

高精度前向散射式能见度仪设计

姜涛^{1,2}, 高世交^{1,2}, 李鹏^{1,2}, 王永²

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044;

2. 南京旗云中天科技有限公司, 南京 210044)

摘要: 针对现有能见度仪测量误差显著、环境扰动敏感、校准方法复杂的问题, 设计了一种轻量化、低成本且集成校准一体式与窗口污染在线监测功能的高精度前向散射式能见度仪。该仪器同步采集风速、降水量、相对湿度和温度等气象参数, 通过多元线性回归模型动态补偿反演能见度值。室外长期实验结果表明, 该样机与 Vaisala PWD50 能见度仪 15 min 相对误差在 10~2 000 m、2 000~10 000 m 和 10 000~25 000 m 区间分别小于 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 15\%$, 环境补偿后整体误差降低约 32%, 决定系数 (R^2) 由 0.977 8 提升至 0.990 1。验证了该能见度仪在多变气象条件下具有良好的稳定性和测量精度, 能够满足自动气象站、海上平台及交通安全监测等场景的高精度应用需求。

关键词: 能见度; 前向散射; 高精度; 误差补偿; 多元线性回归

中图分类号: TH765; P412.17

Design of a high-precision forward-scattering visibility meter

JIANG Tao^{1,2}, GAO Shijiao^{1,2}, LI Peng^{1,2}, WANG Yong²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Nanjing Qiyun Zhongtian Technology Co., Ltd., Nanjing 210044, China)

Abstract: To address the issues of existing visibility meters, such as significant measurement errors, sensitivity to environmental disturbances, and complex calibration procedures, a high-precision forward scattering visibility meter with lightweight design, low cost, integrated calibration function, and online window contamination monitoring is proposed. The instrument simultaneously acquires meteorological parameters—wind speed, precipitation, relative humidity, and temperature—and employs a multiple linear regression model to dynamically compensate the inverted visibility values. Long-term outdoor experiments demonstrate that the prototype's 15-minute relative errors compared to the Vaisala PWD50 are within $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, and $\pm 15\%$ for the 10–2 000 m, 2 000–10 000 m, and 10 000–25 000 m ranges, respectively. After environmental compensation, the overall error is reduced by approximately 32%, and the coefficient of determination (R^2) increases from 0.977 8 to 0.990 1. These results verify that the sensor exhibits excellent stability and measurement accuracy under variable meteorological conditions, and can meet the high-precision application requirements of scenarios such as automatic weather stations, offshore platforms, and traffic safety monitoring.

Keywords: visibility; forward scattering; high precision; error compensation; multiple linear regression

能见度是反映大气中悬浮颗粒物浓度和光学消光特性的关键气象要素^[1]。它既是气象观测的基本参数, 也是航空航海、高速公路通行安全及城市环境监测等领域的重要依据^[2], 其测量精度直接影响对雾霾等恶劣天气的预警与决策支持。目前市场上较为普遍的能见度仪主要是透射式、散射式和摄像式^[3]。透射式能见度仪以长距离光束通过大气的衰减量来计算能见度, 结构复杂且易受对准误差影响^[4]; 摄像式能见度仪通过摄像头和图像处理算法获取能见度信息, 但受光照条件和算法性能限制较大^[5]。相比之下, 基于 Mie 散射理论的前向散射式能见度仪因结构紧凑、响应快速、对齐要求低而被广泛采用。

作者简介: 姜涛 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器开发

通信联系人: 李鹏, 教授, 主要研究方向为数字信号处理算法、传感网络等, peng.li@nuist.edu.cn. E-mail: paper@cutech.edu.cn

在前向散射式能见度仪测量领域,国内外已进行了深入的理论和应用研究。Zhuang 等^[6]在标准大气模拟舱中对多款前向散射式能见度仪进行了替代性实验,结果表明,在能见度低于 2 000 m 条件下多数仪器误差较小,但在高能能见度情况下仪器间性能差异较大,对环境扰动较为敏感。Zhang 等^[7]提出了激光腔增强校准方法,在实验室条件下模拟不同能见度环境对前向散射式能见度仪进行校准,取得了 10~2 000 m 区间内误差低于 10% 的性能表现,但该方法依赖于复杂的校准舱设备,并未适配现场实时应用。国外能见度仪产品处于国际领先水平,以芬兰 Vaisala 和英国 Biral 为代表^[8],在自动校准、防尘补偿及长期稳定性方面具备优势:测量误差通常低于 5%,且可连续数月无须维护;但高昂成本及复杂维护流程限制了其在二三线城市和交通沿线的推广。相比之下,国产前向散射式能见度仪普遍存在精度不足、校准流程繁琐、缺乏在线污染监测及环境扰动补偿等问题,从而制约了其在多变气象条件下的长期稳定部署。

针对上述问题,本文设计并实现了一种轻量化、低成本、稳定性好、校准一体式的高精度前向散射能见度仪。该仪器集成了窗口污染在线监测与自动补偿功能,能够同步采集风速、降水量、相对湿度和温度等参数,基于多元线性模型对原始散射信号进行动态修正,可显著提升复杂环境下的测量精度与鲁棒性,适用于自动气象站、海上平台及交通安全监测等场景。

1 测量原理

能见度是反映大气光学性质的基本要素,其大小主要由消光系数 (σ) 决定^[9],根据柯西密德(Koschmieder)定律^[10],大气能见度 (V) 与 σ 的关系式如下:

$$V = -\frac{\ln \varepsilon}{\sigma} \quad (1)$$

式中, ε 为视觉阈值,根据世界气象组织(WMO)规定, ε 取值为 0.05^[11]。则大气能见度与大气消光系数之间的关系可表示为

$$V = \frac{2.996}{\sigma} \quad (2)$$

根据 Mie 散射理论,散射光强度 (I) 与入射光强度 (I_0) 的关系如下:

$$I = MI_0 \quad (3)$$

其中, M 可表示为

$$M(\lambda, r, m, \theta) = \frac{\sigma_s(\lambda, r, m)}{4\pi r^2} P(\lambda, r, m, \theta) \quad (4)$$

