

# 变基线大气能见度测量系统

冯帅<sup>1\*</sup>, 熊兴隆<sup>2</sup>, 马愈昭<sup>2</sup>, 李猛<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300;

<sup>2</sup> 中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300

**摘要** 针对传统大气透射仪收发基线固定、采样空间有限、透过率模型适用性差等问题,设计了一种变基线大气能见度测量系统。该系统的激光发射单元固定,光学接收单元可移动,能在不同基线长度上获得大气透过率。通过测量多点大气透过率并进行最小二乘拟合,得到大气消光系数和大气能见度。在大气能见度分别为 200, 800, 2000 m 时,对本系统和传统大气透射仪进行了仿真实验。结果表明,本系统测量得到的大气消光系数均方根误差均低于传统大气透射仪,可以有效减小系统误差和随机误差对测量结果的影响。在大气模拟舱内开展的外场实验也验证了本系统的有效性和稳定性。

**关键词** 大气光学; 大气能见度; 大气透过率; 变基线; 最小二乘法

**中图分类号** P415.3+3 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.210102

## Variable Baseline Atmospheric Visibility Measurement System

Feng Shuai<sup>1\*</sup>, Xiong Xinglong<sup>2</sup>, Ma Yuzhao<sup>2</sup>, Li Meng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Engineering Techniques Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

<sup>2</sup> *Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*

**Abstract** In order to solve the problems of traditional atmospheric transmissometer, such as fixed transmitting-receiving baseline, limited sampling space, and poor applicability of transmittance model, a variable baseline atmospheric visibility measurement system is designed in this work. The laser emission unit of the system is fixed, while the optical receiving unit is movable, so the atmospheric transmittance can be obtained at different baseline lengths. By measuring the multi-point atmospheric transmittance and using the least square fitting, the atmospheric extinction coefficient and the atmospheric visibility can be obtained. Simulation experiments of the proposed system and the traditional transmissometer are carried out under the atmospheric visibility conditions of 200, 800, and 2000 m. The results show that the root mean square error of atmospheric extinction coefficient measured by the proposed system is less than that of the traditional transmissometer, which effectively reduces the influence of system error and random error on the measurement results. The effectiveness and reliability of the system are verified by the external field experiment in the atmosphere environment simulation chamber.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric visibility; atmospheric transmittance; variable baseline; least square method

**OCIS codes** 010.7295; 000.2170; 010.1320

## 1 引言

大气能见度是表征大气透明度的物理量,在气象、交通、军事和日常生活中受到了广泛关注<sup>[1-2]</sup>。作为重要的气象因素,大气能见度对航空飞行至关重要。目测是大气能见度的观测方法之一,但客观

性、准确性较差。目前,大多数民航机场通过安装能见度仪实时监测机场跑道区域的大气能见度,为航空飞行活动提供气象信息。

大气透射仪和前向散射仪是民航机场常见的大气能见度观测设备<sup>[3-4]</sup>。大气透射仪将光学收发单元以一定基线长度相对放置,通过测量收发

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-05-21; 录用日期: 2020-06-11;

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1833111)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122019068)

\* E-mail: fengshuai2004@126.com

两点间的大气透过率计算大气能见度。相比前向散射仪,采样空间更大,在一定程度上能克服前向散射仪以点代面的缺点,且在多次对比实验中表现出更高的可靠性和准确性<sup>[5-6]</sup>,是大气能见度观测的主导设备。其中,芬兰维萨拉公司的LT31型大气透射仪以其优良的性能成为民航机场大气能见度仪的首选<sup>[7]</sup>。国内相关研究方面,长春气象仪器研究所研制了TS型透射表<sup>[8]</sup>,与维萨拉公司生产的大气透射仪LP11、LR11测量偏差不超过10%。程绍荣等<sup>[9]</sup>介绍了一种以白光LED为光源的大气透射仪样机,通过在光学天线上加装多功能门机构,延长了定期清洁镜头的周期,测量指标接近维萨拉同类产品的水平。王宗俐等<sup>[10]</sup>利用反射镜设计了激光往返式大气透射仪,兼容了透射测量原理和后向散射仪单端收发的优点,具有抗环境污染能力强和测量灵敏度可调等优点。田林等<sup>[11]</sup>基于角反射器设计了单端透射式能见度仪,并与维萨拉的前向散射仪FD12进行了对比测量,两者测量结果的一致性较好。然而国内对大气透射仪的研究还处于样机阶段,少有成熟产品的出现,导致民航机场使用的大气透射仪被国外产品垄断,售价及后期维护费用较高。此外,虽然以LT31为代表的大气透射仪作为成熟产品已运行多年,但在使用中仍然存在测量值与目测值偏差较大的情况<sup>[12-13]</sup>。这一方面与光源、光路、探测器等硬件因素有关<sup>[14-16]</sup>,另一方面与大气透过率模型有关<sup>[17-19]</sup>。进口大气透射仪的透过率模型基于国外的大气环境建立,直接应用于国内大气环境必然存在“水土不服”的问题。

