

适用于临近空间低温低压环境超细颗粒物探测的高灵敏差分迁移率谱仪研制

移率谱仪研制

刘友江¹, 刘少敏^{1,2}, 季建辉¹, 金梦超¹

(1.中国科学院合肥物质科学研究院智能机械研究所, 合肥 230031; 2.广西大学电气工程学院, 南宁 530004)

摘要: 超细颗粒物具有强物理化学效应、强漂浮和迁移性能, 广泛存在于地球大气对流层、平流层乃至电离层中。临近空间中超细颗粒物模态及浓度认知, 对大气组成、大气物质传输及化学转化、大气污染成核机理解析、大气光散射等科学问题研究, 以及国家对临近空间开发战略需求均具有重要的基础意义。针对现阶段临近空间超细颗粒物探测技术的缺失, 开展基于差分迁移率谱(DMA)的超细颗粒物在线探测关键技术研究。针对临近空间低温低压环境和较低的超细颗粒物浓度环境应用需求进行改造。开发出一套适用于临近空间低温低压环境且满足较低的超细颗粒物浓度检测需求的差分迁移率分析仪。经过低温低压及空间载荷试验验证, 本样机可以实现在临近空间环境下进行 500nm 以下超细颗粒物高灵敏探测, 满足临近空间颗粒物分布廓线原位检测需求。

关键词: 超细颗粒物; 临近空间; 差分迁移率谱仪; 低温低压环境

中图分类号: P415.1 文献标识码: B

Development of a highly sensitive differential mobility spectrometer

suitable for ultrafine particles detection in near space with

low-temperature and low-pressure environments

LIU Youjiang¹, LIU Shaomin^{1,2}, JI Jianhui¹, JIN Mengchao¹

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China ;2. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Ultrafine particles have strong physical and chemical effects, strong floating and migration properties, and are widely present in the troposphere, stratosphere and even the ionosphere of the earth's atmosphere. Understanding the mode and concentration of ultrafine particles in near space is important for research on atmospheric composition, atmospheric material

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 加粗, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 小三, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 上标, 字距调整: 1 磅

删除[作者]:

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 上标, 字距调整: 1 磅

删除[作者]:

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 上标, 字距调整: 1 磅

删除[作者]:

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 上标, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 五号, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 字距调整: 1 磅

删除[作者]:

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 五号, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 五号, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 四号, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 左侧: 0 毫米

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 字体: (中文)宋体, 字距调整: 1 磅

删除[作者]: 1

transport and chemical transformation, analysis of air pollution nucleation mechanisms, atmospheric light scattering and other scientific issues, as well as the country's strategic needs for near space development basic meaning. In view of the current lack of detection technology for ultrafine particles in near space, research on key technologies for online detection of ultrafine particles based on differential mobility spectroscopy (DMA) has been carried out. It is modified to meet the application requirements of low-temperature and low-pressure environments in adjacent space and low ultra-fine particle concentration environments. A set of differential mobility analyzer is developed that is suitable for low-temperature and low-pressure environments in near space and meets the requirements for low ultrafine particle concentration detection. After verification by low-temperature, low-pressure and space load tests, this prototype can achieve highly sensitive detection of ultrafine particles below 500nm in the near-space environment, meeting the needs for in-situ detection of particle distribution profiles in near-space.

Keywords: Ultrafine particles, Near space, Differential mobility spectrometer, Low temperature and low pressure environment

1 研究背景及应用价值

1.1 研究背景

临近空间通常是指距离地球表面20~100 km的空域,是关系到我国国际竞争力的战略必争领域之一,是建设我国空天海洋能力新拓展体系的重要组成部分。对临近空间的利用开发依赖于其大气物理化学环境的精准认知^[1]。超细颗粒物广泛存在于大气各层,对大气演变、灰霾成核、传输及大气光散射等均具有直接作用。临近空间超细颗粒物监测是现阶段国家大气污染防治的重要科学依据。研究超细颗粒物水平扩散和垂直输送规律是解决大气污染成因机理和灰霾形成迁移规律过程中最为基础和重要的一环。传统的大气污染监测手段缺乏对空气污染垂直分布特征的观测,地面观测数据难以满足超细颗粒物大气污染的预报预警需求和区域污染防控对策制定以及污染减排工作的要求。利用临近空间浮空器有望实现对近地层超细颗粒物进行立体化、宽时空范围监测,为气溶胶成核机理、沉降过程分析提供重要的技术支持^[2]。同时,通过临近空间超细颗粒物模态及浓度认知,研究临近空间大气物理化学环境及其变化规律,提升我国临近空间资源利用水平,对临近空间开发战略需求具有重要的基础意义^[3]。

针对临近空间大气物理化学环境研究和开发战略的重大需求,世界各个国家相继开展了一系列临近空间颗粒物探测的相关工作^[4]。2008年意大利空间局开发的离线采样检测系统

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 非加粗, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

