

分类号: TG376. 4

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120171



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 大粒径尘埃粒子计数传感
器的设计与实验研究

论 文 作 者 吴过

校 内 导 师 郑衍畅（副教授）

校 外 导 师 万桂波

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 传感检测技术

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号: TG376.4

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2210120171

大粒径尘埃粒子计数传感器的设计与实验研究

The Design and Experimental Study of Large Diameter Dust Particle Counting Sensor

学 生 姓 名 : 吴过
校 内 导 师 : 郑衍畅 (副教授)
校 内 导 师 : 万桂波
专 业 学 位 类 别 : 机械
研 究 方 向 (领 域): 传感检测技术

论文答辩日期: 2024 年 05 月 27 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：吴过

日期：2024年5月31日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☒。

学位论文作者签名：吴进 指导教师签名：靳国彬

日期：2024 年 5 月 31 日

日期：2024 年 5 月 31 日

大粒径尘埃粒子计数传感器的设计与实验研究

摘 要

随着科技进步的加速，对洁净室的空气洁净度也提出了新的要求，尤其是在高精度制造和尖端科技领域，如半导体制造、精密机械加工、食品和制药等行业，环境的清洁度已经成为生产中的核心要素。空气中尘埃粒子对产品的质量和安全性有着显著影响，因此检测和控制洁净室中的尘埃粒子至关重要。在洁净室中，人员流动、机械操作、工具使用和工艺流程可能产生各种尺寸的粒子，包括 $5\mu\text{m}$ 以上的大粒径粒子，这些粒子通过空气在洁净室内扩散，从而影响产品质量和制造过程。然而，传统粒子计数传感器在检测大于 $5\mu\text{m}$ 的粒子方面存在局限，因此，开发能够检测大粒径尘埃粒子的传感器具有非常迫切的现实需求。

针对上述情况，本文研制了一款大粒径尘埃粒子计数传感器。首先，文章详细讨论了尘埃粒子计数传感器的设计基础，包括工作原理、粒子的 Mie 散射理论以及粒子的散射光通量计算方法。特别是通过 MATLAB 软件对 Mie 散射理论进行编程计算，深入分析了粒子大小、波长等因素对散射光强的影响。

其次，本文详细阐述了尘埃粒子计数传感器的设计流程，涵盖了照明系统、散射光收集系统、气路系统以及信号处理系统的详细设计过程。在照明系统中，采用非球面镜对激光进行整形，以优化

光束的均匀性和照明效果。此外，为了更精确地模拟采样气路系统的流动特性，运用 ANSYS FLUENT 软件进行了仿真分析。

最后，本文成功制作出一款大粒径尘埃粒子计数传感器样机，并对其进行了实验测试与分析。通过标定实验确定了传感器的粒径阈值电压。进一步地，与商用粒径谱仪 Promo2000 进行了对比测试，结果显示，两者在 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 五个粒径档的测量偏差均在 7.83%以内。通过浓度测试，得出传感器的最大检测浓度约为 23500 颗/L。

关键词：洁净室，粒子计数传感器，Mie 散射理论，光束整形，实验标定

The Design and Experimental Study of Large Diameter Dust Particle Counting Sensor

ABSTRACT

With the acceleration of technological advancement, new requirements for air cleanliness in cleanrooms have emerged, especially in fields involving high-precision manufacturing and cutting-edge technologies such as semiconductor production, precision machinery processing, food production, and pharmaceuticals. The cleanliness of the environment has become a core element in production. Airborne dust particles significantly impact the quality and safety of products, making the detection and control of dust particles in cleanrooms crucial. In cleanrooms, personnel movement, machinery operations, tool use, and process flows can generate particles of various sizes, including particles larger than 5 microns. These particles disperse through the air within the cleanroom, affecting product quality and the manufacturing process. However, traditional particle counting sensors have limitations in detecting particles larger than 5 microns. Thus, the development of sensors capable of detecting large dust particles is of urgent practical necessity.

In response to the above situation, this paper has developed a large particle size dust particle counting sensor. Initially, the article discusses in detail the design foundations of the dust particle counting sensor, including its working principle, the Mie scattering theory for suspended particles, and methods for calculating the scattered light flux of particles. Notably, MATLAB software was used to program calculations based on Mie scattering theory, thoroughly analyzing the impact of particle size, wavelength, and other factors on the intensity of scattered light.

Subsequently, the paper elaborates on the detailed design process of the dust particle counting sensor, encompassing the illumination system, scattered light collection system, airway system, and signal processing system. In the illumination system, aspherical mirrors are used to shape the laser light to optimize the uniformity and effectiveness of illumination. Moreover, to more accurately simulate the flow characteristics of the sampling airway system, ANSYS FLUENT software was employed for simulation analysis.

Finally, this paper successfully developed a prototype of a large-particle-size dust particle counting sensor, and conducted experimental tests and analysis on it. Through calibration experiments, the particle size threshold voltage of the sensor was determined. Furthermore, comparative tests with the commercial particle size spectrometer Promo2000 were conducted. The results showed that the measurement deviations for both devices at

particle sizes of 5 μm , 10 μm , 25 μm , 50 μm , and 100 μm were all within 7.83%. Through concentration testing, it was found that the maximum detection concentration of the sensor is approximately 23,500 particles/L.

KEY WORDS : cleanroom, particle counting sensor, Mie scattering theory, beam shaping, experimental calibration

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	VI
第 1 章 绪 论	1
1.1 粒子与洁净室	1
1.1.1 粒子对工业生产的影响	1
1.1.2 洁净室技术与发展	2
1.2 尘埃粒子计数器的发展	3
1.2.1 颗粒的检测方法	3
1.2.2 国内外研究现状	6
1.3 大粒径尘埃粒子计数传感器的研究意义	9
1.4 本文的主要工作	9
第 2 章 大粒径尘埃粒子计数传感器的设计基础	12
2.1 大粒径尘埃粒子计数传感器的工作原理	12
2.2 粒子的光散射理论	13
2.3 粒子的散射光通量计算	16
2.4 散射光功率的数值模拟与计算	20
2.4.1 散射强度函数与粒子直径的关系	20
2.4.2 散射光强分布与粒子直径的关系	21
2.5 本章小结	23
第 3 章 大粒径尘埃粒子计数传感器的设计	24
3.1 照明系统的设计	24
3.1.1 光敏区域的设计	24
3.1.2 光源的选择	26
3.1.3 光束整形的原理及方案	27
3.1.4 光束整形的优化仿真	31
3.2 散射光收集系统的设计	36
3.3 气路系统的设计	39
3.4 信号处理系统的设计	41
3.4.1 光噪声的降低	41

3.4.2 信号处理电路的设计	42
3.5 本章小结	44
第 4 章 大粒径尘埃粒子计数传感器的实验与分析	46
4.1 传感器的测试系统搭建	46
4.2 传感器的标定实验	50
4.3 传感器的性能测试	52
4.3.1 计数效率测试	53
4.3.2 最大检测浓度测试	54
4.4 本章小结	55
第 5 章 总结与展望	56
5.1 总结	56
5.2 展望	57
参考文献	58
攻读学位期间发表的学术论文与成果目录	64
致谢	65

第1章 绪论

1.1 粒子与洁净室

1.1.1 粒子对工业生产的影响

随着科技的高速发展，对洁净室的空气洁净度也提出了新的要求，尤其是在高精度制造和尖端科技领域，如半导体制造、精密机械加工、食品和制药等行业，环境的清洁度已经成为生产中的核心要素^[1]。在洁净室中，人员流动、机械操作、工具使用和工艺流程可能产生各种尺寸的粒子，这些粒子通过空气在洁净室内扩散，从而影响产品的质量和安全性。

在半导体和微电子制造领域，由于半导体和微电子器件的制造过程极为精细，即使极小的粒子也可能导致产品缺陷。例如，在芯片制造过程中，尘埃粒子的沉积可能导致电路图案的损坏或失准，从而造成电路短路或开路。这些缺陷会大幅降低芯片的性能和可靠性，严重影响产品的合格率。据统计，约 70% 至 80% 的不合格芯片是由于微尘引起的电路问题^[2]。因此，提升洁净环境实验室的等级，使用粒子计数传感器等仪器来监测悬浮颗粒的尺寸和数量，对于提高芯片良品率至关重要。

在制药行业中，空气中的粒子对生产过程、产品质量及最终用户的安全都有着重要影响。制药过程中，空气粒子可能导致原料、中间体或成品药物的直接污染。这些粒子可能携带微生物，如细菌和真菌，或者是化学污染物，这些都可能影响药品的纯度和安全性^[3,4]。污染的药品不仅可能失去疗效，还可能对患者造成健康风险；在多产品生产设施中，空气粒子可能导致药品间的交叉污染。例如，生产不同药物的设备和区域如果没有适当的隔离，颗粒物可以携带一个产品的成分到另一个产品中，从而影响药品的纯度和效果；空气粒子还可能影响药品的稳定性和储存寿命。

在食品加工领域中，加工环境中的空气粒子可能含有各种微生物、化学物质或其他污染物，这些粒子可以直接污染食品，影响食品的安全性和质量；不同类型食品的生产线也可能会相互影响。空气中的粒子可以从一个加工区传播到另一个加工区，导致交叉污染^[5]。

在精密机械加工领域中，精密机械加工依赖于高度精确的设备和工艺来生产零件。空气中的粒子，如尘埃和金属颗粒，可以在加工过程中沉积在工件或机械设备的关键部件上，导致加工精度降低。这种沉积可能导致表面瑕疵、尺寸不准确或形状畸变；粒子也可能导致切削工具的过度磨损，这会影响加工效率和工具寿命。

总之，随着科技的发展，对空气洁净度的要求日益提高。不论是在高科技领域如半导体制造、精密机械加工，还是在轻工业如食品和制药行业，空气中的粒子都对产品质量和安全性有着显著影响，因此建立和维护洁净室、从而确保产品质量、降低生产风险对这些行业至关重要。

1.1.2 洁净室技术与发展

为了降低颗粒物及其携带的微生物对人类活动的影响，洁净室的应用在多个领域正变得日益普遍^[6]。洁净室是一种特殊设计的环境，旨在减少空气中的粒子污染，提高产品的质量和安全性，其应用范围涵盖了科学研究、医疗保健和高端制造等多个重要领域。根据其使用目的的不同，洁净室主要分为工业洁净室和生物洁净室^[7]。工业洁净室主要聚焦于控制无生命颗粒的污染，以保护生产环境免受空气中无生命颗粒的影响。生物洁净室不仅涉及无生命颗粒的控制，还包括对生命颗粒的限制，以确保生产环境免受这两种类型颗粒的共同影响。

洁净室是一个控制环境，涉及多个方面，包括空气过滤、温湿度控制和空间布局。高效空气过滤器（HEPA 或 ULPA）用于捕捉和过滤粒子。温度和湿度的控制对于确保洁净室内的工作环境稳定同样重要^[8]。洁净室的运行需要遵循特定的标准，如 ISO14644。这些标准定义了不同级别的洁净室应满足的要求。洁净室的状态需要定期监测，以确保其符合规定的标准。依据 ISO14644 标准，洁净室根据空气中特定粒径颗粒的浓度来分类，见表 1.1。

随着技术的不断发展和精密度要求的提高，洁净室在许多行业中的重要性日益增加。洁净室技术也在不断演进，新材料、智能监测系统、自动化技术等将进一步提高洁净室的效能和可靠性，以满足不断变化的行业需求。总体而言，洁净室是许多高科技行业中不可或缺的一部分，它在保障产品质量、提高制造效率方面发挥着关键作用。

表 1.1 ISO14644-1 洁净度等级标准

等级	各粒径颗粒允许最大浓度 (颗/m ³)					
	0.1μm	0.2μm	0.3μm	0.5μm	1.0μm	5.0μm
1	10	2				
2	100	24	10	4		
3	1000	237	102	35	8	
4	10000	2370	1020	352	83	
5	100000	23700	10200	3520	832	29
6	1000000	237000	102000	35200	8320	293
7				352000	83200	2930
8				3520000	832000	29300
9				35200000	8320000	293000

1.2 尘埃粒子计数器的的发展

1.2.1 颗粒的检测方法

实现洁净环境的有效控制首先依赖于对环境中的尘埃粒子的精准检测。得益于科学研究人员的持续努力，颗粒测量技术领域已经发展出多种先进的测试方法。这些方法按照其基本原理可以分为两大类：取样法和非取样法^[9]。

(1) 取样法

取样法通过物理方式将空气中的颗粒物收集到过滤纸、溶液等介质上。收集后，通过各种分析技术（如重量分析、光学显微镜、电子显微镜等）来确定颗粒物的浓度、粒径分布、化学成分等特性。取样法主要有多级撞击器粒度分级法^[10]、滤膜显微镜检测法^[11,12]、滤膜称重法^[13,14]、β射线吸收法^[15,16]、电荷感应法^[17,18]、压电晶体法^[19]等。

多级撞击器通常包含几个不同大小的喷嘴和收集板，这些喷嘴和收集板被安排成级联形式。空气样本通过设备时，较大的颗粒物因惯性作用而撞击到第一个级别的收集板上，而较小的颗粒物则通过较小的喷嘴进入到下一个级别。每个级别的喷嘴和收集板都被设计为捕获一定大小范围内的颗粒物。通过这种方式，颗粒物根据其大小被分离并收集在不同的级别上。

滤膜显微镜检测法是一种用于分析空气中颗粒物或液体中悬浮颗粒的技术。这种方法结合了过滤和显微镜技术，允许对颗粒物进行直观的观察和测量。通

过一个特定孔径的滤膜将空气或液体中的颗粒物过滤出来。滤膜的材质和孔径根据颗粒物的性质和所需的分析精度来选择。过滤后，滤膜上的颗粒物可以进行染色以提高可视性。最后，使用显微镜观察和分析滤膜上的颗粒物。

滤膜称重法则是通过收集空气样本中的颗粒物在滤膜上，然后称重来确定颗粒物的总质量。这种方法特别适用于环境监测和工业环境中的空气质量评估。使用一个特定的采样设备，如空气采样器，将空气中的颗粒物收集到滤膜上。采样时间和流量会根据需要进行调整。采样后，称量滤膜以获取含有颗粒物的总质量。通过比较采样前后的滤膜质量，计算出空气中颗粒物的总质量。进而可以计算出采样空间中的颗粒浓度。

β 射线吸收法利用 β 射线通过物质时的吸收或衰减特性来测量颗粒物的质量。使用 β 射线源（通常是放射性同位素，如碳-14）发射 β 射线。空气中的粒子通过一个特定的采样系统被收集在一个滤纸带或滤膜上。 β 射线穿过含有颗粒物的滤纸带，其强度会因穿过颗粒物而减弱（衰减）。通过测量射线穿过滤纸前后的强度，可以计算出颗粒物的质量。这种方法通常允许连续监测，滤纸带在采样过程中不断移动，允许新的空气样本被收集和测量。

电荷感应法是一种基于颗粒物对电荷的响应，通过测量电荷变化来推断颗粒物的特性的方法，当带电或可被电化的颗粒物经过一个特定的感应区域时，它们会对电场产生影响，导致电荷分布的变化。这种电荷的变化可以通过感应器件（如电极）检测，并转化为电信号。通过分析这些电信号，可以推断出颗粒物的浓度、大小甚至可能的化学性质。

压电晶体法是一种利用压电效应来检测和测量气体中颗粒物或化学物质的技术。这种方法基于压电晶体的质量变化对其振动频率的影响。使用一块压电晶体作为传感器，当其表面吸附气体或颗粒物时，会导致其质量变化。由于吸附的质量改变，压电晶体的振动频率会发生变化。这种频率变化是非常微小的，但可以准确测量。通过监测和分析频率的变化，可以推断出吸附在晶体表面的物质的质量。

取样法的优点是精确度高，能够提供颗粒物的详细信息，包括化学成分和形态；可以广泛应用，适用于各种环境和条件下的颗粒物测量。缺点是时间消耗大，样品的收集和分析过程耗时较长；无法实时监测，不能提供实时数据，

更适合历史数据分析。

（2）非取样法

非取样法在空气颗粒物测量中通常依赖于光学或电子技术进行直接检测。随着光电技术的不断进步，光学测量技术及其仪器已在颗粒物检测领域得到广泛应用。光学方法由于其非接触性质、简洁的结构设计、宽广的测量范围、良好的重复性以及出色的实时性，成为了颗粒物测量的优选技术。当前在非取样法中普遍使用的技术包括光透射法^[20,21]、激光干涉成像法^[22,23]、衍射激光粒度仪法^[24]、差分吸收光谱法^[25,26]及单颗粒光散射粒径测量法^[27]等。

光透射法基于颗粒物对光的吸收和散射特性，在环境监测和空气质量评估中广泛使用，使用一个稳定的光源，如激光或 LED，当光束穿过含有悬浮颗粒物的空气样本时，其强度会因为颗粒物的吸收和散射作用而发生降低，测量光强度变化，便可推断出颗粒物的浓度。

激光干涉成像法（Laser Interferometric Imaging）利用激光干涉的原理，通过分析由颗粒物引起的光波干涉图案来获取颗粒物的详细信息。使用激光照射样本。当激光遇到颗粒物时，会产生散射和干涉现象。散射光与未散射的直射光相互干涉，形成特定的干涉图案。通过分析这些干涉图案，可以推断出颗粒物的大小、形状、分布和浓度等信息。

衍射激光粒度仪法，也称为激光衍射法，是一种基于激光光束在经过颗粒物时发生的衍射现象，通过分析衍射图案来确定颗粒的尺寸的方法。当激光穿过颗粒物时，会发生衍射现象，即光波在遇到颗粒时会偏离原来的路径。衍射光形成的图案与颗粒物的大小直接相关。通过分析这些图案，可以得出颗粒物的大小分布。

差分吸收光谱法（Differential Absorption Spectroscopy, DAS）是一种用于测量气体成分浓度的技术，特别适用于大气污染监测和环境科学研究。这种方法基于不同气体分子对特定波长光的吸收特性，通过分析光谱数据来识别和量化气体成分。使用一定波长范围的光源，通常是紫外、可见光或近红外光。当光穿过含有目标气体的样本时，特定波长的光会被气体分子吸收。通过测量吸收前后的光强度变化，可以确定特定波长的光被吸收的程度，从而推算出气体浓度。

单颗粒光散射粒径测量方法（Single Particle Light Scattering）是一种用于精确测量单个颗粒物（如气溶胶、尘埃粒子等）的大小的技术。这种方法基于分析颗粒物对光波的散射特性来确定其尺寸，使用一个激光或其他光源照射颗粒物，当光束遇到颗粒物时，会发生散射。散射的角度和强度依赖于颗粒物的大小、形状和折射率。通过一系列探测器捕捉散射光，并分析散射光的特性。根据光散射理论，通过散射光的数据计算出颗粒物的大小。

非取样法优点是可以实时监测，能够提供实时数据，适合连续监测；相比于取样法，操作更简单，维护需求较低；可以快速响应，适用于环境监控和应急响应。在非取样法中，光散射法凭借其测量粒度范围广泛、高重复性、精准度以及非接触式测量等特点，在颗粒测量领域备受青睐。特别是在光学尘埃粒子计数器的应用中，这些计数器以其快速的测量速度、可靠的结果和能够直接评估空气洁净度级别的能力，成为测量洁净环境洁净度的重要工具。

1.2.2 国内外研究现状

尘埃粒子计数器的发展历程是一段不断创新与技术进步的历史，它从早期的基本概念到现代高精度仪器的演变反映了科技和工业需求的增长。早期的粒子计数方法主要依赖于显微镜和人眼观察。科学家通过直接观察样本来计数和分析颗粒物，这一过程非常缓慢且容易出错。

在 1869 年，Tyndall 首次记录了对空气中尘埃粒子在白光照射下产生的光散射现象的研究，标志着人们开始系统地探索尘埃粒子的光散射特性并将其应用于科学研究^[28]。随后，1908 年德国科学家 Gustav Mie 引入了著名的 Mie 散射理论^[29]。这一理论提供了一种严格的数学解释，用于描述均匀介质中的同质球形颗粒在单色平行光照射下的光散射行为，Mie 散射理论不仅深化了对光散射现象的理解，而且奠定了现代光学粒子计数器理论的基础^[30]。

1947 年，来自美国印第安纳大学的 F. T. Gucker 及其团队经过数年的研究和努力，成功开发了一种采用白光作为照明源的近前向散射型粒子计数器^[31]。这一创新成果标志着全球首台光学粒子计数器的诞生，为粒子测量技术的发展开启了新的篇章。20 世纪 60 年代，激光的发明对粒子计数器的发展产生了重大影响，激光粒子计数器能够更精确地测量颗粒物的大小和数量，粒子计数器技术也迎来了新一轮的发展^[32]。

在 20 世纪 80 年代，美国开发的粒子计数器已经实现了 28.3L/min 的采样流量。20 世纪末期，国际上的粒子计数技术在灵敏度方面取得了显著进展，能够检测到小至 0.1 μm 的颗粒，同时在计数效率和计数精度等关键指标上也实现了迅速提升^[33]。进入 21 世纪，同时测量多个不同角度散射光的方法^[34]以及双波长技术^[35]，解决了微粒复折射率导致的传感器测量误差问题。Njalsson T 等人利用 Mie 散射代码的数值蒙特卡罗模拟，使传感器几何结构得到了进一步优化^[36]。随着计算机技术的发展，尤其是到了 20 世纪末至今，粒子计数器开始集成先进的微处理器，这一重要创新大幅提高了数据处理的速度和精度^[37]。这些技术进步不仅提升了粒子计数器的性能，也使其在环境监测、科研、制造业等多个领域的应用变得更加广泛和有效^[38]。

