

凝聚核粒子计数器原理与实验研究^{*}张 白 蒋尊阳 曹 威 孔德超
(北方民族大学 银川 750021)

摘 要:针对环境中纳米量级颗粒物浓度检测问题,对凝聚核粒子计数器进行了研究与设计。首先对凝聚核粒子生长原理及检测原理进行了研究,并依据异质核化原理设计了凝聚核粒子计数器的生长装置;其次设计了传感器后级信号处理电路用于解决微弱粒子检测信号抗干扰能力差和测量困难问题;然后设计了基于抗饱和和积分 PID 的控制系统,实现了采样流量的闭环控制;最后研制了凝聚核粒子计数器样机,并开展了流量控制、纳米量级粒子生长及计数实验。实验结果表明,设计的凝聚核粒子计数器,流量稳定性在 2% 以内,以 TSI3772 型凝聚核粒子计数器为标准仪器的计数相对误差在 $\pm 8.5\%$ 以内,满足了行业规范要求。

关键词:凝聚核粒子计数器;异质核化;生长装置;信号处理

中图分类号: TH724 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Principle and experimental study of the condensed particle counter

Zhang Bai Jiang Zunyang Cao Wei Kong Dechao
(North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Aiming at the problem of nano-scale particle concentration detection in the environment, the condensed particle counter was researched and designed. Firstly, the growth principle and detection principle of condensed particles were researched, and the growth device of condensed particle counter was designed according to the heteronuclear principle. Secondly, the signal processing circuit of the sensor was designed to solve the problem of poor anti-interference ability and difficult measurement of weak signal of particle detection. Then, a control system based on anti-saturation integral PID was designed to realize the closed-loop control of sampling flow. Finally, a prototype of condensed particle counter was developed, and several experiments were carried out, including flow control, nano-scale particle growth and counting. The experimental results show that the flow stability of the condensation particle counter designed is within 2%, and the relative error of counting with the TSI3772 condensation particle counter as the standard instrument is within $\pm 8.5\%$, which meets the requirements of the industry standard.

Keywords: condensed particle counter; heteronuclear; growth device; signal processing

0 引 言

大气中的污染物主要以气溶胶的形式存在,气溶胶是悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气态分散系统,其颗粒物直径普遍在 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ ^[1]。在半导体芯片制造^[2]、医学、精密仪器加工等行业^[3],空气中悬浮颗粒物的大小和浓度直接影响产品的质量与安全问题。随着科学技术的进步与人们日益增长的需求,相关科学研究

对粒子计数器所能检测最小粒径的要求也越来越高。基于光散射原理的激光尘埃粒子计数器,受光学散射理论限制,对直径低于 $0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒物检测效率不足。

为了突破传统光散射颗粒检测技术的检出极限,实现对微纳颗粒数量浓度的检测,1980 年美国 TSI(Technical Sales International)公司开发了第一台商用凝聚核粒子计数器 TSI 3020。该仪器是以正丁醇为工作液,利用温差产生过饱和正丁醇蒸汽,以采样气体中的颗粒物为凝聚核,

收稿日期:2023-12-13

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52065002)、宁夏自然科学基金(2022AAC02045)项目资助

将过饱和蒸汽凝结在颗粒物表面,使颗粒物增长至光学可测尺寸^[4],再利用光学粒子计数器对颗粒物进行计数的测量仪器。水和醇是用于凝聚核粒子计数器最广泛的两种工作液^[5]。相对于醇基液体而言,水作为工作液具有更容易获取、无污染等优点,但同时也存在无法对表面疏水性颗粒物检测的缺陷。最近几年国内相关研究成果越来越多,其理论与试验数据也逐步接近国际先进水平。浙江大学王志彬团队研发了一种可推断颗粒物化学成分的凝聚核粒子计数器^[6]。郭皓天^[7]研发的基于异质冷凝原理的超细颗粒物浓度检测,其实验只是验证了23~100 nm 粒径范围内的检测精度,且其仪器体积较大,毛细管易损坏。刘晨阳^[8]对凝聚核粒子计数器的生长过程进行了研究。上述研究推动了国内凝聚核粒子计数器的发展,但相关研究成果仍未形成成熟产品。截至目前市场上暂无国产凝聚核粒子计数器,相关企业只能通过进口来满足其使用需求。