删除[作者]: 2

DUSTER 采用碰撞切割头采样,用于平流层上层的尘埃追踪和探测实验^[5]。2014-2017年,NASA-ISRO 资助了一系列(68次)在印度和沙特阿拉伯开展的气球搭载研究,采用光散射、激光计数、饱和室/光计数等颗粒物检测技术,用于研究亚洲夏季风期间对流层上层和平流层下层气溶胶的性质,以及形成和运输。法国 LPCE 实验室针对低气压、低浓度改进的光散射检测方法,平流层和对流层气溶胶计数器(STAC),检测范围从对流层至平流层中部 30km。

差分迁移率谱(Differential Mobility Analyzer, DMA),通过电场下的迁移率不同实现带电颗粒物的粒径测量,具有速度快、灵敏度高等优点,是现阶段超细颗粒物检测的主流技术^[6]。早在 1974 年,Whitby 设计的气溶胶分析仪在美国发展成为商业化的设备^[7]。从此以后,DMA 作为一种有潜力的迁移谱技术,越来越多的研究者对其进行研究,特别是近二十年来,各式各样的新型结构被研制出来用来提高的检测范围和检测性能^[8]。美国明尼苏达大学 D.R.Chen 在 1997 年设计出圆柱形 Nano-DMA,将检测物质粒径拓宽至纳米数量级(3-50nm)^[9]。日本纳米材料处理实验室 Takeuchi 在 2005 年设计出双 DMA,并使用其检测汽车排放到空气的纳米粒子(10-100nm)^[10]。为推动差分迁移率谱小型化发展,2001 年,Alonso 和 Endo 设计出了一款平板型差分迁移率谱,具有较小的分级区长度和较大的鞘气流流速,且与质谱仪集成后,可以用来分级离子和大的分子,这也充分证明了平板差分迁移率谱出色的分级能力。但由于鞘气流流速较大,所需泵的体积也较大,增加了整体体积,不适用于便携式检测目的。美国 D.R.Chen 等 2016 年设计出一版小型平板 mini-DMA,其大小与手机尺寸相似,并标定分析了差分迁移率谱的性能,为后续开展差分迁移率谱的研究工作提供了思路。商业化的差分迁移率谱的粒径谱一般以圆柱型或平板型 DMA 为核心,结合气溶胶中和器、凝结粒子计数器(CPC)或气溶胶静电计(FCE)进行检测^[11,12]。应用最为广泛的产品如美国 TSI 公司 3938、3910 型扫描电迁移率粒径谱仪(SMPS)。TSI 3938 SMPS 常用于实验室颗粒物高精度分析,具有分辨率高、检测灵敏度高以及范围广等优势,但是其体积庞大,无法实现便携式搭载以及进行移动检测。TSI 3910 重约为 9KG,它的使用更简单,重量也更轻,使用电池供电,检测时间约为 1 分钟。此外,美国的 Ioner 公司也一直在进行差分迁移率谱产品的改进和研发。但是由于商业仪器其环境适应能力无法满足临近空间低温、低气压的气候特点,使国外使用差分迁移率谱对临近空间超细颗粒物检测相关研究较少^[13]。

面向临近空间环境超细颗粒物原位探测重大需求,针对差分迁移率谱无法直接适用于临近空间低温低压环境和满足较低的超细颗粒物浓度检测需求难题,本项目开展了差分迁移率谱仪器的系统性改造和优化,设计了用于临近空间中超细颗粒物原位探测的差分迁移率谱,并在通过低温低压环境模拟测试的基础上,通过了探测气球搭载差分迁移率分析仪在临近空间环境中的超细颗粒物原位探测应用。

本项目通过解决差分迁移率谱低温低压环境适应性问题 and 低浓度高灵敏探测技术问题,实现原位探测方法获取临近空间超细颗粒物分布检测方法,为临近空间超细颗粒物模态、粒径、浓度、迁移扩散、成核增长和转化等方面的直接观测数据,无论是对临近空间大气物理

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

删除[作者]: 得

删除[作者]: 的

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 上标

设置格式[作者]: 上标

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

化学环境及其变化规律基础研究,还是对高速物体的流体特征响应和燃烧影响等临近空间开发战略需求,都具有重要的基础意义。

1.2 技术难点

差分迁移率谱是实现临近空间超细颗粒物原位探测最为合适的检测方法,现有差分迁移率谱已经能够满足固定污染源和移动源颗粒物排放监测需求,但针对临近空间低温低压环境和较低的超细颗粒物浓度环境应用需求,存在以下问题或缺陷需要进行改造。

1) 现阶段的差分迁移率谱仪器主要面向常温常压环境,而临近空间的气温和气压范围与地面环境均存在较大差异,以海拔高度 20km 为例,温度低至 -55°C ,气压仅 5kPa。因此现有差分迁移率谱无法直接满足临近空间超细颗粒物原位探测需求。

2) 现阶段差分迁移率谱仪器应用主要面向浓度较高的排放监测,对检测灵敏度要求不高,检测限通常为 105 个/cm³。通过调研发现,临近空间超细颗粒物浓度通常在 102 个/cm³~104 个/cm³ 量级,因此,为了满足临近空间超细颗粒物探测,需要大幅提高检测下限。