如今，国际上已经建立了一个成熟的粒子计数器体系，拥有多家技术领先的制造商。其中，PMS 公司、METONE 公司、LIGHTHOUSE 公司和 TSI 公司等都在尘埃粒子计数器技术方面处于行业领先地位。为了展示这些全球知名公司的产品性能，表 1.2 综合列出了这几家公司生产的粒子计数器的关键性能参数。这些数据不仅提供了不同型号粒子计数器的详细信息，而且展示了当前市场上粒子计数技术的先进水平。

表 1.2 国外领先厂商生产的几种规格的粒子计数器

厂商	METONE	LIGHTHOUSE	PMS	TSI
型号	BT-620	Solair1100	Lasair-III-350	Aero Trak+ A100-50
灵敏度 (μm)	0.1	0.1	0.3	0.5
流量 (L/min)	28.3	28.3	50	100
浓度上限 (颗/ m^3)	20,000,000	34,300,000	29,400,000	25,000,000
标定标准	ISO21501	ISO21501	ISO21501	ISO21501

从表中可以明显看出，国际上领先的尘埃粒子计数器在检测粒径方面具有卓越性能，能够精确探测到最小 0.1 μm 的粒子。此外，这些设备的采样流量同样引人注目，达到了 50L/min 乃至 100L/min 的高标准，同时仍能维持 0.3 μm 的高灵敏度。它们还能应对较高的最大采样浓度，展示了广泛的适用范围和高效的测量能力。这些特点使得这些尘埃粒子计数器在各种要求严格的应用场景中都能发挥重要作用，体现了其在行业中的技术领先地位。

尽管中国在光散射法粒子计数器领域的起步较晚，大约落后于欧美近二十年，但近几十年来国内在此领域已取得了显著的进步。中国粒子计数器领域的发展轨迹呈现了从初期的技术引进和学习，到逐步实现自主研发的转变。自 20 世纪 70 年代起，中国开始重视粒子计数技术的发展，该时期主要聚焦于引入国际先进技术，通过设备引进和技术合作等方式，国内的研究机构和企业逐渐累积起相关的研发和生产经验。

上世纪 70 年代，我国成功研制出采样流量达到 0.3L/min、灵敏度为 0.3 μ m 的尘埃粒子计数器，这标志着国内在粒子计数技术领域的取得了初步突破^[39]。进入 90 年代初，中科院上海光机所的黄惠杰与邹海兴深入剖析了白光光学系统的不足，对照明系统进行了优化^[40]。此外，朱晓苏与谭锐介绍了一款新型光电粒子计数器的设计，实现了技术上的突破^[41]。90 年代中期，随着技术的不断进步，国内专家利用氦氖激光光源研发出了更先进的尘埃粒子计数传感器，该传感器对粒径 0.3 μ m 的粒子的计数效率大于 80%，其采样流量提升至 2.83L/min^[42]。这些发展显著提升了国内粒子计数器的整体性能，体现了中国在粒子检测技术上的持续创新和技术进步。

进入 21 世纪，中国在粒子计数器的自主研发方面取得显著成就，卞保民等人阐述了激光粒子计数传感器信号传输的数学模型^[43]以及信号幅度分布的概率密度函数^[44]，为促进仪器向大流量、高灵敏方向发展奠定了理论基础。在传感器结构的设计方面，刘子轩等人通过优化光阱结构，降低了背景光噪声，进一步提高激光粒子计数传感器信噪比^[45]。目前，国内研制的尘埃粒子计数器的采样流量提升至 100L/min^[46]。市场上的成熟产品主要以具有 0.3 μ m 灵敏度的尘埃粒子计数器为主流，这不仅展示了国内粒子计数技术的显著进步，也反映了技术的日益成熟。

总体来看，中国粒子计数器的发展经历了从跟随到创新的过程，不断提升的技术水平和产业能力展现了国内在这一领域的成长和潜力。虽然与欧美发达国家相比，国内的粒子计数器在性能上仍存在一定差距，但国内产品已在灵敏度、稳定性和使用便捷性等方面取得了显著进步。特别是南京理工大学^[47-50]、天津大学^[51,52]、中科院上海光机所及安徽光机所^[53-55]等国内院校及科研机构在尘埃粒子计数器的多个技术方面取得了显著的成就。这些研究不仅对推进中国

尘埃粒子计数器技术的进步起到了关键性作用，而且还扩展了该技术的应用领域。

1.3 大粒径尘埃粒子计数传感器的研究意义

在洁净室中，活动如人员流动、机械操作、工具使用和工艺流程可能产生各种尺寸的粒子，包括 $5\mu\text{m}$ 以上的大粒径粒子，这些粒子通过空气在洁净室内扩散。根据 ISO14644-1 的标准，颗粒等级为 ISO5 或更清洁的洁净室和受控环境中，大于 $5\mu\text{m}$ 的气载粒子浓度极低或接近零。但实际上，运行中的洁净室表面可能积聚了 $5\mu\text{m}$ 至 $500\mu\text{m}$ 甚至更大的粒子，比 ISO14644-1 给出的粒子尺寸分类极限所建议的要多得多。洁净室中大于 $5\mu\text{m}$ 的粒子的存在和再分布主要与洁净室内部人类或机械活动有关。在“静止”的洁净室中，可能很少有粒子的活动和分散，并且大于 $5\mu\text{m}$ 的粒子的浓度接近于零。但在“运行”状态下，大粒径粒子的问题不能忽视，因为这些大颗粒同样会引起污染，影响产品质量和制造过程。

然而，传统尘埃粒子计数器在检测大于 $10\mu\text{m}$ 的粒子方面存在局限，这些计数器的最大检测粒径为 $10\mu\text{m}$ 。目前，国外的 LIGHTHOUSE 公司已研制出大粒径粒子计数器，最大检测粒径可达 $100\mu\text{m}$ ，而国内产品的最大检测粒径仍为 $10\mu\text{m}$ ，导致对进口设备的依赖，增加成本并可能带来技术安全风险。因此，开发能够检测大粒径尘埃粒子的传感器非常关键。

1.4 本文的主要工作

在本文中，深入探讨了尘埃粒子计数器在洁净室技术中的应用，重点关注大粒径尘埃粒子计数传感器的设计、实验和分析。本文旨在提供对尘埃粒子计数器发展的全面理解，并突出其在维持洁净室标准中的重要性。

第一章绪论介绍了粒子对工业生产的影响和洁净室技术的基本概念，并回顾了尘埃粒子计数器的发展历程。还讨论了目前国内外在这一领域的研究现状，并强调了大粒径尘埃粒子计数传感器研究的重要性。

第二章主要围绕大粒径尘埃粒子计数传感器的设计基础展开。首先，详细描述了传感器如何通过对粒子的光散射进行检测来实现粒子计数功能。其次，

介绍了粒子的光散射理论，包括光在粒子表面的散射过程、散射角度分布和光散射的物理原理。接着，对粒子的散射光通量进行了计算，得出了粒子散射光通量与粒子直径之间的关系。最后，进行了散射光功率的数值模拟与计算，重点分析了散射强度函数、散射光强分布与粒子直径之间的关系。

第三章详细介绍了大粒径尘埃粒子计数传感器的具体设计，包括照明系统、散射光收集系统、气路系统和信号处理系统。在照明系统设计中，重点讨论了光敏区域设计、光源选择、光束整形的原理及方案、光束整形的优化仿真。散射光收集系统的设计涵盖了光电探测器的选择和布局。最后，阐述了气路系统和信号处理系统的设计，其中信号处理系统的设计包括光噪声的降低和信号处理电路的设计。

第四章聚焦于大粒径尘埃粒子计数传感器的实验与分析。首先，详细介绍了传感器的测试系统搭建工作，包括实验所需设备的选择、搭建过程中的技术细节和系统配置等。其次，进行了传感器的标定实验，通过标定实验确定了传感器的工作参数和性能特征。随后，展开了传感器的性能测试，包括计数效率测试和最大检测浓度测试。

第五章总结了本文的主要研究成果，并对未来的研究方向进行了展望。

课题采用的技术路线如图 1-1 所示，先分开设计光学系统、气路系统、放大电路，再根据 Zemax 与 Ansys Fluent 的仿真结果，借助 SolidWorks 软件设计机械结构，兼具良好的气密性与高灵敏度，协调布局光路系统与气路系统，从而设计出计数传感器的整体结构，最后组装样机，测试分析所设计的尘埃粒子计数传感器的性能。

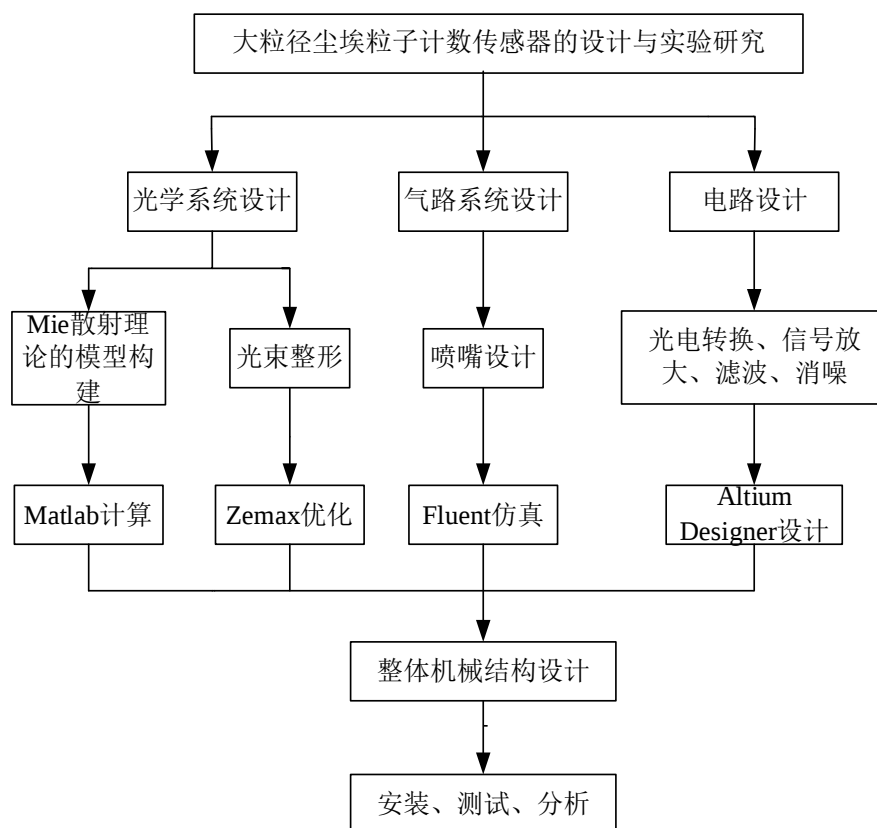


图 1-1 采用的技术路线

第2章 大粒径尘埃粒子计数传感器的设计基础

2.1 大粒径尘埃粒子计数传感器的工作原理

粒子计数传感器，作为一种运用 Mie 散射原理的计数测试仪器，主要用于评估单分散尘埃粒子在光束中散射光强的变化，进而推断出尘埃粒子的粒径大小。这种传感器包括光路系统、采样气路系统以及信号处理系统等关键部分^[56]，具体的工作系统结构如图 2-1 所示。在采样过程中，气体通过气路系统被引入腔体内。当气体中的粒子经过激光照射时，会发生光散射现象。这些散射光信号随后被捕捉，并由光电探测器转换成电流脉冲信号^[57]。经过信号处理系统的处理，这些电流脉冲信号进一步转化为电压脉冲信号。通过对这些信号的细致分析，能够准确地确定粒子的光学等效粒径。

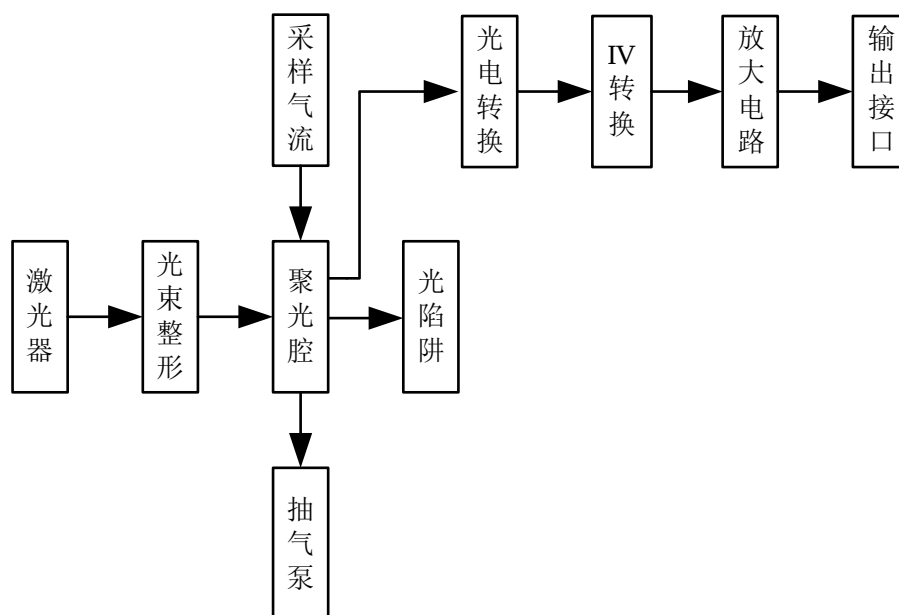


图 2-1 粒子计数器工作原理图

光路系统作为传感器的关键组成部分，其性能优劣对传感器整体性能具有直接影响。该系统由照明光路和散射光收集系统两大部分构成^[48]。照明光路主要包括激光器、光束整形透镜、腔体和光陷阱，负责产生并整形激光，以确保照明光束满足光敏区域的参数要求。散射光收集系统则包括腔内反射镜、腔体和光电探测器^[58]。在腔体中，当尘埃粒子穿过照明光束时会产生散射现象。特定角度范围内的散射光会被光电探测器捕获，并转换为电信号。为了有效抑制

由照明光束引起的杂散光干扰，在腔体的入射端配置了光阑装置，而在出射端则安装了光陷阱。前者用于遮挡主光束周围的杂散光，后者用于吸收那些未经散射的直射激光，从而降低传感器的背景光噪声。

气路系统的主要功能是确保采样气体顺畅地进入腔体，该系统由进气口、腔体、出气口和抽气泵组成^[59]。具体的工作流程如下：采样气体通过进气口进入腔体，在光敏区域穿过照明光束后通过出气口离开腔体，并进入与抽气泵相连的管道。抽气泵以恒定的流量抽取气体，从而在腔体内形成负压，这一负压促使采样气体自动从进气口流向光敏区域^[41]。

信号处理系统先通过 IV 转换电路将光电探测器捕获的电流脉冲信号转换成电压脉冲信号。接着，这些电压脉冲信号经过放大电路处理，以增强其信号强度。只有当处理后的电信号的脉宽和幅度均超过预设的阈值时，这一信号才会被记录和计数，否则将被忽略。值得注意的是，电压脉冲信号的幅度与散射光强呈一定比例关系，而散射光强又与颗粒的粒径大小相关。基于这种关系，可以进行幅值到粒径的变换，并按照不同的幅值等级进行分类计数，从而得出各个粒径等级的尘埃粒子数量。

2.2 粒子的光散射理论

粒子计数传感器的设计原理基于粒子在光照作用下产生的散射现象。因此，粒子的光散射理论构成了尘埃粒子计数器设计的基本理论框架。粒子的光散射理论是一个物理现象的描述，当光波遇到障碍物（如粒子）时，它的传播方向会发生改变，这种现象称为散射。

Mie 散射理论是光散射理论中的一个重要部分，是一种描述光波或其他电磁波与其波长相近或较大的粒子相互作用的物理理论，它在理解和预测各种自然和人工系统中的散射现象方面扮演着关键角色。尽管理论本身涉及复杂的数学，但它为提供了一个强大的工具，用于解释和利用光与物质相互作用的现象。随着计算工具的发展，Mie 散射理论在科学和工程的许多领域中都有着广泛的应用^[60]。

Mie 散射是由德国物理学家 Gustav Mie 提出的，1908 年，Gustav Mie 发表了关于电磁波与球形粒子相互作用的理论研究，他的研究是对麦克斯韦方程的

应用，特别是在解释金属颗粒对光波的散射和吸收方面。随后，这个理论被广泛用于解释和预测各种不同尺寸和材料的粒子对光波的散射行为。

通常情况下，由粒子产生的散射光分布是一个复合函数，与粒子的大小、形状、折射率、入射光的波长等有关。然而，粒子通常并非球形而是具有不规则形状，这使得应用基于电磁理论的 Mie 理论进行解析变得相对困难^[61]。为了适应实际应用需求，常规做法是假设粒子为球形，然后采用近似算法进行计算。这种方法不仅简化了计算过程，也使得光散射理论在实际应用中更具可操作性，有助于准确评估和解析粒子散射特性。

光波与粒子相互作用时散射现象的几何关系如图2-2所示，原点处有一个折射率为 m ，直径为 D 的均匀球形粒子在一束波长为 λ ，光强为 I_{in} 单色平面光波照射下发生散射。当光波从 OZ 方向照射时，它在 OP 方向产生散射光束，其中 OZ 和 OP 方向共同定义了一个散射平面。观测点 $P(r, \theta, \varphi)$ 与粒子之间的距离为 r ，入射光波电矢量的方位角是 φ ，其散射角则是 θ 。

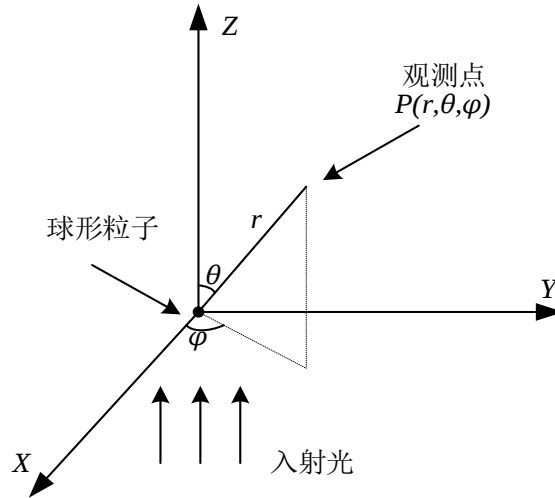


图 2-2 入射光束在球形颗粒发生散射示意图

当入射光为自然光波时，在观测点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处散射光强为 I_s ，可用公式(2-1)表示：

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi^2 r^2} \left[\frac{i_1(\theta)}{2} + \frac{i_2(\theta)}{2} \right] \quad (2-1)$$

当入射光为平面偏振光时，在观测点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处散射光强可用公式(2-2)表示：

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi^2 r^2} [i_1(\theta) \sin^2 \varphi + i_2(\theta) \cos^2 \varphi] \quad (2-2)$$

其中, $i_1(\theta)$ 、 $i_2(\theta)$ 为散射强度函数, 可表示为:

$$\begin{aligned} i_1(\theta) &= S_1(m, \theta, x) \cdot S_1'(m, \theta, x) \\ i_2(\theta) &= S_2(m, \theta, x) \cdot S_2'(m, \theta, x) \end{aligned} \quad (2-3)$$

其中, S_1 与 S_2 为散射强度振幅函数, 是 Bessel 函数和 Legendre 函数两部分组成的无穷级数^[62], 其表达式如公式(2-4): S_1' 与 S_2' 分别为 S_1 与 S_2 的共轭复数, $x = \pi d/\lambda$ 表示粒子的尺寸参数, m 表示粒子的折射率^[63]。

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n \cos\theta + b_n \pi_n \cos\theta) \\ S_2 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n \cos\theta + b_n \tau_n \cos\theta) \end{aligned} \quad (2-4)$$

其中, a_n 、 b_n 为 Mie 系数, π_n 、 τ_n 为散射角函数, a_n 、 b_n 、 π_n 、 τ_n 表达式为:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{\psi_n(x)\psi_n'(mx) - m\psi_n'(x)\psi_n'(mx)}{\xi_n(x)\psi_n'(mx) - m\xi_n'(x)\xi_n(mx)} \\ b_n &= \frac{m\psi_n(x)\psi_n'(mx) - \psi_n'(x)\psi_n'(mx)}{m\xi_n(x)\psi_n'(mx) - \xi_n'(x)\xi_n(mx)} \\ \pi_n \cos\theta &= \frac{P_n^{(1)}(\cos\theta)}{\sin\theta} = \frac{dP_n(\cos\theta)}{d\cos\theta} \\ \tau_n \cos\theta &= \frac{dP_n^{(1)}(\cos\theta)}{d\theta} \end{aligned} \quad (2-5)$$