根据市场调查,美国 TSI 与德国 Grimm 等国外公司生产的凝聚核粒子计数器占据了国内全部市场。这就带来了购买成本高,等待周期长,维修不方便且费用高等诸多痛点,对相关企业的生产经营带来了明显影响。为了实现该关键设备的国产化研制,本文从基础理论出发,研制了凝聚核粒子计数器生长装置,结合光学粒子计数传感器与生长装置设计了凝聚核粒子计数器样机,为凝聚核粒子计数器国产化的突破提供了技术支撑。

1 凝聚核粒子计数器生长原理

1.1 核化冷凝原理

冷凝是指降低热物质的温度达到临界点后发生的相变传热现象^[9],通常指物质从气态变成液态的过程。核化可分为均质核化和异质核化。均质核化为单一相态分子中没有其他物质存在时发生的核化,其过程如图1所示。以水为例,当空气中水蒸气过饱和度达到一个临界值,并且足够洁净无杂质时^[10],水分子在运动过程中相互碰撞以及范德华力的作用下^[11],聚集结合成微小的液滴。当小液滴的尺寸达到某个阈值时,水蒸气会以小液滴为凝聚核附着在小液滴上,使液滴尺寸快速增大。如果水分子在运动中形成的小液滴尺寸达不到阈值,就会蒸发重新变为气态。均质核化所需的水蒸气过饱和度较高,在自然的大气环境下很难形成。



图1 过饱和水蒸气均质核化过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of homogeneous nucleation process of supersaturated water vapor

异质核化是以非同类物质作为核心的核化现象,其过

程如图2所示。当过饱和水蒸气环境中含有其他物质的颗粒物时,若颗粒物大于可以作为凝聚核的尺寸,水蒸气会以颗粒物为凝聚核,在颗粒物表面发生异质核化^[12],促使颗粒物生长为粒径较大的液滴^[13]。由于颗粒物的存在,不再需要水分子聚集结合成微小的液滴,所需的水蒸气过饱和度相较于均质核化大大降低,在普通大气中就能实现。

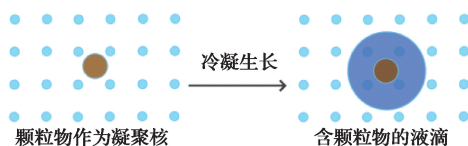


图2 过饱和水蒸气异质核化过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heterogeneous nucleation process of supersaturated water vapor

当流场中过饱和度大于1时,会产生异质核化现象,但过饱和度过高时会发生均质核化。蒸汽过饱和度 S 定义如下^[14]:

$$S = \frac{P_v}{P(T)} \quad (1)$$

式中: P_v 为工质分压; $P(T)$ 为当前物理参数下流场中气压, T 为温度。忽略蒸汽的径向扩散影响, P_v 的差分方程如下^[15]:

$$2U \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \frac{\partial P_v}{\partial z} = D_v \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_v}{\partial r} \right) \quad (2)$$

式中: U 为流场中的平均流速; R 为流场半径; r, z 分别为流场径向和轴向位置; D_v 为工作液蒸汽扩散率。

过饱和蒸汽下能产生核化现象的最小颗粒尺寸与蒸汽过饱和度及化学成分相关,在表面张力的基础上,开尔文提出了用于描述它们之间关系的开尔文公式。在对颗粒物及生长过程中的液滴进行等效球状假设后,能够作为凝聚核的最小粒径称为开尔文直径,公式如下^[16]:

$$D_K = \frac{4\gamma M}{\rho_l R_g T \times \ln S} \quad (3)$$

式中: D_K 为开尔文等效直径; γ 为冷凝流体的表面张力; M 为冷凝流体的相对分子质量; ρ_l 为冷凝流体的密度; R_g 为气体常量; T 为颗粒物绝对温度; S 为蒸汽过饱和度和。

开尔文直径定义了纯液滴稳定的临界平衡直径。同质核化时,小于开尔文直径的液体颗粒会蒸发重新变为气体,较大的颗粒会通过凝结而变得更大。若要形成由分子运动自发形成达到开尔文直径大小的液滴需要浓度极高的过饱和蒸汽。在异质核化时,气体中尺寸大于开尔文直径的粒子会作为凝聚核,快速冷凝生长,这一过程相对容易实现。因此本文设计的凝聚核粒子计数器的生长装置以异质核化为理论基础。