2 仪器功能开发

2.1 高丰度电晕放电荷电技术

空气中的超细颗粒物进入 DMA 进行识别筛选之前,首先要在荷电模块的作用下成为带电颗粒,荷电模块对颗粒物的稳定荷电是整个系统正常运行的前提条件。本项目借助印刷电路板系统集成技术,设计了一种小型化的单极性电晕放电颗粒物荷电模块,研究了不同结构、不同极性电晕放电在低气压条件下的稳定性及超细颗粒物的荷电性能,提高了电晕放电源在低气压条件下稳定性并大大减小了荷电模块的体积。

1) 小型化电晕放电颗粒物荷电系统设计

针对临近空间低气压环境超细颗粒物的稳定荷电,设计了一种基于单极性扩散荷电技术的丝-板电晕放电装置作为颗粒物荷电电源,并通过电流控制电路实现对放电电流的实时监控以及控制,荷电颗粒物载气的流速控制在 0.3~3L/min。

荷电模块的整体结构图如图 1 所示,为了避免放电针长期使用出现钝化而导致放电不稳定的情况,本项目采用了钨丝作为放电电极,并将接地板电极打孔使得电晕放电区与颗粒物荷电区分离,以减少颗粒物对放电钨丝的污染。颗粒物载气由进气口进入,随后到达荷电区进行充分的扩散荷电,带电颗粒物由出气口直接进入 DMA,从而降低了带电颗粒物在流道中的损失。荷电模块整体制作通过 PCB 技术实现,放电钨丝通过焊接在 PCB 焊盘上实现电气连接,丝-板电晕放电间距通过改变 PCB 厚度或层数实现,因此荷电模块具有较好的动态调整能力,可以针对性的测试不同直径钨丝及不同放电间距下的放电效果,以实现稳定放电及颗粒物荷电。为了更好的与 DMA 分析器进行集成,颗粒物荷电模块采用平板型结构,整

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 加粗, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 4

体尺寸为 100mm*80mm*45mm，多层叠加的 PCB 通过螺栓螺母实现紧密配合，为了保证颗粒物荷电模块内部良好的气密性，对荷电模块整体外围进行厌氧胶粘合剂处理，实现粘接及密封。

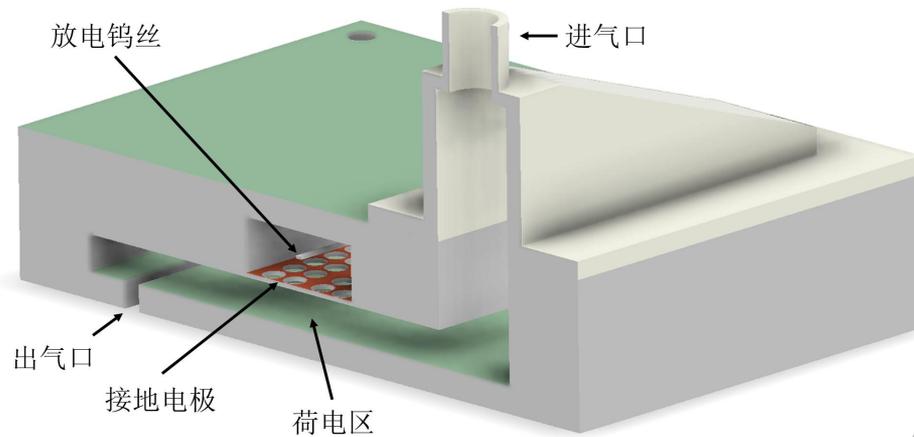


图 1 荷电模块剖面结构图

2.2 高稳定、抗干扰 DMA 结构设计

为了得到更加真实的颗粒物粒子运动情况，本项目借助 COMSOL 多物理场仿真工具建立平板型 DMA 的三维结构模型，主要包括静电场、流场以及粒子轨迹追踪三个仿真模块，以研究 DMA 不同结构参数对其检测性能的影响，为 DMA 分级区的设计提供参考。

1) 流道宽度 W 对粒子传递函数的影响

将 DMA 分级区高度 H 设置为 3.2mm、长度 L 为 60mm，鞘气流量设置为 5L/min，出入口载气流速为 0.5L/min，保持其他仿真参数相同，以 50nm 颗粒物粒子作为检测对象，得到粒子归一化迁移率 Z/Z_p 的传递函数谱图。图 2 展示了不同流道宽度时粒子的传递函数，由图可知，平板型 DMA 的粒子传递函数曲线受流道宽度 W 的影响较大，当宽度 W 为 25 倍高度 H 时，传递函数峰高（即粒子传递效率）能达到 0.8 以上。但随着流道宽度的减小而逐渐下降，尤其当宽度 W 减小至 8H 以下时，粒子传递效率骤降，并且传递函数出现拖尾、峰宽展宽现象，分辨率开始下降。影响粒子传递函数出现这种现象的主要原因是流场的侧壁效应，由于平板型 DMA 气流通道 Y 轴方向两侧侧壁的存在，导致流道内的流场分布不均匀，如图 3 所示，使得靠近两侧壁的流体流速以及粒子的运动速度变慢，最终导致靠近侧壁的粒子会以更长的时间、更低的电压才能到达粒子出口检测缝隙。