其中, ψ_n' 、 ξ_n' 分别为 ψ_n 、 ξ_n 的一阶导数, $P_n(\cos\theta)$ 是关于 $\cos\theta$ 的 Legendre 函数, $P_n^{(1)}(\cos\theta)$ 是关于 $\cos\theta$ 的一阶 Legendre 函数。 $\psi_n(x)$ 、 $\xi_n(x)$ 可由公式(2-6)计算。

$$\begin{aligned} \psi_n(x) &= \left(\frac{\pi x}{2}\right)^{\frac{1}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(x) \\ \xi_n(x) &= \left(\frac{\pi x}{2}\right)^{\frac{1}{2}} H_{n+\frac{1}{2}}(x) \end{aligned} \quad (2-6)$$

其中, $J_{n+1/2}(x)$ 为第一类半整数阶 Bessel 函数, $H_{n+1/2}(x)$ 为第二类 Hankel 函数。使用迭代法对公式(2-6)进行求解, 可得:

$$\begin{aligned} \psi_n(x) &= \frac{2n-1}{x} \psi_{n-1}(x) - \psi_{n-2}(x) \\ \psi_n'(x) &= -\frac{n}{x} \psi_n(x) - \psi_{n-1}(x) \\ \xi_n(x) &= \frac{2n-1}{x} \xi_{n-1}(x) - \xi_{n-2}(x) \\ \xi_n'(x) &= -\frac{n}{x} \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x) \end{aligned} \quad (2-7)$$

对公式(2-7)进行迭代时, 其初始值为公式(2-8)所示。

$$\begin{aligned}
\psi_{-1}(x) &= \cos\theta \\
\psi_0(x) &= \sin\theta \\
\xi_{-1}(x) &= \cos\theta - i \cdot \sin\theta \\
\xi_0(x) &= \sin\theta + i \cdot \cos\theta
\end{aligned} \tag{2-8}$$

联合公式(2-5)第三联与第四联，可得到公式(2-9)。

$$\begin{aligned}
\tau_n(\cos\theta) &= \frac{d[\sin\theta \cdot \pi_n(\cos\theta)]}{d(\theta)} \\
&= \cos\theta \cdot \pi_n(\cos\theta) - \sin^2\theta \frac{d[\pi_n(\cos\theta)]}{d(\cos\theta)}
\end{aligned} \tag{2-9}$$

对公式(2-5)进行变形，可得：

$$P_n^{(1)}(\cos\theta) = \sin\theta \cdot \pi_n(\cos\theta) \tag{2-10}$$

对公式(2-10)进行迭代，可得：

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{2n-1}{n-1} \cos\theta \cdot \pi_{n-1}(\cos\theta) - \frac{n}{n-1} \cdot \pi_{n-2}(\cos\theta) \tag{2-11}$$

进行迭代的初始条件为： $\pi_0 = 0$ ， $\pi_1 = 1$ ， $\pi'_0 = \pi'_1 = 1$ 。

计算出 a_n ， b_n ， π_n ， τ_n 后，代入公式(2-2)和公式(2-3)可得散射光的强度分布。

2.3 粒子的散射光通量计算

尘埃粒子计数传感器中光电探测器只能收集一定立体角范围内的散射光通量，因此建立散射光通量的数学模型是分析散射光功率的前提。在本研究的散射光通量数学模型中，图 2-3 展示了一个细致的布局，以粒子为中心的积分球定义了散射的空间结构。

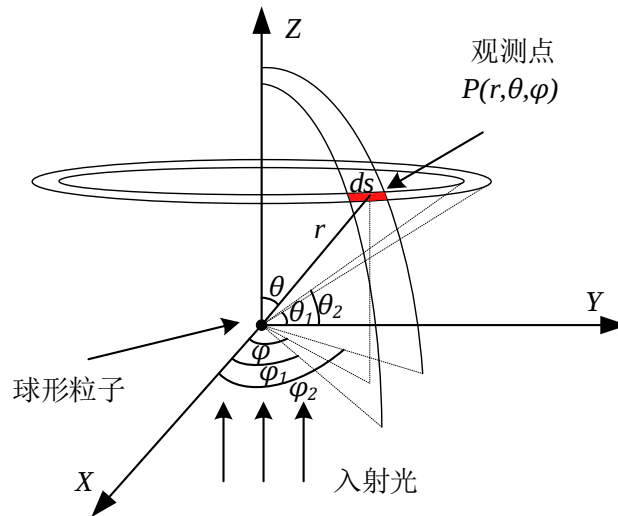


图 2-3 粒子的散射光通量数学模型

选择了以半径为 r 的球冠作为接收散射光的表面，覆盖着特定的方位角范围 φ_1 到 φ_2 ，以及散射角范围 θ_1 到 θ_2 ^[64]。为了计算这个区域的散射光通量，进一步将球冠分割成沿 Z 轴对称的无数细小微条。每个微条的宽度定为 $r \cdot d\theta$ ，长度为 $L=r \cdot \sin\theta \cdot d\varphi$ 。由此，每个微条的表面积 ds 可以计算为 $ds=r^2 \cdot \sin\theta \cdot d\varphi \cdot d\theta$ 。在这些微条上，根据 Mie 散射理论，散射光通量 dF ，可以表达为 $dF=I_{Mie}(\theta, \varphi)ds$ 。通过对整个接收面进行积分，能够计算出收集系统整体的散射光通量 F ，如公式 (2-12) 所详细描述。通过这种方法，能够精确地分析和计算在给定条件下的散射光通量，为进一步的传感器设计提供了一个坚实的理论基础。

$$F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} I_{Mie}(\theta, \varphi) r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2-12)$$

利用 Mie 散射理论，可以计算出不同粒径的球形粒子在特定收集系统中产生的光通量。在不同类型的散射光收集系统中，计算光通量的方法各有特点。其中，最基本的散射光收集形式主要分为直角式和近前向式两种。许多其他常见的散射光收集系统实际上是这两种基本形式的变体，它们可以看作是直角式和近前向式系统的组合或是叠加^[32]。因此，通过精确计算这两种基础系统收集到的散射光通量，能较为便捷地推算出其他类型散射光收集系统的光通量。

图 2-4 为前向散射光路系统示意图。

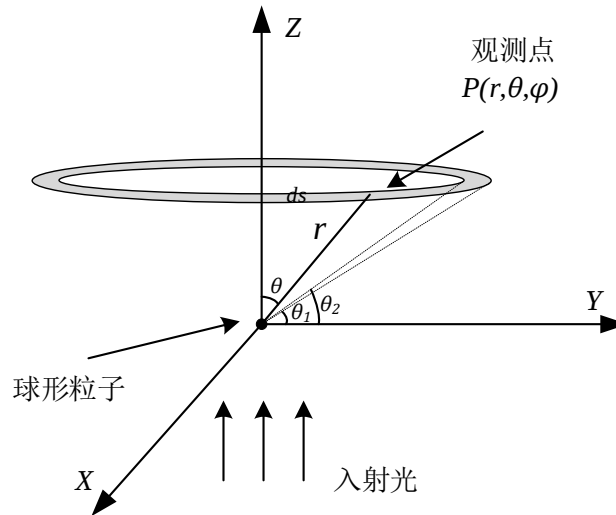


图 2-4 前向散射光通量计算的示意图

当照明光束照射在粒子上会发生光散射现象，主光束和其邻近的散射光大部分被专门设计的光陷阱所吸收。因此仅有特定区域，即一个环状立体角内的散射光能够被系统收集。前向环状散射光经过聚光镜汇聚进入光电探测器件，

转化后形成电脉冲。这些电脉冲的形成与粒子的属性密切相关，包括其尺寸和数量。

根据上文，光通量可以通过对特定立体角内的光强进行积分来计算，这里，立体角由散射角 θ_1 和 θ_2 定义。面元微分 ds ，即小面元的面积，可以表示为 $ds=r^2\sin\theta d\theta d\varphi$ ，使用这个微分表达式，可以积分特定范围内的光强以求得光通量。如公式(2-13)：

$$F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} I_{Mie}(\theta, \varphi) \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2-13)$$

在自然光的照射下，散射光的强度分布仅与散射角 θ 有关，而与方位角 φ 无关联。基于这一现象，可以导出前向自然光光通量的表达式：

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi^2 r^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} \left[\frac{i_1(\theta)}{2} + \frac{i_2(\theta)}{2} \right] \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \\ &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \cdot \sin\theta d\theta \end{aligned} \quad (2-14)$$

在偏振光的照射下，光通量可以表示为：

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi^2 r^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} [i_1(\theta) \sin^2\varphi + i_2(\theta) \cos^2\varphi] \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \\ &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \cdot \sin\theta d\theta \end{aligned} \quad (2-15)$$

前向散射光路系统主要捕获靠近前方的散射光通量，当这部分光通量投射至光电探测器件后，会产生较大的光电流。然而，不同粒径粒子所产生的散射光通量存在显著差异，因此在转换为电压信号时，这种差异也会相应显现，可能会对探测粒径的范围产生影响。此外，由于光电探测器件位于光束的传播方向上，会受到较强的杂散光干扰，这对尘埃粒子计数传感器的信噪比产生负面影响。

直角散射光路系统的示意图如图 2-5 所示。这种散射光路系统的工作原理与前向散射光路系统的差异体现在收集到的散射光通量在直角。

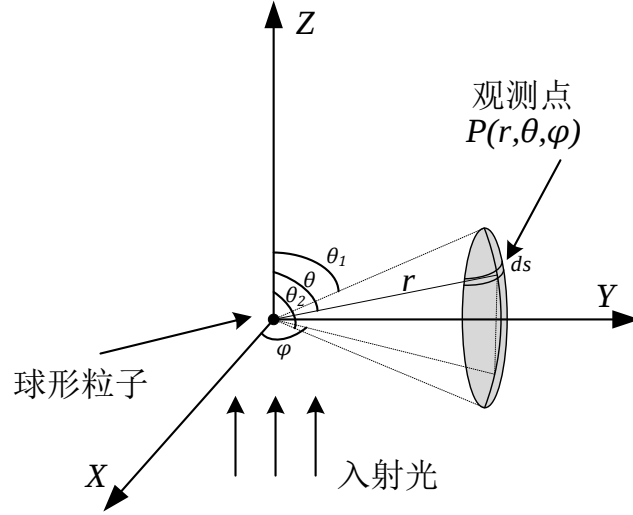


图 2-5 直角散射光通量计算的示意图

在自然光的照射下，可计算出的光通量为：

$$\begin{aligned}
 F &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} I_{Mie}(\theta, \varphi) r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \\
 &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi^2 r^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\frac{i_1(\theta)}{2} + \frac{i_2(\theta)}{2} \right] \cdot \Delta\varphi \cdot r^2 \sin\theta d\theta \\
 &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{8\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \cdot \Delta\varphi \cdot \sin\theta d\theta
 \end{aligned} \tag{2-16}$$

在直角式散射光收集系统的情况下， θ_1 与 θ_2 的总和等于 180° 。考虑到这一几何关系，可以推导出以下结论：

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = \arccos \left[\frac{\cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) - \cos\theta \cdot \cos\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right)}{\sin\theta \cdot \sin\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right)} \right] \tag{2-17}$$

在偏振光照射下，光通量可表示为：

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi^2 r^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [i_1(\theta) \sin^2\varphi + i_2(\theta) \cos^2\varphi] r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \\
 &= \frac{\lambda^2 I_{in}}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\frac{i_1(\theta)}{2} + \frac{i_2(\theta)}{2} \right] \cdot \Delta\varphi \cdot \sin\theta d\theta \\
 &\quad + \frac{\lambda^2 I_{in} \cos(2\varphi)}{4\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\frac{i_1(\theta)}{2} - \frac{i_2(\theta)}{2} \right] \cdot \sin\varphi \cdot \sin\theta d\theta
 \end{aligned} \tag{2-18}$$

根据 Mie 散射理论及两种散射光收集系统的特性，可以看出，光电探测器收集到的光信号强度是评估传感器性能的关键。这表现在两个方面，一是照射在粒子上的光强大小，二是散射光收集角大小。特别是对于 $5\mu\text{m}$ 及以上大粒径颗粒，其散射光强极大，因此在有效测量这些大粒径颗粒时，降低散射光强成

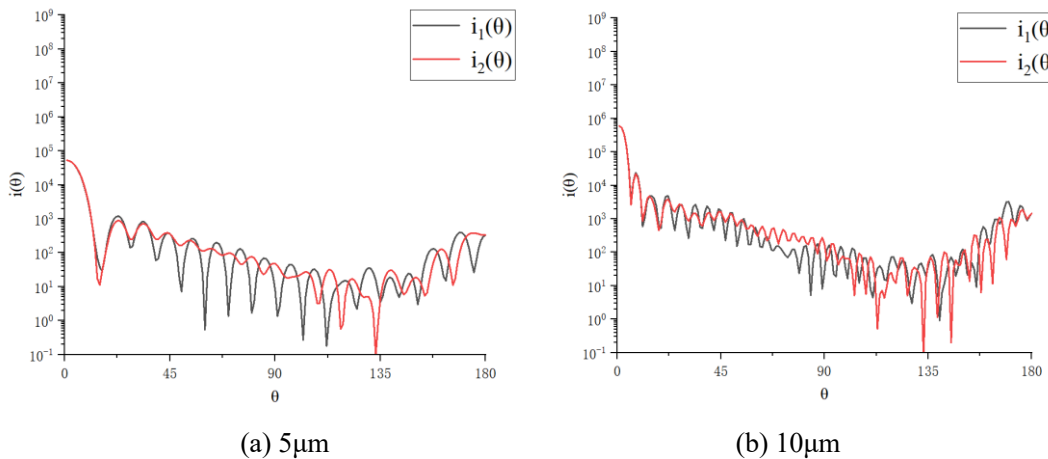
为一项必要措施。这可以通过两种主要策略来实现：其一，降低照射在粒子上的光强度，可以通过减少激光器的输出功率来实现；其二，缩小散射光的收集角，可通过降低光电探测器的感光面积来完成。

比较两种散射光收集系统，直角散射光收集系统的设计主要注重于捕获与入射光束垂直的方向上的散射光通量。尽管这些散射光相对于前向方向的散射光通量较为弱，但由于其照明光路与探测器相互垂直，这一结构设计极大地减少了杂散光噪声的影响，因而提高了信号的质量和可靠性。此外， $5\mu\text{m}$ 以上大粒径粒子在直角方向的散射光已足够强。考虑到这些因素，本文最终选择采用直角散射光路系统。这种选择是基于对系统整体性能的全面评估，尤其是在噪声控制和散射光优化方面的考量。

2.4 散射光功率的数值模拟与计算

2.4.1 散射强度函数与粒子直径的关系

在本研究中，使用半导体激光器作为偏振光源，来探索在 $5\mu\text{m}$ 至 $100\mu\text{m}$ 粒径范围内粒子的光散射特性。考虑到激光源的特性，选择的光波长为 808nm ，并以标准聚苯乙烯（PSL）粒子作为测试对象，其折射率为 $m=1.589$ 。为了深入理解不同大小粒子的散射行为，在 MATLAB 软件中进行了详细的模拟计算。特别是，计算出了 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 标准 PSL 粒子在散射角 θ 范围 0° 至 180° 内的散射强度函数 $i_1(\theta)$ 与 $i_2(\theta)$ 的相对数值，其结果如图 2-6 所示。



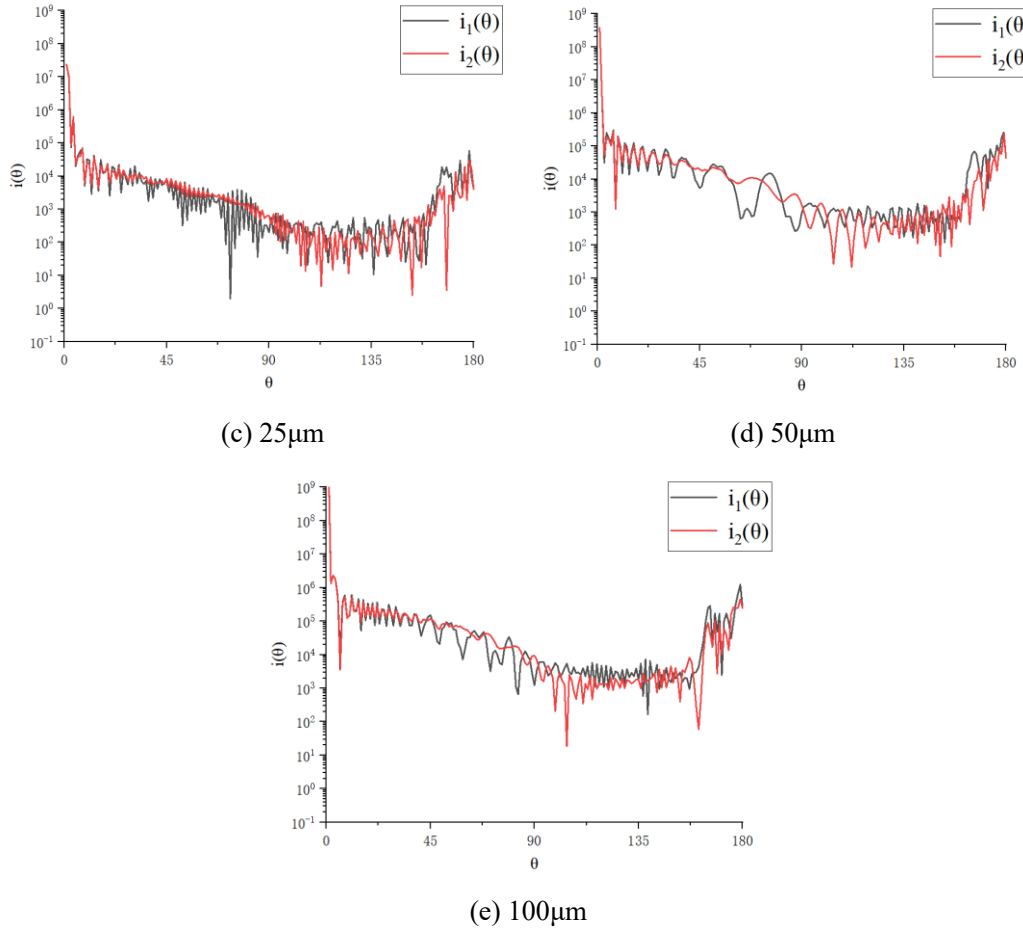


图 2-6 5~100 μm 标准 PSL 粒子散射光强度函数与散射角关系图

从图 2-6 可以看出，随着散射角 θ 的增加，散射强度函数 $i_1(\theta)$ 与 $i_2(\theta)$ 的曲线整体呈现出一种先下降后上升的趋势，在 0° 和 180° 附近，散射强度函数相对较大。图中还可以清楚地看出，随着粒子尺寸的增加，散射光的相对强度也随之增大。另外，在 $\theta=0^\circ$ 附近，随着散射角 θ 的增大，强度函数值会迅速下降，这意味着对于较大的粒子，散射光能量主要集中在主光束附近。

2.4.2 散射光强分布与粒子直径的关系

在图 2-7 中，利用 MATLAB 软件展示了一系列计算结果，这些结果描绘了不同粒径大小的标准 PSL 粒子（具体为 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ ）在 Mie 散射理论框架下的散射光强分布。通过这些图像，可以清晰地观察到在 0° 到 360° 范围内，粒子在散射角 θ 与方位角 φ 方向上的 Mie 散射光强 I_{Mie} 的空间分布情况。这些分布图不仅展现了各尺寸粒子散射光强度的变化，而且还揭示了散射光强随着粒子大小增加而呈现的不同趋势。这种可视化分析对于理解和