1.2 光散射粒子检测原理

凝聚核粒子计数器的光学粒子计数传感器采用光散

射法实现对颗粒物数量的计数。光学粒子计数传感器由激光二极管、准直透镜、聚焦透镜、散射腔、采集透镜以及光电二极管组成。光学粒子计数传感器结构如图3所示,激光二极管发出一束光,经过准直透镜和聚焦透镜后,激光聚焦点在气溶胶出气嘴的正前方,激光聚焦点与采样气流交叉区域为光敏区^[17]。当气流中的颗粒物经过光敏区时会发生光散射现象,散射光强度与颗粒物直径的六次方正相关^[18]。采集透镜将采集到的散射光聚焦到一个低噪声的光电二极管上,光电二极管会产生微弱电流信号,设计电路将电流信号转化为电压脉冲信号^[19],并进行放大处理。信号的脉宽代表着颗粒物穿过光敏区的时间,脉冲数量即是冷凝生长后粒子的数目^[20],也是采样气体中微小颗粒物的数量。当光电二极管检测到的粒子小于某个尺寸时,转换得到的脉冲信号幅度较小,信噪比过低导致颗粒物无法分辨。

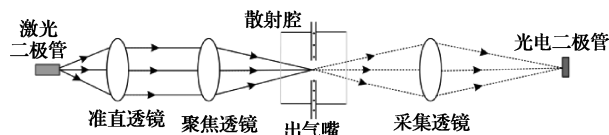


图3 光学粒子计数传感器结构

Fig. 3 Structure of optical particle counting sensor

光学粒子计数传感器在同一时间光敏区只存在一个尘埃粒子的前提下才能正常工作,当所测样本中颗粒物的浓度较高时测量误差显著增加。单个粒子通过光敏区的时间为:

$$t = \frac{S \cdot h}{Q} \quad (4)$$

式中: S 为进气嘴的截面面积为; Q 为采样流量; h 为光敏区在气流方向的厚度。由此可得单位时间内能测量粒子的最大数量。

2 凝聚核粒子计数器系统设计

2.1 凝聚核粒子计数器生长装置设计

本文设计的凝聚核粒子计数器生长装置如图4所示。

主要包括饱和器、隔热装置、冷凝器3个部分。底座、储液室、多孔介质、饱和腔这4个部分共同组成了凝聚核粒子计数器的饱和器。冷凝器由冷凝腔、半导体制冷片、散热器、风扇、加热膜构成。冷凝器与饱和器腔体外围均覆盖一层保温棉,减少设备与外部环境之间的热传递,使其快速达到设定温度,减少制冷与加热设备的功率,使温度控制更稳定,降低系统整体功耗。

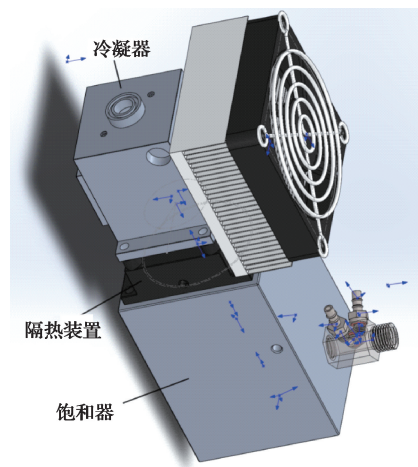


图4 凝聚核粒子计数器生长装置

Fig. 4 Aggregate nucleus particle counter growth device

2.2 传感器信号放大电路

采样气体中不同粒径的颗粒物经过冷凝生长后形成的液滴大小不一,尺寸较小的液滴在经过光学粒子计数传感器时得到的脉冲信号幅值较小,不利于采集。本文采用LF356M集成运放设计了放大电路对脉冲信号进行放大处理,电路如图5所示。

2.3 滞回比较器电路

电压比较器可分为单门限电压比较器、滞回电压比较器、窗口电压比较器。单门限电压比较器的输入电压在参考电压上下变动时,比较器输出电平也会随之跳变。在输入电压接近参考电压时,若受到扰动会输出多个高低变化的电平,使计数结果偏高。滞回比较器可以有效解决这一