因此,基于大气透射原理,从软硬件方面改进现有大气透射仪,研究高精度的大气能见度观测系统具有重要意义。本课题组设计了一种变基线大气能见度测量系统,文献<sup>[13]</sup>给出了系统的测量装置,并讨论了测量间隔点数对测量结果的影响。相比传统大气透射仪,该系统最大的特点是光学接收单元具有可移动性。通过改变光学接收单元的位置,可在多个基线长度上测量大气透过率,从而实现大气能见度的变基线测量。本文在介绍系统测量原理和组成的基础上,根据大气透射仪的测量误差来源,通过理论分析和仿真实验论述了变基线大气能见度测量系统在处理系统误差和随机误差方面的优势,验证了该系统可从根源上克服硬件引入的系统误差,有效提高大气能见度的测量精度。

## 2 测量原理及系统实现

### 2.1 测量原理

在气象上,大气能见度是指视力正常的人,在当时天气条件下能从天空背景中看到和辨认出黑色目标物(大小适度)的最大距离。世界气象组织采用气象光学视程(MOR)作为大气能见度的特征量,即色温为2700 K的白炽灯发出的平行光束在大气中光通量削弱至初始值5%时所经过的路径长度。根据Koschmieder定律,MOR与大气消光系数 $\sigma$ 的关系为

$$M = -\frac{\ln \epsilon}{\sigma}, \quad (1)$$

式中, $M$ 为气象光学视程, $\epsilon$ 为视觉对比阈值,一般取为0.05。由(1)式可知,MOR测量的关键在于大气消光系数的测量,根据Bouguer-Lambert定律,激光在均匀大气中的衰减可表示为

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma r), \quad (2)$$

式中, $T$ 为大气透过率, $I$ 为接收光强, $I_0$ 为出射光强, $r$ 为基线长度,即大气消光系数的测量依赖于大气透过率的精确测量。因此,设计了一种变基线大气能见度测量方法,主要思想是将固定基线改为可变基线,在多个基线长度上测量大气透过率,对得到的多点大气透过率进行最小二乘拟合,从而获得探测路径上的大气消光系数,如图1所示。

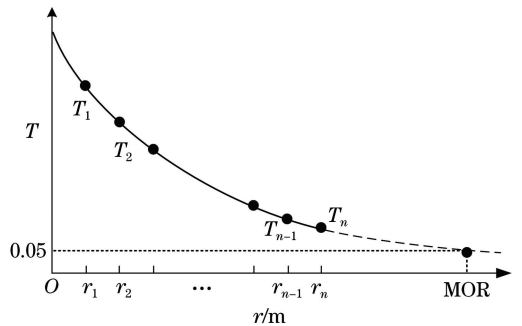


图1 变基线大气能见度的测量原理

Fig. 1 Measurement principle of atmospheric visibility with variable baseline

当基线长度分别为 $r_1, r_2, \dots, r_n$ 时,(2)式可写为

$$\begin{cases} T_1 = \frac{I_1}{I_0} = \exp(-\sigma r_1) \\ T_2 = \frac{I_2}{I_0} = \exp(-\sigma r_2) \\ \dots \\ T_n = \frac{I_n}{I_0} = \exp(-\sigma r_n) \end{cases}. \quad (3)$$

