

搅拌式高精度恒温槽设计与试验

张开兴¹ 李 科¹ 张开峰² 徐震震³ 许方鹏³ 刘贤喜^{1,4}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 中国电力建设集团核电工程有限公司, 济南 250102;
3. 泰安磐然测控科技有限公司, 泰安 271018; 4. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 根据高精度温度计量器具检定和校准需求,设计了一种搅拌式高精度恒温槽。在结构上,优化恒温槽内筒结构,内筒采用上搅拌式结构,搅拌腔和工作腔分开,由上下连通结构连为一体,设计了整流格栅和工作介质循环系统,确保筒内工作介质循环和热交换的稳定进行,提高了温场分布的均匀性和稳定性。在温度控制上,采用增量式PID(Proportion integration differentiation)算法,利用粒子群算法自整定PID系数,通过闭环负反馈PID结构实现恒温槽温度精确控制。利用自主研发的软件对恒温槽性能进行测试,结果表明,设计的恒温槽能够实现快速降温 and 升温过程, -10℃时温场稳定性为0.001 1℃/min,工作腔中的上水平面最大温差仅为0.003 4℃,下水平面最大温差为0.002 0℃,内筒工作腔最大温差为0.003 4℃,整个系统自动化程度高、控温稳定,符合国家规定的标准要求。

关键词: 恒温槽; 高精度; 均匀性; 稳定性; PID 算法; 粒子群

中图分类号: TB942 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0418-09

OSID:



Design and Test of High Precision Thermostat

ZHANG Kaixing¹ LI Ke¹ ZHANG Kaifeng² XU Zhenzhen³ XU Fangpeng³ LIU Xianxi^{1,4}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. China Power Construction Group Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Ji'nan 250102, China
3. Panran Measurement and Calibration Technology Co., Ltd., Taian 271018, China
4. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China)

Abstract: In order to meet the needs of verification and calibration of high-precision temperature measuring instruments, a high-precision thermostatic bath was designed. In terms of structural design, the inner cylinder structure of the thermostatic bath was optimized. The inner cylinder adopted an upper stirring structure, and the stirring chamber and the working chamber were separated. The upper and lower connecting structures were connected as a whole, and the rectifying grid and the working medium circulation system were designed to ensure the stable circulation and heat exchange of the working medium in the cylinder, and improve the uniformity and stability of the temperature field distribution. In the temperature control algorithm, the incremental proportion integration differentiation (PID) algorithm was used, the PID coefficients were self-tuning by the particle swarm algorithm, and the closed-loop negative feedback PID structure was used to achieve precise temperature control of the constant temperature bath. The self-developed software was used to test the performance of the constant temperature bath. The test results showed that the designed constant temperature bath can realize a rapid cooling and heating process, and the temperature field stability at -10℃ was 0.001 1℃/min, and the maximum temperature difference at the upper level in the working cavity was only 0.003 4℃, the maximum temperature difference in the lower horizontal plane was 0.002 0℃, and the maximum temperature difference in the inner cylinder working chamber was 0.003 4℃. The entire system had a high degree of automation, stable temperature control, and can meet the national performance requirements.

Key words: constant temperature bath; high precision; uniformity; stability; PID algorithm; particle group

收稿日期: 2020-05-13 修回日期: 2020-06-29

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019GNC106120)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ011)和泰安高新区加快科技成果转化促进新动能培育计划项目(KJDN202014)

作者简介: 张开兴(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业机械化与信息化研究,E-mail: kaixingzhang@139.com

通信作者: 刘贤喜(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化与农机装备研究,E-mail: wjblu@sdau.edu.cn

0 引言

在高精度温度计量器具的检定和校准工作中,恒温槽是非常关键的检定和校准设备^[1-4],它能够给被测体提供一个稳定、均匀的恒温环境。恒温槽在化工、航空航天、医疗卫生、农业等领域应用十分广泛^[5-7]。在农业生产中,经常遇到诸如菌种发酵、温室作物培育、农副产品运输等^[8-11]温度控制问题,农用温度计量器具的准确与否将直接对农业生产产生影响,恒温槽可保证产品质量、提高生产效率。

目前,国内用于检定和校准温度计量器具的恒温槽主要有干体炉、热管恒温槽和液体介质恒温槽。干体炉和热管恒温槽在使用上受到限制,并且控温精度较低,温度场稳定性较差。随着恒温槽应用场合的不断增加,国内学者对其进行了大量的研究。吴江涛等^[12]设计了一种双级控温低温恒温槽,通过模糊比例积分微分实现了对温度的控制,温度控制范围为193~333 K,最小波动度为 ± 5 mK。王海涛等^[13]通过对热管恒温槽增加辅助金属环的方式,提高了传热效率和测量准确度,降低了被测温度计浸没深度的要求。陈龙祥^[14]开发了一套能精确测量纯工质PVT性质的实验平台,其可测温度范围为233~453 K,总不确定度为 ± 5 mK。胡芃等^[15]研制了制冷工质PVT实验用精密低温恒温槽,其最小控温精度可达 ± 3 mK。然而,传统恒温槽普遍存在工作范围有限、控温精度低、温场不稳定、自动化程度低等问题^[16-19],不能满足高精度计量器具的检定和校准要求。

为解决上述问题,依据北京市计量检测科学研究院JJF 1030—2010《恒温槽技术性能测试规范》^[20],本文设计一种高精度恒温槽。

1 工作原理与结构设计

1.1 工作原理

恒温槽采用上搅拌式结构,内筒搅拌腔和工作腔分开,呈中心对称分布,由上下连通结构连为一体,类似连通器的结构原理。内筒搅拌腔中的工作介质经加热器加热或压缩机降温,在搅拌器的作用下,从底部通道经整流格栅整流后进入内筒工作腔,工作腔中的工作介质从顶部经整流格栅整流进入搅拌腔,以此往复循环,两个腔体内工作介质进行充分的混合与热交换,最终达到稳定均匀状态。采用增量式PID算法进行稳定控温,利用粒子群算法自整定PID系数,通过闭环负反馈PID结构实现恒温槽高精度均匀控温。在温度控制系统的控制下,整个