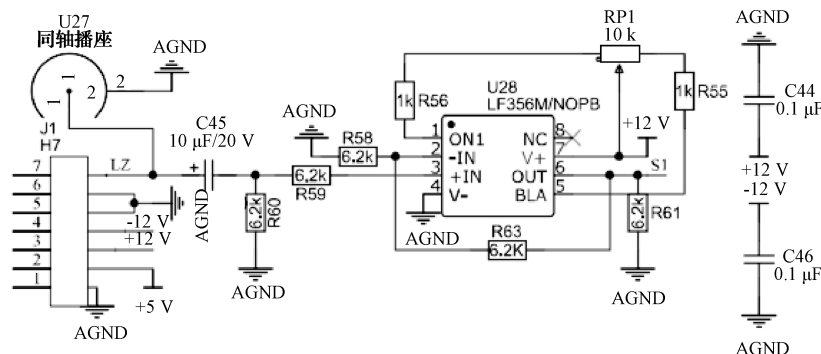


图5 光学粒子计数传感器放大器电路

Fig. 5 Optical particle counting sensor amplifier circuit

问题,因此本文使用滞回比较器设计比较电路,电路如图6所示。

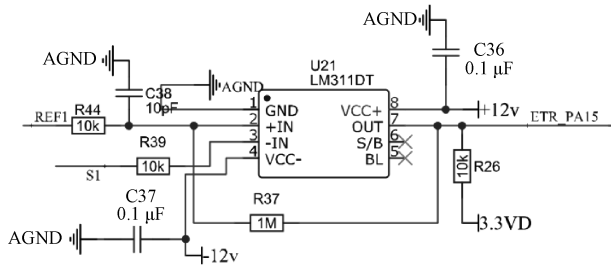


图6 滞回比较器电路

Fig. 6 Hysteresis comparator circuit

当输入信号电压在参考电压附近有轻微扰动时,在扰动幅度上限超过 U_{T2} ,同时下限低于 U_{T1} 才会对输出电平产生影响,否则不会影响输出电平,减少了电压扰动带来的计数误差。 U_{T1} 、 U_{T2} 公式如下:

$$U_{T1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{REF} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z \quad (5)$$

$$U_{T2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z \quad (6)$$

式中: U_{REF} 为DAC设置的参考电压为500 mV; U_Z 为输出高电平3.3 V; R_1 为输入电阻,对应图6中R44; R_2 为反馈电阻,对应图6中R37。由式(5)与(6)得出 $U_{T1} = 463$ mV, $U_{T2} = 527$ mV。电压滞回值应设置在合理范围,若滞回值太小对电压扰动抑制不足,使计数结果偏高。若滞回值设置太大,会造成小粒径颗粒物漏记使计数效率降低。经过测试,本文反馈电阻阻值设置为1 MΩ。

2.4 闭环控制系统设计

在气体采样时,使用FURGUT DC 06 21FK气泵抽取采样气体,该气泵为无油直流旋片泵,额定电压为6 V,流量范围0.3~64 L/min。本文设计的凝聚核粒子计数器需要将采样流量控制在1 L/min,流量控制时将压差传感器得到的压差值经过数据处理得到流量值作为PID闭环参数,控制PWM输出不同占空比来调节气泵转速,从而得到所需的气体流量。

气泵驱动电路如图7所示,PWM输出使用光耦隔离,避免功率电路对模拟信号干扰。当PWM输出高电平时光耦不工作,N沟道增强型MOS管 U_{GS} 小于开启电压 $U_{GS(th)}$,此时气泵不工作。当PWM输出低电平时,光耦引脚中6与4导通,MOS管 $U_{GS} > U_{GS(th)}$,此时MOS导通进而驱动气泵工作。由于气泵属于感性元件,因此在输出端加一个续流二极管用来保护MOS管不被气泵产生的反向电动势损坏。

2.5 人机交互界面设计

本文采用迪文DMT80480T070_07WT工业串口屏实现人机交互设计,该串口屏大小为7 in,支持触控操作,屏幕像素为800×480。屏幕使用变量驱动显示方式,通过改