对(3)式两边取自然对数,得到

$$\ln T_i = -\sigma r_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

由(4)式可知,变基线测量时,一个  $r_i$  可得到一个  $\ln T_i$ 。以  $r_i$  为自变量,  $\ln T_i$  为因变量,采用最小二乘法,构造误差平方和函数  $f(\sigma)$ ,令其一阶导数为 0,得到的大气消光系数为

$$\begin{cases} f(\sigma) = \sum_{i=1}^n [\ln T_i - (-\sigma r_i)]^2 \\ \frac{df(\sigma)}{d\sigma} = 0 \\ \sigma = -\frac{\sum_{i=1}^n r_i \ln T_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2} \end{cases} \quad (5)$$

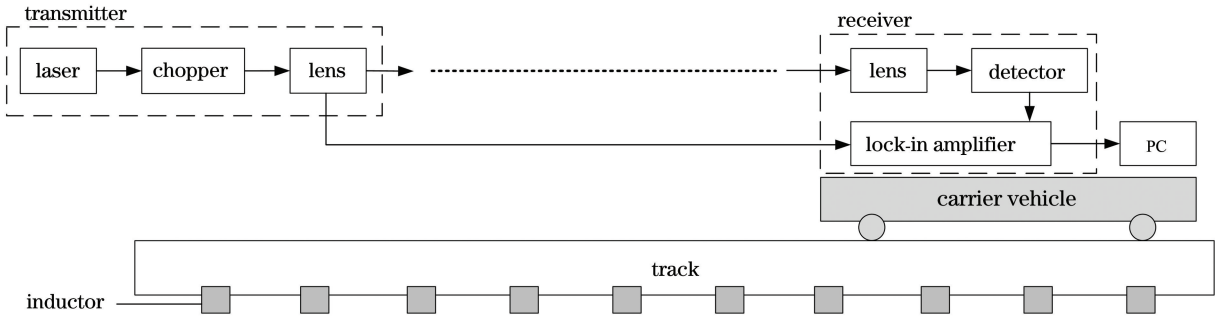


图 2 系统的组成

Fig. 2 Composition of the system

光学接收单元包括透镜组、光电探测器和锁相放大器。探测路径上经大气衰减的平行光被光电探测器接收后送入锁相放大器。该信号作为探测信号,与斩波器输出的参考信号一并由锁相放大器进行相关检测。锁相放大器利用参考信号与探测信号频率相关、与噪声信号频率不相关的特点,在提取有用信息的同时抑制光源、光路及电路中的随机噪声,提高了输出信噪比。最终将锁相放大器输出的光强信号送入计算机进行处理。

数据处理及控制单元采用工控机,用于完成数据的计算处理以及光学斩波器、光电探测器、锁相放大器及载运小车的控制。载运小车通过伺服电机驱动,由蓄电池提供动力,用于搭载光学接收单元和数据处理单元。使用的滑轨长为 55 m,轨道间距为 0.35 m,安装精度可保证光学收发单元的准直度及载运小车的平稳移动。滑轨两侧每隔 5 m 安装一个感应片,配合载运小车的接近传感器进行定位。

系统工作时,载运小车从激光发射端出发,首先

## 2.2 系统实现

变基线大气能见度测量系统由激光发射单元、光学接收单元、数据处理及控制单元(统称为 PC)、载运小车和高精度滑轨组成,其中,载运小车位于高精度滑轨上,如图 2 所示。

激光发射单元由激光器、光学斩波器、透镜组和光束调整架组成。激光器输出的连续光波长为 532 nm,接近人眼最为敏感的 550 nm 波长。激光器发出的光首先经光学斩波器调制为脉冲光,然后由分光镜分为两束,大部分光作为探测信号经扩束后射向大气,小部分光作为参考信号送入接收端的锁相放大器。光学斩波器相当于一个光开关,以一定频率对激光进行调制,输出与探测信号频率一致的参考信号。光束调整架具有粗调和微调功能,可调整出射光束的角度和高度,确保光学收发单元的高度准直性。

采集出射光强,然后每隔 5 m 驻留一次,由光学接收单元对不同基线长度上的光强信号进行测量,经数据处理后得到大气透过率。测量完毕后,载运小车复位,数据处理单元根据多点透过率计算出大气消光系数和大气能见度。

## 3 测量误差分析

大气透射仪的测量误差包括系统误差和随机误差,其中,系统误差主要来自光源的稳定性、光学收发单元的准直度和窗口玻璃污染,受系统误差影响的收发光强可表示为

$$\begin{cases} I_T = \lambda_T I_0 \\ I_R = \lambda_R I_0 \exp(-\sigma r) \end{cases}, \quad (6)$$