内筒中的工作介质达到预先设定的稳定温度,并且使内筒中各处的工作介质温度保持稳定。

1.2 整机结构

恒温槽主要由内筒、工作介质、保温层、制冷装置、加热装置、油路循环系统、搅拌装置和温度控制系统等组成,整机结构如图1所示。将高精度恒温槽内筒设计为上搅拌式结构,内筒工作腔为温度计量器具的检定和校准提供均匀且稳定的温度环境;内筒搅拌腔用于对工作介质的搅拌、加热和制冷;搅拌装置为恒温槽中经加热或降温后的工作介质在搅拌腔和工作腔之间的循环流动提供动力,加速工作介质之间的热交换过程;制冷装置和加热装置分别用来实现工作介质的降温和加热。制冷装置中的压缩机组和水箱置于内部结构的最下方,这种结构布局符合制冷原理,并且可以减小整机体积、提高设备的结构稳定性、节省空间。恒温槽的电源及其控制电路装配在内筒结构的侧面,方便与各部件之间的连接。

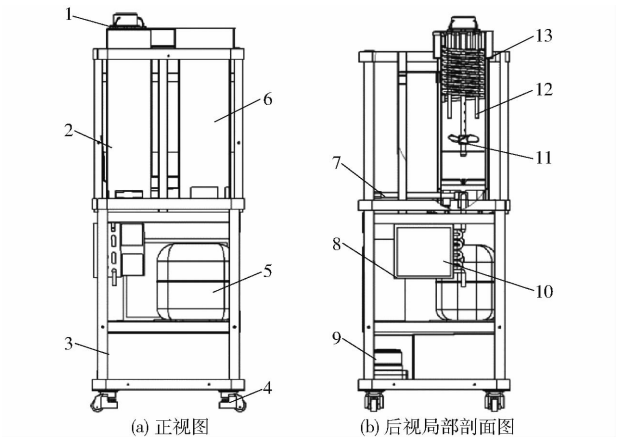


图1 整机结构示意图

Fig.1 Schematic of whole machine

1. 电机 2. 内筒搅拌腔 3. 水箱 4. 福马轮 5. 压缩机 6. 内筒工作腔 7. 放液管 8. 冷凝器 9. 油泵 10. 冷排 11. 桨叶 12. 加热棒 13. 蒸发器

1.3 内筒结构设计

内筒是恒温槽的主要工作区域,将内筒设计为两个连通腔体,其中内筒工作腔尺寸为(150 mm×150 mm×450 mm),搅拌腔尺寸为(132 mm×132 mm×450 mm),上下连通结构尺寸为(132 mm×50 mm×85 mm),其三维结构如图2a所示。搅拌电机主轴、桨叶、加热器、压缩机盘管蒸发器和铂电阻传感器均安装于内筒搅拌腔中;整流格栅置于工作腔中,用于对工作介质的阻流以确保筒内介质循环和热交换的稳定进行。考虑到内筒热量散失对整机的恒温效果的影响,选择导热系数和比热容均比较小的厚度1.5 mm的不锈钢作为内筒的

材料,同时选择厚度 6 mm、密度 100 ~ 200 kg/m³ 的纳米气凝胶毡作为内筒外部的保温材料,缠绕在内筒外壁,形成性能良好的保温层,如图 2b 所示。

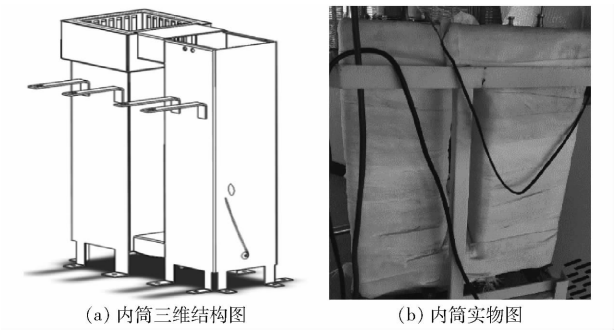


图 2 内筒三维图和实物图

Fig. 2 3D and solid diagram of inner cylinder

1.3.1 整流格栅

传统恒温槽内筒工作腔结构简单,只有单个腔体,正常工作时不利于工作介质的循环与搅拌,容易在搅拌器周围形成涡流,导致工作介质流动方向杂乱,造成工作腔温度场不均匀、不稳定,且不利于热交换的充分进行。为解决上述问题,设计了一种整流格栅,其上下两端各开导流槽,腔体四面皆有,导流槽长度设计为 10 mm,宽度 5 mm,各导流槽间距为 5 mm,其结构如图 3 所示。

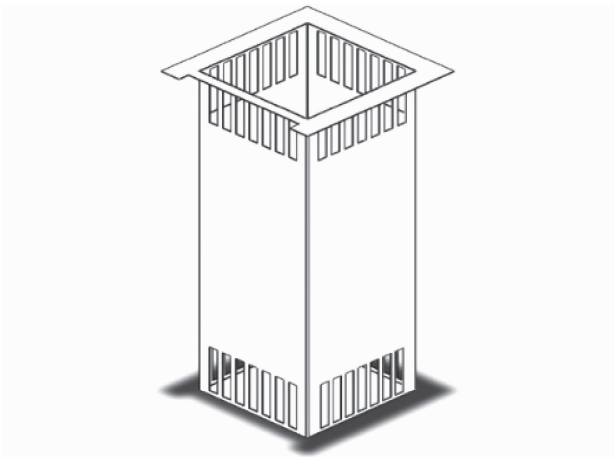


图 3 整流格栅结构示意图

Fig. 3 Schematic of rectifying grid structure

区别于传统的内筒结构设计,经本研究设计的工作腔内置整流格栅,克服了由于搅拌器搅拌而造成工作介质流动方向杂乱的问题,经过搅拌腔循环的工作介质在整流格栅的作用下先被阻流,后在工作腔内均匀混合,为没有充分混合和热交换的工作介质的循环起到滞后作用,降低工作腔内温场的波动,使工作介质在搅拌腔和工作腔之间形成一个稳定的循环流动。整流格栅的设计使进入工作腔内的工作介质流动均匀且稳定,图 4a 和图 4b 分别为工作介质正面速度矢量图和侧面速度矢量图。由图 4 可知,在无整流格栅作用的搅拌腔内,搅拌器附近流场流动均匀性极差,