式中: λ 为入射光的波长; r 为散射粒子的半径; m 为散射粒子的复折射率; θ 为散射角; $P(\lambda, r, m, \theta)$ 为散射相函数; $\sigma_s(\lambda, r, m)$ 为单个散射粒子的总散射截面。

由于人眼对绿光 ($\lambda = 550\text{nm}$) 最为敏感,该波长被用来作为测量能见度时的参考波长。根据统计数据,当散射角介于 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间时,散射相函数 P 基本保持稳定。因此,当散射角处于 $20^\circ \sim 50^\circ$ 范围内时, $I(\theta)$ 与 σ_s 、 $P(\theta)$ 及 I_0 之间存在线性关系:

$$I(\theta) = \sigma_s P(\theta) I_0 \quad (5)$$

当大气粒子的散射角为 θ 时,散射光强度 ($I(\theta)$) 与大气能见度 (V) 之间的关系可表示为

$$V = \frac{2.996P(\theta)}{I(\theta)/I_0} = \frac{K}{I(\theta)/I_0} \quad (6)$$

式中， K 为常系数。

85

由此可知，对于一个特定的系统，已确定入射光强度（ I_0 ），大气能见度与散射光强度成反比，因此可通过测量散射光强度来测定大气能见度。

以单个球状颗粒为例，建立坐标系，如图 1 所示。颗粒位于原点 O 处，入射光强度为 I_0 ， θ 为散射角。由 Mie 散射理论可知，与颗粒相距为 l 、位于 P 点处的散射光强可以表示为

$$I(\theta) = \frac{I_0}{l^2} \beta_{sc}(\theta) \quad (7)$$

90

式中， $\beta_{sc}(\theta)$ 为散射函数，其物理意义是当入射光强为 1 个单位时，在距离颗粒单位距离处的散射光强^[12]。

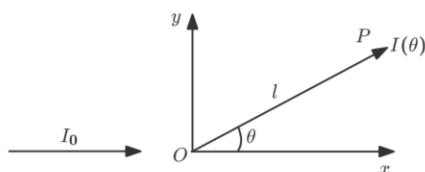


图 1 单个粒子散射在坐标系中的表示

Fig. 1 Representation of individual particle scattering in coordinate system

95

由式(7)可见，在光源功率与探测器响应不变的条件下，减小气溶胶颗粒到探测器的距离，即适当减小能见度仪的体积，可显著增强接收的散射光强度，进而提高能见度的灵敏度并扩展测量范围。

2 系统设计

完整的前向散射式能见度仪系统主要由机械结构、光学结构、硬件、软件设计等构成。

2.1 机械结构

100

前向散射式能见度仪的机械结构如图 2 所示，主要包括发射单元、接收单元及位于中部的
的主板腔体。

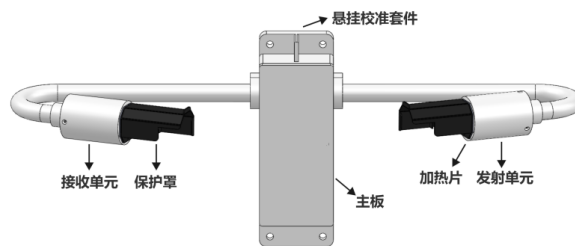


图 2 机械结构设计

Fig. 2 Mechanical structure diagram

105

左右探头腔体分别安装接收单元和发射单元；黑色保护罩用于防护雨雪和灰尘；两端加热片对窗口及腔体进行除霜加热；中部腔体用于固定核心主板；底部电缆固定结构用于引出电源和信号线；顶部螺丝卡槽则用于悬挂校准套件。

2.2 光学结构

110

选择接收光轴与发射光轴相交的锐角 θ 作为工作散射角。选取散射角时，应确保方向散射光强最大，以获得足够的信号幅度和较高的信噪比。实验结果表明，在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 前向散射角范围内，散射光强度更大且角散射系数与总散射系数的比例因子更加稳定。同时，散射角较大会导致环境干扰（如障碍物表面漫反射干扰、背景光干扰），而散射角较小会导致直接透射。为避免环境可见光干扰，光源应选择不可见波段。基于上述原则，本系统采用 45° 散射角，并选用 850 nm 近红外发光二极管（light emitting diode, LED）作为光源。前向散射式能见度仪光路如图3所示。

115

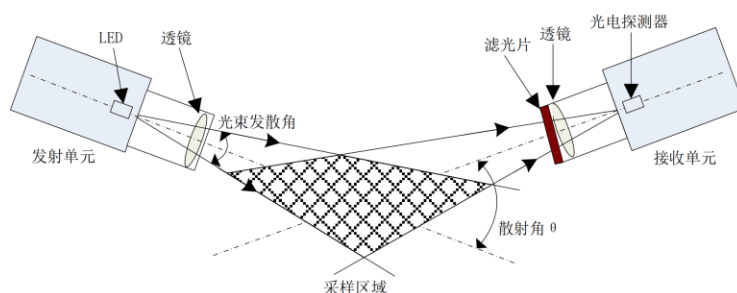


图3 光路示意图

Fig. 3 Schematic of the optical path

120

在发射端，光源置于透镜焦点处以输出近似平行光束，同时通过缩小发散角提升光束能量密度。接收端光路由光电探测器、聚焦透镜和带通滤光片构成；光电探测器用于检测采样区域内的散射光强度，聚焦透镜可将不同入射角的散射光汇聚至探测器平面，提高光信号集中度；为抑制日光和人造光源的干扰，在聚焦透镜前安装带通滤光片，以滤除其他波段的环境光。该光路结构整体成型，且在所有设备中保持相同位置与角度^[13]。