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进: 0 字符, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

删除[作者]: 5

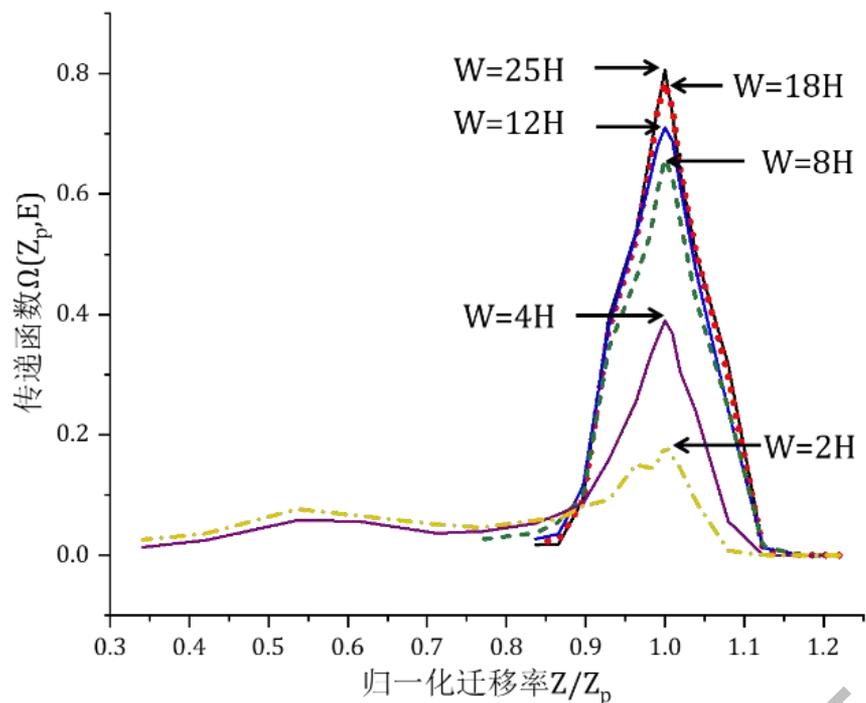


图2 粒子传递函数曲线

(a)

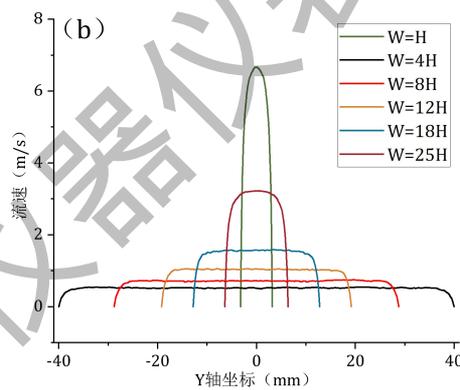
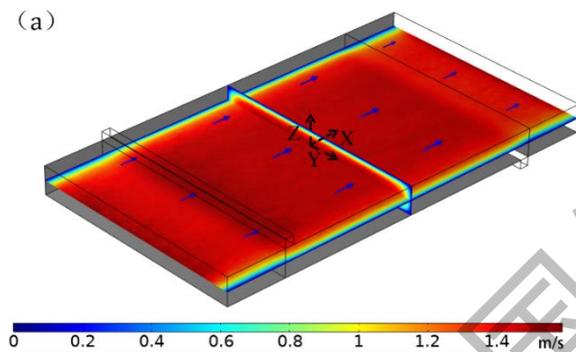


图3 (a) DMA 流场分布图, (b) Y 轴方向流场分布随宽度变化曲线图

图4展示了不同宽度条件对粒子分级电压的影响程度,并与理论分级电压进行了比较,给出了分级电压的补偿系数 η (即仿真分级电压/理论分级电压)。由图4可知,当流道宽度较大时粒子的理论分级电压与仿真实验分级电压基本一致,随着流道宽度的减小,由于其中中心流速与侧边流速的差异越来越大,此时则需要比理论计算值高得多的电压才能使粒子发生偏转。

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进:0 字符, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进:0 字符, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 6