搅拌器周围工作介质流向杂乱,而经整流格栅整流后进入工作腔中的工作介质的流动速度均匀、稳定,在工作腔内形成一个均匀稳定的流场。

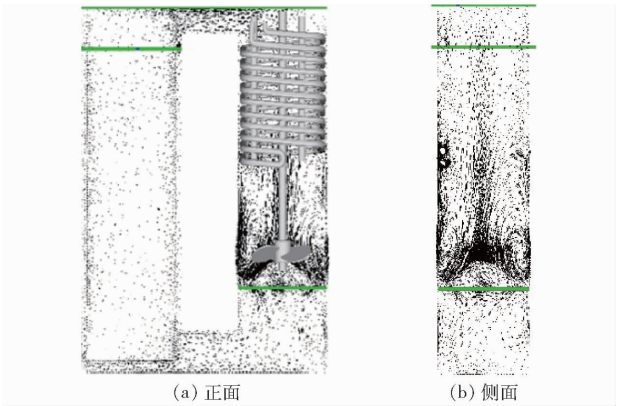


图 4 速度矢量图

Fig. 4 Speed vector

1.3.2 加热装置

采用绝缘电热棒作为加热器。选用铠装的加热丝,由导线、发热丝、耐高温不锈钢管套等组成。加热棒内部填充绝缘材料,外层是保护管,末端为英制 4 分螺纹,如图 5 所示。电热棒作为加热器,其绝缘性较好,安装和拆卸比较方便,而且在工作时,加热棒表面温度高于加热丝,能保证快速升温,由此也提高了升温效率。

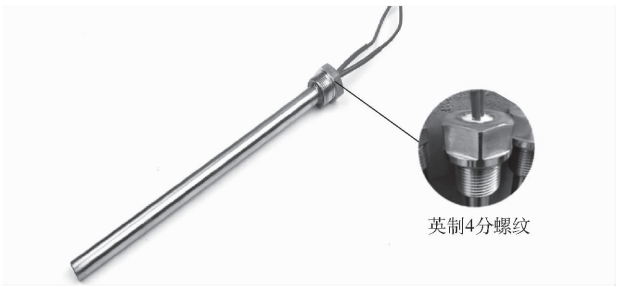


图 5 绝缘电热棒

Fig. 5 Insulated electric heating rod

所选的绝缘电热棒产品技术参数如表 1 所示。本设计所选功率为 2 000 W,采取 3 支串联的工作方式。电机安装板上焊接英制 4 分螺母,安装电热棒。

表 1 绝缘电热棒产品技术参数
Tab. 1 Technical indicators of insulated electric heating rod products

参数	数值
功率公差	- 5 ~ 10
管径公差	- 0. 15 ~ - 0. 10
长度公差/%	- 1 ~ 1
耐压阻值/MΩ	1 600
绝缘阻值/MΩ	> 400
电源引线长度/mm	250

1.3.3 制冷装置

本设计选用 SIKELAN 生产的变排量压缩机,

QDZH65G 型压缩机排量可调,选用 R134a 作为制冷剂,压缩机运行功率为 120 W,极限转速 3 500 r/min 时制冷量为 210 W,具有体积小、质量小、震动小、效率高、噪声小等优点。压缩机组回路铜管直径设计为 8 mm,毛细管长度为 1.7 m,直径 0.5 mm。盘管蒸发器长度设计为 6.8 m,盘 14 圈,自上而下自然排列,间距在 30 mm 左右,最后再自下而上返回入口处,与入口的管口平行,盘管蒸发器结构示意图如图 6 所示。

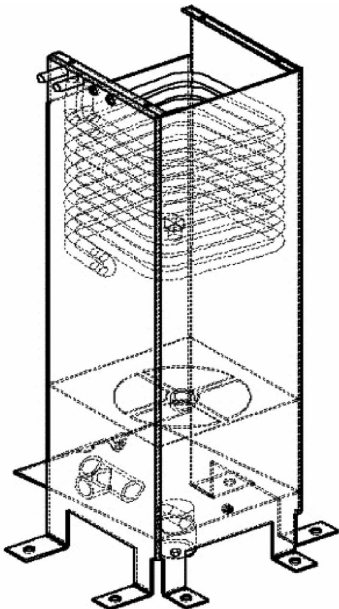


图 6 盘管蒸发器结构示意图

Fig.6 Structure sketch of coil evaporator

1.4 恒温槽控制电路设计

高精度恒温槽的温度控制系统的硬件部分由数据采集模块、通信模块、显示模块、输出控制模块和 MCU 微控制单元等组成,如图 7 所示。

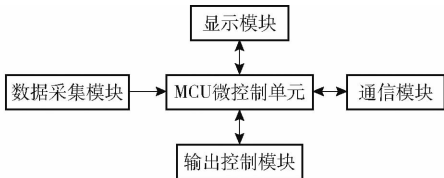


图 7 温度控制系统硬件结构框图

Fig.7 Block diagram of hardware structure of temperature control system

MCU 微控制单元以 STM32 单片机作为整个系统的控制核心。数据采集模块将标准铂电阻传感器采集的电流信号送入单片机进行计算。通信模块由 RS485、RS232 两路通信串口组成,RS485 串口用来与数据采集模块进行通信,每隔 1 s 将采集的温度数据送至控制中心;RS232 串口与触摸屏模块进行通信,完成触摸屏参数的调整与显示。输出控制模块由 DAC 电路和继电器组成,MCU 微控制单元将处理好的模拟信号送入继电器,通过控制其通断来

