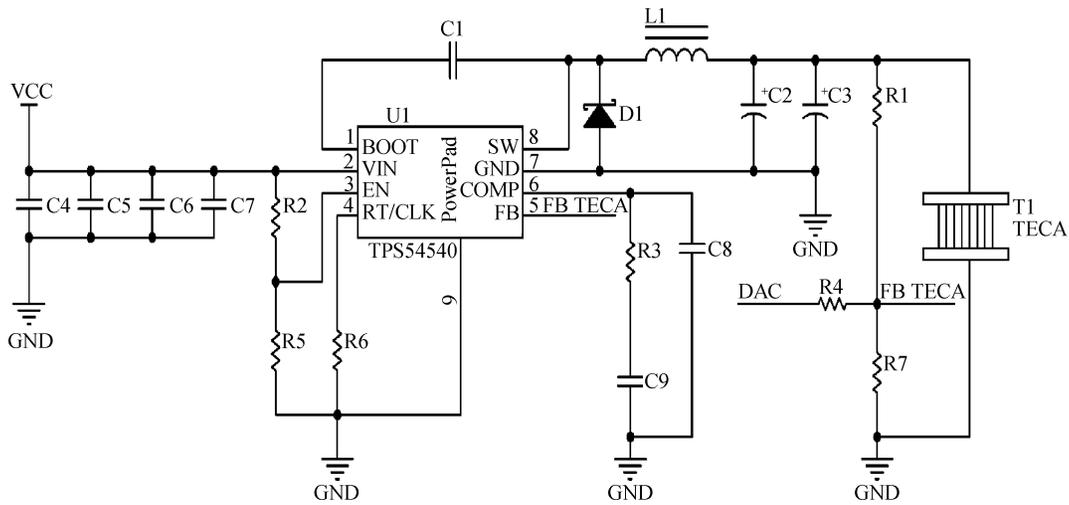


图3 半导体制冷器驱动电路

Fig.3 Driving circuit of semiconductor cooler

源芯片，该芯片可提供0.8~41.1 V的电压输出与最高5 A的电流输出，可以满足半导体制冷器功率要求。TPS54540的输出电压可以通过电阻 $R_1$ 与 $R_7$ 来调整，为实现数字信号控制输出电压的目的，在TPS54540的反馈引脚即电阻 $R_1$ 与 $R_7$ 的分压结点接入电阻 $R_4$ ，则输出电压可通过式(1)计算。

$$V_{out} = V_{REF} \times \left(1 + \frac{R_1}{R_7}\right) + (V_{REF} - V_{DAC}) \times \frac{R_1}{R_4} \quad (1)$$

式中： $V_{REF}$ 为TPS54540的参考电压，为0.8 V； $V_{DAC}$ 为单片机DAC的输出电压。

图3所示为单一半导体制冷器的驱动电路，双半导体制冷器主控温系统采用双路驱动的方式，即两个半导体制冷器采用两个相同的驱动电路驱动，相较于使用单一驱动电路的驱动方式，采用双路驱动可以降低驱动电路的功率。

### 2.2 温度信号采集电路

温度传感器采用PT100铂热电阻。铂热电阻具有线性度好、体积小、准确度高、测温范围广、稳定性好等优点<sup>[15]</sup>。铂热电阻将温度的变化转换为阻值的变化，为了消除铂热电阻引线电阻对测量的影响，采用三线制接法。三线制接法铂热电阻的温度测量电路有电桥法与恒流源法。本系统利用集成芯片，采用恒流源法搭建温度信号采集电路。ADS1248是TI公司生产的一款24位、8通道的模数转换芯片，能够测量4路差分输入电压，可同时接入4个铂热电阻进行温度测量。温度信号采集电路如图4所示，引脚IEXC2与IEXC1接铂电

阻两端，REFP01接铂电阻补偿线。

## 3 控制算法及软件实现

### 3.1 位置式PID算法

PID算法是目前应用最广泛的控制算法，具有控制效果好、稳定性好且不需要建立控制系统数学模型等优点<sup>[16]</sup>。PID算法分为比例环节、积分环节与微分环节三部分，将三者适当地结合可以实现非常理想的控制效果。PID算法的系统框图如图5所示。