式中,  $I_T$  为发射端的实际光强,  $I_R$  为接收端的实际光强,  $\lambda_T$ 、 $\lambda_R$  分别为发射端、接收端的系统误差因子。 $\lambda$  越小,表明系统误差越大。

在系统误差中,窗口玻璃污染对大气透射仪测量精度的影响最为严重,而传统大气透射仪使用两套接收机分别检测收发光强,其定期清洁窗口玻璃

的方法不能从根本上解决问题。根据(6)式得到的大气透过率为

$$T = I_R / I_T = \lambda_R / \lambda_T \exp(-\sigma r). \quad (7)$$

由(7)式可知,系统误差因子隐含在大气透过率中无法消除,除非收发端系统误差完全一致。针对该问题,本系统使用单一接收机进行双端检测,即光学接收单元同时检测收发光强,其接收光强可表示为

$$I'_R = \lambda_R I_0 \exp(-\sigma r). \quad (8)$$

由(8)式可知,当 $r=0$  m,光学接收单元位于激光发射端时,接收端检测到的光强即为发射光强,可表示为

$$I'_T = \lambda_R I_0. \quad (9)$$

结合(8)式、(9)式,得到的大气透过率为

$$T' = I'_R / I'_T = \exp(-\sigma r). \quad (10)$$

由(10)式可知,系统误差因子因透过率的比值形式被抵消。因此,本系统能从根源上消除系统误差对测量结果的影响。

探测器的暗电流噪声及电路中的热噪声、散粒噪声是随机误差的主要来源。与传统大气透射仪类似,本系统以多次测量求平均值的方法减小随机误差对测量结果的影响。但传统大气透射仪基线长度固定,仅能进行单点多次测量。而本系统的基线长度可变,可进行多点、多次测量。随着测量间隔点数和测量次数的增加,噪声方差将进一步减小,同时在透过率存在测量误差的前提下,可利用最小二乘法得到大气消光系数的最优解。

## 4 仿真实验

选取 200, 800, 2000 m 三种大气能见度作为实验研究对象,分别模拟低、中、高能能见度天气,以此评

估随机误差和系统误差对本系统及传统大气透射仪的影响。为客观反映系统性能,利用蒙特卡罗法进行仿真实验,以均方根误差(RMSE)作为性能评价标准。传统大气透射仪的基线长度 50 m,为定基线测量。本系统为变基线测量,基线长度分别为 5, 10, ..., 50 m 等,共 10 个测试点。为便于分析,对发射光强进行归一化处理,系统误差因子 $\lambda$ 的取值范围为 $[0.2, 1]$ 。

### 4.1 随机误差对测量结果的影响

假设水平方向大气分布均匀,200, 800, 2000 m 的大气能见度对应的大气消光系数真值分别为 15, 3.75, 1.5  $\text{km}^{-1}$ 。设收发端的系统误差因子保持不变, $\lambda_T$  和  $\lambda_R$  分别为 0.9 和 0.8。通过加入高斯白噪声改变系统信噪比,在每个信噪比下进行 100 次蒙特卡罗实验。信噪比为 10 ~ 40 dB 时,本系统与传统大气透射仪大气消光系数的测量结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,当大气能见度为 200 m、信噪比为 10 dB 时,本系统和传统大气透射仪的最大 RMSE 分别为 6.3197 和 8.0291。随着信噪比的增大,本系统和传统大气透射仪的 RMSE 逐渐减小,但传统大气透射仪的 RMSE 整体高于本系统。当大气能见度为 800 m 时,二者的测量结果趋势相同,如图 3(b)所示。当大气能见度为 2000 m、信噪比为 10 dB 时,本系统和传统大气透射仪的最大 RMSE 分别为 4.3382 和 5.7651。当信噪比增至 40 dB 时,传统大气透射仪的 RMSE 为 2.3538,本系统仅为 0.1262,如图 3(c)所示。即增大信噪比并没有使传统大气透射仪的 RMSE 出现显著下降,但本系统的测量精度得到了明显提高。这表明本系统受随机误差的影响较小,具有良好的抗噪声能力,且对多种能见度天气的适用性较好。