驱动电热棒,以实现恒温槽温场热平衡。

2 温度控制

2.1 粒子群自整定 PID 算法

恒温槽各机构协同工作,对导热工作介质进行制冷或加热,实现温度的改变。由电机总成实现对工作介质的搅拌和循环,通过控温系统实现恒温槽的温度控制。恒温槽的温度控制算法采用增量式 PID 控制算法,传统的 PID 控制算法是一种基于过程参数的控制算法,相对简单,只能用在普通领域,当反应条件复杂、介质多变时,存在控制精度低和可控性差的问题,很难达到温度的精确控制。模拟 PID 的控制算法为

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

式中 $u(t)$ ——PID 控制器输出信号

K_p ——比例系数

T_d ——微分时间常数

T_i ——积分时间常数 t ——时间

$e(t)$ ——控制器偏差信号

由于设计的温度控制是一套数字系统,STM32 单片机只能处理数字信号,无法进行连续的 PID 控制,需要对模拟信号进行离散化处理,以取样时刻点 $kT(k=0,1,2,\cdots)$ 代替连续时间 t ,以增量代替微分项,以和式代替积分项,以数字差分方程代替连续微分方程,得到数字型 PID 算法表达式为

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + K_p \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (2)$$

式中 $u(k)$ ——第 k 次的控制器输出信号

此表达式为位置型 PID 控制算法,第 2 项累加和增加了运算量,会占用较多的存储单元,因此采用相邻采样时刻的增量

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = Ae(k) + Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (3)$$

其中

$$A = 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}$$
$$B = -K_p \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) \quad C = K_p \frac{T_d}{T}$$

通过确定采用周期 T ,调节 A 、 B 、 C 3 个参数,即可确定最优的控制量。PID 控制器的参数整定常采用工程整定法,由于被控系统精度要求高,与真实系统存在较大的差异。设计一种基于粒子群的 PID 参数整定方法,将 A 、 B 、 C 3 个参数作为三维空间的一个矢量解,对应算法中的一个粒子,为了使控制系统有较快的响应速度,适应度函数为

$$J = \int_0^\infty t |e(t)| dt + \sigma M \tag{4}$$

式中 σ ——权重系数
 M ——系统生产的超调量

通过粒子群算法自整定 PID 系数的原理框图如图 8 所示,通过调整权重系数优化系统性能,最终寻找一组最优参数使得适应度函数的值最小。

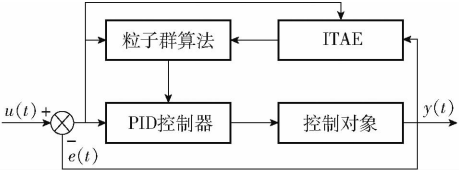


图 8 PID 参数整定原理框图

Fig. 8 PID parameter tuning principle block diagram

2.2 温度控制原理

温度控制系统的原理图如图 9 所示,在温度调控系统下,数据采集模块完成温度的数据采集,将其送至放大电路和 ADC 采集电路,然后将转换数据送至 MCU,将温度设定值与采集的温度作差,根据偏差来确定是否采用 PID 控制。当偏差超过设定范围时,不进行 PID 控制;当偏差在设定范围之内时,进行 PID 控制,然后信号经 DAC 转换,输出的模拟量控制电热棒的功率,压缩机持续制冷,电热棒的热功率所产生的热量对制冷量予以平衡,从而平衡温场的温度。

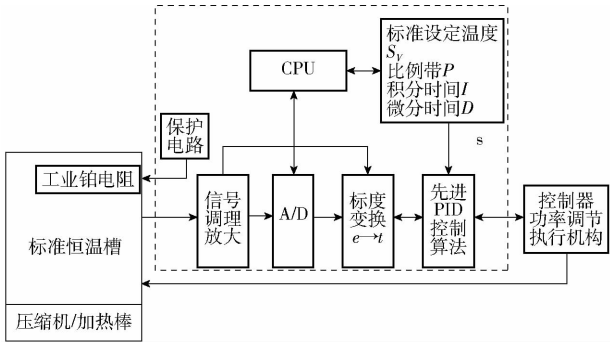


图 9 精密控温原理框图

Fig. 9 Functional block diagram of precise temperature control

恒温槽在正常工作时,通过设定任意目标温度,能够建立一个温度分布均匀且稳定的恒温场,其温度控制主要由降温 and 升温两部分组成。恒温槽的降温过程由槽体下方的制冷压缩机组实现。压缩机组盘型蒸发器中的制冷剂吸收内筒中工作介质的热量通过制冷循环排放到环境中,达到降温的目的。恒温槽的升温过程以绝缘电热棒作为加热器,通过对工作介质加热进行平衡热量。当恒温槽内的介质从低温快速升至高温时,只需关闭冷排上的风扇,通过冷排自然散热补偿热量,并与底部水箱内常温介质进行热交换完成快速升温,由此完成一个“搅拌

腔 + 工作腔 → 冷排 → 油泵 → 水箱 → 油泵 → 搅拌腔”的循环路线。

工作介质循环系统原理图如图 10 所示。当需要冷却恒温槽内筒的工作介质时,打开油泵,油泵是双重进出口,共 4 个管口。内筒搅拌腔和内筒工作腔内的高温介质经过放液管流至冷排,进行充分散热后被油泵吸入并泵入水箱,与水箱的常温介质进行混合热交换,再被油泵泵入内筒搅拌腔,循环往复,实现恒温槽内的高温介质在短时间内迅速降温,提高温度调控效率。

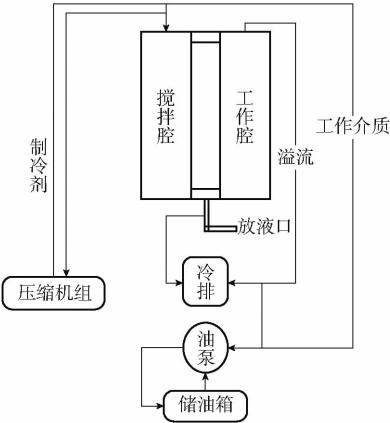


图 10 工作介质循环系统原理图

Fig. 10 Schematic of working medium circulation system

3 性能测试

恒温槽性能测试包括:温场稳定性测试和温场均匀性测试。要求测试过程严格符合国家规程,且两项性能测试结果均低于国家标准。本研究设计的高精度恒温槽性能测试系统的配套设备由昆明大方自动控制科技有限公司生产的、灵敏度为 0.1 Ω/℃ 的 Pt25 标准铂电阻、低热电势转换开关、高精度数字多用表等组成,实物如图 11 所示。检测信息的传递路线为:恒温槽 → Pt25 标准铂电阻 → 低热电势转换开关 → 高精度数字多用表,最后将测得数据存储于优盘中。本文对所研究设计的高精度恒温槽的性能评价指标分别进行了测试,对所得测试结果进行转换和分析,并与国家规