PID算法分为位置式PID算法与增量式PID算法。位置式PID算法是一种非递推算法，算法的输出直接控制被控对象要达到的程度，而增量式PID算法是一种递推算法，算法的输出是被控对象控制量的增量<sup>[6]</sup>。位置式PID算法直接产生控制量，直接控制被控对象，但存在积分饱和现象，通常需要采用积分分离法来消除积分饱和现象<sup>[17]</sup>。增量式PID算法仅仅与最近三次的采样值有关，因此避免了积分饱和现象，增量式PID适用于带有积分元件的被控对象。本系统的被控对象半导体制冷器为无积分元件的被控对象，故采用位置式PID控制算法。位置式PID算法的公式为

$$u(k) = K_p \times e_k + K_i \times \sum e_k + K_d \times (e_k - e_{k-1}) \quad (2)$$

式中： $u(k)$ 为控制量； $K_p$ 为比例系数； $K_i$ 为积分系数； $K_d$ 为微分系数； $e_k$ 为当前偏差； $e_{k-1}$ 为上次偏差。

系统设计在反馈温度达到设定温度 $\pm 1.0$  °C范

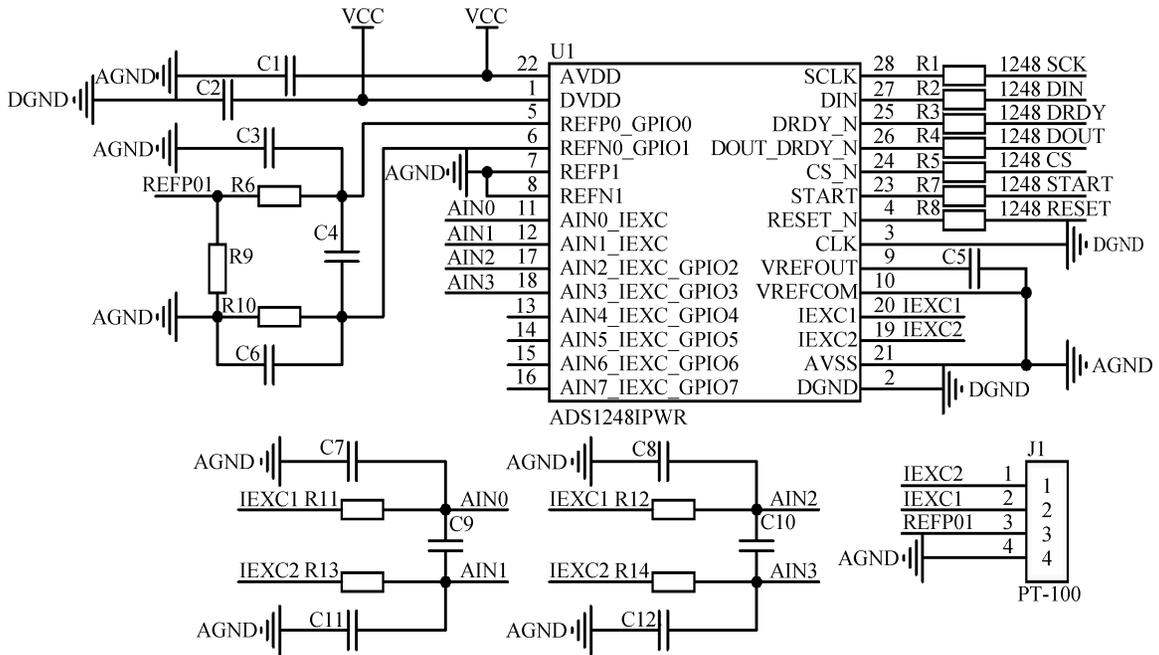


图4 温度信号采集电路

Fig.4 Temperature signal acquisition circuit

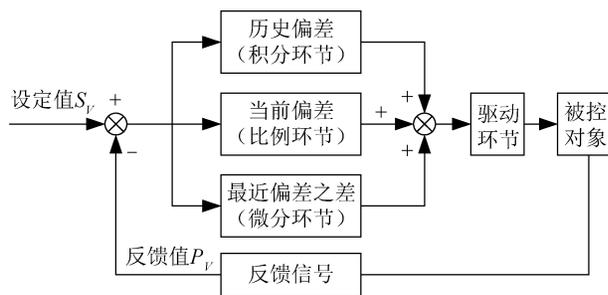


图5 数字PID算法系统框图

Fig.5 Block diagram of digital PID algorithm system

围时，加入积分环节，在其余范围内，去掉积分环节，通过这种方式，实现积分分离，避免了积分饱和现象。

### 3.2 软件实现

双半导体制冷器主控温系统的程序流程图如图6所示。系统开始后，设置PID的比例系数，积分系数与微分系数，这三个PID参数需要多次实验，直到控制效果达到理想状态。通过线性地增加或减小温度设定值，即可实现线性控温的目的。设置修改目标温度值周期至少大于5倍PID计算周期可以避免温度还未达到稳定而温度设定值就发生变化。