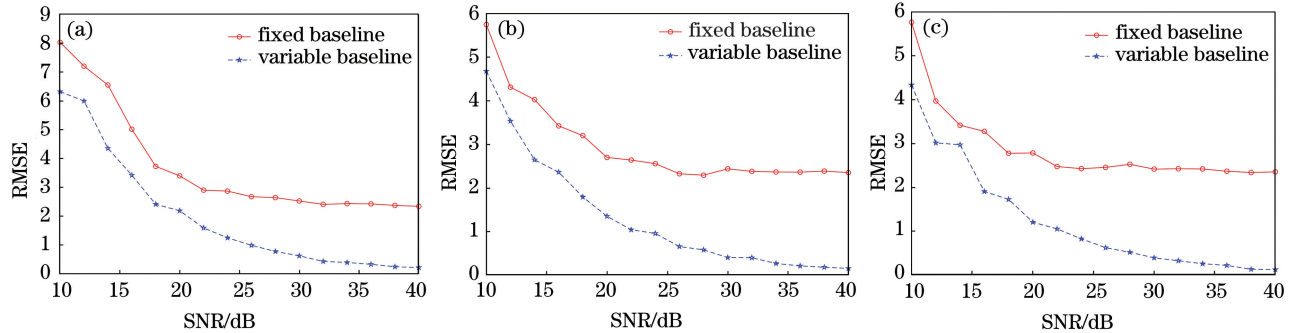


图 3 不同大气能见度下信噪比对测量结果的影响。(a)200 m;(b)800 m;(c)2000 m

Fig. 3 Influence of signal-to-noise ratio on measurement results under different atmospheric visibility.

(a) 200 m; (b) 800 m; (c) 2000 m



## 4.2 系统误差对测量结果的影响

设  $\lambda_T$  保持 0.9 不变,  $\lambda_R$  在区间  $[0.2, 1]$  内变化, 采用蒙特卡罗法得到信噪比为 25 dB, 大气能见度分别为 200 m 和 2000 m 时, 本系统与传统大气透射仪的大气消光系数, 如图 4 所示。从图 4(a) 可以看出, 当大气能见度为 200 m、 $\lambda_R$  较小时, 传统大气透射仪的测量误差较大。如当  $\lambda_R$  为 0.5 时, 其 RMSE 为 12.0068, 随着  $\lambda_R$  的增大, 传统大气透射仪的 RMSE 有所减小, 直到  $\lambda_R$  为 0.9 与  $\lambda_T$  接近时, 其 RMSE 才与本系统相当。但该结果的前提是

收发端系统误差一致, 实际中无法做到。本系统因单端采样, 测量结果受系统误差的影响较小。当  $\lambda_R=0.5$  时, RMSE 的最大值为 1.9614, 即使在  $\lambda_R=0.2$  时, 本系统的 RMSE 也远远小于传统大气透射仪。从图 4(b) 可以看出, 当大气能见度为 2000 m 时, 相比传统大气透射仪, 本系统的测量精度更高, 而系统误差会严重影响传统大气透射仪的测量精度, 仅在理想情况下, 即  $\lambda_R=0.9$  时, 两者的测量结果接近, 这表明本系统在处理系统误差方面具有独特优势。