图 11 恒温槽性能测试系统配套仪器

Fig. 11 Diagram of supporting instruments for thermostat performance testing system

程技术要求进行对比,结果表明所设计的恒温槽精度远高于国家规程技术要求,可以很好地满足各类农用温度计量器具的检定和校准需求。

3.1 温场稳定性测试

鉴于本恒温槽主要应用于 $-10\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的温度范围,因此试验选取恒温槽下限温度 -10°C 、上限温度 100°C 和 0°C 3 个温度作为整个温度范围内的重要代表温度分别进行测试。在恒温槽触摸屏工作界面分别设定温度参数 S_v 为 -10 、 0 、 100°C 。低热电

势转换开关不切换通道,试验采用一个 Pt25 铂电阻,将电阻插入深度为工作腔深度 $1/2$ 处等待测试。测试时,严格按照国家规程要求操作,待恒温槽达到测试温度后稳定至少 10 min ,再读取数字多用表上的数字。在测试时保证检测仪表上的恒温槽的实际温度与测试点温度偏差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。以每分钟不少于 6 次的均匀间隔读数,持续读数 10 min 。最终将完成 3 个温度各 60 次恒温槽温场稳定性测试,恒温槽温场稳定性测试记录如表 2~4 所示。

表 2 -10°C 时恒温槽温场稳定性测试数据

Tab.2 Testing readings for stability of temperature field in thermostat bath at -10°C										Ω
次序	第 1 分钟	第 2 分钟	第 3 分钟	第 4 分钟	第 5 分钟	第 6 分钟	第 7 分钟	第 8 分钟	第 9 分钟	第 10 分钟
1	24.468 1	24.468 3	24.468 5	24.468 7	24.468 9	24.468 7	24.469 0	24.469 0	24.469 2	24.469 2
2	24.468 2	24.468 3	24.468 5	24.468 6	24.468 8	24.468 6	24.469 0	24.469 0	24.469 0	24.469 1
3	24.468 1	24.468 4	24.468 4	24.468 6	24.468 9	24.469 0	24.469 0	24.469 1	24.469 1	24.469 1
4	24.468 2	24.468 4	24.468 6	24.468 2	24.468 7	24.468 9	24.469 0	24.469 1	24.469 2	24.469 2
5	24.468 3	24.468 4	24.468 6	24.468 7	24.468 7	24.469 0	24.469 2	24.469 0	24.469 0	24.469 0
6	24.468 3	24.468 3	24.468 7	24.468 7	24.468 6	24.469 0	24.469 2	24.469 2	24.469 2	24.468 9

表 3 100°C 时恒温槽温场稳定性测试数据

Tab.3 Test reading of temperature stability of constant temperature bath at 100°C										Ω
次序	第 1 分钟	第 2 分钟	第 3 分钟	第 4 分钟	第 5 分钟	第 6 分钟	第 7 分钟	第 8 分钟	第 9 分钟	第 10 分钟
1	35.482 6	35.482 8	35.482 8	35.483 2	35.483 2	35.483 2	35.483 6	35.483 3	35.483 6	35.483 7
2	35.482 7	35.482 8	35.483 0	35.483 1	35.483 3	35.483 1	35.483 5	35.483 7	35.483 5	35.483 6
3	35.482 6	35.482 9	35.482 9	35.483 1	35.483 4	35.483 5	35.483 6	35.483 6	35.483 8	35.483 6
4	35.482 7	35.482 9	35.483 1	35.483 1	35.483 2	35.483 4	35.483 7	35.483 5	35.483 9	35.483 7
5	35.482 8	35.482 9	35.483 1	35.483 2	35.483 2	35.483 5	35.483 7	35.483 9	35.483 9	35.483 5
6	35.482 8	35.482 8	35.483 2	35.483 2	35.483 1	35.483 5	35.483 7	35.483 9	35.483 8	35.483 4

表 4 0°C 时恒温槽温场稳定性测试数据

Tab.4 Test reading of temperature stability of constant temperature bath at 0°C										Ω
次序	第 1 分钟	第 2 分钟	第 3 分钟	第 4 分钟	第 5 分钟	第 6 分钟	第 7 分钟	第 8 分钟	第 9 分钟	第 10 分钟
1	25.485 2	25.485 4	25.485 6	25.485 8	25.486 0	25.485 8	25.486 2	25.486 1	25.486 5	25.486 4
2	25.485 3	25.485 4	25.485 6	25.485 7	25.485 9	25.485 7	25.486 1	25.486 3	25.486 4	25.486 3
3	25.485 2	25.485 5	25.485 5	25.485 7	25.486 0	25.486 1	25.486 2	25.486 2	25.486 2	25.486 2
4	25.485 3	25.485 5	25.485 7	25.485 3	25.485 8	25.486 0	25.486 3	25.486 3	25.486 3	25.486 3
5	25.485 4	25.485 5	25.485 7	25.485 8	25.485 8	25.486 1	25.486 3	25.486 1	25.486 5	25.486 1
6	25.485 4	25.485 4	25.485 8	25.485 8	25.485 7	25.486 1	25.486 3	25.486 5	25.486 4	25.486 0

3 个不同温度下测试数据的平均值及其对应的标准偏差如图 12 所示。高精度数字多用表显示的数值单位是 Ω ,需要将测试记录数值转为温度。本测试系统使用自主研发国际 90 温标辅助换算软件,能够方便快捷地完成温度、电阻之间的数值转换,其工作界面如图 13 所示。由图 13 的温标辅助换算程序计算出 -10°C 时温场电阻的最大差值为 $0.001\text{ 1}\Omega$ 。经温标辅助换算程序单位换算后,得恒温槽在 -10°C 时稳定性为 $0.001\text{ 1}^{\circ}\text{C}/\text{min}$,显著低于国家规程规定的 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{min}$,另外在 0°C 和 100°C 时稳定性分别为 $0.000\text{ 13}^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 和 $0.001\text{ 32}^{\circ}\text{C}/\text{min}$,