125

如图3所示，采样区域为发射器发射光束锥体与接收器光束锥体的相贯体。采样区域在包含发射器与接收器光轴平面内的投影为一个四边形，在通过两光轴交点的铅垂面内的截面投影为卵圆形。

假设发射单元与接收单元的口径相同，用符号 D 表示。设两光轴交点与两透镜的距离均为 L ，则相贯体底面的卵圆半径（ R ）近似为

$$R = \frac{\omega_{\min} L + D}{2} \quad (8)$$

130

式中， ω_{\min} 为发射和接收单元光束发散角中的较小者^[14]。

135

距离（ L ）在很大程度上决定了设备的空间尺寸，而采样区域的卵圆半径（ R ）可作为采样体积大小的表征。当采样体积过小时，采样体积内的散射粒子数目不足，测量结果因统计波动而显著不稳定，表现为较大的随机噪声。此外，较小的采样体积对局部粒子浓度的瞬时波动高度敏感；在高能见度条件下，粒子浓度本身较低，导致接收信号减弱，进而使信噪比显著下降。因此，当采样大气体积不足时，所得到的能见度值不具有代表性。

这意味着能见度仪的体积不能盲目缩小，应在采样代表性与散射信号强度之间进行权衡。本仪器在保证分辨率为 1 m 、量程为 $10 \sim 30\ 000\text{ m}$ 的性能指标下， L 取值为 50 cm ，增大通光口径至 25 mm ，使采样体积达到约 200 cm^3 ，超过行业规定标准，可保证仪器小型化和高精度的同时实现。

140 2.3 系统硬件设计

2.3.1 发射/接收单元

145 图 4 展示了前向散射式能见度仪发射及接收单元的硬件设计。发射单元电路由发射驱动电路、近红外 LED、光电探测器 1、光电探测器 2 及模数转换电路组成。发射单元以 5 kHz 频率驱动 LED, 输出 850 nm 光脉冲; 驱动电路由运算放大器和三极管构成恒流源, 以 650 mA 恒定电流驱动 LED, 确保光源输出功率稳定。光电探测器 1 负责监测发射光强, 以补偿温度和器件老化引起的光功率漂移; 光电探测器 2 通过检测透镜透光率评估窗口污染, 当透光率低于阈值时, 主控单元发出清洁警示。

150 接收单元由光电探测器 3、I-V 转换电路、前置放大器、带通滤波器、锁相放大器及低通滤波器构成。光电探测器 3 检测散射光信号, 经 I-V 转换和前置放大后, 依次通过带通、锁相及低通滤波, 将信号限幅至 0~5 V, 最终由 A/D 采样。本系统采用 TI 24 位 ADS1256 模数转换器进行数据采集; 锁相放大器选用 AD630, 可在 100 dB 干扰噪声中恢复微弱信号。

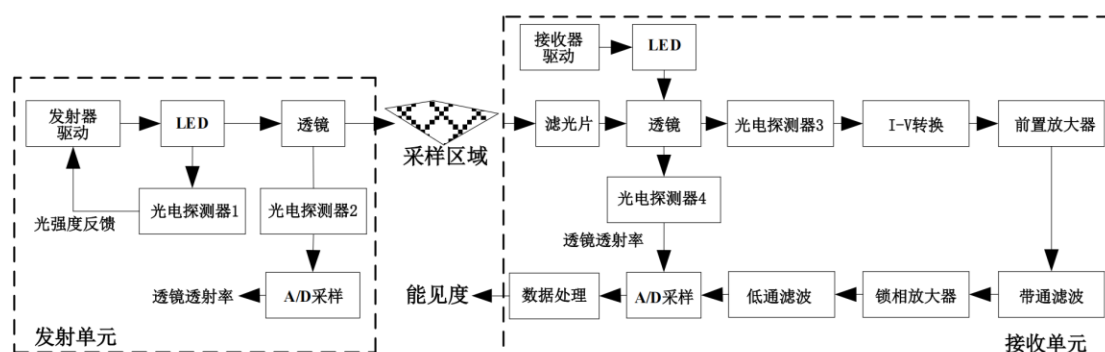


图 4 发射和接收单元的硬件设计框图

Fig. 4 Hardware design block diagram of the emitting and receiving units

155 2.3.2 电源/控制器

图 5 为电源/控制器框图, 其主要由电源模块、温控电路和控制单元构成, 并集成 RS-485 接口以实现与上位计算机的通信。

160 电源模块将 24 V 开关电源转换为 +5 V、+3.3 V 和 ±15 V 输出, 其中 ±15 V 专用于模拟电路供电。为保证透镜表面不结霜且光强稳定, 温控电路驱动加热片对腔体进行加热, 以抑制水汽和霜冻, 同时减小环境温度变化对 LED 和光电二极管的影响。每个加热片功耗约为 0.8 W, 由电源模块持续供电。温湿度传感器选用瑞士 Sensirion SHT40, 安装于腔体内部, 其测量范围为 -40~85 °C、0~100%RH。

165 控制单元以 STM32 微控制器为核心, 对来自 ADS1256 的数据执行信号处理与运算。微控制器生成方波脉冲驱动信号以控制 LED 发射, 并采集散射信号; 同时监测发射光强、电源状态和腔体温度, 控制加热片开关; 所有数据通过串口协议上传至上位计算机。ADS1256 通过 SPI 总线与微控制器通信, SHT40 温湿度传感器则通过 IIC 总线连接。