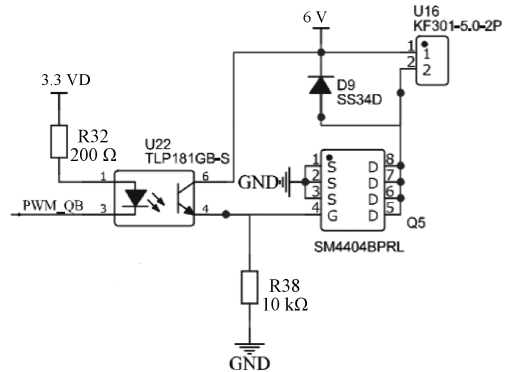


图7 气泵驱动电路

Fig. 7 Air pump drive circuit

变变量实现页面跳转。

系统主界面如图8所示,右边界面分别为湿度、周期、间隔、次数、流量。主界面显示当前湿度值的目的是为了提醒使用者是否打开除湿功能,开启仪器除湿功能,脉冲泵开始抽取隔热装置凹槽内的多余液体。周期为单次采样的时间,具体时间用户可自行设置。间隔为每个周期开始前的延时时间,用户可以依据需求设置时间。次数为采样周期的次数,当采样达到预设次数后仪器停止采样。流量为当前采样气体的实时流量,在使用过程中方便用户了解流量是否正常。



图8 人机交互主显示界面

Fig. 8 Human-computer interaction main display interface

设置界面如图9所示,该界面有5个功能选项触控键,分别为采样设置、时间设置、删除记录、人员地点、厂家设置。



图9 人机交互设置界面

Fig. 9 Human-computer interaction setting interface

2.6 ETR 计数设计

对光学粒子计数传感器产生的脉冲信号进行计数的常规方法包括外部中断计数和外部触发(external trigger, ETR)计数。本文设计的凝聚核粒子计数器每分钟计数高达百万个微粒,若采用外部中断计数模式,就会使系统频繁进入中断,进而导致系统响应不及时。ETR 计数方式以粒子脉冲信号作为外部时钟信号,通过内部计数器直接对脉冲信号计数,仅在计数器产生溢出时进入更新中断对溢出次数计数,避免频繁进入中断而导致的系统响应不及时,因此本文采用外部时钟 ETR 计数方式。

STM32F407ZGT6 的 TIM1、TIM2、TIM3、TIM4 可以配置为定时器 ETR 计数模式。TIM1、TIM3、TIM4 计数器分辨率为 16 bit,在计数达到 2^{16} 时会产生数据溢出, TIM2 计数器分辨率为 32 bit,在计数达到 2^{32} 时会产生数据溢出,远远超过本文设计的最大值,因此选用 TIM2 的 ERT 引脚接收脉冲信号。

3 实验与分析

3.1 流量控制实验

为了验证流量控制系统的性能,本文采用 ALICAT 流量计作为标准装置,其量程为 $0\sim 6$ slpm,读数误差为 $\pm 0.8\%$ 。根据《中华人民共和国国家计量技术规范 JJF-1562—2016》对仪器流量控制性能进行实验,分为 6 个时间段,每个时间段连续测量 10 次。实验数据如表 1 所示。

表 1 流量稳定性实验结果

Table 1 Experimental results of flow stability

测量 次数	流量/(L·min ⁻¹)					
	1 min	3 min	6 min	9 min	12 min	15 min
1	1.00	0.99	1.01	1.01	1.00	1.01
2	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
3	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00
4	0.99	0.99	1.01	1.01	1.01	0.99
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00
6	1.01	1.01	0.99	1.00	1.01	0.99
7	1.01	1.00	1.01	1.00	1.01	1.01
8	1.00	1.00	1.01	1.00	0.99	1.00
9	1.00	1.01	0.99	0.99	1.01	0.99
10	1.01	0.99	1.00	1.01	1.00	1.00

由表 1 可知,在稳定运行时,每个时间段内流量最小值为 0.99 L/min,最大值为 1.01 L/min。流量示值误差最大为 1.010%,符合示值误差小于 $\pm 5\%$ 的要求。每个时间段 10 次流量稳定性最大值为 1.997%,符合采样流量稳定性小于 2% 的要求。

为了验证流量控制的抗干扰性,使用流量稳定时增加串扰的方式观察系统稳定性,当流量稳定在 1 L/min 时,在流量计进气端接高效过滤器增加气路阻力,读取流量计

数据。在增加阻力的瞬间读数变小,经过 2 s 的调节流量值恢复至 1 L/min 左右,并平稳运行。

3.2 粒子生长实验

为了验证设计的凝聚核粒子计数器能否使粒子有效生长,在凝聚核粒子计数器有生长装置和无生长装置时分别对直径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的标准粒子进行计数。生长装置最重要的 3 个因素分别为合适的饱和器温度、合适的冷凝器温度、过饱和和正丁醇蒸汽。本文采用断开加热与制冷装置的电路以及排空饱和腔内正丁醇液体的方法来模拟没有粒子生长环境。