## 4 试验结果

图7为主控温系统在不同制冷速率下进行连续

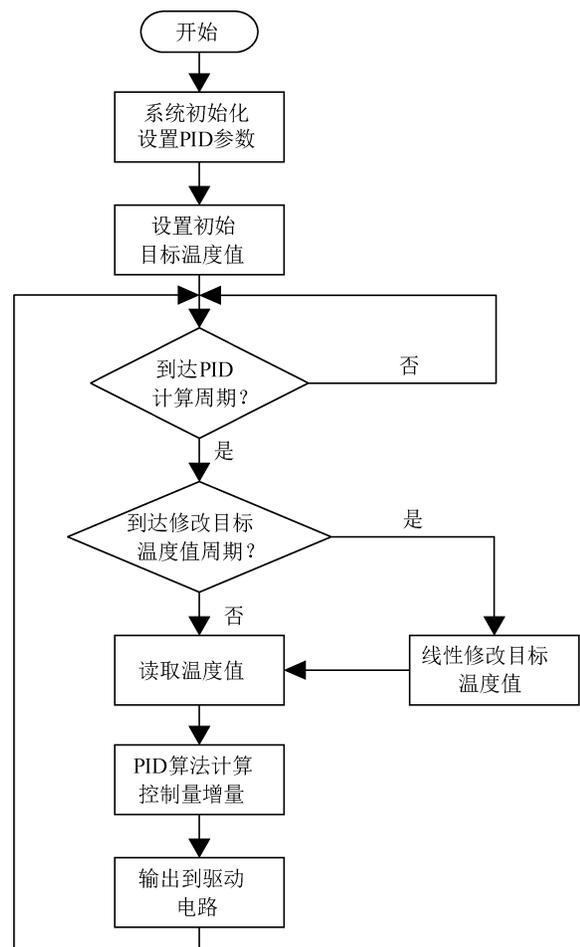


图6 程序流程图

Fig.6 Program flow chart

线性控温的测量结果。试验确定控温范围为-15~15℃,测试了制冷速率分别为±0.8, ±0.5, ±0.2, ±1.0℃/s的控温效果,实际试验测量结果如表1所示。

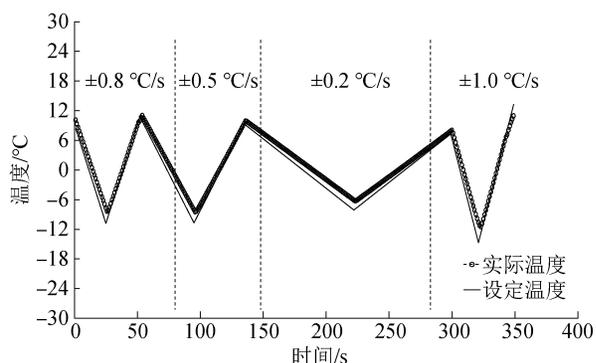


图7 不同制冷速率下连续线性控温结果

Fig.7 Results of continuous linear temperature control under different cooling rates

表1 不同制冷速率实际测量结果

Tab.1 Actual measurement results under different cooling rates

设定制冷速率/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ )	实际制冷速率/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ )	误差/%
±0.2	±0.1849	7.55
±0.5	±0.4585	8.30
±0.8	±0.7385	7.69
±1.0	±0.9128	8.72

根据试验结果可知主控温系统的温度跟随性优良、控温连续性好、温度变化稳定,实际控温系统制冷速率误差不高于10%。

### 5 结束语

本文提出一种基于双半导体制冷器的石英谐振式露点仪主控温系统。该系统采用位置式PID算法实现对控温速率的精确控制,使用最大误差为±0.02℃的PT100铂热电阻测量被控对象的温度并反馈给主控温系统,利用DC/DC开关电源芯片TPS54540以线性电压型方式驱动半导体制冷器,能够以不同速率进行连续线性控温。试验结果表明:该主控温系统线性制冷速率误差不高于10%,制冷效率高、连续线性控温精度高、整体体积小,能够有效满足谐振式露点仪的温度控制需求。

### 参考文献

[1] NIE J, LIU J, MENG X F. A new type of fast dew point sensor using quartz crystal without frequency measurement[J]. Sensors and actuators B chemical, 2016, 236: 749-758.