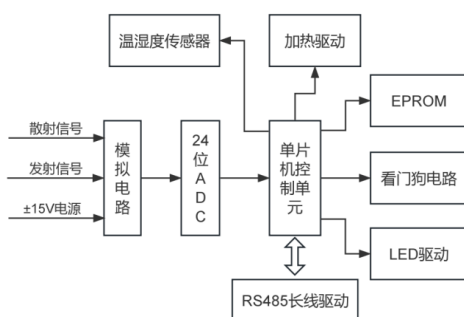


图 5 电源/控制器框图

Fig. 5 Block diagram of the power supply and controller

170 2.4 系统软件设计

图 6 为系统软件流程，软件基于 Keil 环境开发，主要模块包括校准、定时中断、数据采集、信号处理及数据通信。

175 系统上电后，悬挂校准套件于仪器顶部，利用多组由基准透射仪提供参考能见度的标准板完成校准。系统采样周期设定为 60 s，周期结束后触发中断并启动数据采集。数据采集分为温湿度采集与光强信号采集 2 个部分：温湿度采集模块实时获取温度和相对湿度，并由单片机依据测量结果控制加热片开关；采样周期触发时，系统首先关闭 LED 并采集零点信号，随后通过 PWM 驱动 LED 并同步采集窗口污染、入射及散射 3 路光强信号。信号处理阶段，实际散射信号为 LED 开启的散射信号与 LED 关闭时的零点之差，以消除背景光及硬件直流偏置影响。利用污染信号与入射信号比值，通过最小二乘法线性拟合获得透镜透过率 (T)，并据此对散射信号进行补偿。当污染度 ($P=1-T$) 超过设定阈值后，系统向用户发出窗口清洁预警。同理，计算补偿后的散射信号与入射信号的比值，根据式(6)计算出能见度值，其中 K 在系统校准过程中由校准板标定得到。信号采样、数据处理及传输完成后，系统进入待机模式以降低功耗，并等待下一个采样周期。

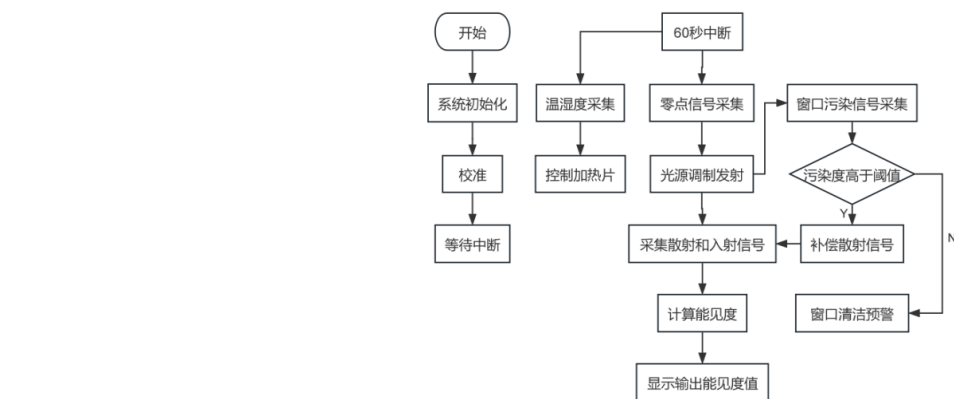


图 6 系统软件流程

Fig. 6 System software flowchart

185 式(6)虽然适用于前向散射式能见度仪的理论计算，但实际应用中仍需进行修正校准。主要原因包括：1) 系统使用 $\lambda = 850\text{nm}$ 近红外光源，而标准能见度测量参考波长为 $\lambda = 550\text{nm}$ ，两者的光学消光系数不同，故需应用经验转换公式进行换算^[15]；2) 散射光在不同角度上有不同分布，雾天虽以大粒子主导前向散射，但红外波段下小粒子仍会影响总散射光强^[16]。



图 7 样机现场实物图

Fig. 7 Physical on-site image of the prototype

195 为了建立精确的信号与能见度转换关系，将样机置于晴天开阔场地并安装校准套件，通过更换不同校准板模拟多个能见度等级，样机现场实物如图 7 所示。在观测过程中，实时记录各等级参考能见度与对应输出信号比值。为提高观测精度，取样机输出信号的 15 min 平均值，并在软件中剔除电噪声引起的离群数据。将能见度划分为 11 个等级，对信号比值 (S) 与能见度 (V) 进行拟合。

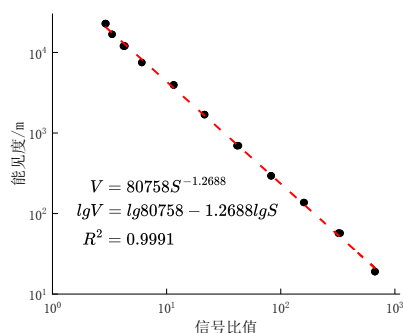


图 8 信号比值与能见度的拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between signal ratio and visibility