在无生长环境下开启凝聚核粒子计数器,利用标准粒子发生器发射粒径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的标准粒子,标准粒子发生器的气溶胶出口与凝聚核粒子计数器的采样气进气口连接,如图 10 所示。

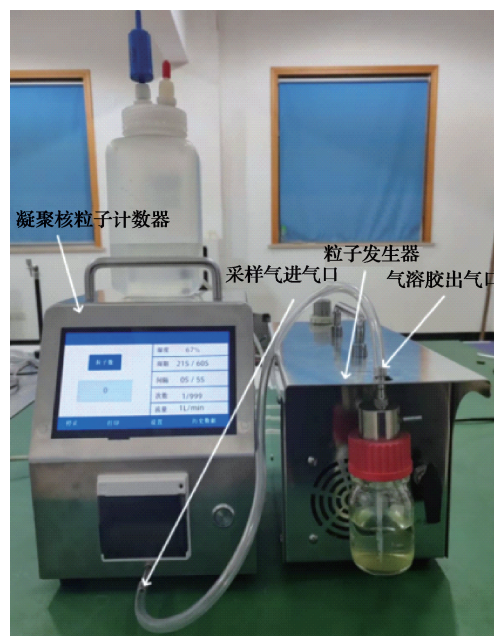


图 10 凝聚核粒子计数器与粒子发生器连接

Fig. 10 Connection diagram of condensed nuclear particle counter and particle generator

以 1 min 为一个周期,连续采集 10 个周期,分别记录无生长环境与有生长环境时的计数个数,数据如表 2 所示,其中数据为 1 min 所计粒子总个数。

由于基于光散射原理的光学粒子计数传感器对 $0.1\ \mu\text{m}$ 的颗粒物识别率极低,即使有少量颗粒物被识别到,其产生的电压脉冲幅值也很小,达不到滞回比较器的参考电压值,故在无生长环境时计数结果为 0,符合预期。

粒径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的颗粒物经过生长装置使粒径增长至光学粒子计数传感器可以识别的大小,使凝聚核粒子计数器可以正常计数。由此可证明本文设计的生长装置可以使颗粒物粒径有效增长。

表 2 粒子生长实验结果

Table 2 Experimental results of particle growth

无生长环境计数	有生长环境计数
0	1 256 324
0	1 245 632
0	1 204 251
0	1 219 361
0	1 237 621
0	1 248 538
0	1 223 695
0	1 264 552
0	1 213 514
0	1 253 677

3.3 计数精度对比实验

为了验证本文设计的凝聚核粒子计数器的计数精度，选用 TSI 3772 型凝聚核粒子计数器作为对比实验的标准仪器。在洁净试验台模拟不同等级的洁净室，验证仪器在不同环境下的计数效率。将实验样机与 TSI 3772 的进气口接在同一个采样气管道上，并尽量缩短采样管道的长度，保证通向两台仪器的采样气体基本一致，连接方式如图 11 所示。



图 11 对比实验连接

Fig. 11 Comparison of experimental connection diagram

两台仪器同时开启计数，每次计数周期为 1 min，计数 10 个周期后改变一次洁净试验台净化等级，实验结果如表 3 所示。结果表明，在 1 个周期计数低于 120 万个时数据误差均不超过 $\pm 8.5\%$ ，达到计数误差在 $\pm 10\%$ 以内的行业要求。在 1 个周期计数总数超过 130 万时误差在 $\pm 10\%$ 以上，主要是由于计数时光敏区粒子存在重叠造成的。本文设计的凝聚核粒子计数器可以在颗粒物浓度低