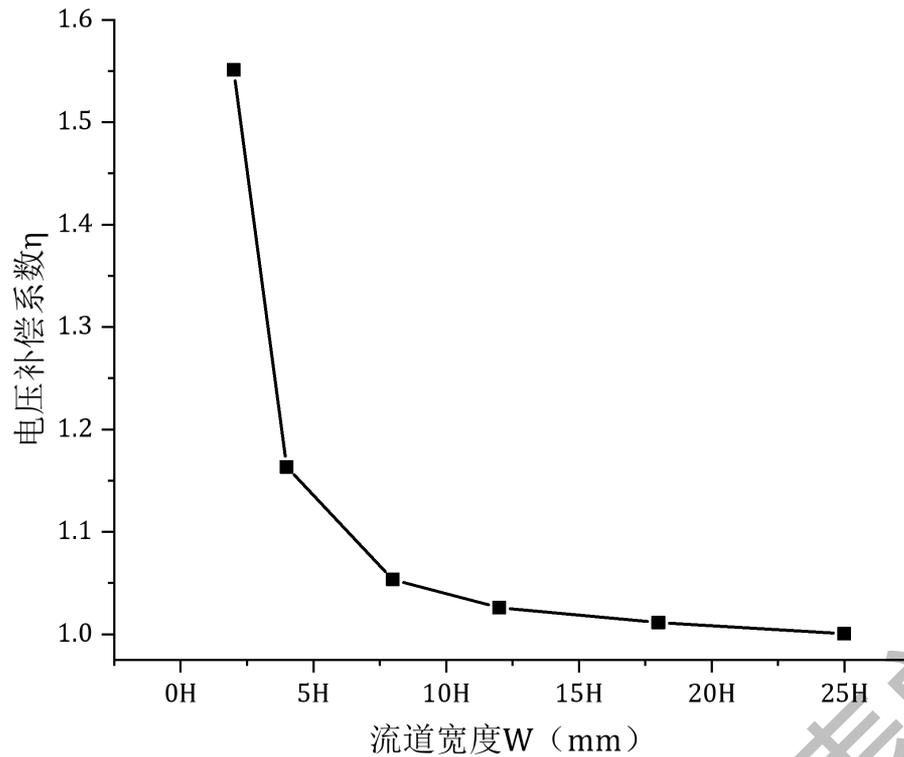


图4 分级电压随通道宽度变化曲线图

2) 载气出入口狭缝宽度 w_s 对粒子传递函数的影响

根据理论研究的结果，将 DMA 通道宽度 W 设置为 80mm (25H)，其他参数保持不变，研究载气出入口狭缝宽度 w_s (默认参数一致) 对粒子传递函数的影响，图 5 展示了狭缝宽度 w_s 与通道宽度 W 相同时的粒子轨迹分布。

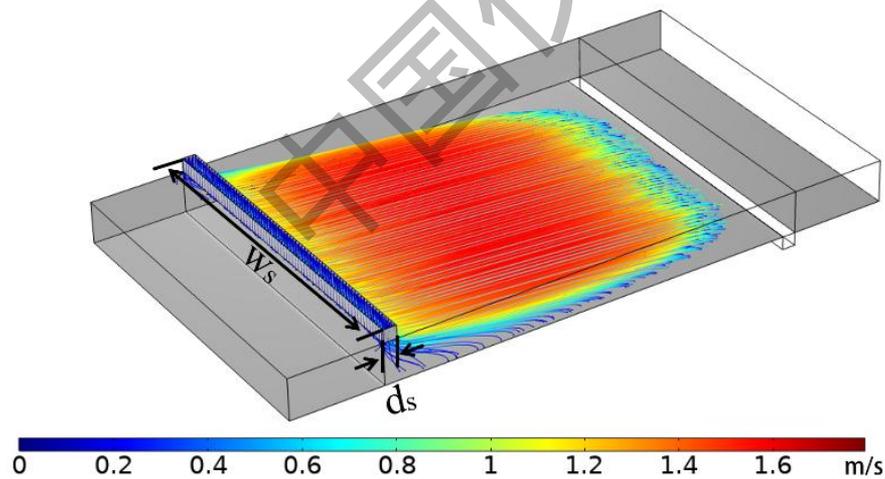


图5 狭缝宽度 $w_s=W$ 时粒子轨迹分布图

将狭缝宽度 w_s 分别缩短至 0.9W、0.75W、0.6W，得到了不同狭缝宽度时粒子传递函数的变化曲线，如图 6 所示。从图中可知，传递函数峰会随着狭缝宽度的减小而逐渐升高，当 w_s 缩短至 0.75 倍的通道宽度时，粒子的传递效率达到了 0.9，进一步将 w_s 缩短至 0.6W