分析两者拟合关系，发现符合幂指数的表达形式。为更直观地验证幂指数关系，在对数-对数坐标系下绘制散点图并进行线性回归（图 8），得到以下公式：

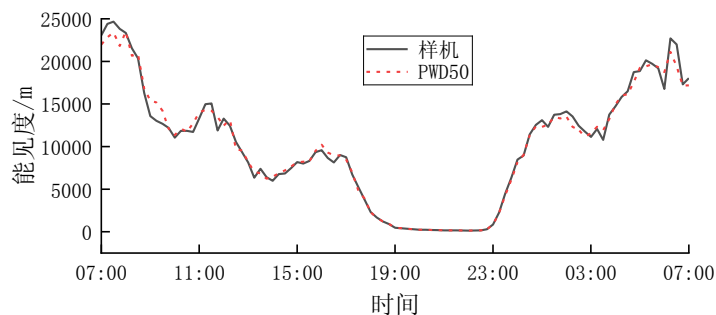
205
$$V = \frac{80758}{S^{1.2688}} \quad (9)$$

由式(9)可知，根据样机测得的散射信号与入射信号的比值 (S) 即可计算大气能见度 (V)。在样机中根据该拟合关系由 CPU 计算得到大气能见度，通过 RS485 接口输出。

3 室外对比实验与分析

210 2025 年 6 月，对样机开展了为期 1 个月的室外实验，直接测量输出大气能见度值。为验证精度，将样机与荷兰 Vaisala PWD50 能见度仪进行对比测试。2 台设备安装于南京市六合区旗云中天科技有限公司楼顶气象观测场，相距 10 m，架设高度均为 2 m，自动连续同步记录，确保观测条件一致。鉴于能见度变化缓慢，采样分辨率均设为 15 min，以平衡数据量与时间响应。

215 图 9 展示了选取雾晴交替期间的典型 24 h 对比实验结果。如图 9 所示，2025 年 6 月 13 日 7:00—6 月 14 日 7:00 期间天气情况由晴到雾再转为晴，能见度在 13 日 9:00 有下降的趋势，逐步起雾形成轻雾，17:00 点能见度急剧下降，于 19:00 降至最低约 100 m 形成强浓雾。大雾持续至 14 日凌晨后逐渐消散，清晨时分恢复高能见度的晴天。上述能见度变化过程与南京市气象台同期发布的大雾黄色预警相一致。



220 图9 样机与 PWD50 测量数据的曲线对比(2025 年 6 月 13—14 日)

Fig. 9 Comparison of measurement data curves between the prototype and PWD50 (June 13–14, 2025)

225 测量数据曲线显示, 样机与 PWD50 能见度仪总体变化趋势一致。当能见度低于 5 000 m 时, 两仪器观测值接近; 当能见度高于 5 000 m 时, 样机读数多数低于 PWD50。这可能由高能见度条件下样机标定存在误差所致。经进一步数据处理后, 两者呈现良好相关性 (图 10)。在高能见度条件下, 样机数据波动加剧, 数据较为分散, 其原因在于高能见度时大气粒子浓度低、散射光强弱, 导致接收信号微弱、信噪比小。

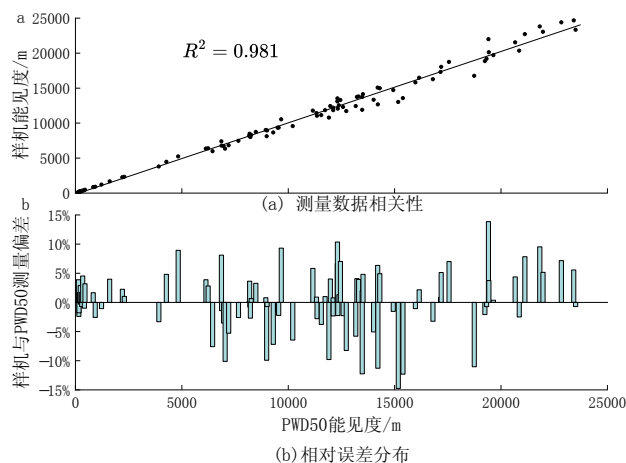


图 10 2025 年 6 月 13—14 日测量数据相关性及相关误差分布

230 Fig. 10 Correlation and relative error distribution of measurement data from June 13 to 14, 2025
其中, 相对误差 (RE) 计算公式为

$$RE = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中: V 为样机能见度; V_0 为 PWD50 能见度。

235 图 10 进一步展示了样机与 Vaisala PWD50 在 15 min 测量下的偏差分布。在 10~20 000 m、20 000~100 000 m 和 100 000~250 000 m 区间 15 min 相对误差分别小于 ±5%、±10% 和 ±15%。根据中国气象局发布的行业标准《前向散射式能见度仪》(QX/T 698—2023) [17] 中的性能指标“能见度在不大于 1 500 m 时相对误差小于 ±10%, 在大于 1 500 m 时相对误差小于 ±20%”可知, 样机的测量精度已符合标准并达到较高水平, 验证了其测量能见度数据的有效性。

4 环境影响因素补偿

240

4.1 能见度的影响因素

能见度的变化是多种气象因子综合作用的结果。基于观测场气象数据与实际能见度测量结果进行关联分析，以揭示两者的相关性。

线性相关系数，又称皮尔逊相关系数，是衡量 2 个变量之间线性关系强度和方向的统计量。给定 2 个变量 X 和 Y ，其相关系数 (r) 定义为

245

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

式中， \bar{x} 和 \bar{y} 分别为 X 和 Y 的均值。

r 取值范围为 $[-1,1]$ 。如果 $0 < r \leq 1$ ，表明 X 与 Y 之间存在正线性相关性；如果 $-1 \leq r < 0$ ，表明 X 与 Y 之间存在负线性相关性；如果 $r = 0$ ，表明 X 与 Y 之间不存在线性相关关系。其中， $|r| \geq 0.7$ 为强线性相关， $0.4 \leq |r| < 0.7$ 为中度线性相关， $0 < |r| < 0.4$ 为弱线性相关。