于 120 万个每升的环境下正常使用，这个使用环境能满足绝大多数使用者的需求。

表 3 粒子计数实验结果

Table 3 Experimental results of particle counting

样机 计数	TSI 3 772 计数	误差 /%	样机计 数数据	TSI 3 772 计数	误差 /%
9 655	8 922	8.2	369 544	368 670	0.2
9 671	9 015	7.3	391 988	412 001	-4.9
10 319	9 901	4.2	422 496	452 420	-6.6
9 571	9 102	5.2	294 645	311 629	-5.5
10 021	9 666	3.7	309 970	324 037	-4.3
9 985	9 531	4.8	335 915	356 611	-5.8
9 835	9 547	3.0	345 182	359 051	-3.9
9 651	9 366	3.0	401 786	421 259	-4.6
9 978	9 615	3.8	399 105	416 263	-4.1
10 006	9 822	1.9	372 557	385 611	-3.4
42 903	40 221	6.7	1 069 853	1 132 681	-5.5
46 617	43 832	6.4	1 156 372	1 225 462	-5.6
45 072	43 761	3.0	1 089 547	1 132 549	-3.8
54 259	51 038	6.3	1 099 658	1 193 561	-7.9
42 605	40 984	4.0	1 093 167	1 153 843	-5.3
48 267	46 173	4.5	1 083 127	1 171 572	-7.5
45 822	43 951	4.3	1 078 273	1 135 468	-5.0
47 371	44 176	7.2	1 085 662	1 151 939	-5.7
41 366	39 145	5.7	1 056 844	1 133 855	-6.8
49 107	46 912	4.7	1 100 364	1 202 716	-8.5

为了验证本文设计的凝聚核粒子计数器长时间运行后计数效率是否稳定，在仪器连续运行 48 h 后进行实验验证，实验结果与上述数据基本一致，计数误差仍在 $\pm 8.5\%$ 。

4 结 论

本文完成了凝聚核粒子计数器的开发，依据过饱和蒸汽异质核化原理设计了凝聚核粒子计数器的生长装置，实现了纳米级粒子的可靠生长。设计了基于抗饱和积分的 PID 流量控制系统，流量稳定性达到 2% 以内。采用运放电路与滞回比较器电路对光学粒子计数传感器输出信号进行放大与甄别，基于 ETR 计数方式实现颗粒物数量计数。实验结果表明，本文设计的凝聚核粒子计数器在每分钟计数低于 120 万个粒子的浓度下计数误差低于 $\pm 8.5\%$ ，经过 48 h 的连续运行后，测量结果稳定可靠，满足了行业要求。

参 考 文 献

[1] 郭皓天,韩晓霞,刘俊杰,等. 凝结核粒子计数器的研究及校准技术现状[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):1-13.