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 7

时，粒子传递效率的提升已十分微弱；当气流流道宽度为 80mm 已足够宽时，传递函数峰宽基本不受狭缝宽度 w_s 的影响。

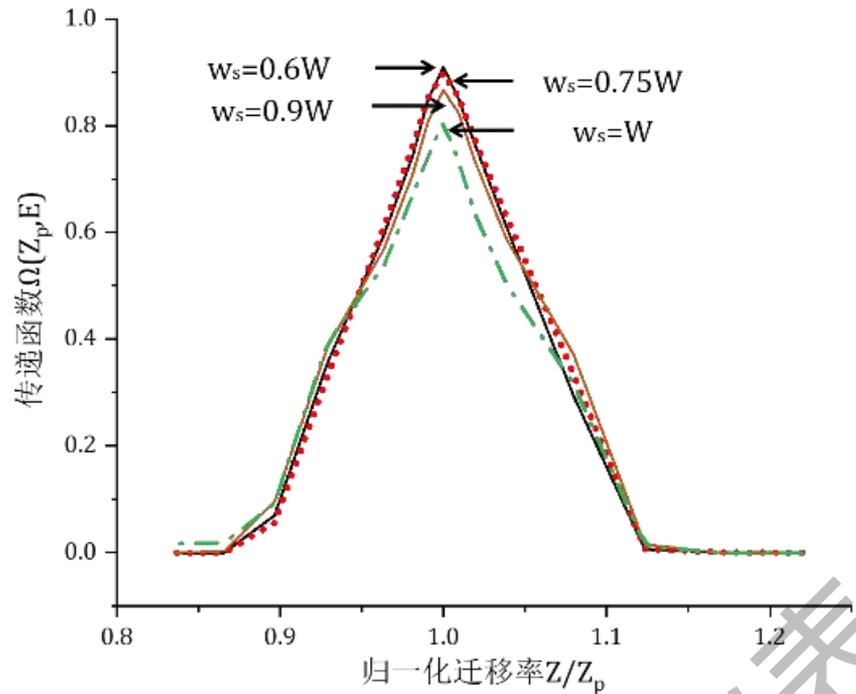


图 6 不同狭缝宽度 w_s 时粒子传递函数曲线图

3) 载气出入口狭缝缝隙大小 d_s 对粒子传递函数的影响

根据前面两个仿真研究的结果，将 DMA 流道宽度 W 设置为 80mm 且载气出入口狭缝宽度 w_s 对设置为 60mm ($0.75W$)，其他参数保持不变，研究载气出入口狭缝缝隙大小 d_s (默认参数一致) 对粒子传递函数的影响。将狭缝缝隙大小 d_s 分别设置为 1mm、1.5mm、2mm、3mm，得到了不同缝隙大小时粒子传递函数的变化曲线，如图 7 所示。从图中可知，狭缝缝隙大小 d_s 对粒子传递函数的影响较小，粒子传递效率均可以保持在 0.9 左右，传递函数的峰宽基本没有变化。

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进: 0 字符, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 五号, 字距调整: 1 磅

删除[作者]: 8

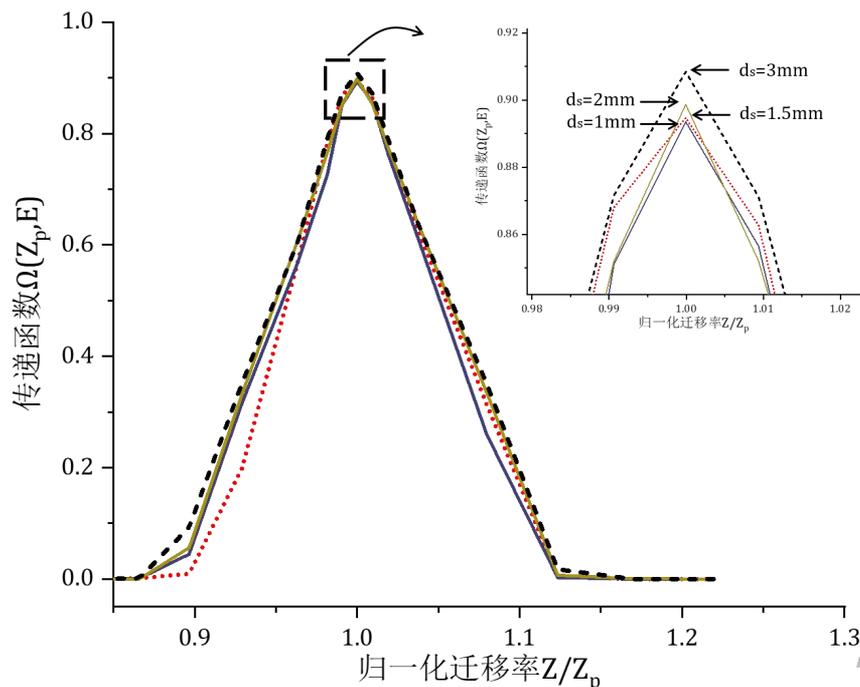


图7 不同狭缝间隙大小 d_s 时粒子传递函数曲线图

2.3 低温低压环境温控与环境补偿方法

针对低温环境,做好保温措施,同时防止因为低压环境散热不良而造成局部过热的情况。利用温度传感器对系统多个位置进行实时测量,对于温度过低或过高的位置及时经行加热或散热,以保证整机温度保持在一个良好的水平。与此同时,由于温度控制具有较大的惯性环节,所以对于小范围的温度调节不及时,做到精准测量记录,后续利用实验数据,拟合出差分迁移率谱检测数据与温度之间的关系,以此来小范围的补偿,以降低系统受温度的影响。

1) 保温/加热-散热: 由于系统工作在低温环境下,所以整体以保温为主。系统整体外壳大部分包裹气凝胶,以保证大部分温度不流失;小部分贴附帕尔贴和加热电阻,已达到散热与加热的效果。与此同时对于系统内部主要发热部分(电源、气泵等)做散热处理,不仅保证易发热部分的散热效率,同时散发出来的热量可对系统整体加热,以减少系统能耗。

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进: 0 字符, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