250

图 11 展示了相对湿度、风速、温度和降水量与能见度的时序对比数据。通过折线趋势分析，探讨能见度与上述因素的相关原因：

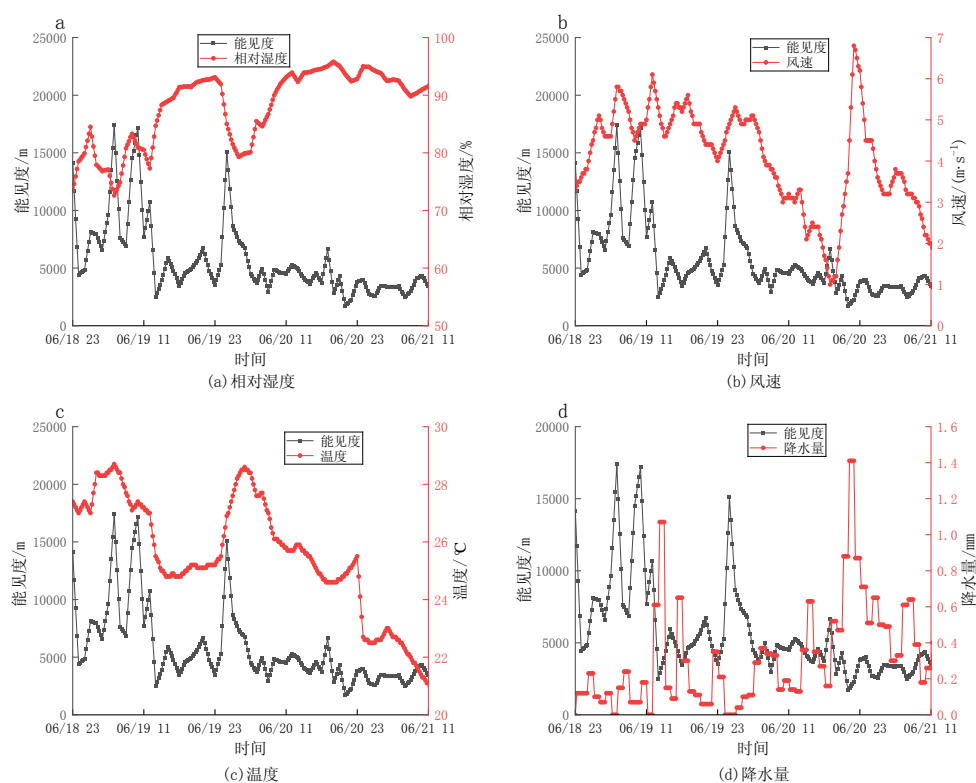


图 11 本气象观测场能见度与相对湿度、风速、温度、降水量随时间的变化关系

255

Fig. 11 Temporal variation of visibility and relative humidity, wind speed, temperature, and precipitation at the meteorological observation site

1) 能见度与相对湿度呈强线性负相关($r = -0.75$)。随着湿度的升高，水汽凝结或吸附

于气溶胶颗粒，增强光学散射与吸收，从而降低能见度^[18]。

260

2) 能见度与风速呈中等线性正相关($r = 0.63$)。风速增大有助于吹散悬浮颗粒和雾滴，改善视程并提升能见度^[19]。

3) 温度升高会降低相对湿度并促使水滴蒸发减少散射，同时增强大气对流促进污染物扩散，导致能见度上升。在不考虑光化学反应的情况下，气温与能见度通常呈中等线性正相关($r = 0.51$)^[20]。

265

4) 能见度与降水量呈强线性负相关($r = -0.80$)。降水时大量水滴增强光学散射与吸收，显著缩短视程；降水量越大，能见度下降越剧烈。

4.2 环境参数补偿模型

270

为了进一步提高样机在复杂气象条件下的测量精度，增强样机适应极端天气和多变环境的能力(如海上和机场)^[21]，在原有的能见度反演基础上，引入风速(w)、降水量 \square (P)、相对湿度(RH) \square 和温度 \square (T)等环境参数，通过多元线性回归构建补偿模型，对原始反演值进行动态修正。该模型结构简单、运算高效，可直接嵌入 STM32 主控 MCU，实时补偿环境扰动。

4.2.1 数据采集与预处理

275

在样机主控板上拓展 RS-485 接口，采用 Modbus \square RTU 协议与气象站通信，实时读取风速(w)、降水量(P)、相对湿度(RH) \square 和温度 \square (T)。将 4 路气象参数与散射信号同步采样，采样周期均为 60 \square s。采样完成后，依据时间戳在 STM32 MCU 内部对齐多源数据，保证参数配对准确。每周周期读数后，对各路环境参数序列应用 Z-score 方法剔除绝对偏差超出 3 倍标准差的异常点($x - \mu > 3\sigma$)，将剩余数据按时间序列做 3 点滑动平均，有效抑制短期噪声，提高模型拟合稳定性。

4.2.2 模型构建与系数标定

280

记样机原始能见度为 V_0 ，修正后能见度为 V 。构造多元线性补偿模型：

$$V = V_0 \times (1 + a_w w + a_p P + a_{RH} RH + a_T T)。 \quad (12)$$

式中， a_w, a_p, a_{RH}, a_T 为待标定的环境补偿系数，分别反映各因子对测量误差的贡献度。

285

选取 2025 年 6 月的室外对比实验数据，共计 $N=2880$ 个 15 \square min 平均样本，包含标准能见度值 (V_{std})、样机原始能见度值 (V_0) 及同步环境参数 ($\mathbf{x} = [w, P, RH, T]^T$)。构造环境特征矩阵 $X \in \mathbf{R}^{N \times 4}$ ，第 n 行为 \mathbf{x}_n ；目标向量 $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^N$ ，其第 n 元素为 $y_n = \frac{V_{std,n}}{V_{0,n}} - 1$ 。