- GUO H T, HAN X X, LIU J J, et al. Research and calibration technology status of nuclear particle counter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 1-13.
- [2] 鲁月林, 郑衍畅, 汪爽, 等. 基于匹配滤波的激光尘埃粒子计数器信号处理方法研究[J]. 应用激光, 2023, 43(5): 82-87.
- LU Y L, ZHENG Y CH, WANG SH, et al. Research on signal processing method of laser dust particle counter based on matched filtering [J]. Applied Laser, 2023, 43(5): 82-87.
- [3] 周中木, 彭建春, 李明, 等. 便携式尘埃粒子发生装置的研制[J]. 中国测试, 2021, 47(S1): 103-106.
- ZHOU ZH M, PENG J CH, LI M, et al. Development of portable dust particle generating device[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(S1): 103-106.
- [4] 张鑫, 陈龙飞, 梁志荣, 等. 凝聚核粒子计数器的理论研究及数值模拟[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 73-78.
- ZHANG X, CHEN L F, LIANG ZH R, et al. Theoretical research and numerical simulation of condensed nuclear particle counter [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(6): 73-78.
- [5] HERING S V, SPIELMAN S R, LEWIS G S. Moderated, water-based, condensational particle growth in a laminar flow[J]. Aerosol Science, 2014, 48(4): 401-408.
- [6] 王志彬, 张科炜, 裴祥宇, 等. 一种推断颗粒物化学组成的凝结核粒子计数器[P]. CN114062229A, 2022-02-18.
- WANG ZH B, ZHANG K W, PEI X Y, et al. A condensation nucleus particle counter for inferring the chemical composition of particulate matter [P]. CN114062229A, 2022-02-18.
- [7] 郭皓天. 基于异质冷凝原理的超细颗粒数浓度在线测量关键技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- GUO H T. Research on the key technology of online measurement of ultrafine particle number concentration based on heterogeneous condensation principle [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [8] 刘晨阳. 层流凝聚核粒子计数器中颗粒生长过程的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2022.
- LIU CH Y. Study on particle growth process in laminar condensation nuclear particle counter [D]. Hangzhou: China university of metrology, 2022.
- [9] 郭亚丽, 王润, 刘瑞, 等. 蒸汽滴状冷凝演变和液滴生长方式的研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(7): 1881-1890.
- GUO Y L, WANG R, LIU R, et al. Research on the evolution of vapor droplet condensation and droplet growth mode [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(7): 1881-1890.
- [10] 余廷芳, 高巨, 熊桂龙, 等. 基于分子运动学的水汽在细颗粒表面异质核化的数值模拟[J]. 化工学报, 2020, 71(7): 3071-3079.
- YU T F, GAO J, XIONG G L, et al. Numerical simulation of heterogeneous nucleation of water vapor on the surface of fine particles based on molecular kinematics[J]. CIESC Journal, 2020, 71(7): 3071-3079.
- [11] 刘义, 丁珏, 刘丽颖, 等. 雾天气下二次气溶胶均质成核生长过程[J]. 环境科学研究, 2012, 25(11): 1222-1228.
- LIU Y, DING J, LIU L Y, et al. Homogeneous nucleation and growth process of secondary aerosol under fog weather [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(11): 1222-1228.
- [12] 熊桂龙, 谢静雯, 杨林军. 粗糙度对水汽在细颗粒表面异质核化影响的数值模拟[J]. 化工学报, 2021, 72(8): 4304-4313.
- XIONG G L, XIE J W, YANG L J. Numerical simulation of the effect of roughness on the heterogeneous nucleation of water vapor on the surface of fine particles [J]. CIESC Journal, 2021, 72(8): 4304-4313.
- [13] 郭阳, 凡凤仙, 张超, 等. 氨法脱硫系统排放细颗粒物的异质核化特性[J]. 动力工程学报, 2022, 42(1): 49-55.
- GUO Y, FAN F X, ZHANG CH, et al. Heterogeneous nucleation characteristics of fine particles emitted from ammonia desulfurization system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(1): 49-55.
- [14] 于燕, 徐俊超, 张军, 等. 生长管中过饱和度在不同构建方式下的分布特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 733-738.
- YU Y, XU J CH, ZHANG J, et al. Distribution characteristics of supersaturation in growth tube under different construction methods [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(4): 733-738.
- [15] 张倩瑜, 于明州. 层流型凝聚核粒子生长器的设计与测试[J]. 中国粉体技术, 2020, 26(5): 7-13.
- ZHANG Q Y, YU M ZH. Design and test of laminar condensed nuclear particle growth device [J]. China Powder Science and Technology, 2020, 26(5): 7-13.
- [16] 郭皓天, 刘俊杰, 韩晓霞, 等. 凝结核粒子计数器的流

- 场数值模拟及流量配比优化[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 225-234.
- GUO H T, LIU J J, HAN X X, et al. Numerical simulation of flow field and optimization of flow ratio of condensation nucleus particle counter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 225-234.
- [17] 鲁月林, 郑衍畅, 汪爽, 等. 基于匹配滤波的激光尘埃粒子计数器信号处理方法研究[J]. 应用激光, 2023, 43(5): 82-87.
- LU Y L, ZHENG Y CH, WANG SH, et al. Research on signal processing method of laser dust particle counter based on matched filtering[J]. Applied Laser, 2023, 43(5): 82-87.
- [18] 孙佳佳. 大流量尘埃粒子计数器理论与系统开发[D]. 银川: 北方民族大学, 2023.
- SUN J J. Theoretical research and system development of large flow dust particle counter[D]. Yinchuan: North Minzu University, 2023.
- [19] 李响, 李凌霄, 李晗光. 激光尘埃粒子计数器的稳定性分析[J]. 通信电源技术, 2018, 35(9): 123, 125.
- LI X, LI L X, LI H G. Stability analysis of laser dust particle counter[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(9): 123, 125.
- [20] 暴海霞, 汤文良, 厉龙, 等. 尘埃粒子计数器的检测和校准现状[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(6): 75-77.
- BAO H X, TANG W L, LI L, et al. Status of detection and calibration of dust particle counters[J]. Metrology & Measurement Technique, 2020, 47(6): 75-77.

作者简介

张白(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为现代精密测量技术与仪器。
E-mail: zhangbai6402@163.com