删除[作者]: 9

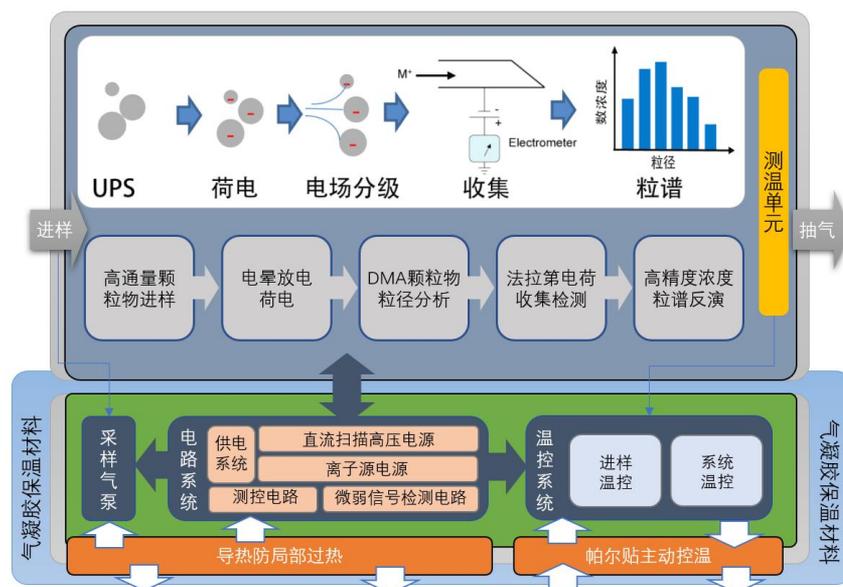


图8 系统保温/加热-散热结构示意图

2) 精确控制: 被动的加热和散热条件都具备的前提下, 可利用数字电路对系统温度做进一步控制。NTC 温度传感器采集到的实时温度数据将作为反馈量做 PID 控制, 当前温度高于或低于期望温度时, 利用帕尔贴向外界散热或利用加热电阻给系统加热。

3) 补偿修正: 由于温度控制具有较大惯性环节, 所以, 若外界温度变化过于快速, 实时调节未必跟得上, 那么除了尽可能的硬件调节保持恒温, 也要通过实验找到温度与测量结果之间的关系, 再通过大量数据拟合出算法公式, 再嵌入到系统中, 做软件上的补偿, 以最大可能的减少系统温漂。

3 仪器测试

3.1 临近空间模拟测试环境搭建

在各模块集成调试完成后, 对差分迁移率谱仪系统样机开展高空低温、低压环境适应性测试, 借助中科院安徽光机所光学遥感中心高空环境模拟舱, 进行了 24h 的不间断测试, 如图 9 所示。

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进: 0 字符, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

删除[作者]: 10



图9 高空环境模拟舱

3.2 临近空间典型环境模拟测试

样机内部气压传感器与温度传感器分别记录了 24 小时实验舱中的气压及温度变化，分别如图 10、图 11 所示：

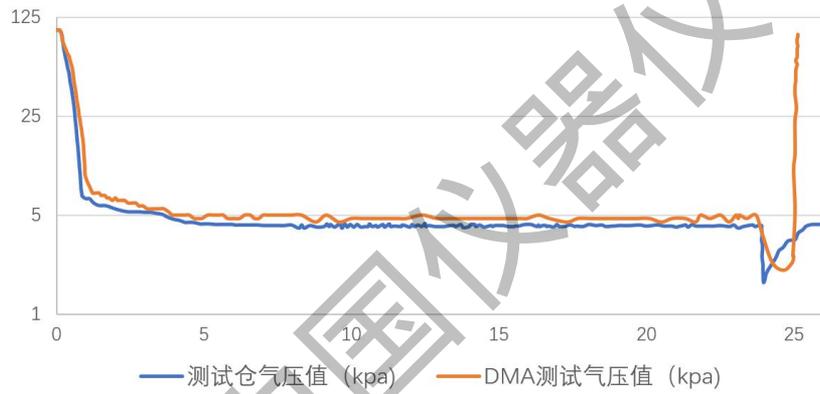


图10 模拟舱气压数据

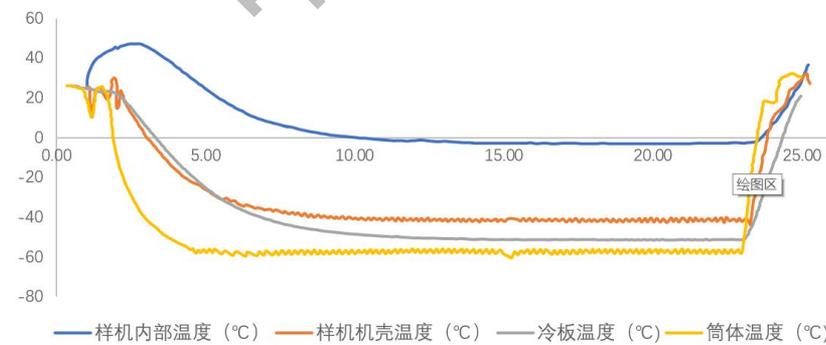


图11 模拟舱温度数据

由图可知，差分迁移率谱仪系统样机在实验舱内温度-57.3°C左右、气压为 4.6kPa 的环境下，依靠自身良好的保温措施以及 PID 温控模块，连续正常工作 24 个小时，其中样