解释各种粒径的 PSL 粒子在不同散射角度下的行为具有重要意义。

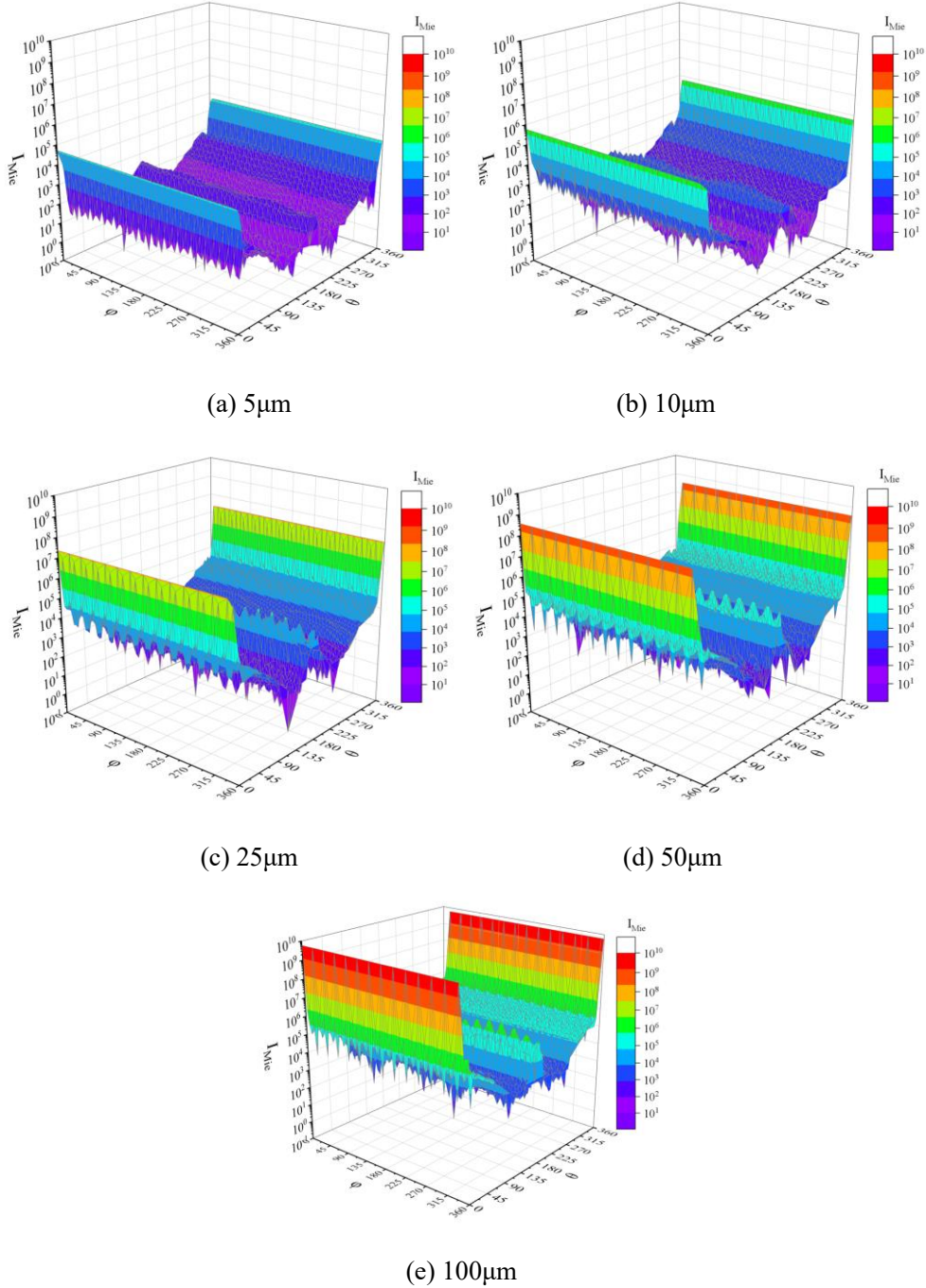


图 2-7 Mie 散射光功率的空间分布

从图 2-7 的详细分析中可以观察到，在散射光收集系统中，粒子的 Mie 散射强度在 $\theta=0^\circ$ ，即在前向散射时，达到最大值，而随着 θ 角的增大，即远离直接前向散射方向时，强度迅速下降，但在 180° 附近，Mie 散射强度会有所增大，这一现象与先前讨论的散射强度函数 $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 随 θ 变化的相对数值的规律保持一致。进一步分析还可以发现： ϕ 的变化（入射光波的偏振方向）对于直径

5 μm 以上粒子散射光强的影响甚微。这一现象表明,对于较大粒子,Mie 散射效果在不同偏振状态下保持相对稳定。

2.5 本章小结

本章专注于阐述尘埃粒子计数传感器的设计理论和基础。首先,详细介绍了尘埃粒子计数传感器的工作原理,包括其如何通过光散射来检测悬浮在空气中的粒子。然后,深入探讨了粒子的光散射理论,包括光与粒子的相互作用原理,介绍了如何计算粒子的散射光通量,这对于粒子计数器的设计和性能评估至关重要。接着,讨论了散射光的收集方式,包括不同设计方案的优缺点及其对粒子计数器性能的影响。最后,进行了散射光强的数值模拟与计算,探讨了散射强度函数与粒子直径之间的关系以及散射光强分布与粒子直径之间的关系,为粒子计数器的设计提供了计算方法。

第3章 大粒径尘埃粒子计数传感器的设计

3.1 照明系统的设计

3.1.1 光敏区域的设计

图3-1为光敏区域示意图，可以看出，光敏区域为激光光束与采样气路交叉而形成的一块区域。其中 H 为激光光束沿 Y 方向的尺寸， L 为光敏区域沿激光光束照射方向尺寸， W 为光敏区域在气流方向的厚度。光敏区域的参数指标决定着整个传感器的优劣，光束整形的最终目的就是设计出满足条件的光敏区域。

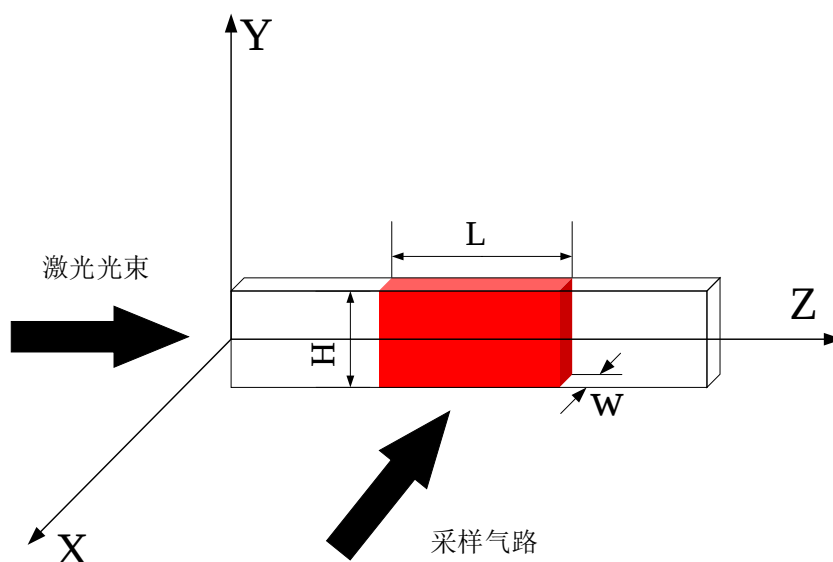


图 3-1 光敏区域

理想的光敏区域，其光强分布应保持高度的一致性，因为均匀性对传感器的性能也有很大的影响，同等粒径的粒子分别穿过光敏区域中光强度不同的位置时，所产生的电压脉冲幅值可能存在显著差异。若这种差异能够跨越两个计数通道的阈值电压，传感器可能会错误识别粒子的粒径，从而影响粒子计数器的计数效率^[65]。此外，当较大粒径的粒子穿过光强度较弱的区域时所产生的电压幅值与较小粒径的粒子穿过光强度较强的区域时的电压幅值相等时，传感器难以区分微粒的大小，最终导致传感器的粒子分辨率显著降低^[66]。

电压脉冲信号的幅值大小与粒子粒径成比例的关系仅在单粒子散射的情况下成立。因此，每个传感器都设有一个最大检测浓度的上限。如果尘埃粒子的

浓度超过这一上限，那么多个粒子同时穿过光敏区的概率可能性会显著增加，进而导致测量误差。为了避免这种情况，设计时必须确保在同一时间内只有单个尘埃粒子通过光敏区，这对光束在光敏区的 W 尺寸有所要求。

为确保所有粒子都能够顺利穿过光敏区域，激光光束在 Y 方向的尺寸 H 应略大于微粒气流通道的宽度。此外，进气口的形状和尺寸对微粒通过光敏区域的位置具有显著影响。南京理工大学的邹婷通过仿真计算，得出了单一粒径的球形粒子在各种进气口结构下穿过光敏区的位置分布情况^[67]，可以据此确定光敏区的尺寸。进气口截面图如图 3-2 所示。

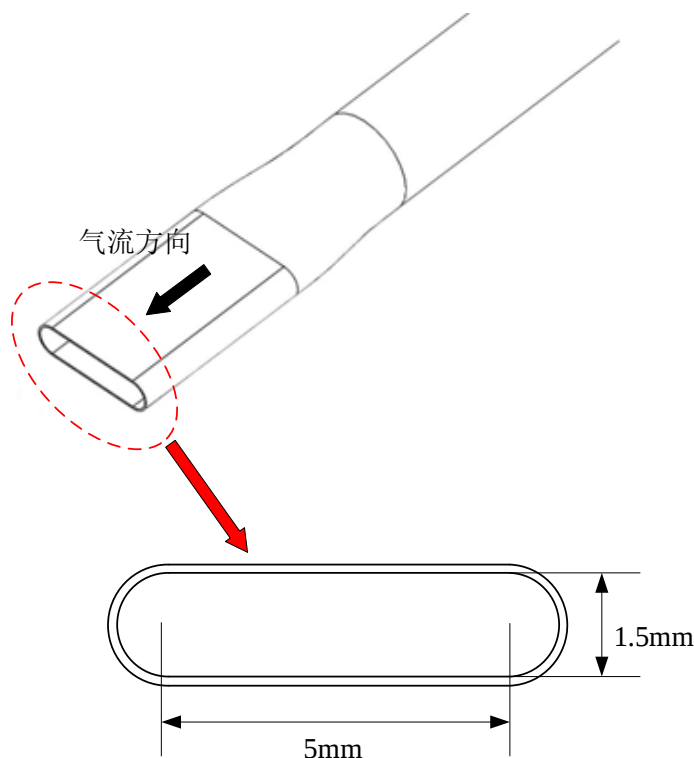


图 3-2 进气口截面图

该截面图描绘了一种矩形加上两侧直径为 1.5mm 的半圆构成的槽口结构。其中， 5mm 表示沿光束传播方向的长度，而 1.5mm 表示进气嘴的宽度。光敏区 H 的尺寸应稍大于 1.5mm ，而 L 尺寸可定为 6.5mm 。这种设计考虑了粒子的运动特性和光敏区的有效捕捉范围，从而确保了粒子计数器在实际应用中的准确性和效率。

设定粒子计数器的采样流量为 Q ，进气口的截面积为 S ，光敏区在气流方向的厚度为 W 。根据这些参数，可以推算出单个粒子通过光敏区的时间 t 为 SW/Q 。一般而言，粒子计数器要求脉冲信号的占空比不超过 $1/10$ ，据此可以计算出单

位时间内可测量的最大粒子数量为 $1/(10t)$ 。据此，最大饱和浓度可以估算为 $1/(10tQ)$ ，即 $1/(10SW)$ 。

本文研究的粒子计数传感器流量为 $28.3\text{L}/\text{min}$ ，根据上文 S 为 9.3mm^2 。常规粒子计数器的最大饱和浓度大致为 1000000 颗/ ft^3 ，据此推算， W 的尺寸应小于 0.5mm 。同时，考虑到光束整形时很难将 W 整形到 0.1mm 以下，因此 W 的取值范围应在 $0.1\sim 0.5\text{mm}$ 之间。因此，结合进气口结构和粒子计数器的采样流量，光敏区的尺寸可设定为 $6.5\text{mm}\times 1.6\text{mm}\times 0.3\text{mm}$ 。这种尺寸的确定是基于精确计算与实际应用需求的综合考虑，旨在确保粒子计数器在测量时的性能。

3.1.2 光源的选择

照明光源是粒子计数传感器核心组件的关键部分，对传感器的照明系统起着决定性作用。它不仅直接影响传感器的计数效率，还决定了检测的精度，光电探测器所接收的能量主要由照明光源的功率确定^[68]。此外，考虑到光敏区域对光源的光强稳定性和均匀性有很高的要求，选择照明光源时需要综合考量光源波长、发射功率及成本等因素^[69]。这种全面的考虑确保了照明光源能够满足传感器在不同检测环境下的需求，从而提高传感器的性能和可靠性。

相比于白光光源，激光可以提供更高的检测精度，优点如下：首先，能够提供更高的亮度和能量集中度；其次，激光通常只有一个非常窄的波长范围，这使得它在测量特定大小的粒子时更为精确。第三，激光光束非常直且易于聚焦，有助于更精确地定位和计数粒子；第四，由于激光的光谱纯净度高，它减少了由于光源波长分布引起的误差。

粒子计数传感器常用的激光光源包括氦-氖（He-Ne）激光器和半导体激光器。氦-氖激光器以其光强稳定性、长寿命而著称，可以提供高质量的光束。然而，其较大的体积和对高压电源的需求限制了其在便携式尘埃检测设备上的应用。另一方面，半导体激光器，也称为激光二极管（LD），具备体积小、重量轻、高可靠性等优势。使用半导体二极管作为光源时，光敏区的光强分布均匀，能够提高系统的计数效率和分辨率，但其缺点是输出光束质量较差，且光斑呈椭圆形，因此，为了在光敏区实现适当的照明，半导体激光需要经过专门的光束整形处理。

本研究选用了 HGLD-808TO5.6-Z-200mW 型号激光二极管作为光源，其实

物图如图 3-3 所示。该光源具有优秀的性能参数，如表 3.1 所示。



图 3-3 激光器实物图

表 3.1 激光器 HGLD-808TO5.6-Z-200mW 性能参数表

性能参数	性能指标
额定出光功率	200mW
波长	808±5 nm
阈值电流	55mA
工作电流	230mA
工作电压	1.8V
发散角	35°×8°
发光面	100×1μm

3.1.3 光束整形的原理及方案

半导体激光的光斑呈现椭圆形状，这是由于其内部结构发出的光束在不同方向具有不同的发散角度。这种光束通常表现为非对称的高斯光束（Gaussian beam），其特性由半导体激光器的空间模式和结构特征决定。半导体激光器中的有源区域不仅尺寸极小，而且呈现不对称形状，核心结构是一个具有光反馈作用的 P-N 结二极管芯片。因此，与其他类型激光器相比，半导体激光器的一个显著特点是光束的发散非常剧烈且不对称。激光的出射可以分为快慢两个轴：快轴的激光发射角较大，通常在 $\theta_{\perp}=30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内；慢轴的激光发散角较小，大约在 $\theta_{\parallel}=5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间，这就导致半导体激光器输出光束呈椭圆截面。图 3-4 展示了半导体激光器在远场的光强分布，清晰描绘了这些特点。

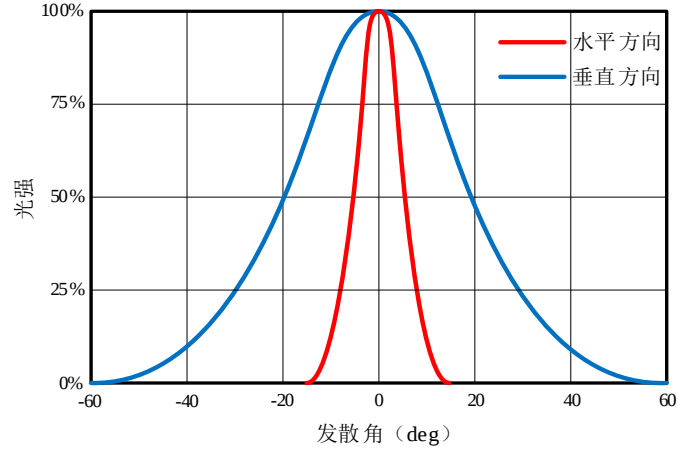


图 3-4 半导体激光器远场光强分布

半导体激光器发射的光束可被视作一个发散的高斯光束，多数半导体激光器设计有内部束腰，负责发散光的发射，其半径取决于光束焦点处的半径大小。高斯光束的半径则是由光强从最大值下降至 $1/e^2$ 点的距离所定义。高斯光束的光场强度分布能够通过特定的数学公式进行表达：

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (3-1)$$

在高斯光束的描述中， ω_0 表示光强峰值降至 $1/e^2$ 处的光束半径，这一特定半径被称为束腰半径。归一化光强 I_0 的值则定义为 $I_0 = 2/(\pi\omega_0^2)^{[70]}$ 。这种表示方式准确地描绘了高斯光束的光场强度分布特征。图 3-5 展示了高斯光束的光场强度分布，清晰地反映了这些特性，提供了对高斯光束空间特性的直观理解。

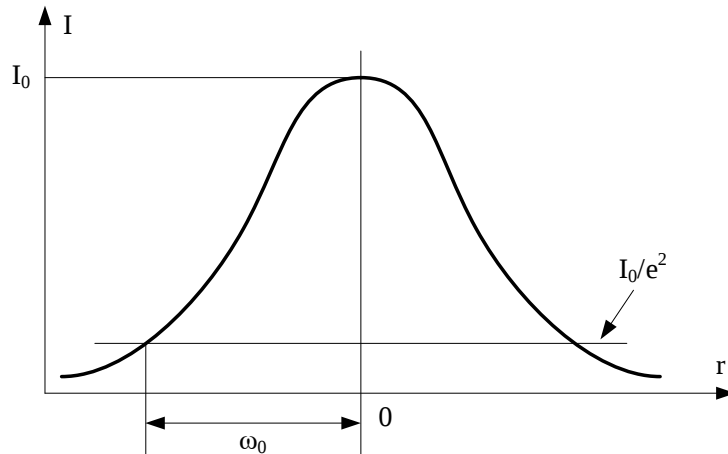


图 3-5 高斯光束

然而，高斯光束并不满足光敏区对光强均匀化的要求。因此，必须对光束进行整形处理，以实现能量的均匀化，即将高斯光束转换为平顶光束^[71]。通过

光束整形技术，可以将光强分布调整为更适合于精确测量的平顶形状，从而优化光敏区的响应特性。最理想的平顶光束的物理模型如图 3-6 所示。

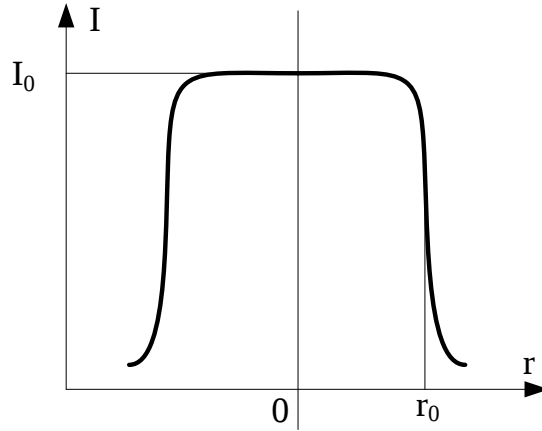


图 3-6 理想的平顶光束

理想的平顶光束可简单的表达为：

$$I = \begin{cases} I_0 & (r \leq r_0) \\ 0 & (r > r_0) \end{cases} \quad (3-2)$$

根据之前的讨论，光敏区的尺寸参数已定为 $L \times H \times W = 6.5 \times 1.6 \times 0.3 \text{mm}$ 。针对半导体激光光束的特性，通过对慢轴方向（即小发散角方向）进行准直，可以缩短粒子在 X 方向上的光程，从而确保单粒子效应的实现。同时，对快轴方向（即大发散角方向）进行聚焦，以集中能量并满足粒子通道 Y 方向的高度要求。为此，选用非球面单透镜对发散角进行压缩是一种有效的策略。这种方法既考虑了光束特性，又优化了光敏区域的设计，确保了粒子计数器能够更准确地测量粒子特性。

在实际应用中，半导体激光器所发出的光束需要通过光学系统进行整形，以满足技术需求。光束整形的方法可分为直接法和间接法两种。直接法是指利用物理光阑直接截取边缘光束，以保留中心光束。而间接整形技术则是指采用光学元件，通过改变激光光束的物理特性，即利用折射定律来改变光束的传播方向和距离，从而实现光束的整形。半导体激光光束整形的主要目的有两个：一是将光束整形成特定的形状，二是进行光束能量的重新分配。

在各种光束整形方法中，非球面镜整形因其结构简洁和高效率的特点，特别适用于高功率半导体激光器发出的高斯光束的整形处理^[72]。通常，非球面镜的光学曲面不是简单的球面，而是按照复杂的数学函数或曲线进行设计和加工的镜面。这种表面的中心到边缘的曲率半径是不断变化的。通过这种技术，光

束在透镜中经历能量的重新分布，改变了传统的能量分布模式，从而实现光束能量的平顶分布。当光束离开透镜的后表面时，原本的高斯光束能量变得均匀并进行了整形^[65]。

以非球面顶点为原点，建立笛卡尔坐标系，以非球面镜的中心轴为 X 轴，则非球面 y 可用二次曲线方程表示，可表达为：

$$y^2 = 2R_0x - (1 - e^2)x^2 \quad (3-3)$$

在此， R_0 代表曲面近轴处的曲率半径，而 e^2 是曲面的圆锥系数。将方程扩展为多项式形式，其表示可以表述为：

$$y^2 = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + \dots \quad (3-4)$$

其中， a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 $a_5 \dots$ 为方程系数， $a_1 = 2R_0$ ， $a_2 = e^2 - 1$ 。

当该表达式包含更高阶项，例如 x^3 或更高次项时，在给定的 y 值条件下，求解 x 值变得相当复杂，这通常涉及偏微分方程的相关知识。在大多数情况下，并不直接求解其精确值，而是倾向于使用曲线拟合的方法，并应用迭代法来进行求解。

在光学设计软件 ZEMAX 中，常用的偶次非球面表达式如下所示：

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6 + \alpha_4r^8 + \dots \quad (3-5)$$

在该公式中， $r^2 = x^2 + y^2$ ，其中 z 表示非球面上某点在光轴上的投影到非球面顶点的距离。 c 是在非球面顶点处的曲率， α_1 、 α_2 、 $\alpha_3 \dots$ 代表非球面系数。圆锥系数 k 定义为 $k = -e^2$ ，其中 e 是曲线的离心率。当 e^2 为 0 时，该曲面是球面； e^2 介于 0 和 1 之间时，曲面为椭球面； e^2 等于 1 时，曲面成为抛物面；而 e^2 大于 1 时，曲面为双曲面。这个表达式基于二次曲线，通过在其上增加高阶项，来表示非球面相对于二次曲面的偏离程度，这种表达方式有效地描绘了非球面的复杂形状。