利用正规方程求最小化均方误差

$$J(\mathbf{a}) = \sum_{n=1}^N (\mathbf{x}_n^T \mathbf{a} - y_n)^2 \quad (13)$$

的闭式解：

$$\mathbf{a} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{y}。 \quad (14)$$

290

一次性求得补偿系数 $\mathbf{a} = [a_w, a_p, a_{RH}, a_T]^T$ ，写入 MCU 固件，无需在设备端进行迭代运算。

在本次样本实验中, a_w, a_p, a_{RH}, a_T 经过该模型计算后分别为+0.00520, -0.01280, -0.00075, +0.00115。

4.2.3 补偿与效果验证

在每个采样周期结束后, MCU 读取原始反演值 (V_0) 与同步环境参数 (w, P, RH, T), 计算补偿因子

$$F = 1 + a_w w + a_p P + a_{RH} RH + a_T T \quad (15)$$

并输出补偿后能见度 $V = V_0 \times F$, 通过 RS-485 同步上传。

2025 年 6 月室外对比实验数据覆盖气象条件: 能见度为 10~25 000 m, 风速为 0.1~8.0 m/s, 降水量为 0~3 mm, 相对湿度为 30%~100, 温度为 10~40 °C。图 12 展示了 6 月 26 日—28 日的能见度补偿前后的相对误差, 可见, 整体误差明显改善, 由 ±15% 缩减至 ±10%。

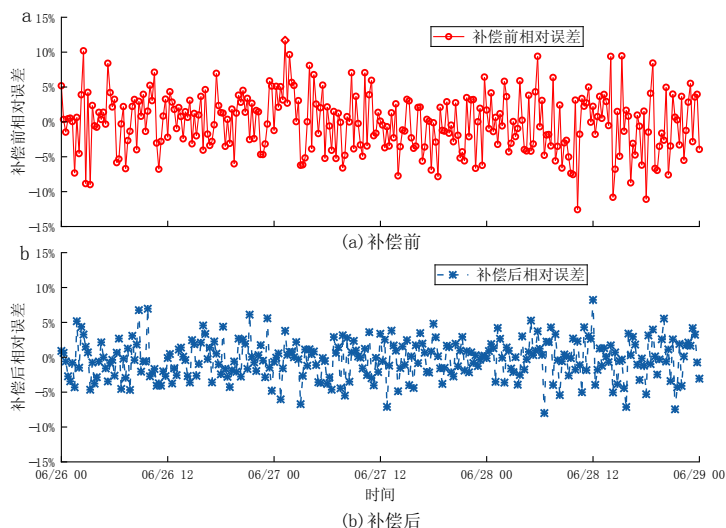


图 12 2025 年 6 月 26—28 日能见度补偿前后相对误差对比

Fig. 12 Comparison of relative error before and after visibility compensation from June 26 to 28, 2025

为验证环境补偿模型的有效性, 将补偿前的原始 V_0 与补偿后输出 V 分别与标准能见度 (V_{std}) 进行对比, 计算均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、决定系数 (R^2), 性能对比见表 1。

表 1 不同能见度区间下的模型性能对比

Table 1 Comparison of model performance across different visibility ranges

能见度区 间/m	样本数	RMSE/m		MAE/m		R^2	
		补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
10~2 000	25	27.65	13.30	14.55	6.65	0.998 9	0.999 6
2 000~10 000	834	321.18	230.18	251.98	181.76	0.976 0	0.997 4
10 000~25 000	2 021	975.68	652.55	786.99	526.10	0.914 8	0.959 4
总计	2 880	827.59	558.26	610.16	416.19	0.977 8	0.990 1

从表 1 可以看出, 补偿后整体性能显著提升, 尤其在高能见度段效果更为明显。在 $10\ 000\sim 25\ 000\ \text{m}$ 区间, RMSE 下降 323 m, MAE 下降 261 m, R 提升 0.044 6; 而在总体区间上, RMSE 和 MAE 下降 32% 左右, R 由 0.977 8 提升至 0.990 1; 证明该模型大幅提升了能见度测量的一致性和线性相关性。

结果表明, 所引入的基于风速、降水量、相对湿度和温度的线性补偿模型, 有效减小了外部气象条件对测量结果的系统性误差, 决定系数显著提高。该模型结构简单、计算量小且易于嵌入 STM32 微控制器, 实现了复杂天气条件下的实时补偿, 显著提升了测量精度与稳定性, 满足自动气象站和交通监测等场景的高精度应用需求。

5 结论

本文针对前向散射式能见度仪在动态环境下测量精度低、校准流程繁琐及环境干扰敏感等缺点, 提出并实现了一种集成在线校准与污染和气象因子补偿功能的轻量化系统。通过在发射端与接收端增设光强与透光率监测模块, 并同步采集风速、降水量、相对湿度和温度等气象参数, 构建多元线性补偿模型, 对原始散射信号进行动态修正, 从而显著提升了测量精度和稳定性。

室外对比实验结果表明, 该样机在 $10\sim 2\ 000\ \text{m}$ 、 $2\ 000\sim 10\ 000\ \text{m}$ 和 $10\ 000\sim 25\ 000\ \text{m}$ 这 3 个能见度区间内的测量误差分别控制在 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 15\%$ 以内, 经环境补偿后整体误差下降约 32%, 决定系数达到 0.990 1, 有效验证了补偿模型对复杂气象条件下测量准确性的提升作用。

该能见度仪设计结构紧凑、校准与补偿算法运算量小且嵌入 STM32 微控制器, 具备自动化持续运行能力, 能满足自动气象站、海上平台及交通安全监测等场景对高精度、低维护成本的需求。未来可在更多气象环境中开展长期野外验证, 并逐步引入更多影响因子, 以进一步拓展应用范围并优化测量性能。

[参考文献] (References)

[1] 汪玮, 张世国, 章超, 等. 自研透射式能见度测量系统性能分析[J]. 气象科技, 2020, 48(2): 163-170.