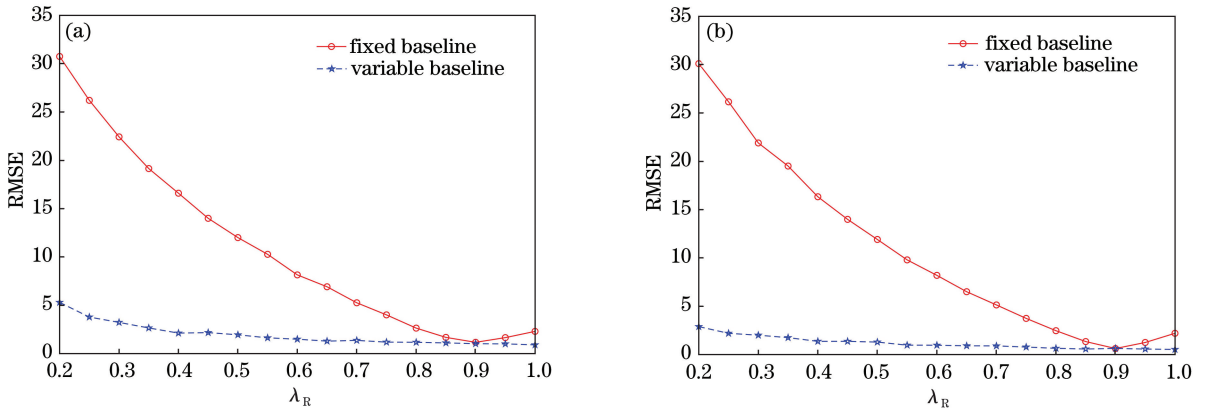


图 4 不同大气能见度下系统误差对测量结果的影响。(a)200 m;(b)2000 m

Fig. 4 Influence of system error on measurement results under different atmospheric visibility. (a) 200 m; (b) 2000 m

## 5 外场实验

本系统搭建完成后, 开展了大量的外场实验。首先利用自行建造的大气环境模拟舱进行了观测实验, 模拟舱的长为 55 m, 高为 1.8 m, 宽为 1.6 m, 与变基线测量系统同步设计, 如图 5 所示。向模拟舱内注入雾化气溶胶、黑碳气溶胶、粉尘气溶胶等各类气溶胶, 经供气循环系统混合, 在短时间内可实现大气能见度的快速可控调节。多次测量实验结果表明, 随着模拟舱内气溶胶注入量的增大, 本系统能很好地反映大气能见度的变化趋势。其次, 在自然环境下, 将本系统与天津滨海国际机场使用的大气透射仪进行了对比测量, 后者的大气能见度信息通过机场发布的气象报文获取。模拟舱的建设地点距离天津滨海国际机场直线距离约为 7 km, 机场气象报文作为实际运行部门的数据可信度较高, 可用于数据对比。在大雾、轻雾、晴天等不同天气条件下开展了多次对比实验, 得到二者的测量偏差在 10% 以内的占比达 92%, 测量偏差大于 20% 的不足 5%, 这表明两者的测量结果一致性较好, 验证了本系统的稳定性和有效性。



图 5 大气环境模拟舱

Fig. 5 Atmospheric environment simulation chamber

## 6 结 论

设计了一种变基线大气能见度测量系统, 相比传统大气透射仪, 本系统的光学接收单元具有可移动性, 通过变基线方式测量大气透过率, 扩大了大气能见度的动态测量范围, 能有效应对测量基线上出现的大气非均匀分布状况。仅使用接收端测量收发光强, 以单端检测方式减小了系统误差和随机误差

对测量结果的影响,采用最小二乘法拟合多点大气透过率,提高了系统的整体测量精度。对三种典型大气能见度的仿真实验结果表明,对于不同的信噪比和系统误差因子,本系统得到的大气消光系数RMSE均低于传统大气透射仪。外场实验结果表明,本系统的测量结果与机场实际运行的大气透射仪的测量偏差集中在10%以内。除了用于大气能见度测量外,本系统还可用于能见度仪的标定和校准。目前系统还处于实验、改进阶段,随着系统软硬件的完善及其产品化进程的推进,有助于打破国外大气透射仪的价格垄断,具有良好的市场前景。