[2] NIE J, MENG X F, LIN L W. High-accuracy quartz crystal resonance DP instrument [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2020, 67 (9): 8026-8033.

[3] CHA S, CHOI M G, JEON H R, et al. Negative solvatochromism of merocyanine dyes: Application as water content probes for organic solvents [J]. Sensors and actuators B chemical, 2011, 157(1): 14-18.

[4] BAO B, FADAEI H, SINTON D. Detection of bubble and dew point using optical thin-film interference [J]. Sensors and actuators B chemical, 2015 (207) : 640-649.

[5] ZHANG W, CHEN L, YANG Z, et al. An optical humidity sensor based on  $\text{Li}_3\text{PO}_4$  hollow nanospheres [J]. Sensors and actuators B chemical, 2011(155): 226-231.

[6] STEHLE J, SAMARAO A K, YAMA G, et al. Development of a silicon-only capacitive dew point sensor [J]. IEEE sensors Journal, 2017(17): 7223-7230.

[7] WEREMCZUK J, IWASZKO R, JACHOWICZ R. The method of water molecules counting during condensation process in the dew point detector [J]. Sensors and actuators B chemical, 2012 (175): 137-141.

[8] JACHOWICZ R S, WEREMCZUK J, PACZESNY D, et al. A MEMS-based super fast dew point hygrometer—construction and medical applications [J]. Measurement science and technology, 2009 (20): 1-10.

[9] WEREMCZUK J, TARAPATA G, PACZESNY D, et al. Fast dew point hygrometer with silicon integrated detector—optimization of dynamic properties [J]. Sensors and actuators A physical, 2006 (132): 195-198.

[10] JOUNG O J, KIM Y H. Dew point measurement for organic vapor mixture using a quartz crystal sensor [J]. Sensors and actuators B chemical, 2006 (113) : 335-340.

[11] WANG P, SU J, SU C, et al. An ultrasensitive quartz crystal microbalance-micropillars based sensor for humidity detection [J]. Journal of applied physics, 2014 (115): 224501.

[12] 王怀光,范红波,任国全,等. 基于增量式PID控制的半导体制冷温控系统 [J]. 现代制造工程, 2013(11):

110-113.

WANG H G, FAN H B, REN G Q, et al. Semiconductor refrigeration temperature control system based on incremental PID control[J]. Modern manufacturing engineering, 2013(11):110-113. (in Chinese)

[13] 徐颖达,杨遂军,吴聿聪,等. 多级热电制冷器升降速率控制策略[J]. 自动化仪表, 2018, 39(7): 6-10, 15.

XU Y D, YANG S J, WU Y C, et al. Control strategy of temperature rise and fall rate of multistage thermoelectric cooler[J]. Automatic instrument, 2018, 39(7): 6-10, 15. (in Chinese)

[14] 李丹,蔡静. 基于半导体制冷片的高精度控温电路系统设计[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 19-21, 39.

LI D, CAI J. Design of high precision temperature control circuit system based on semiconductor refrigeration chip[J]. Metrology and measurement technology, 2017, 37(2): 19-21, 39. (in Chinese)

[15] 张志勇,辛长宇,朱玉龙,等. Pt100温度传感器非线性的补偿方法与电路实现[J]. 电子器件, 2007(6): 2189-2191.

ZHANG Z Y, XIN C Y, ZHU Y L, et al. Nonlinear compensation method and circuit implementation of Pt100 temperature sensor [J]. Electronic device, 2007(6): 2189-2191. (in Chinese)

[16] 谭加加,刘鸿宇,黄武,等. PID控制算法综述[J]. 电

子世界, 2015(16): 78-79.

TAN J J, LIU H Y, HUANG W, et al. Overview of PID control algorithm[J]. Electronic world, 2015(16): 78-79. (in Chinese)

[17] 王祎晨. 增量式PID和位置式PID算法的整定比较与研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(5): 123-124.

WANG Y C. Comparison and research on tuning of incremental PID and position PID algorithms [J]. Industrial control computer, 2018, 31(5): 123-124. (in Chinese)

(本文编辑:刘圣晨)

第一作者:白雪松(1997—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为双闭环露点跟踪控制技术。



通讯作者:聂晶(1985—),男,江苏徐州人,副研究员,工学博士,博士生导师,主要从事湿度(露点)精密测量与特种传感技术、湿度计量标准的量子化、压电传感器与执行器、动态测试与校准技术等领域的研究。