也均满足要求,恒温槽稳定效果优于国内其他水平的恒温槽产品。

3.2 温场均匀性测试

恒温槽温场均匀性测试选取温度 -10°C 作为代表测试点。测试开始后,在恒温槽达到设定温度至少 10 min 后开始读数,并且仪表上的恒温槽的实际温度与测试点温度偏差在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 范围内。

测试时,将恒温槽内筒工作区域分为上、下工作水平面,如图 14 所示。上、下水平面各有 4 个典型位置:A、B、C、D 和 E、F、G、H。水平面温场均匀性测试将一个 Pt25 标准铂电阻温度计固定在参考位

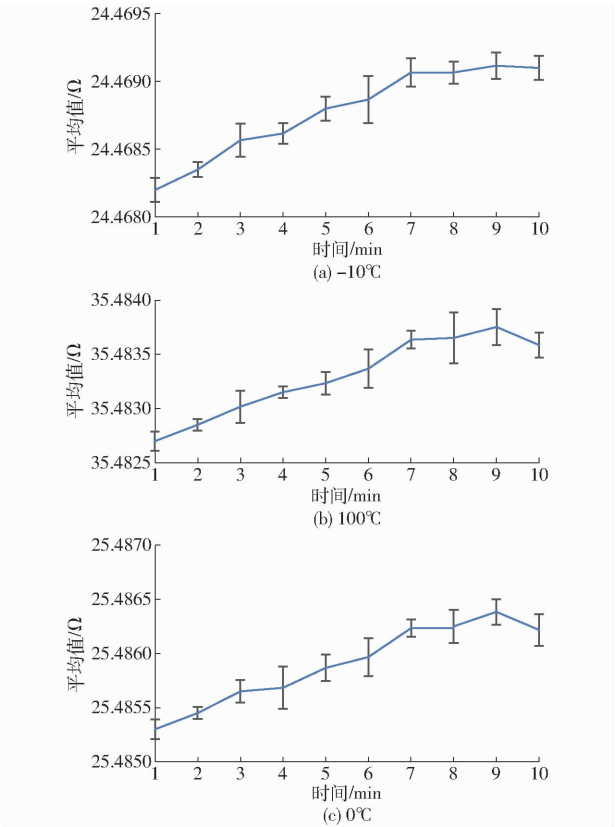


图 12 温场稳定性检测数据分析
Fig. 12 Data analysis of temperature stability

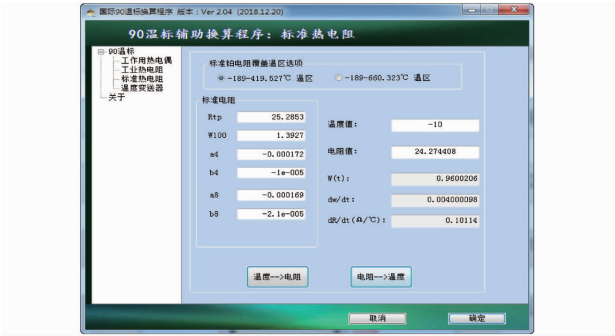


图 13 国际 90 温标辅助换算程序
Fig. 13 International 90 temperature scale auxiliary conversion program

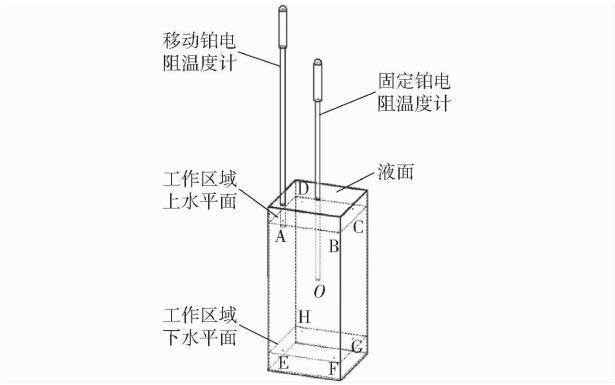


图 14 水平面均匀性测试示意图
Fig. 14 Schematic of uniformity test on water level

Pt25 标准铂电阻温度计移动式插在所选测试点 (A), 固定铂电阻和移动铂电阻在每个位置处均检测 4 次, 以避免偶然因素产生误差, 若 $R_o(i1)$ 、 $R_o(i2)$ 、 $R_o(i3)$ 、 $R_o(i4)$ 和 $R(i1)$ 、 $R(i2)$ 、 $R(i3)$ 、 $R(i4)$ 分别表示固定铂电阻和移动铂电阻 4 次的检测误差, 其中 i 为 A、B、C、D、E、F、G, 则测试点相对点 O 温度差值为

$$R_{i-o} = R_{iavg} - R_{Oavg} \quad (5)$$

式中 R_{Oavg} ——固定铂电阻 4 次测量的平均值
 R_{iavg} ——移动铂电阻 4 次测量的平均值

恒温槽温场均匀性测试上、下水平面测试结果如表 5、6 所示。

表 5 -10°C 时恒温槽温场均匀性测试上水平面数据
Tab.5 Horizontal data in temperature field uniformity testing of constant temperature bath at -10°C Ω

参数	i			
	A	B	C	D
$R_o(i1)$	24.468 9	24.469 0	24.468 8	24.469 2
$R_o(i2)$	24.469 0	24.469 0	24.468 8	24.469 3
$R_o(i3)$	24.468 8	24.469 0	24.468 7	24.469 3
$R_o(i4)$	24.469 2	24.469 1	24.468 6	24.469 2
$R(i1)$	24.465 2	24.465 5	24.465 0	24.465 7
$R(i2)$	24.465 3	24.465 7	24.465 0	24.465 6
$R(i3)$	24.465 3	24.465 5	24.464 9	24.465 7
$R(i4)$	24.465 4	24.465 6	24.464 8	24.465 7
R_{Oavg}	24.469 0	24.469 0	24.468 7	24.469 3
R_{iavg}	24.465 3	24.465 6	24.464 9	24.465 7
R_{i-o}	-0.003 7	-0.003 5	-0.003 8	-0.003 6