### 参 考 文 献

- [1] Fu G, Li X L, Wei N. Review on the atmospheric visibility research[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2009, 39(5): 855-862.  
傅刚, 李晓岚, 魏娜. 大气能见度研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 855-862.
- [2] Ye K, Yang L, Zhen X Q, et al. Design and implementation of visibility measurement system based on integrating sphere light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240104.  
叶开, 杨玲, 甄小琼, 等. 基于积分球光源的能见度测量系统设计及实现[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240104.
- [3] Tian L. Measuring data comparative analysis between atmospheric transmission meter and forward scatter meter in the low visibility weather [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2009, 26(3): 46-49.  
田丽. 大气透射仪与前散射仪在低能见度条件下的测量数据对比分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 26(3): 46-49.
- [4] Fan D W, Cao D B, Zhu G D, et al. Comparative analysis of runway visual range of atmospheric transmission meter and forward scattering meter in low visibility conditions[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(4): 58-63.  
范大伟, 曹敦波, 朱国栋, 等. 大气透射仪与前向散射仪低能见度条件下跑道视程数据对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 58-63.
- [5] Ming H, Chen L J, Gao L H, et al. Comparison on measurements by airport visibility automatic observation instruments in low visibility weather[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(6): 750-758.  
明虎, 陈丽杰, 高联辉, 等. 机场低能见度自动观测设备测量数据对比[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 750-758.
- [6] Pu J P, Hu Z G, Wei Y C, et al. Comparison and analysis of property of visibility automatic observation instruments[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2002, 22(1): 60-71.  
濮江平, 胡宗刚, 魏阳春, 等. 能见度自动观测系统性能对比及分析[J]. 气象科学, 2002, 22(1): 60-71.
- [7] Han X Q. The operating principles of transmissometer LT31 and the effect of weather[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2017, 28(5): 61-64.  
韩夏清. LT31 大气透射仪工作原理及受天气影响的个例分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2017, 28(5): 61-64.
- [8] Sun Y D, Li H. Technical problems analysis of TS type transmissometer in field use[J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument, 1998, 15(4): 3-5.  
孙耀东, 李虹. TS 型透射表现场使用中的技术问题分析[J]. 气象水文海洋仪器, 1998, 15(4): 3-5.
- [9] Cheng S R, Wei Q Z, Lü J. The development of a new atmosphere transmittance meter [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(2): 144-150.  
程绍荣, 魏全忠, 吕军. 一种实用型大气透射式能见度仪的研制[J]. 光电工程, 2011, 38(2): 144-150.
- [10] Wang Z L, Cao N F, Wang C L. New design of laser instrument for detecting the visibility [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 629-632.  
王宗俐, 曹乃锋, 王春录. 一种激光能见度仪设计的新方法[J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 629-632.
- [11] Tian L, Lu Y H, Gui H Q, et al. Investigation on one-terminal transmission visibility meter based on using corner reflector[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(5): 390-397.  
田林, 陆亦怀, 桂华侨, 等. 基于角反射器的单端透射式能见度仪的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(5): 390-397.
- [12] Zhuang Z B, Tai H D, Jiang L H. Changing baseline lengths method of visibility measurement and evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0201001.  
庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0201001.
- [13] Li M, Xu J Z, Xiong X L, et al. Mobile multiple

- baselines visibility meter and its measurement approach [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47 (4): 0401002.
- 李猛, 徐玖治, 熊兴隆, 等. 移动式多基线能见度测试系统及其测量方法 [J]. 光子学报, 2018, 47 (4): 0401002.
- [14] Xiao S R, Shang G Q, Zhou J, et al. Influence of detection wavelength drift on visibility measurement [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35 (5): 853-857.
- 肖韶荣, 尚国庆, 周佳, 等. 探测光波长漂移对能见度测量的影响 [J]. 应用光学, 2014, 35 (5): 853-857.
- [15] Zhou S D, Ma Z L. Influence of optical path collimation on measurement of long baseline transmittance meter [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(1): 87-90.
- 周树道, 马忠良. 光路准直对长基线透射式能见度仪测量的影响 [J]. 应用光学, 2016, 37(1): 87-90.
- [16] Wei T W, Wang C, Shanguan M J, et al. Effect of detector nonlinear response on visibility lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (11): 110402.
- 魏天问, 王冲, 上官明佳, 等. 探测器非线性响应对能见度激光雷达的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110402.
- [17] Geng R, Chen F F, Lv Y. Research on influencing factors of transmittance for laser transmission in atmosphere [J]. Laser Journal, 2016, 37 (12): 13-17.
- 耿蕊, 陈芳芳, 吕勇. 激光大气传输透过率影响因素研究 [J]. 激光杂志, 2016, 37(12): 13-17.
- [18] Sun Q Y, Xu J, Gao Y, et al. Transmission characteristics of visible light in different types of aerosols [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110103.
- 孙琦云, 徐军, 高旸, 等. 可见光在不同类型气溶胶中的传输特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55 (11): 110103.
- [19] Fan W, Chen K, Ling X F, et al. Atmospheric optical characteristics of national climate observation in Shouxian county in winter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 050101.
- 范伟, 陈凯, 凌新峰, 等. 寿县国家气候观象台的冬季大气光学特征 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 050101.