在本研究中，采用了非球面镜对半导体激光器输出的光束进行整形，图 3-7 展示了传感器的光路结构示意。在此结构中，激光器发出的激光经由非球面镜进行整形并重新分配光束能量，从而产生光强均匀的激光光束^[73]。当此光束照射到粒子上，会引发光散射现象，而特定散射角度范围内的散射光则被光电探测器捕获^[74]。这些散射光信号随后被转换为电信号，而这些电信号的幅值与粒子的粒径呈正比关系。通过测量这些电脉冲信号的幅值，可以推断出粒子的粒

径，通过统计电脉冲信号的个数，可以得到粒子的数量。在出射口，设有光陷阱用于吸收和消除未经散射的激光，以防止激光在腔体内多次反射后被探测器捕捉，从而显著降低了由激光反射产生的杂散光对整个系统的干扰。

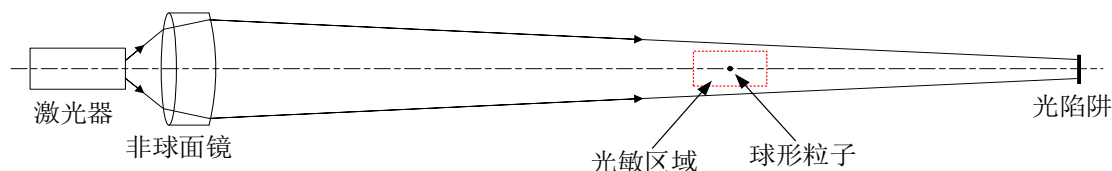


图 3-7 传感器光路示意图

设计一个合理的光学系统是准确而高效检测到尘埃粒子的前提，其关键点在于如何在光强度和减少光噪声之间找到平衡。该系统需要在保证充足的光通量的前提下，最大限度地降低杂散光的影响。这可能涉及采用高质量的光学元件来减少杂散光，使用高效的滤光技术来降低噪声水平，以及优化系统的几何配置，如合理安排光源、探测器和样品的相对位置。总结来说，一个合理的光学系统应该综合考虑光源的功率、光敏区域大小的控制和高效噪声控制技术，以确保在提高灵敏度的同时，保持检测的准确性和可靠性。

3.1.4 光束整形的优化仿真

ZEMAX 是一款专业的光学设计软件，广泛用于光学系统的设计和分析。它能够帮助用户设计和模拟各种光学元件和系统，如镜头、激光器、光纤和照明系统等。ZEMAX 提供多种功能和工具，以支持从基础的光学元件设计到复杂的光学系统集成的各个阶段。其核心功能包括光线追踪、系统优化与公差分析等。光线追踪技术可以模拟光在光学系统中的行为，计算光线通过各种光学元件（如透镜、棱镜、反射镜）的折射和反射；该软件还提供了强大的系统优化功能，允许用户根据特定性能指标优化他们的设计，可以自动调整元件参数以改善系统性能，例如减少像差、增加分辨率或提高光通量；公差分析功能可以帮助评估生产和装配误差对系统性能的潜在影响，这对于确保设计的可生产性和可靠性至关重要。

在使用 ZEMAX 软件进行分析和验证非球面结构的设计时，首先设定初始条件并输入相关参数。与传统的模拟点光源方法不同，采取模拟半导体激光器的发光特性来构建光源模型。如图 3-8 所示，这种方法更准确地反映了半导体激

光器在实际应用中的光学行为，为更精细的设计和分析提供了基础。

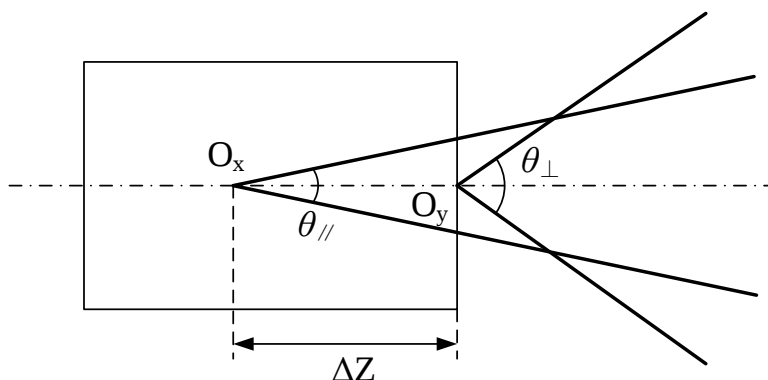
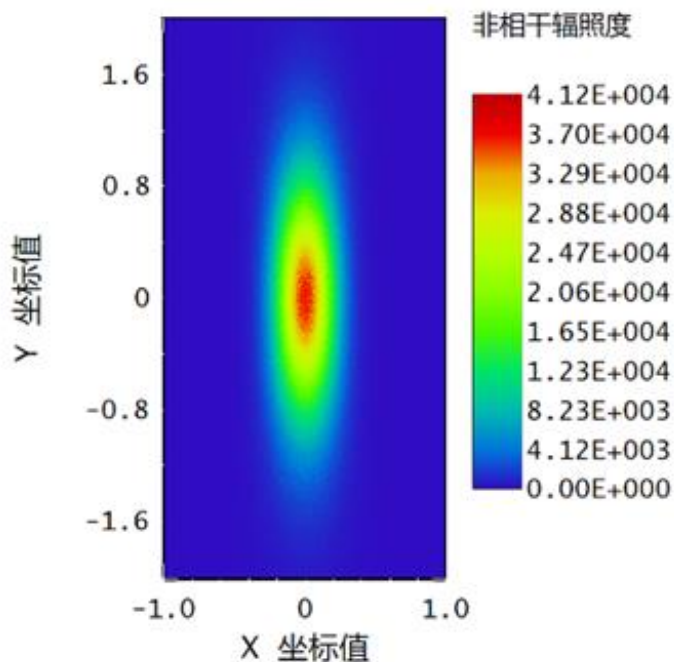
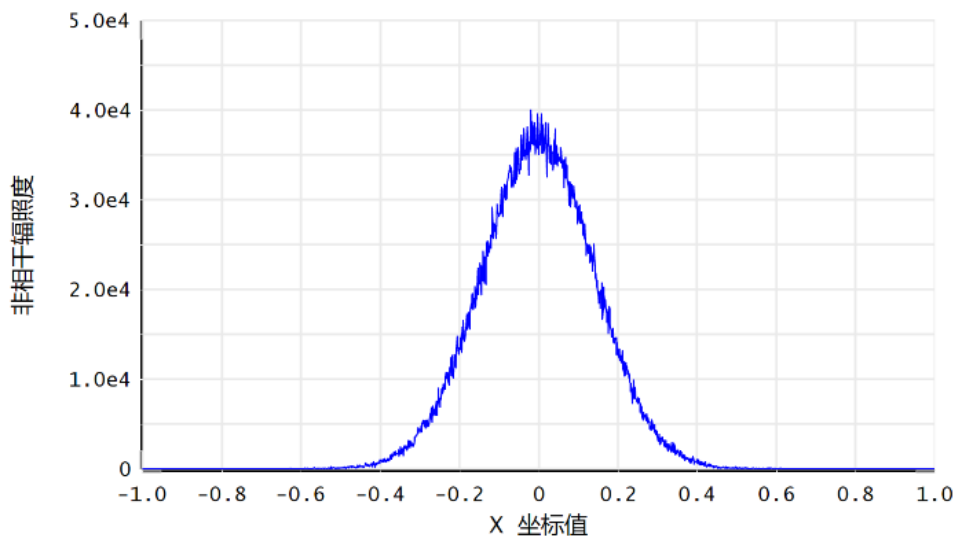


图 3-8 半导体激光光源特性

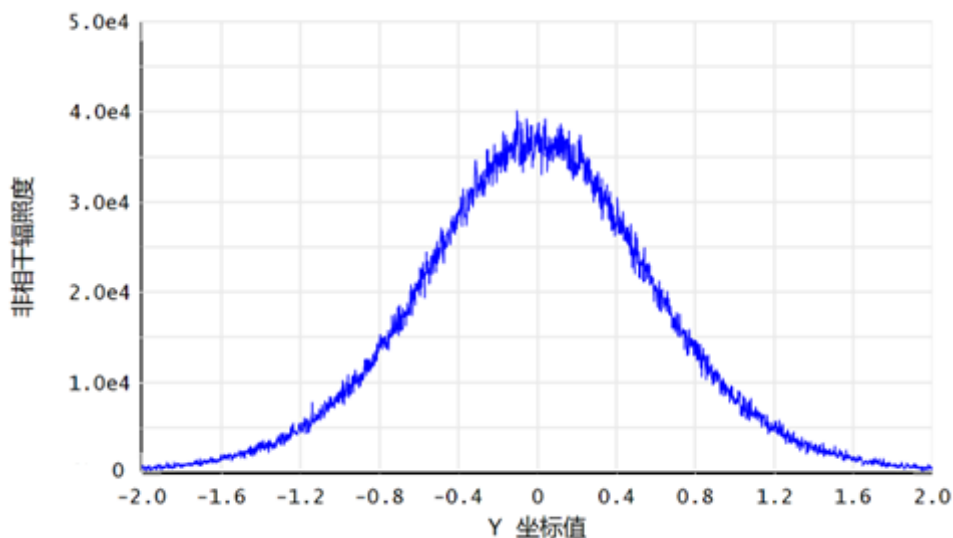
半导体激光可以等效为从 O_x 与 O_y 分别发出的光，发散角分别为 $\theta_{//}$ 与 $\theta_{\perp}$ ， O_x 与 O_y 之间的距离为 ΔZ ， ΔZ 即称为 X 轴和 Y 轴方向的像散。在 ZEMAX 软件中用二极管光源来模拟快轴和慢轴的不同角度。根据所选的激光二极管性能参数，在非序列模式中依次设置光源的参数。并使用虚拟探测器在激光发光面前方的 2mm 处对光斑进行探测，激光出射光束特征如图 3-9 所示，图 3-9(a)为虚拟探测器所探测到的光斑，可以看出，光斑的形状为椭圆形；图 3-9(b)、(c)分别为 X、Y 方向截面强度曲线，光强呈高斯分布，符合激光二极管的光束分布特征。



(a) 虚拟探测器探测的光斑



(b) X 方向截面强度曲线



(c) Y 方向截面强度曲线

图 3-9 激光出射光束特征

ZEMAX 软件中的评价函数是设计和优化光学系统的关键部分，它提供了一系列强大的工具，用于评估和改进系统性能。这些函数提供了一种量化系统性能的方式，允许设计者确定光学系统是否满足特定的性能要求。本文研究的主要是激光光束的整形设计，主要的技术目标为确保辐射强度的均匀性，因此采用非序列评价函数进行优化。

首先，按照光束整形原理，在 ZEMAX 软件建立照明光路初始模型，然后根据初始模型编辑优化函数。Z 轴正方向为光路传播方向，使用 NPZV 等操作数对模型中的各光学元件进行约束，所编写的优化函数如图 3-10 所示。

类型	操作数#						目标
1 NPZV ▾ 1	1	1	0				0.000
2 NPZV ▾ 1	2	2	0				0.000
3 NPZV ▾ 1	2	2	0				0.000
4 DIFF ▾ 2	1						0.000
5 DIFF ▾ 3	2						0.000
6 OPGT ▾ 2							2.000
7 OPLT ▾ 2							5.000
8 OPGT ▾ 5							25.000
9 OPLT ▾ 5							35.000
10 DMFS ▾							
11 BLNK ▾ 光线追迹							
12 NSDD ▾ 1	0	0	0	0	0.000	0.000	
13 NSTR ▾ 1	0	0	0	0	0.000	0.000	
14 BLNK ▾ 光斑X方向大小							
15 NSDD ▾ 1	1	-10	0	0	0.000	0.000	
16 OPGT ▾ 15							0.250
17 OPLT ▾ 15							0.350
18 BLNK ▾ 光斑Y方向大小							
19 NSDD ▾ 1	1	-11	0	0	0.000	0.100	
20 OPGT ▾ 19							1.550
21 OPLT ▾ 19							1.650

图 3-10 优化函数的建立

运行所建立的优化函数，得到如图 3-11 的光路图，图 3-11(a)、(b)分别为快轴与慢轴光束整形结果。



(a) 快轴光束整形

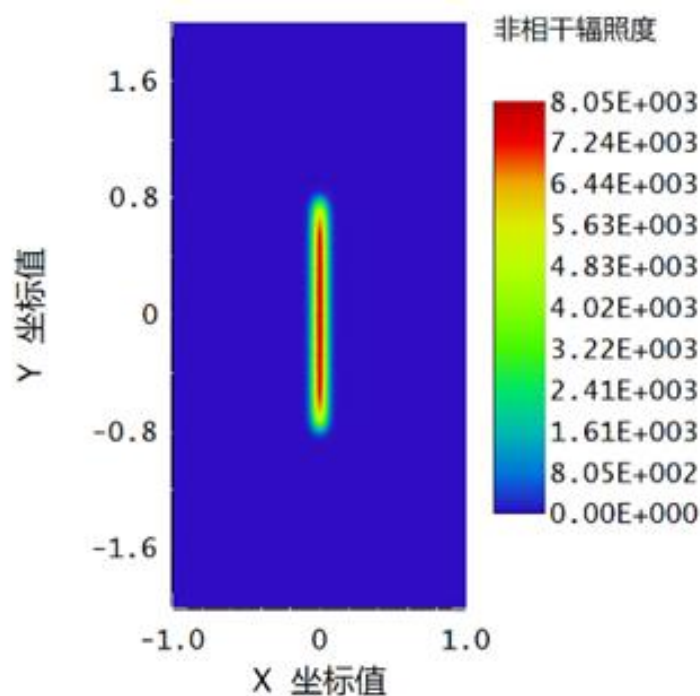


(b) 慢轴光束整形

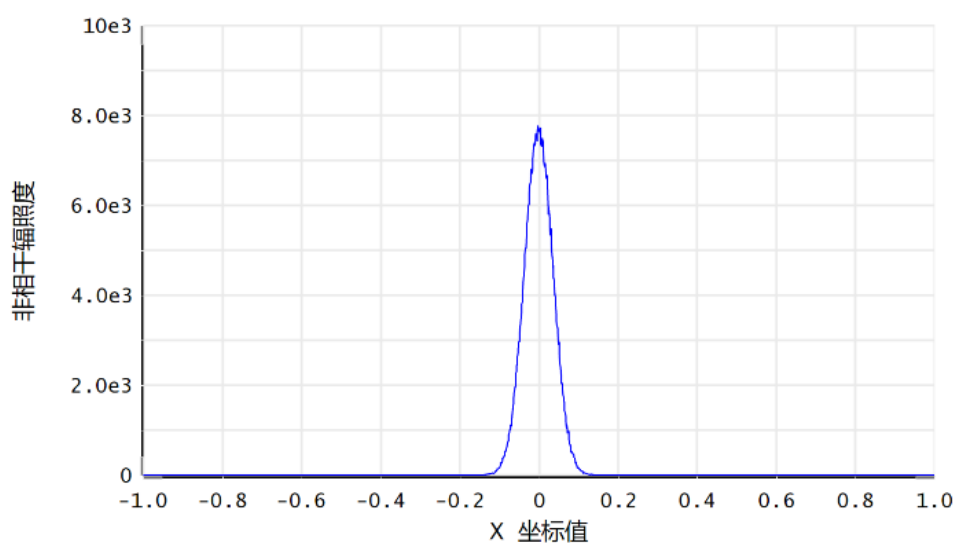
图 3-11 优化后的光路图

对已优化的光学系统进行光线追迹操作，可生成光敏区域光斑强度图，如图 3-12 所示。其中，图 3-12(a)展示了光敏区域在 XOY 平面上的强度分布，可观察到光斑呈狭长椭圆形，尺寸约为 $1.6 \times 0.3\text{mm}$ 。而图 3-12(b)和(c)则分别展示

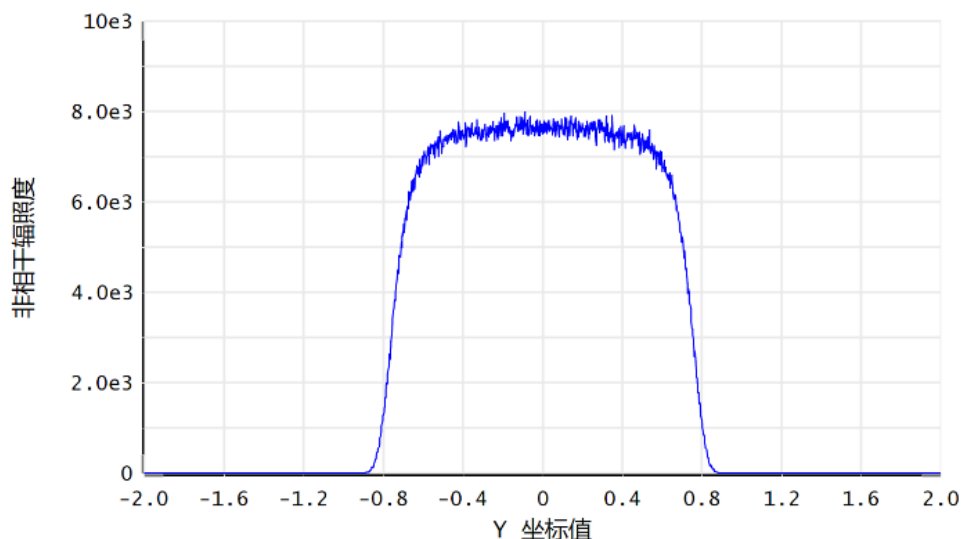
了 X 方向和 Y 方向的相对强度分布情况，X 方向上的强度呈现压缩趋势，能量更为集中，而 Y 方向上的强度则呈现平顶分布。需要强调的是，粒子是沿着 X 方向穿过光敏区，形成的脉冲信号的幅值大小是由穿过路径中最大辐照度决定的，因此只需要保证 Y 方向光强呈平顶分布便可消除粒子从不同地方穿过带来的误差。



(a) XOY 平面强度分布图



(b) X 方向强度分布图



(c) Y 方向强度分布图

图 3-12 光敏区域光斑强度图

完成对照明光路的仿真设计后，进行了实际光路的搭建，并使用光束轮廓分析仪对整形后的激光光束在光敏区域的相对强度进行探测，其结果如图 3-13 所示。光敏区域在 XOY 平面的相对强度分布呈狭长的椭圆形状，与 ZEMAX 软件仿真结果相符。可以看出，光斑的大部分能量集中于粉色区域，粉色区域长约为 1.6mm，宽度约为 0.3mm，且粉色区域的光线相对强度分布较为均匀，满足光敏区域的设计指标要求。

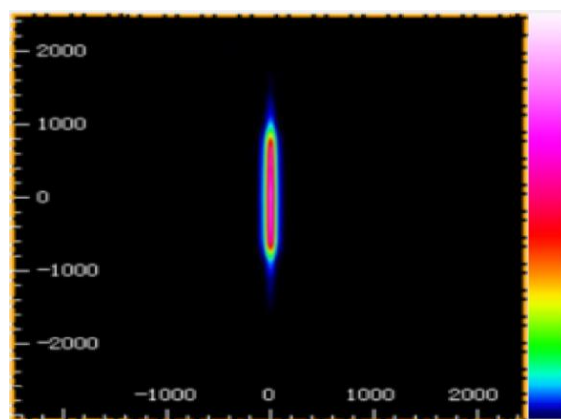


图 3-13 实际光敏区域的强度分布

3.2 散射光收集系统的设计

高效的散射光收集系统不仅要能够有效收集颗粒的散射光信号，还需要尽可能地减少光噪声的干扰。在本研究中，选择采用直角散射光收集方法来收集

粒子的散射光。根据先前的分析，直角散射光收集系统在减少光噪声方面表现出色，从而有助于提高信噪比。

尘埃粒子计数传感器中光电探测器是散射光收集系统的关键组成部分，其性能的优劣直接影响到传感器输出的信噪比，进而决定了仪器的灵敏度。它的工作原理是将光线和尘埃粒子之间的相互作用而产生的散射光信号转化为电信号，从而准确地检测和计数空气中微小的尘埃粒子。

目前广泛应用的光电探测器包括雪崩二极管（APD）、光电倍增管（PMT）、硅光电二极管等。APD 需要较高的电压来维持雪崩效应，因此电路复杂性较高。同时，APD 的性能受温度影响较大，有时候在雪崩过程中产生的脉冲不太稳定。PMT 通常相对较大，占用较多空间，同样需要高电压来工作，因此需要额外的电源和电路，PMT 对光污染和强光的敏感性较高，需要进行额外的防护。综合考虑后，本研究选用硅光电二极管作为光电探测器。硅光电二极管具有快速的响应时间，适用于高速光测量，它们在可见光和红外光范围内具有高的量子效率，相对于 APD 与 PMT，硅光电二极管的噪声水平较低。