表 6 -10°C 时恒温槽温场均匀性测试下水平面数据
Tab.6 Horizontal data under temperature field uniformity test of constant temperature bath at -10°C Ω

参数	i			
	E	F	G	H
$R_o(i1)$	24.469 5	24.469 1	24.469 7	24.469 4
$R_o(i2)$	24.469 4	24.469 2	24.469 9	24.469 5
$R_o(i3)$	24.469 4	24.469 2	24.469 8	24.469 5
$R_o(i4)$	24.469 3	24.469 2	24.469 9	24.469 6
$R(i1)$	24.465 9	24.465 5	24.466 1	24.465 9
$R(i2)$	24.465 9	24.465 6	24.466 1	24.466 0
$R(i3)$	24.465 8	24.465 6	24.466 2	24.466 1
$R(i4)$	24.465 9	24.465 6	24.466 2	24.466 1
R_{Oavg}	24.469 4	24.469 2	24.469 8	24.469 5
R_{iavg}	24.465 9	24.465 6	24.466 2	24.466 0
R_{i-o}	-0.003 5	-0.003 6	-0.003 6	-0.003 5

图 15 为固定铂电阻和移动铂电阻在不同检测位置处的平均值, 图 16 为固定铂电阻与移动铂电阻检测数值之间的相对误差。从图 15、16 可以看出, 上下水平面检测位置处的温度平均变化相对稳定,

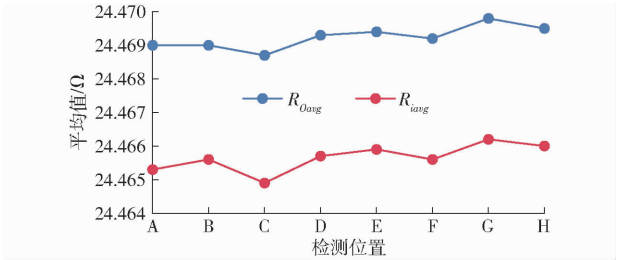


图 15 不同检测点均值变化曲线

Fig. 15 Change curves of mean value of different detection points

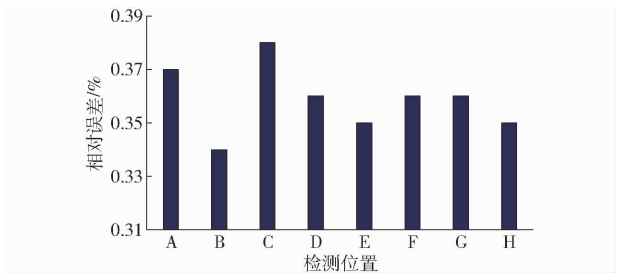


图 16 固定铂电阻与移动铂电阻间检测值的相对误差

Fig. 16 Relative error of detected value between fixed platinum resistance and moving platinum resistance

固定铂电阻与移动铂电阻检测数值之间的相对误差最大仅为 0.38%，表明恒温槽产生的温场具有良好的均匀性。经过整合及单位换算可得，恒温槽工作温度为 -10°C 时，工作区域中上水平面最大温差为 0.0034°C ，恒温槽内筒工作区域下水平面最大温差为 0.0020°C ，恒温槽内筒整体工作区域最大温差为 0.0034°C 。国家规程规范的技术要求为：水平温

场不大于 0.01°C ；垂直温场不大于 0.02°C 。以上试验数据均符合标准。

恒温槽工作腔上层温差比下层温差大，原因为恒温槽内筒的介质循环方式是自下而上，所以工作区域下层的介质混合比上层均匀，且换热体积小，但是整体温场均匀性并未改变，控温精度没有改变。

4 结论

(1)根据温度传感器检定和校准需求，设计了一种用于检定和校准农用温度传感器的高精度恒温槽。优化内筒结构，搅拌腔和工作腔呈中心对称设计，由上下连通结构连为一体；内筒采用上搅拌式结构，改进了整流结构，从而提高温场分布的均匀性和稳定性。

(2)采用增量式 PID 算法进行系统的温度控制，通过粒子群算法自整定 PID 系数，通过闭环负反馈 PID 结构实现恒温槽温度精确控制。依据北京市计量检测科学研究院 JJF 1030—2010《恒温槽技术性能测试规范》开发了相关的温度测量和检验软件。

(3)该恒温槽系统运行稳定，控制精度高，在 -10°C 时，恒温槽工作腔中的上水平面最大温差为 0.0034°C ，下水平面最大温差为 0.0020°C ，恒温槽内筒工作区最大温差为 0.0034°C ，其温场稳定性为 $0.0011^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，能够满足高精度温度计量器具的检定校准需求。

参 考 文 献

[1] 宋占表. 恒温槽温场计量特性分析及仿真研究[D]. 天津:天津大学,2009.
SONG Zhanbiao. Research on the metrological properties analysis and simulation of temperature field of thermostat bath[D]. Tianjin:Tianjin University,2009. (in Chinese)

[2] 任奇锋. 具有自动进样和恒温控制的电子舌检测系统的研制和应用[D]. 杭州:浙江大学,2016.
REN Qifeng. Development and application of electronic tongue system with automatic sampling and constant temperature control [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2016. (in Chinese)

[3] 代晓成. 高精度恒温槽温控系统设计与实现[D]. 保定:华北电力大学,2018.
DAI Xiaocheng. Design and realization of high precision thermostat bath temperature control system[D]. Baoding:North China Electric Power University,2018. (in Chinese)

[4] 杨焕诚. 智能置换式恒温槽测量系统的应用研究[J]. 计量学报,2019,40(6):1037-1042.
YANG Huancheng. Research on the application of the intelligent replacement type thermostatic bath measurement system[J]. Acta Metrologica Sinica,2019,40(6):1037-1042. (in Chinese)