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进:0 字符, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 小四, 加粗, 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进:0 字符, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 缩进: 首行缩进:0 字符, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字距调整:1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

删除[作者]: 11

机外壳最低温度达-45℃，样机内部温度最高至 45℃、最低至-3.4℃。

4 小结与展望

针对临近空间低温低压环境和较低的超细颗粒物浓度环境应用需求，研制出满足临近空间等复杂环境应用的高灵敏差分迁移率分析仪，超细颗粒物浓度检测下限优于 102 个/cm³，最低工作温度-55℃，最低工作环境气压 5kPa，初步满足临近空间环境探测应用的需求。

本研究的成果主要可用于临近空间超细颗粒物探测、行星大气尘埃探测、气溶胶科学探测等领域。同时，由于本研究成果具有高灵敏检测特性，可以为火灾早期预警和高洁净度车间超细颗粒物探测提供了全新的检测技术支持。

参考文献

- [1] Kwon H S, Ryu M H, Carlsten C ,et al Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease[J]. Exp Mol Med 2020, 52 (3), 318-328.
- [2] Zhang Q D, Zhang T T, Wei Y B,et al .Highly sensitive and reliable optical fiber TDLAS gas detection system for methane in situ monitoring in near space[J]. Applied optics 2023 , 62(17) 4409-4414.
- [3] Hong G ,Jee Y K .Special issue on ultrafine particles: where are they from and how do they affect us[J]? Exp Mol Med 2020, 52 (3), 309-310.
- [4] 邓潘. 地基激光雷达对临近空间大气的探测研究[D]. 中国科学技术大学, 2018.
- [5] Al-Hagan O , Kaiser C , Madison D ,et al .Atomic and molecular signatures for charged-particle ionization[J]. Nature Physics 2008, 5 (1), 59-63.
- [6] Davies N C. Definitive equations for the fluid resistance of spheres[J]. Proc. Phys. Soc 2002, 57 (4), 259-270.
- [7] Liu, B Y H, Pui,et al .A submicron aerosol standard and the primary, absolute calibration of the condensation nuclei counter[J]. Journal of Colloid & Interface Science 1974, 47 (1), 155 - 171.
- [8] 李珂, 袁凡, 刘友江,等 微型化圆筒型与平板型 DMA 仿真对比研究[J]. 传感器与微系统 2022, 41 (06), 14-17.
- [9] Knutson, E O . Aerosol Classification by Electric Mobility[J]. Journal of Aerosol Science 1975, 6(6) . 443-451.
- [10] Takeuchi K, Yabumoto J, Okada Y ,et al. A new dual-type DMA for measuring nanoparticles

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

删除[作者]: 、

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体

设置格式[作者]: 行距: 1.5 倍行距

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 行距: 1.5 倍行距, 无孤行控制

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 加粗, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: 五号

设置格式[作者]: 正文, 两端对齐, 缩进: 左侧: 0

设置格式[作者]: 字体: (默认) Times New Roman

设置格式[作者]: 字体: 五号

设置格式[作者]: 字体: (默认) Times New Roman

设置格式[作者]: 字体: 五号

设置格式[作者]: 字体: (默认) Times New Roman

删除[作者]: 12

emitted from combustion engines[J]. Journal of Nanoparticle Research 2005, 7 (2), 287-293.

[11] Kulmala M , Petäjä T, Nieminen T ,et al. Measurement of the nucleation of atmospheric aerosol particles[J]. Nature Protocols 2012, 7 (9), 1651-67.

[12] Liu Q, Chen D R, Performance evaluation of a miniature plate Electrostatic Aerosol Analyzer (mini-plate EAA) [J]. Journal of Aerosol Science 2016, 95, 30-42.

[13] Gerwig H, Janicke U, Schmidt W ,et al. Ultrafine particle dispersion modelling at Frankfurt airport[J]. 2020. 318 - 328.

设置格式[作者]: 字体: (默认) Times New Roman, (中文) 宋体, 五号, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (默认) Times New Roman, (中文) 宋体, 五号, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 字体: (默认) Times New Roman, (中文) 宋体, 五号, 字距调整: 1 磅

删除[作者]: 1. Kwon H S, Ryu M H, Carlsten C ,et al
Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease[J]. Exp Mol Med 2020, 52 (3), 318-328.
2. Zhang Q D, Zhang T T, Wei Y B,et al .Highly sensitive and reliable optical fiber TDLAS gas detection system fi

设置格式[作者]: 字体: (中文) 宋体, 字距调整: 1 磅

设置格式[作者]: 两端对齐, 缩进: 左侧: 0 毫米, 悬挂缩进: 7.5 毫米, 行距: 1.5 倍行距, 调整中文与数字的间距, 调整中文与西文文字的间距, 无孤行控制, 定义网格后自动调整右缩进

删除[作者]: 13

中国仪器仪表表学