硅光电二极管的主要性能参数有灵敏度、暗电流、典型上升时间、结电容等。灵敏度是硅光电二极管对入射光信号的响应能力，它通常以单位光功率下产生的电流来衡量。灵敏度越高，光电二极管对光的感应性越强，可以检测到更弱的光信号。暗电流是在没有入射光的情况下，硅光电二极管自身产生的电流。它通常与温度有关，随温度升高而增加。较低的暗电流表明光电二极管在无光条件下的噪声水平较低，有助于提高信噪比。上升时间是光电二极管从接收到光信号到其输出电流上升到峰值所需的时间，它决定了硅光电二极管对快速变化的光信号的响应能力。较短的上升时间表示光电二极管可以更快地检测到光信号的变化。结电容是硅光电二极管的关键参数之一，它与光电二极管的响应时间相关，较低的结电容可以提高光电二极管的响应速度。结电容也与硅光电二极管的高频特性有关。

除了上述参数之外，还有其他性能参数可以用来描述硅光电二极管的性能，如噪声等。这些参数通常由制造商提供，并在数据手册中详细说明。在选择硅光电二极管时，需要根据具体应用的要求来平衡这些性能参数，以确保最佳性能。根据以上对光电二极管各项指标的分析，并结合本研究的需求，拟选用北京敏光科技有限公司型号为 LSSPD-4.2-2P-08.26 的硅光电二极管，此款二极管

对可见光到红外光比较敏感。实物图如图 3-14 所示，性能参数见表 3.2 所示。



3-14 硅光电二极管实物图

表 3.2 硅光电二极管 LSSPD-3.2-2P-08.26 性能参数表

性能参数	性能指标
感光面积	4.2×4.2mm
光谱范围	400-1100nm
响应率($\lambda=808\text{nm}$)	0.55A/W
响应时间	6ns
暗电流	5pA
结电容	25pF
反向击穿电压	60V
饱和光功率	25mW

在传统的尘埃粒子计数传感器中，散射光的收集常常依赖于反射镜与光电探测器的协同作用。然而，在本研究中，观察到较大粒子由于重力作用容易在反射镜表面沉积，这可能降低反射镜的光反射效率并影响测量结果的准确性。此外，考虑到大粒子产生的散射光通量较大，因此，本研究决定不采用反射镜，而是仅利用光电探测器来收集散射光。光电探测器的具体布局详见图 3-15 所示。

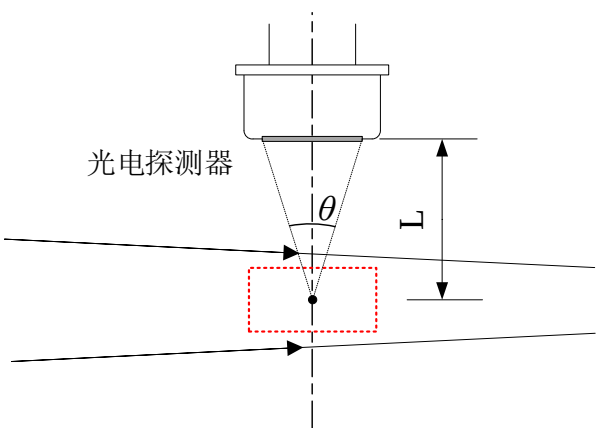


图 3-15 光电探测器的布局

基于只使用光电探测器来收集散射光的策略，需要仔细考虑探测器的感光面到光敏区中心的距离（L）。这一距离的设定是至关重要的，因为过长的距离会导致收集到的散射光通量不足，而过短则可能增大光噪声。在考虑探测器感光面积（ $4.2 \times 4.2 \text{mm}$ ）和实验验证的基础上，确定 L 为 6.5mm 是最佳选择，以达到最佳的散射光收集效率和噪声控制平衡。在这个参数设定下，可以推算出探测器和光敏区域中心所构成的圆锥顶角大约为 36° 。进一步依据式 3-6，可以估算出收集的立体角约为 0.31sr。

$$\alpha = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \quad (3-6)$$

其中， α 表示收集光通量的立体角， θ 表示探测器和光敏区域中心所构成的圆锥顶角。

3.3 气路系统的设计

尘埃粒子计数传感器中的气路系统是传感器设计的一个关键部分，它负责将空气样本从环境采集传输到传感器的检测区域，并确保粒子的有效检测。这个系统的设计对于传感器的性能和准确性同样重要。气路系统的设计需确保采样气流中的所有待测粒子被完整检测到，同时保持采样气流的流速稳定。腔体内部不能出现任何回流或涡流现象，因为这些流动异常会对传感器计数粒子的精度产生影响。气路系统是由进气口、腔体、出气口、抽气泵等组成，如图 3-16 所示。

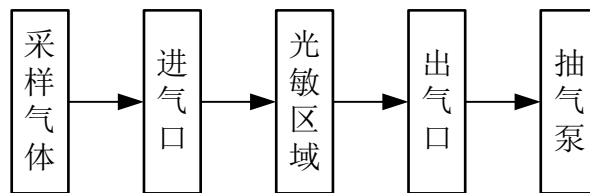


图 3-16 采样气路系统框图

当采样气体从进气口流入腔体时，会出现扩散现象，即气流的宽度逐渐增大。这种气流扩散可能导致尘埃粒子通过非光敏区的照明光束，使得测得的粒子信号强度相对于光敏区域中心略有减弱。这不仅增加了粒子信号分布的离散度，降低了传感器对粒径的分辨能力，还可能导致一定程度的噪声本底，从而降低传感器的信噪比。此外，采样气流在腔体内可能形成环流，导致尘埃粒子多次通过光敏区域。这种重复经过现象可能导致重复计数，进而影响传感器的

计数效率^[75]。

为防止上述问题，进气口的设计必须满足特定要求。首先，进气口的尺寸应当适中。如果尺寸过大，光敏区内的气流截面将超过入射光束的尺寸，无法确保所有待测粒子都被检测到。相反，若尺寸太小，进气口截面缩小，在相同采样流量下，气流速度将加快，这可能妨碍光电探测器的充分响应，从而降低传感器的采样浓度。其次，气流在通过进气口时应保持稳定，避免在腔内产生回流或涡流，确保粒子仅在光敏区域的强度平顶区域中穿过一次。

本研究进气口借鉴拉瓦尔喷管，将进气嘴设计为类似拉瓦尔喷管结构，将原喷嘴前端从内径通孔改为扁嘴形状，如图 3-17 所示。扁嘴截面为 $1.5 \times 5.0\text{mm}$ 的矩形加上左右直径 1.5mm 的半圆，截面平行于光敏区域 YOZ 平面。为确保采样气流中所有尘埃粒子均能通过光敏区而不被遗漏，进气口扁嘴的宽度需设置为略小于光敏区域 H 值的尺寸。同时，圆管与扁嘴之间平滑过渡，这样可以使气流从圆管平稳过渡到扁嘴，扁嘴做了加长设计，可使气流在出扁嘴之前更加平稳，另外，内表面粗糙度应尽量降低，以减小气流与管道内壁的摩擦，从而使气流始终保持层流状态。

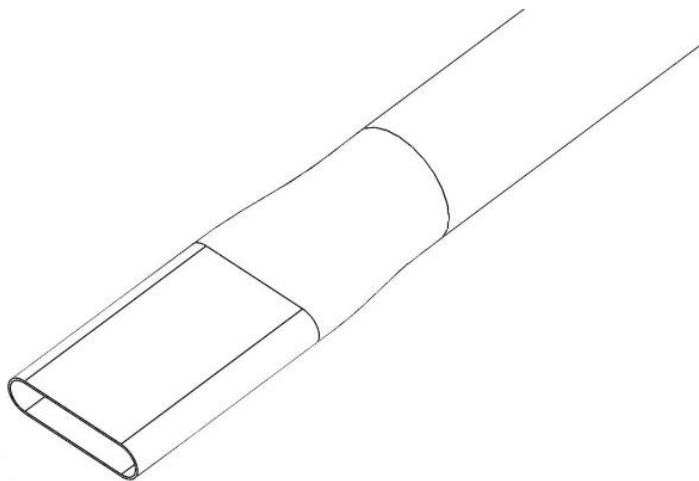


图 3-17 进气口形状

针对所设计的进气口，使用 ANSYS FLUENT 对其进行仿真分析，模拟的场景是从粒子浓度为 $400000\text{pcs}/\text{ft}^3$ 的空间中抽取 20000 颗 $5\mu\text{m}$ 的 PSL 粒子。构建了一个 10ft^3 的标准空间，并且在空间内均匀设置了 4000000 颗 $5\mu\text{m}$ 的 PSL 粒子，以 1CFM 的流量抽取空间中的粒子。从进气嘴喷出 20000 颗粒子后停止仿真，得到 20000 颗粒子在光敏区域 YOZ 平面累计散点图，如图 3-18 所示。

结果显示，粒子分布在光敏区域的横截面呈现出近似椭圆形状^[67]，长轴约为 6.5mm，短轴约为 1.5mm。大多数粒子集中在光敏区域的 YOZ 截面的强度平顶区域，呈现出中间密集而周围疏散的分布特征，符合设计要求。

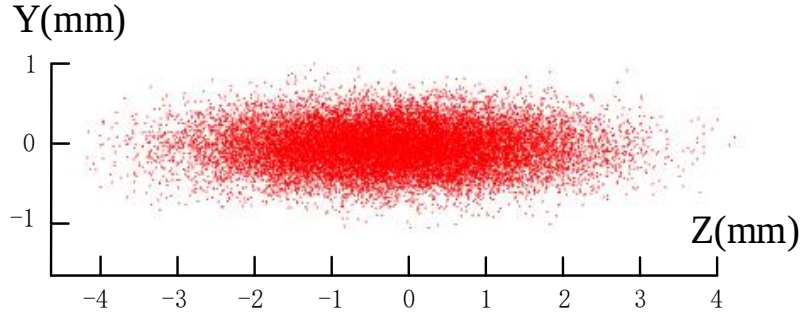


图 3-18 粒子在光敏区域 YOZ 平面散点图

3.4 信号处理系统的设计

3.4.1 光噪声的降低

对尘埃粒子计数传感器而言，光噪声对传感器的性能和测量精度有显著影响。光噪声主要来源于两个方面。首先，光噪声的一个重要来源是半导体激光器发射的激光光束周围的杂散光。其次，若不在传感器结构中设置光阑和光陷阱，主光束在腔体内部发生的多次反射也可能被散射光收集系统接收，从而导致光噪声的增加。这些光噪声会对散射光的收集产生显著影响，导致信噪比降低。因此，对光噪声的有效控制是提升粒子计数传感器精度和性能的关键环节，需要通过精细的设计和选择合适的光学组件来实现。

对于第一种光噪声，有效的降低策略是使用适当尺寸的光阑，如图 3-19 所展示。在激光主光束进入腔体之前，传感器的光噪声主要源于这些杂散光。因此，在激光主光束进入光敏区之前放置光阑是一个有效的解决方案。放置在此处的光阑尺寸需要严格把控。如果光阑过大，将无法充分过滤杂散光；反之，若光阑过小，则会导致主光束在光阑处产生衍射，衍射光若进入腔体并被光电探测器接收，不但不能降低光噪声，反而加剧光噪声问题^[76]。

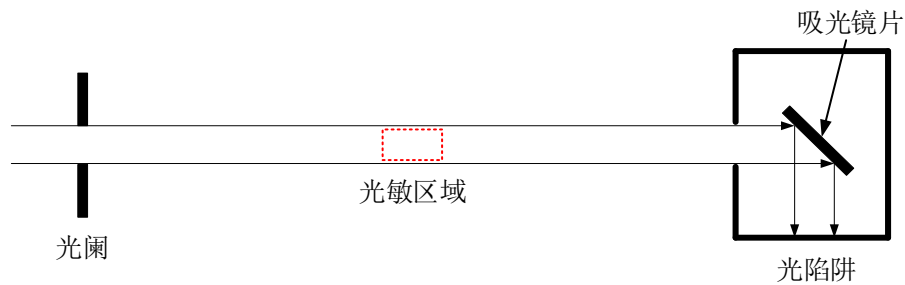


图 3-19 光阑与光陷阱结构示意图

当激光光束经过光阑，进入腔体，穿过光敏区并与粒子发生散射后，需要在主光束离开腔体之后的适当位置安置光陷阱。光陷阱的核心功能是吸收大部分未经散射的光束，防止它们在腔体内部反射形成光噪声。为使光陷阱尽可能多地吸收未散射的激光光束，进行了巧妙的设计，在光陷阱内安置了一个 45° 夹角的黑色吸光镜片，这种镜片能吸收绝大多数光线，未被吸收的光线会被反射至光陷阱内壁涂覆的吸光材料上做进一步吸光处理。

3.4.2 信号处理电路的设计

经过光电探测器转化后的信号是一个很弱的信号，需要经过信号处理电路的处理后才能进行粒子计数。信号处理电路包括光电探测器、IV 转换电路、放大电路等组成，其系统框图如图 3-20 所示。

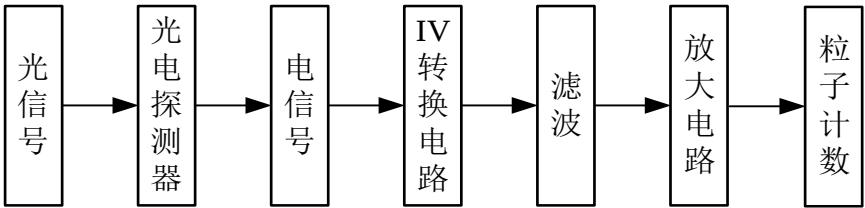


图 3-20 信号处理电路系统框图

粒子经过光敏区会产生散射效应，部分散射光会被光电探测器接收并转换为电信号，此时的电信号为电流信号，经过 IV 转换电路后，电流信号被转换为电压脉冲信号，再经过后续的滤波与放大电路将信号进一步放大，电压脉冲幅值便代表各个粒径粒子对应的电压值。最后，将电压值送入粒子计数系统进行比较计数，粒子计数系统会将不同粒径的粒子区分出来，从而获得他们的个数值^[77]。

IV 转换电路是整个信号处理电路中起始电路，它对后续电路的信号处理和

放大具有关键作用。光电二极管探测器主要有两种工作模式：光伏模式（Photo-Voltaic Mode）和光导模式（Photo-Conductive Mode），如图 3-21 所示。在光伏模式下，光电二极管在没有外部电压的情况下工作。当光照射到二极管上时，电子-空穴对被激发，并在内部电场的作用下分离，从而产生光生电流。在光导模式下，光电二极管在外加电压的作用下工作。光照射到器件时产生光生载流子，这些载流子在外加电压的作用下电导增加，从而产生光电流^[78]。相比于光伏模式，由于外加电压的增强作用，光导模式下的器件对光的响应更加灵敏。同时，通过改变外加电压，还可以调节器件的增益，从而调整响应度，因此，在本研究中的 IV 转换电路，光电探测器采用光导模式进行工作。

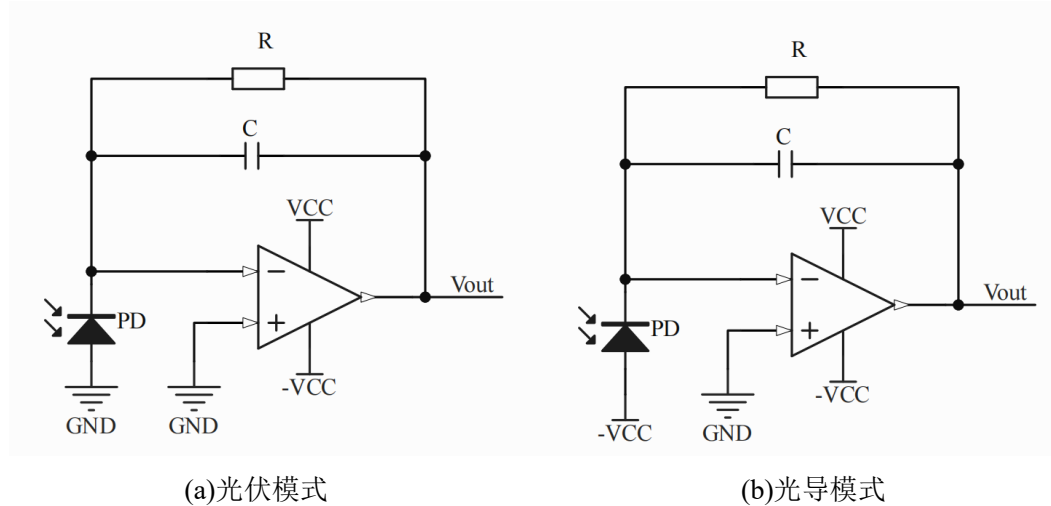


图 3-21 光电二极管的两种工作模式

通常情况下，由光电二极管直接采集的信号往往伴随着一定量的噪声，产生的噪声可能源于多种因素，包括激光光源的不稳定性、气路系统的振动、电源供电电路的波动，以及外界高频电磁干扰等。若这些噪声幅度过高，它们可能会干扰并掩盖由尘埃粒子产生的有效信号，从而影响传感器探测粒子的准确性。由于噪声频率与信号频率通常不同，本设计采用隔直和滤波电路。利用电容器对直流信号呈现无穷大阻抗的特性，以及对不同频率的交流信号阻抗随频率增高而减小的原理，选用电容滤波方法来消除噪声，这一做法能有效提升信噪比。隔直电路能够消除由于直流分量引起的信号漂移，而滤波电路则削弱高频噪声对信号的干扰，从而获得更准确的测量结果。

在 IV 转换后，得到的电压脉冲信号仍然较弱，因此需要进行放大处理。本研究中，采用一款高性能、低噪声和低失真的运算放大器 OPA1652 对放大电路

进行设计。其低噪声特性，可以在增强信号的同时保持信号质量；低总谐波失真（THD）保证了信号的清晰度和质量；较宽的带宽对于处理高速信号非常重要；能够提供接近电源电压范围的输出，使得功率利用更加高效。OPA1652 主要参数如表 3.3 所示。

表 3.3 OPA1652 性能参数

性能参数	性能指标
噪声	$4.0\mu\text{V}_{\text{pp}}(20\text{Hz}-20\text{kHz})$
温漂	$2\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
增益带宽	18MHz
开环增益	114dB
输入失调电流	10pA
输入失调电压	0.5mV

信号经 OPA1652 运算放大器进行第一级放大，然后再进行第二级放大。第二级放大电路为主放大环节，反馈电阻采用滑动变阻器设计，使得在光信号强度变化时，可以进行增益调节。电路原理图如图 3-22 所示。

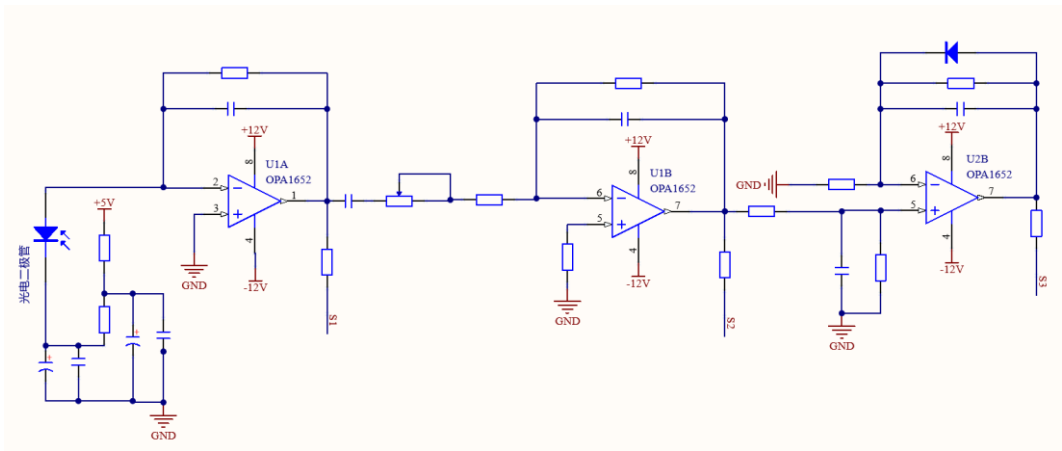


图 3-22 信号处理电路图

3.5 本章小结

本章深入探讨了尘埃粒子计数传感器的设计，涵盖了从照明系统到信号处理系统的多个关键部分。首先，在照明系统设计中，讨论了光束整形的方案、光敏区域的设计、光源的选择以及光束整形的原理和优化仿真，确保传感器能够有效照明。接下来，在散射光收集系统设计中，着重于光电探测器的选择和布局。气路系统的设计则关注于确保采样气流有效通过检测区域，包括空气流

动路径的设计和流速控制。最后，在信号处理系统的设计部分，进行了光噪声的消除处理，并探讨了运算放大器的选择和信号处理电路的设计。整体而言，这一章全面而详细地阐述了尘埃粒子计数传感器设计的各个方面，提供了一个高效、精确的粒子计数解决方案。

第4章 大粒径尘埃粒子计数传感器的实验与分析

基于前三章理论分析、仿真计算与建模分析，完成了大粒径尘埃粒子计数传感器的设计，并制作出传感器样机。本章还需要通过实验验证和数据分析来确定传感器的性能。实验选用德国 PALAS 公司的 Promo2000 型粒径谱仪作为标准仪器，使用标准 PSL 粒子作为采样标本，对本文设计的尘埃粒子计数传感器与标准仪器进行实验对比。