[5] 甄瑞英. CO_2/Ar 混合物 pvTx 性质研究[D]. 太原:太原理工大学,2015.
ZHEN Ruiying. The study of pvTx properties of CO_2/Ar mixtures [D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2015. (in Chinese)

[6] 叶永伟,杨超,王永兴,等. 自适应环境温度变化的压力式温度仪表的研制[J]. 仪器仪表学报,2016,37(5):1087-1093.
YE Yongwei,YANG Chao,WANG Yongxing,et al. Development of the temperature instrument in pressure type for adaptive environmental temperature change[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016,37(5):1087-1093. (in Chinese)

[7] 叶永伟,陆俊杰,钱志勤,等. 基于 LS-SVM 的机械式温度仪表误差预测研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(1):57-66.
YE Yongwei,LU Junjie,QIAN Zhiqin,et al. Study on the temperature error prediction of mechanical temperature instrument based on LS-SVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016,37(1):57-66. (in Chinese)

[8] 孙庆运,王光辉,王德成,等. 巨菌草高温快速干燥设备设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):338-345.

- SUN Qingyun, WANG Guanghui, WANG Decheng, et al. Design and test of high temperature fast drying equipment for hybrid pennisetum[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 338 – 345. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180939&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 09. 039. (in Chinese)
- [9] 邵春声, 张兵. 基于 PROTEUS 的温室大棚温度控制系统的设计与仿真[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(6): 92 – 95. SHAO Chunsheng, ZHANG Bing. Design and simulation of the temperature control system for greenhouse based on PROTEUS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(6): 92 – 95. (in Chinese)
- [10] 袁兴茂, 范国昌, 陈林, 等. 畜禽粪便高温快速发酵装备设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 413 – 418. YUAN Xingmao, FAN Guochang, CHEN Lin, et al. Design and experiment of high temperature and rapid fermentation equipment for livestock and poultry excrement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 413 – 418. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s056&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. S0. 056. (in Chinese)
- [11] 刘广海, 吴俊章, FOSTER A, 等. 多温蓄冷车设计与车内温度场分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 309 – 316. LIU Guanghai, WU Junzhang, FOSTER A, et al. Design of multi-temperature cold storage vehicle and analysis on temperature field in vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 309 – 316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190435&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 04. 035. (in Chinese)
- [12] 吴江涛, 刘志刚, 王凤坤, 等. 一种新的高精度流体热物性测试用低温恒温槽的研制[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(5): 504 – 507. WU Jiangtao, LIU Zhigang, WANG Fengkun, et al. Development of a new-type low-temperature thermostat bath for fluid thermophysical properties measurement[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2004, 38(5): 504 – 507. (in Chinese)
- [13] 王海涛, 董亮, 文萌, 等. 热管恒温槽校准工业用短型温度计的可行性研究[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(1): 29 – 31. WANG Haitao, DONG Liang, WEN Meng, et al. Feasibility study on calibration of industrial short thermometers with heat pipe thermostatic bath[J]. Metrology & Measurement, 2020, 47(1): 29 – 31. (in Chinese)
- [14] 陈龙祥. 含新型制冷工质 HFO – 1234yf 的混合物的气液相平衡研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015. CHEN Longxiang. Study of vapor – liquid equilibrium for the mixtures containing new refrigerant HFO – 1234yf[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [15] 胡芑, 陈则韶, 罗大为, 等. 制冷工质 PVT 实验用精密低温恒温槽的研制[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(4): 414 – 416. HU Peng, CHEN Zeshao, LUO Dawei, et al. The development of precise low-temperature thermostat for PVT measurement of refrigerant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(4): 414 – 416. (in Chinese)
- [16] 刘海莺. 恒温槽温度稳定性参数优化研究[J]. 工业计量, 2020, 30(1): 3 – 6.
- [17] 朱晨彬. 恒温槽自动检测装置的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. ZHU Chenbin. Research on the device of automatic detection of temperature bath[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [18] 田鹏. 高精度温盐检定恒温槽控制系统的设计与研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. TIAN Peng. Design and research of control system of precision thermostatic bath for temperature and salinity verification[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [19] 伍伟雄, 董德晖, 张敏. 一种获得理想温度场的空气介质恒温槽技术[J]. 计测技术, 2012, 32(6): 25 – 28. WU Weixiong, DONG Dehui, ZHANG Min. Air medium thermostatic bath technology for obtaining ideal temperature field[J]. Measurement Technique, 2012, 32(6): 25 – 28. (in Chinese)
- [20] 北京市计量检测科学研究院. 恒温槽技术性能测试规范: JJF 1030—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [21] STAFFOLI S, GRANDE N, PLOTINO G, et al. Influence of environmental temperature, heat-treatment and design on the cyclic fatigue resistance of three generations of a single-file nickel-titanium rotary instrument[J]. Odontology, 2019, 107(3): 301 – 307.
- [22] JIANG Tingshun, GAO Guofang, YANG Cheng, et al. Catalytic activity of Ag – Co – MCM – 41 for liquid-phase selective oxidation of styrene to benzaldehyde[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2020, 20(3): 1670 – 1677.
- [23] 钟广学, 张祖训, 赵宏安, 等. 吸附量热计的研制[J]. 仪器仪表学报, 1993, 14(1): 71 – 75. ZHONG Guangxue, ZHANG Zuxun, ZHAO Hongan, et al. Development of an adsorption calorimeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1993, 14(1): 71 – 75. (in Chinese)
- [24] ZABDUR R, KWANJAE S, SANGYONG L, et al. Experimental study on the rheological behavior of tetrafluoroethane (R – 134a) hydrate slurry[J]. Chemical Engineering Communications, 2018, 205(6): 822 – 832.
- [25] 臧振胜. 工业热电阻检定软件的研究与实现[J]. 中国仪器仪表, 2020, 40(1): 54 – 58. ZANG Zhensheng. The research and implementation industrial thermal resistance verification software[J]. Chinese Instrumentation, 2020, 40(1): 54 – 58. (in Chinese)