WANG W, ZHANG S G, ZHANG C, et al. Performance analysis of self-developed transmission visibility system [J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 48(2): 163-170. (in Chinese)

[2] 王敏, 方海涛, 张世国, 等. 前向散射式能见度仪测试方法研究[J]. 气象科技, 2021, 49(1): 12-17.

WANG M, FANG H T, ZHANG S G, et al. A method for testing forward scattering visibility meters [J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(1): 12-17. (in Chinese)

[3] LI M, LIU S Y, MA Y Z, et al. A high-precision measuring system for atmospheric visibility based on a multi-reflection cell [J]. Optical Review, 2024, 31(1): 8-16.

[4] JIANG H D, LI F, REN X H, et al. Comparative analysis of instrumental and manual visibility observations at Xiamen airport and the influence of relative humidity [J]. Applied Sciences, 2023, 13(17). DOI: 10.3390/app13179514.

[5] 张雨晴, 田小平, 邹长宽, 等. 图像能见度检测方法研究综述[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 41-47.

- 350 ZHANG Y Q, TIAN X P, ZOU C K, et al. Review of research on image visibility detection methods [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(4): 41-47. (in Chinese)
- [6] ZHUANG Z B, LI J F, CHAN P W, et al. Substitutability research for forward-scatter meters in indoor low-visibility environments [J]. *Meteorological Applications*, 2022, 29(2). DOI: 10.1002/met.2050.
- [7] ZHANG J F, PAN S Q, CHU J H, et al. Research on calibration method for forward scatter visibility meter based on laser cavity enhanced technique [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2019, 31(2): 160.
- 355 [8] WANG Y F, LI X X, QIN Y D, et al. Investigation and analysis of actual atmospheric scattered radiance and slant visibility by two-wavelength Raman-Mie lidar [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 288: 108250.
- [9] 王志儒, 程寅, 桂华侨, 等. 基于前后向光散射原理的天气现象识别系统设计与初步应用[J]. *大气与环境光学学报*, 2025, 20(2): 134-144.
- 360 WANG Z R, CHENG Y, GUI H Q, et al. Design and preliminary application of weather phenomenon recognition system based on forward and backward light scattering principle [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2025, 20(2): 134-144. (in Chinese)
- [10] 王惠颖, 祖繁, 袁成松, 等. 前散式和透射式能见度仪的综合观测试验及对比分析[J]. *气象科学*, 2022, 42(2): 225-234.
- 365 WANG H Y, ZU F, YUAN C S, et al. Comprehensive observation experiment and comparative analysis of the forward scattering visibility meter and atmospheric transmission visibility meter [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2022, 42(2): 225-234. (in Chinese)
- [11] 张世国, 汪玮, 方海涛, 等. 前向散射能见度仪测试模拟环境与试验[J]. *气象科技*, 2019, 47(3): 408-412, 425.
- 370 ZHANG S G, WANG W, FANG H T, et al. Simulation environment and experiment of forward scattering visibility meters [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(3): 408-412, 425. (in Chinese)
- [12] 李孟麟. 前向散射式能见度检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 18-20.
- LI M L. The research of the foreword scattering visibility detection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 18-20. (in Chinese)
- 375 [13] ZHOU Q C, FAN C Y, HAN Y, et al. Development of a new intelligent instrument for visibility and turbulence meteorological environment parameters in traffic network [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 177: 108123.
- [14] 李春亮, 曲来世, 张勇, 等. 能见度测量技术 100 问[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 49-51.
- 380 LI C L, QU L S, ZHANG Y, et al. 100 Questions on visibility measurement technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 49-51. (in Chinese)
- [15] NEBULONI R. Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(18): 3795-3804.
- [16] TONNA G, SHFRIN K S. Reliability of the polar nephelometer for the measurement of visibility in fog [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(15): 2932-2941.
- 385 [17] 全国气象仪器与观测方法标准化技术委员会. 前向散射式能见度仪: QX/T 698—2023 [S]. 北京: 气象出版社, 2023.

National Technical Committee 507 on Meteorological Instruments and Methods of Observation of Standardization Administration of China. Forward scatter visibility meter: QX/T 698—2023 [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2023. (in Chinese)

390 [18] 张霞, 汪太明, 孟晓艳, 等. 我国 6 个典型城市大气能见度及其影响因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 239-247.

ZHANG X, WANG T M, MENG X Y, et al. Study of atmospheric visibility and its influence factors in six typical cities in China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(1): 239-247. (in Chinese)

395 [19] 李晓岚, 张宏升, 杜金林. 自制快速响应能见度仪特性及应用研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(27): 15134-15136.

LI X L, ZHANG H S, DU J L. Fast-response characteristics and application of self-developed visibility meter [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(27): 15134-15136. (in Chinese)

[20] 刘骞, 盛立芳, 王园香, 等. 气象要素对中国大气能见度长期变化影响的定量研究[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(1): 47-55.

400 [20] LIU Q, SHENG L F, WANG Y X, et al. Quantitative study of the effect of meteorological variables on the long-term variation of visibility in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(1): 47-55. (in Chinese)

[21] 郑经烽. 高精度散射式能见度仪的研制[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019: 35-43.

405 [21] ZHENG J F. Development of high precision scattering visibility meter [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019: 35-43. (in Chinese)