4.1 传感器的测试系统搭建

传感器的测试系统主要由颗粒发生装置、混合罐、粒径谱仪、传感器样机、数据采集装置等组成，其结构框图如图 4-1。

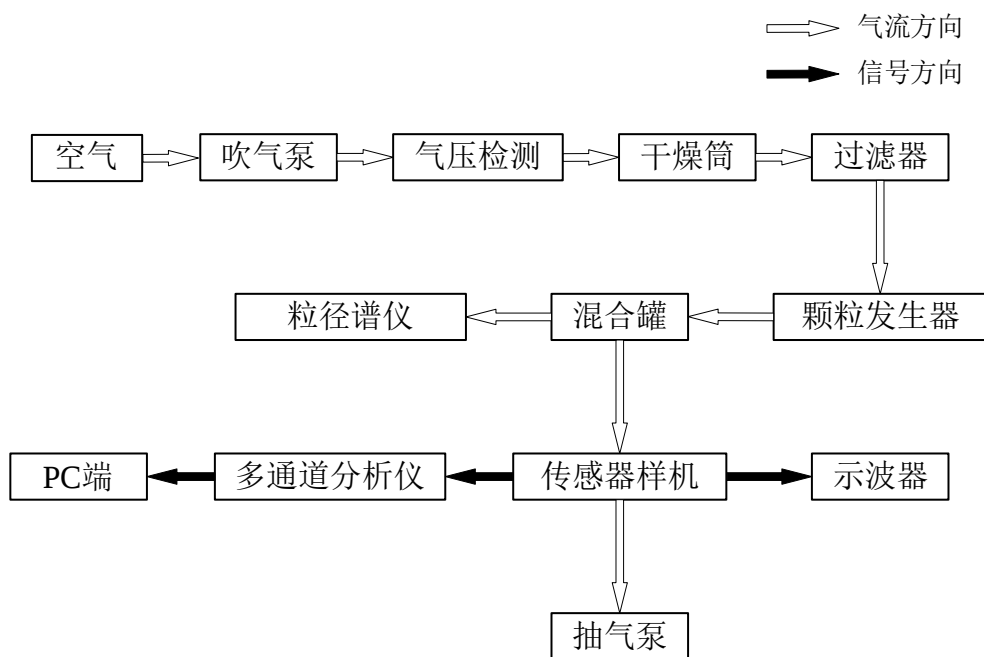


图 4-1 传感器测试系统结构框图

（1）颗粒发生器

颗粒发生装置采用高精度可调颗粒发生器，这种设备在空气质量研究、环境监测、滤材测试和科学研究等领域具有重要应用。它的能力在于可以调节颗粒的产生率，能够精确调节颗粒的浓度，为各种应用提供了可靠和精确的测试条件，这对于模拟特定环境条件和进行精密实验至关重要。

本实验中，采用德国 PALAS 公司的颗粒发生器 RBG professional，如图 4-

2。其工作原理如图 4-3 所示，在实验过程中，所需粉末被先行填充进圆筒形储藏器内，并进行压实，粉末的输送依赖于活塞的精准运动控制，以确保给料速率的恒定。随后，旋转的毛刷将储藏器底部的粉末顺势带至顶部，此时，一定流速的空气将粉末有效吹出。因此，通过调整活塞的进给速度、毛刷的转速及空气流量，便可实现对粉尘浓度的精确控制。



图 4-2 PALAS 高精度可调颗粒发生器

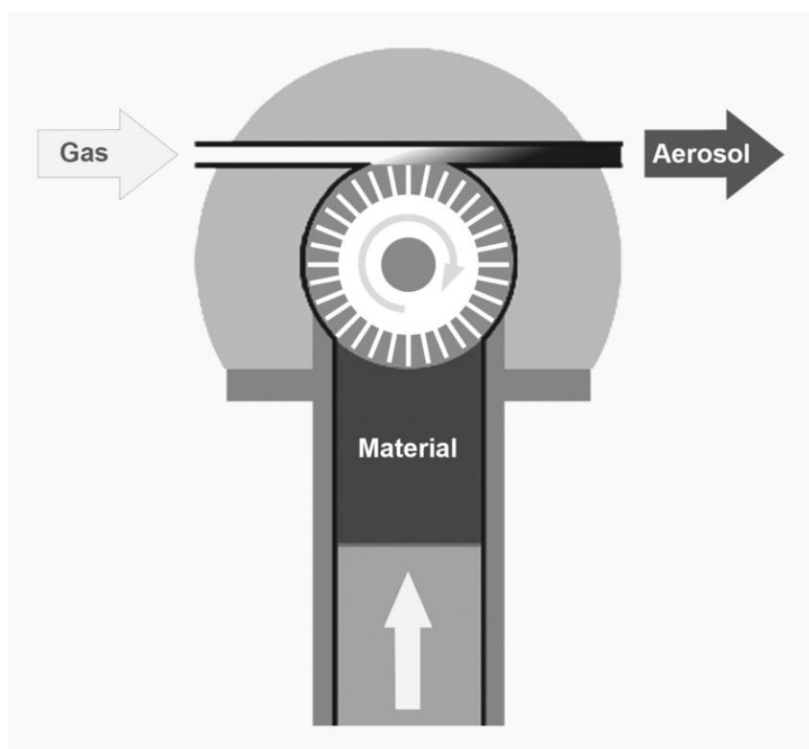


图 4-3 颗粒发生器工作原理图^[79]

PALAS 公司的高精度可调颗粒发生器 RBG professional 最大的优势在于可处理任何非粘性粉尘，具有可处理超宽粒径范围粒子的能力，为 $0.1-200\mu\text{m}$ ；该设备工作的最大质量流量为 800g/h （假设压实密度为 1g/cm^3 ）。

（2）粒径谱仪

本实验采用德国 PALAS 公司的粒径谱仪 Promo2000，如图 4-4 所示。Promo2000 是一款单颗粒物光散射法粒径谱仪，用于粒度分析和浓度测定，可以配备任意一台 PALAS 采样传感器，并且可以根据需要配备不同的采样流量。这些传感器可实现气体中颗粒浓度范围为 $1-10^6$ 颗/ cm^3 ，具备从 $0.2\mu\text{m}$ 开始计数的高效检测能力，检测范围为 $0.2-100\mu\text{m}$ ，其独特功能是在一台设备中支持四个测量范围： $0.2\mu\text{m}-10\mu\text{m}$ ， $0.3\mu\text{m}-17\mu\text{m}$ ， $0.6\mu\text{m}-40\mu\text{m}$ ， $2\mu\text{m}-100\mu\text{m}$ 。每个测量范围内可进行多达 128 个尺寸通道的测量。另外，Promo2000 配备一个新的 20MHz 快速信号处理处理器，可以分析每个粒子信号的过程。这样就可以在光散射测量技术中识别单信号上的巧合事件，并对其进行校正，从而获得更高的测量精度。



图 4-4 Promo2000 粒径谱仪

（3）多通道脉冲分析仪

多通道脉冲分析仪（MCA）是一种高度特化的测试设备，其功能相当于数个单道分析器的集合体。它将测量范围内的可测电压平均分成多个通道，例如 512 道、1024 道、2048 道等，以满足不同的测量需求。这种设计允许各通道同时进行测量，精确探测位于各窄道宽范围内的脉冲强度。

MCA 的应用领域非常广泛，包括电子信号分析、脉冲信号分析、核物理信号分析和光谱分析等。它还被用于各类传感器的校准，以及构建多种分析型测试设备。特别在脉冲计数分析领域，MCA 是关键的测试仪器之一。在本实验中，使用了 MCA8000D-PA 型号的多通道脉冲分析仪，以采集和计数传感器输出的电压信号，如图 4-5 所示。



图 4-5 MCA8000D-PA 多通道脉冲分析仪

在本研究中，搭建了一套完整的实验装置，如图4-6所示。该装置的运行原理是通过吹气泵将空气输送至颗粒发生器内。在进入颗粒发生器之前，空气首先通过干燥筒和过滤器进行净化处理，以确保纯净无杂质的空气流。净化后的空气载着颗粒发生器产生的标准粒子进入混合罐，该混合罐起到模拟粉尘环境的作用。在混合罐内，空气流和粒子的重力共同促使粒子充分扩散，确保颗粒在混合罐中的均匀性。该混合罐高度为 170cm，直径为 30cm，并设有三个气孔：侧面的气孔用于泄压，而底部的两个孔则负责输出采样气流。这些采样气流一部分被导向粒径谱仪的采样传感器，另一部分则输送至研制的传感器样机。

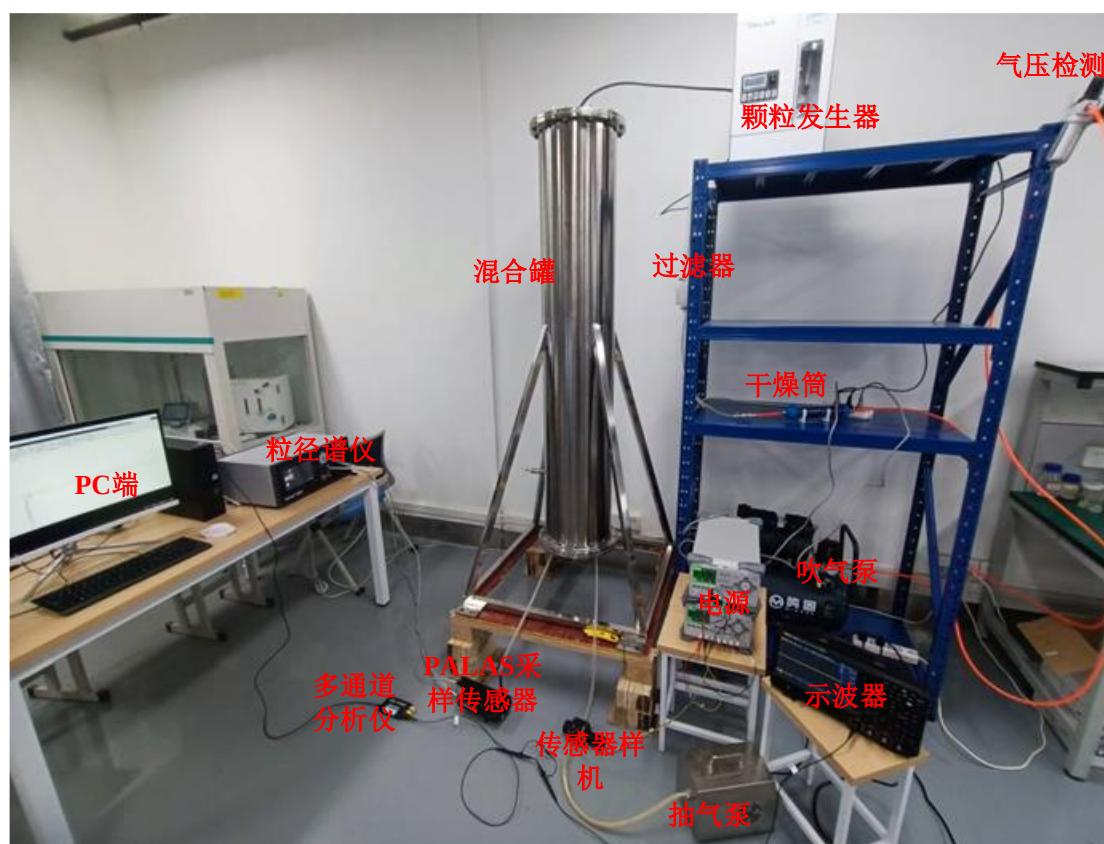


图 4-6 测试系统实物图

采样传感器从混合罐中收集粒子样本并输送至粒径谱仪进行分析，以获取粒径与颗粒数量之间的关系数据。同时，传感器样机所采集的相应数据通过示波器和多通道分析仪进行收集。多通道分析仪专注于收集传感器输出的电压信号，并执行相应的计数工作。在计算机端，对多通道分析仪收集到的数据进行深入处理，从而得到粒子计数传感器的电压-数量分布曲线。通过这套精心设计的实验装置和流程，能够有效地收集、分析粒子数据。

4.2 传感器的标定实验

作为测量工具，确立电压信号与粒子粒径之间的关系是使用前的关键步骤。虽然理论上可以通过 Mie 散射理论来推导粒径与电压之间的关系，但实际应用中，由于存在各种误差和电路响应的因素，单纯依靠理论往往难以获得精确的粒径-电压对应关系。因此，实验标定成为确定粒径与电压关系的最常用且最有效的方法。通过实验标定，可以准确地校正理论计算与实际测量之间的偏差，从而确保测量结果的准确性和可靠性。

粒子的散射光信号可以通过示波器直观地展示，从而便于分析传感器的性能。在示波器上，电压脉冲信号的幅度与颗粒的粒径相对应，而信号的宽度则反映了粒子穿过光敏区的时间长度。本实验在传感器标定过程中使用了标准 PSL 粒子，这些粒子具有统一的折射率 $m=1.585$ ，并且粒径均匀。在洁净度级别测量中，采用的是“等效直径”的概念。这一方法为粒子尺寸的测量提供了一个通用且准确的标准，确保了测量结果的一致性和可比性。在标准 ISO 21501-4 的框架内，传感器的标定过程设定了严格的质量控制标准。标准要求粒子直径要保持高度的一致性，变异系数控制在 2.5% 以内。在本研究中，采用的标准 PSL 粒子符合上述严格要求。

在本研究中，尘埃粒子计数传感器被配置以监测五个不同粒径通道的粒子，分别为 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ ，同时设定空气采样流量为 28.3L/min 。使用传感器来测量这些不同尺寸的 PSL 粒子，并借助示波器捕捉相应的粒子电压脉冲信号，如图 4-7 所示。实验数据显示，随着粒径的增大，电压脉冲信号的幅度相应增加，这与第二章的理论分析是完全吻合的。而且脉冲信号的持续时间也略有延长，这种现象的成因在于，较大的粒子在通过光敏区域

时，由于其尺寸较大，其穿越路径长度相应增加，即等于光敏区宽度与粒子直径的总和。因此，较大粒子穿越光敏区所需时间相对较长。

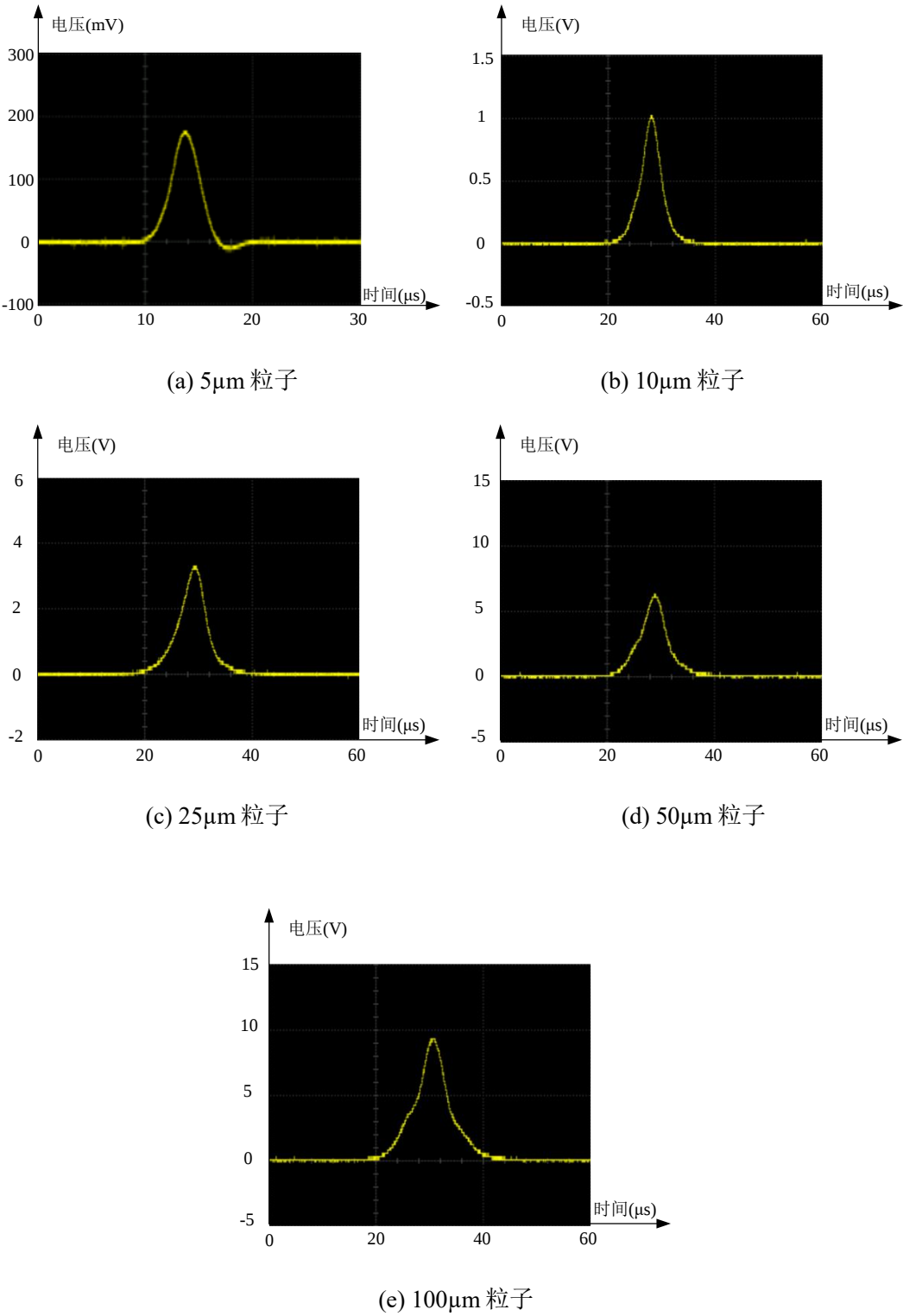


图 4-7 五种粒径的 PSL 粒子脉冲信号

表 4.1 展示了五种不同粒径 PSL 粒子的电压幅值数据，涵盖了粒径为 5 μm 、10 μm 、25 μm 、50 μm 和 100 μm 的粒子。

表 4.1 五种粒子电压幅值

粒径(μm)	5	10	25	50	100
电压(V)	0.18	1	3.5	6.5	9.5

为了深入理解粒径与电压之间的关系，本研究采用了指数关联（ExpAssoc）模型对粒径-电压曲线进行拟合。该模型的方程形式为：

$$Y = Y_0 + A_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{t_1}}\right) + A_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{t_2}}\right) \quad (4-1)$$

经过拟合，得到的参数值分别为 $Y_0 = -0.88$ ， $A_1 = -6.25$ ， $t_1 = 56.28$ ， $A_2 = -6.25$ ， $t_2 = 56.28$ ，相应的拟合曲线详见图 4-8。该曲线与粒子的 Mie 散射特性是吻合的，粒径越大，电压幅值越大，但电压幅值的增长会变缓。

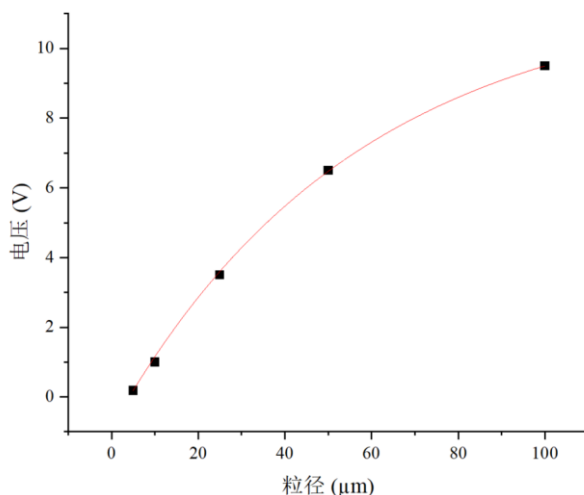


图 4-8 粒径-电压拟合曲线

4.3 传感器的性能测试

粒子计数传感器的计数效率和最大检测浓度是衡量其性能的两个关键参数，它们共同决定了仪器的实际应用范围和精度。计数效率则描述了传感器在一定浓度范围内，对粒子进行计数时的准确度。高计数效率意味着对于通过光敏区的粒子，仪器能够以更高的概率进行正确计数。最大检测浓度指的是传感器能够准确计数的最大粒子浓度值，超过这个值，由于粒子过密导致的信号重叠，将会降低计数的准确性和可靠性。因此，将从这两个方面对自研传感器进行性能测试。

4.3.1 计数效率测试

为了准确评估传感器的计数效率，本研究对粒径谱仪与自研传感器进行了一系列的对比实验。为此，实验中选择了五种不同规格的 PSL 粒子作为测试样品，其尺寸分别为 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 。各种粒子均以不同的浓度配置，以便于系统地评估传感器对不同尺寸、不同浓度粒子的计数能力，从而验证自研传感器的性能指标。

实验过程中，为了便于数据的记录，设粒径谱仪为标准机 A，自研传感器为样机 B，两者同步抽取混合罐内含有 PSL 粉尘的气体样本。粒径谱仪采样传感器设定的采样流量为 5L/min ，而自研粒子计数传感器的设计采样流量为 28.3L/min 。这两个流量值均通过精密抽气泵实现严格控制，其中抽气泵具备流量反馈调节功能，确保采样流量的精准和稳定。为保证有效的粉尘采样和流动性能，颗粒发生器的输出流量被设定为 35L/min ，略高于两个传感器采样流量之和。这一措施旨在保证足够的粉尘气体供给，避免由于流量不足而影响测试准确性。超出采样需求的多余气流则通过混合罐的排气孔排出，从而确保了整个测试系统的流动平衡和有效性。

表 4-2 PSL 粒子计数效率实验数据(单位：颗/L)

实验批次		1	2	3	4	5
5μm	A	1923	3994	7391	11125	15550
	B	1851	3832	6696	10254	14564
	计数误差	3.74%	4.06%	5.34%	7.83%	6.34%
10μm	A	2663	5084	8337	10205	12143
	B	2544	4907	7838	9925	11499
	计数误差	4.47%	3.48%	5.99%	2.74%	5.30%
25μm	A	2391	4642	7368	10294	13845
	B	2298	4404	7135	9742	13223
	计数误差	3.89%	5.13%	3.16%	5.36%	4.49%
50μm	A	2026	4398	6815	9213	12903
	B	1962	4265	6375	8818	12131
	计数误差	3.16%	3.03%	6.46%	5.98%	5.98%
100μm	A	2413	4171	6240	8722	10632
	B	2352	4007	5947	8260	10265
	计数误差	2.52%	3.93%	4.69%	5.28%	3.45%

使用粒径谱仪与自研传感器同时采样，考虑到两种设备采样流量的差异，直接对比所得粒子数目并不科学，因此，将所有实验数据统一转换为颗粒浓度，单位采用颗/L，以便于进行有效比较。对比实验数据如表 4-2 所示，从表中可以看出，在不同浓度下，五种标准 PSL 粒子（尺寸分别为 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ ）的计数效率误差均在 7.83%以内。实验结果表明，所设计的传感器在检测大粒径尘埃粒子方面表现出良好的性能和较高的计数效率。

4.3.2 最大检测浓度测试

在对传感器的最大检测浓度进行验证时，为了节省成本，本研究选用了体积较小的有机玻璃混合罐，如图 4-9 所示。标准 PSL 粒子的价格很高，使用体积较小的有机玻璃混合罐进行实验，仅需较少数量的 PSL 粒子即可有效模拟粉尘环境，从而在保证实验效果的同时，实现了成本的有效控制。



图 4-9 有机玻璃混合罐

该有机玻璃混合罐的罐身高度为 420mm，直径为 80mm，壁厚为 5mm。为确保罐体的密封性，罐身的两端采用铝制端盖进行密封，并且内置密封橡胶圈。在铝盖的中间位置，特意设置了开孔并安装了宝塔接头，以方便连接气管。此外，为了实现有效的气体泄压，在出气口周围均匀设置了三个小孔。

为了精确测定自研传感器的最大检测浓度，实验中有有机玻璃混合罐的上端通过橡胶管与颗粒发生器相连，其下端与自研传感器相连。设定传感器的采样流量为 28.3L/min ，而颗粒发生器的输出流量调节至 30L/min ，多余的气流通过

罐底的三个泄压孔排出。传感器输出的信号分别送至示波器和多通道分析仪进行记录与分析。

实验采用 $5\mu\text{m}$ 标准 PSL 粒子，将 PSL 粉尘置于颗粒发生器中并启动测试系统，待系统稳定运行。逐渐增加颗粒发生器的给料速度，同时仔细观察并分析示波器的信号变化。当示波器显示的信号占空比接近 $1/10$ 时，此刻颗粒发生器产生的粉尘浓度即为所测传感器的最大检测浓度。

在该浓度条件下，使用自研传感器进行一分钟的采样，并利用多通道分析仪对脉冲信号进行计数。实验结果显示，在一分钟内，多通道分析仪记录到大于 180mV 的脉冲共 664389 个。据此计算，可得出自研传感器的最大检测浓度约为 23500 颗/L。

4.4 本章小结

本章专注于大粒径尘埃粒子计数传感器的实验与分析，详细描述了传感器测试系统的搭建、传感器的标定实验和性能测试。首先，搭建了一个测试系统，用于评估传感器的性能。紧接着，在标定实验部分，详细介绍了标定过程，并确定了粒径大小与电压脉冲的关系。随后，聚焦于传感器的性能测试，得到传感器的最大检测浓度约为 23500 颗/L。通过与粒径谱仪的对比实验，测试了传感器的计数效率，结果显示计数效率误差均小于 7.83%，展现了传感器的高准确性和有效性。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

在本论文中，对大粒径尘埃粒子计数传感器进行了全面的研究。本文的主要工作包括以下几个方面：

(1) 介绍了粒子的基本概念以及洁净室技术的重要性和发展历史，强调了在许多高新领域对洁净室空气质量控制的重要性。随后探讨了粒子检测的多种方法及其适用性，并评述了国内外在该领域的研究现状，突出了大粒径尘埃粒子计数传感器研究的重要性和迫切性。

(2) 深入探讨了粒子计数传感器的理论基础，从传感器的工作原理开始，详细介绍了粒子的 Mie 散射理论。重点对 Mie 散射光功率进行了数值模拟，探讨了散射强度函数、散射光强分布与粒子直径的关系。此外，详细讨论了散射光通量，包括散射光通量计算的数学模型，以及对前向散射和直角散射光路系统的分析。

(3) 全面阐述了粒子计数传感器的设计过程。在照明光路系统设计方面，详细讨论了光敏区域的设计，照明光源的选择，以及照明光束整形的原理和实现方法，并通过 ZEMAX 软件设计并优化出一种适用于大粒径尘埃粒子计数传感器的照明光路。在散射光收集系统设计中，对光电探测器的选择和布局进行了详细阐述。在采样气路系统设计方面，对进气口进行了设计，并对气路进行了仿真实验，以确保样本气体有效通过传感器的检测区域。对于信号处理系统设计部分，对光噪声进行了消除处理，并对信号处理电路进行了设计，整个电路包括 IV 转换、放大和滤波三个部分。

(4) 详细讨论了传感器的实验研究，包括测试系统的搭建以及实验结果的分析。在传感器测试系统部分，详细描述了实验装置的搭建和测试流程，为获取准确可靠的数据奠定了基础。在实验结果及分析方面，深入探讨了传感器的粒径与电压的标定曲线、最大检测浓度以及计数效率等关键参数。通过与商用粒径谱仪进行测试对比，五种规格粒子（ $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ ）的计数偏差均保持在 7.83% 以内。浓度测试实验结果表明，传感器的最大检测

浓度约为 23500 颗/L。

5.2 展望

尽管本研究已取得了一定的成果，但在粒子计数传感器的设计和实验方面仍有进一步提升的空间。未来的工作可以集中在以下几个方向：

首先，进一步优化照明系统和散射光收集系统，以应对更广泛的粒径范围和不同的环境条件。其次，开发更先进的信号处理算法，以提高传感器对粒子检测的灵敏度和准确性。此外，探索新材料和技术以降低制造成本，增加传感器的耐用性和环境适应性也是未来研究的重要方向。最后，将传感器与其他传感技术相结合，如将其集成到无线传感网络中，可为洁净室环境监控提供更为全面和高效的解决方案。

通过不断的技术创新和改进，未来的尘埃粒子计数传感器将在保障洁净室环境质量、促进科学研究以及推动相关产业发展等方面发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 姚红兵,钱辰.基于 STM32 的 100L/min 尘埃粒子计数器控制系统设计[J]. 测控技术, 2017, 36(08):70-73+77.
- [2] Franze P, Schneider G, Kaskel S. Wafer Container Monitoring Concerning Airborne Molecular Contaminations along a 300 mm Power Semiconductor Production Flow[J]. Solid State Phenomena, 2021, 314:41-46.
- [3] 李笑蕾,倪明.医药洁净室及相关受控环境标准研究[J]. 中国药事, 2020, 34(10):1165-1170.
- [4] Bharti A, Kundan S B. Pharma pollution: Challenges and future aspects[J]. AIP Conference Proceedings, 2023, 2558(01):1-6.
- [5] Frank M, Seppe T. Hygienic design of food factories[M]. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 2023, 625-691.
- [6] 杨洋.多种回风方式对孔板送风洁净室颗粒物浓度分布影响研究[D]. 天津商业大学, 2022.
- [7] 钱辰.基于 STM32 的尘埃粒子计数器控制系统设计[D]. 江苏大学, 2017.
- [8] 赵燕君,田霖,仪忠勋,等.洁净室及相关受控环境的悬浮粒子检测能力验证研究[J]. 中国医药工业杂志, 2023, 54(12):1794-1798.
- [9] 左晨泽.基于单颗粒光散射法的气溶胶颗粒粒径测量的理论与实验研究[D]. 天津大学, 2018.
- [10] Mitchell J P, Nagel M W. Time-of-flight aerodynamic particle size analyzers: their use and limitations for the evaluation of medical aerosols[J]. Aerosol Med, 1999, 12(04):217-240.
- [11] 杨书申,邵龙义,龚铁强,等.大气颗粒物浓度检测技术及其发展[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2005, (01):36-39.
- [12] Hinds W C. Aerosol Technology-properties, behavior, and measurement of airborne particles[J]. Journal of Aerosol Science, 1982, 31(9).
- [13] 解淑艳,王晓彦,吴迺名,等.环境空气中 PM_{2.5} 自动监测方法比较及应用[J]. 中国环境监测, 2013, 29(02):150-155.
- [14] Li N, Liu Z, Yang Y B, et al. Method for continuous measurement of personal

- exposure to fine particulate matter[J]. Journal of Hygiene Research, 2017, 46(02):303-308.
- [15] 张玉钧,刘文清,郑朝晖,等.大气中可吸入粉尘(PM₁₀) β 射线法测量的理论与数据处理[J]. 量子电子学报, 2001(01):75-81.
- [16] Jin B L, Shik S P. Evaluation of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations from Online Light Scattering Dust Monitors Using Gravimetric and Beta-ray Absorption Methods[J]. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 2019, 35(03):357-369.
- [17] 戚淑芬,王国栋.基于电荷感应原理的粉尘含量在线检测仪设计[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(05):526-530.
- [18] Zheng K, Wang J G, Liu J X. Research on Dust Concentration Measurement Technique and Experiment Based on Charge Induction[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 333:370-373.
- [19] 孙健,白敏冬,毛程奇,等.单极性带电粒子浓度测试方法的研究[J]. 物理学报, 2007(07):3972-3976.
- [20] 尤建新.基于激光散射原理的粉尘在线监测仪器关键技术研究[D]. 天津大学, 2017.
- [21] Ray S H. Determination of Concentration and Surface Area of Powders in Dispersions using Light Transmission[J]. Transactions of The Indian Ceramic Society, 2014, 43(06):160-165.
- [22] 陈益亮.激光干涉粒子成像测量技术的理论与实验研究[D]. 天津大学, 2010.
- [23] Lacagnina G, Grizzi S, Falchi M, et al. Simultaneous size and velocity measurements of cavitating microbubbles using interferometric laser imaging[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(04):1153-1167.
- [24] 潘林超.颗粒散射光能分布的计算与探测方法改进[D]. 天津大学, 2013.
- [25] Zhong Y Y, Yu X Z. Study on Detection of Environmental Air Pollution by Differential Optical Absorption Spectrometry[J]. Advanced Materials Research, 2012, 610:1199-1202.
- [26] 季焱.中红外 LED 光声光谱法与微量乙烷气体测量[D]. 武汉理工大学, 2018.
- [27] Youthapolnavee A, Chewpraditkul W, Chaisawadi A. A construction of particle

- counter by using laser light scattering[C]. 2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chonburi, Thailand, 2009, 452-455.
- [28] 陈刚.光散射法测量颗粒尺寸和浓度的实验研究[D]. 西安电子科技大学, 2007.
- [29] 赵曜.高灵敏度尘埃粒子计数传感器的研制[D]. 南京理工大学, 2021.
- [30] 蒋凡伟.在线式激光矿浆粒度仪的研究与开发[D]. 华北理工大学, 2015.
- [31] Kerker M. Light Scattering Instrumentation for Aerosol Studies: An Historical Overview[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1997, 27(04):522-540.
- [32] 胡澄.基于 MIE 散射理论的粉尘浓度测量研究[D]. 苏州大学, 2007.
- [33] Dobson P J. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. *Physics Bulletin*, 2015.
- [34] Renard J B, Dulac F, Berthet G, et al. LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles—Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(4): 1721-1742.
- [35] Nagy A, Szymanski W W, Gál P, et al. Numerical and experimental study of the performance of the dual wavelength optical particle spectrometer (DWOPS)[J]. *Journal of aerosol science*, 2007, 38(4): 467-478.
- [36] Njalsson T, Novosselov I. Design and optimization of a compact low-cost optical particle sizer[J]. *Journal of aerosol science*, 2018, 119: 1-12.
- [37] 许亮.基于 Monte Carlo 方法的激光粒子计数器信号仿真与粒径分辨率优化研究[D]. 南京理工大学, 2017.
- [38] 宋业辉,王君山,刘俊杰,等.尘埃粒子计数器的性能试验方法[J]. *洁净与空调技术*, 2005, (03):53-56.
- [39] J-73 型灰尘粒子计数器[J]. *建筑技术通讯(暖通空调)*, 1975, (02):1-8.
- [40] 黄惠杰,邹海兴.白光尘埃粒子计数器光学系统的改进[J]. *光学仪器*, 1994, (02):10-14.
- [41] 朱晓苏,谭锟.新型光电粒子计数器及其测量[J]. *环境保护*, 1992, (05):37-39.
- [42] 杨淑连,荣玮.0.3 μm 激光尘埃粒子计数传感器设计[J]. *光电子激光*, 1996, (02):85-88+118.

- [43] 杨娟, 顾芳, 卞保民, 等. 尘埃粒子计数器信号传输特性研究[J]. 激光技术, 2008, 32(3): 255-258.
- [44] 彭刚, 卞保民, 陆建. 激光尘埃粒子计数器信号幅度概率密度函数[J]. 激光技术, 2010, 34(1): 63.
- [45] Liu Z, Zhao H, Zhang R, et al. Design and Optimization of Light Trap Based on Angular Scattering Particle Counter[C]//2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE, 2021: 379-982.
- [46] 金惠琴. 100L / min 大流量激光尘埃粒子计数器. 江苏省, 苏州苏净仪器自控设备有限公司, 2011-12-01.
- [47] 杨孟广. 50LPM 激光尘埃粒子技术传感器的研制[D]. 南京理工大学, 2012.
- [48] 刘尧. 28.3LPM 高灵敏度尘埃粒子计数传感器的研制[D]. 南京理工大学, 2014.
- [49] 纪运景, 卞保民, 贺安之. 不同光源对激光尘埃粒子计数器性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2004, (03): 264-268.
- [50] 闫振纲. 光散射信号统计规律及在尘埃粒子计数中的应用[D]. 南京理工大学, 2013.
- [51] 孙昕. 基于 Mie 散射理论测量微小球粒粒径的数值模拟及实验研究[D]. 天津大学, 2004.
- [52] 钟现奎. 基于光散射法的大气气溶胶粒径测量关键技术的研究[D]. 天津大学, 2012.
- [53] 鲁晨阳, 张佩, 王光辉等. 鞘流技术在气溶胶颗粒物光学传感器上的应用研究[J]. 中国激光, 2019, 46(01): 210-218.
- [54] 梁春雷, 黄惠杰, 任冰强, 等. 激光尘埃粒子计数器微型光学传感器的研究[J]. 光学学报, 2005, (09): 110-114.
- [55] 李学彬, 李超, 徐青山, 等. 获取多波长气溶胶光学特性的方法研究[J]. 激光与红外, 2008, (03): 252-254.
- [56] 杨娟, 彭刚, 顾芳, 等. 激光尘埃粒子计数传感器性能优化设计[J]. 仪表技术与传感器, 2008, (04): 59-61.
- [57] 沈翔. 基于光散射法的组的高浓度粉尘仪研制[D]. 南京理工大学, 2018.
- [58] 吕昌贵, 江静枝. 一种具有复合多光敏区结构的高灵敏度粉尘浓度检测方法[P].

- 中国专利:CN108956402B, 2020-08-11.
- [59] 徐婷婷.基于自适应测量功能粉尘浓度测量仪的设计与实现[D]. 苏州大学, 2012.
- [60] Park D, An M, Hwang J. Development and performance test of a unipolar diffusion charger for real-time measurements of submicron aerosol particles having a log-normal size distribution[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38(04):420-430.
- [61] 韩鹏.基于 Mie 散射理论的亚微米级颗粒粒径测量方法研究[D]. 华南师范大学, 2001.
- [62] 张坤明.信息光学[M]. 华南理工大学出版社, 1996.
- [63] 张青.火灾烟颗粒与非火灾干扰颗粒光散射特性的研究[D]. 合肥工业大学, 2010.
- [64] 余来华,刘俊杰,韩晓霞,等.高准确度光散射法细颗粒物监测仪的研制[J]. *仪表技术与传感器*, 2022, (05):42-50.
- [65] 刘凤磊.光散射颗粒计数传感器光敏区的光束整形设计[D]. 南京理工大学, 2013.
- [66] 陈业盛.28.3LPM 尘埃粒子计数传感器的设计与实验研究[D]. 安徽工程大学, 2023.
- [67] 邹婷.粒子计数传感器光散射信号幅度分布的理论与实验研究[D]. 南京理工大学, 2015.
- [68] 张红彬.基于散射光的悬浮颗粒测试技术研究[D]. 西南科技大学, 2016.
- [69] Jean-Baptiste B, Claire T, Jean-Luc M, et al. Small-angle light scattering by airborne particulates: environment S.A. Continuous particulate monitor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(08):1-10
- [70] 史光远.基于非球面柱透镜的高斯光束整形[D]. 天津理工大学, 2014.
- [71] 舒存铭,唐泽斌,谢玉林.高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计与优化[J]. *黄冈师范学院学报*, 2023, 43(03):54-57.
- [72] 祝连庆,刘超,娄小平,等.一种基于渐变折射率透镜的流式细胞仪光束整形系统[P]. 中国专利:CN106646896A, 2017-05-10.
- [73] 朱天凤,徐彬,袁山山.一款激光雷达的光学系统设计和仿真[J]. *应用激光*, 2023, 43(07):123-128.

- [74] 马玉洁.大气颗粒物散射光信号采集系统的设计[D].哈尔滨工业大学,2015.
- [75] 彭刚.悬浮颗粒散射光脉冲信号计数分布统计规律及分形特征[D]. 南京理工大学, 2010.
- [76] 朱和军.多点激光尘埃粒子计数器系统的设计与实现[D]. 南京理工大学, 2017.
- [77] 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(05):82-87.
- [78] 于跃.APD 阵列探测器读出电路的设计与实现[D]. 长春理工大学, 2020.
- [79] <https://palas.com.cn/product/rbg-professional/>

攻读学位期间发表的学术论文与成果目录

- [1] Zheng Y, **Wu G**, Chen Y, et al. Design of a high counting efficiency sensor for 1.0 cubic feet per minute laser particle counter[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(9)(SCI 收录)
- [2] Zheng Yanchang, **Wu Guo**, Zhang Zhen, Lu Yuelin, Chen Yu. Hedge trimmer with adjustable pruning shape for seedlings[P],2022-09.

致谢

时光恰似白驹过隙，转瞬间，三年的硕士生涯即将落下帷幕，回首安工程的七年，起始于 2017 年的金秋之季，终止于 2024 年的仲夏之时，一切仿若仍清晰如昨。这七年，我曾嗅到图书馆旁的馥郁花香，亦曾聆听教学楼外的清脆蝉鸣；我曾望见博雅路旁的缤纷落叶，亦曾目睹天桥上空的悠悠飘雪。这七年，有欢快的笑颜，那是收获成果之际的欣然；有忧伤的泪水，那是直面挫折之时的无奈；有遗憾的慨叹，那是错失某些契机的懊悔；亦有满满的斩获，那是知识的积聚、能力的增进与心智的成熟。

在我即将完成研究生学业、撰写毕业论文之际，我谨向所有支持、帮助和鼓励过我的人致以最诚挚的感谢。

首先，我要衷心感谢我的研究生导师郑衍畅老师。感谢您在我整个研究生阶段的悉心教诲与倾囊相授。虽说硕士生涯仅三年，但是跟随您进行课题研究却足有三年半之久。您不仅在学术上给予了我无私的指导和启发，还在人生道路上给予了我宝贵的建议和支持，使我受益匪浅，受到了巨大的启发和鼓舞。

其次，我要感谢校外尹荣鑫导师、同课题组的鲁月林老师，当我于工作或科研中遭遇难题时，是你们的耐心指引助我扫除诸多科研与实验上的阻碍。同时，我还要感谢实验室的同窗们，王康、杨龙、何锦涛，是你们的合作和支持让我的研究生生活更加丰富多彩。在学术交流和实验探讨中，我收获颇丰，也度过了许多难忘的时光。

最后尤其要感恩我的家人，感激你们长久以来对我的支持与理解。是你们的激励与支持让我在学业与生活中战胜诸多困境，笃定了我前行的信念。

行文至此，心中感慨万千，是时候和这个校园说再见了，这里承载了我太多的回忆和情感。未来的路还很漫长，我将带着这七年的宝贵财富，继续迈步前行，去追寻属于我的那片天空。感恩这七年的时光，感恩生命中的每一个人，每一件事。愿未来的日子里，我们皆能如花绽般绚烂，如蝉鸣般炽热，如叶落般淡然，如雪飘般纯净。

安工程，再会！

尚德敏学 唯实惟新

