

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.05.10

基于透射法的能见度测量装置的误差分析

邢向楠¹, 秦少刚², 李涛¹, 冷杰¹

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 介绍了透射法测量能见度的基本原理, 给出了一种基于透射法的能见度测量装置的设计及其性能指标。详细分析了该装置测量能见度的主要误差来源, 包括: 数学模型、硬件系统、实验方法和环境等四个方面。总结这些误差来源对测量结果的影响, 并对如何减小误差影响提出建议。

关键词: 能见度; 透射法; 测量; 误差分析

中图分类号: TB9; TH7

文章标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)05-0036-04

Error Analysis for Visibility Measuring Device Based on Transmission Method

XING Xiangnan¹, QIN Shaogang², LI Tao¹, LENG Jie¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China)

Abstract: The visibility measuring principle of the transmission method is introduced. The design and specifications of the visibility measuring device based on transmission method is proposed. The primary visibility measuring error sources of the device is analyzed in detail, including four aspects: mathematical model, hardware system, experimental methods and the environment. The effect of these error sources on measurement results is summarized. And how to reduce the errors effect is suggested.

Key words: visibility; transmission method; measurement; error analysis

0 引言

作为气象观测的要素之一, 能见度的测报不仅用于日常气象部门的天气分析, 更广泛用于军事领域、航空、航海、高速公路等交通运输部门以及环境监测部门。近年来, 由于工业污染的加重与异常气候的活跃, 使各地的能见度日益降低。我国幅员辽阔, 由雾、霾、污染等各种因素导致的极低能见度更是频繁发生, 因此, 提高能见度的监测能力迫在眉睫。要提高能见度监测能力, 就要提高测量仪器的准确度, 相应地就要客观全面地分析仪器测量能见度的误差来源, 以及这些误差对于测量结果的影响。

1 透射法测量能见度的原理

透射法测量能见度是以厚度等于“基线”长度的气柱为采样样本, 用安装在气柱一端的光发射器探照采样样本, 用安装在气柱另一端的光接收器探测衰减后

剩余的光辐射, 比较光辐射的初始能量(发光强度)与被大气水平气柱衰减后的光辐射能量, 即可确定大气透射比, 运用由柯西米德公式导出的公式(1)反演能见度^[1]:

$$V = \frac{2.996B}{-\ln T} \quad (1)$$

式中: V 为能见度; T 为大气透射比; B 为基线长度。

2 透射式能见度测量装置简介

基于透射法能见度测量原理, 构建了一种新型单端透射式能见度测量装置^[1], 如图1所示。该装置主要包括能见度测量系统(改造全站仪)及其合作目标(反射棱镜), 装置借用全站仪的机械系统、光学结构, 在测距功能的基础上, 通过对电路系统进行设计完善而成。

该装置与国家气象局认可的透射式能见度测量仪器进行长期的户外实验, 能见度测量范围 1000 ~ 10000 m 时, 通过能见度校准的数学建模, 实现了以下技术指标: 能见度测量范围为 1000 ~ 5000 m (不含 5000 m) 时, 测量相对误差 $\leq \pm 10\%$; 能见度测量范围为

收稿日期: 2016-08-08

作者简介: 邢向楠(1986-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为计量测试技术及仪器。

5000~10000 m时, 测量相对误差 $\leq \pm 15\%$ 。



图1 能见度测量装置与合作目标

3 装置测量能见度的误差分析

3.1 数学模型的误差

由能见度计算数学模型带来的误差称为算法误差。以下从能见度测量理论本身与装置采用的修正模型两方面讨论数学模型引入的误差。

3.1.1 测量理论的误差

透射法测量局部的一段空气柱的大气衰减, 得到采样空间的透射比后, 仍以式(1)反演能见度。该装置的探测误差与基线长度测量误差和透射比测量误差直接相关, 分别分析这两个直接测得量对该装置的误差影响。

1) 基线测量误差对能见度误差的影响

对于该装置而言, 装置测量基线为 B , 假设装置测得的大气透射比短时间内恒定, 即为真实反映大气衰减的常量, 对式(1)两边求导, 得:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dB}{B} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 基线测量的相对误差将直接引入能见度测量, 基线的确定对能见度的测量精度影响较大。假设接收光能量的大小不受基线微小变化的影响, 基线测量大于其真实值 0.1 m, 则在能见度 5 km 时引入 500 m 的误差。为了尽量减小基线引入的误差, 使用测距准确度高达 ± 0.01 m 的测距仪器进行基线的精确测量, 则在能见度 5 km 时将误差减小至 50 m。

2) 透射比测量误差对能见度误差的影响

该装置的大气透射比由采样空间大气衰减前后的电压信号比较得到。经装置初始发射光强与最终光强直接比较得到的透射比为 T 。令 $\alpha = -2.996B$, 则式(1)简化为

$$V = \frac{\alpha}{\ln T} \quad (3)$$

对式(3)求导, 得:

$$\frac{dV}{dT} = -\frac{\alpha}{T(\ln T)^2} = -\frac{V}{T \ln T} \quad (4)$$

对式(4)求导, 得:

$$d\left(\frac{dV}{V}\right) = \frac{dT(\ln T + 1)}{(T \ln T)^2} \quad (5)$$

令 $d(dV/V) = 0$, 则 $T = e^{-1} \approx 0.368$, 通过对式(5)进行分析, 最小测量相对误差出现在 $T = 0.368$ 。

由式(4), 得:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{dT}{T \ln T} \quad (6)$$

式(6)即能见度测量相对误差与透射比之间的函数关系。根据该式描绘能见度的相对误差曲线, 取透射比 T 的测量准确度为 $\pm 1\%$, 如图 2 反映了能见度测量相对误差随透射比变化的情况。若透射比 T 的测量准确度下降到 2%~3% 左右, 则图中竖轴给出的相对误差须乘以同样的因子即 2~3 倍。

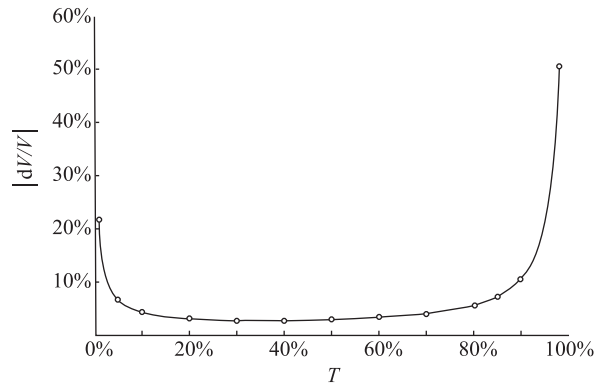


图2 V 的测量相对误差随 T 变化的曲线

由图 2 看出, 在透射比范围内的测量误差分布不均; 在透射比接近上下限时, 测量误差呈指数增长、测量精度低; 重点考虑低能见度, 其测量相对误差随着能见度的降低而骤增。由此可见, 透射比的测量误差指数级影响能见度的测量误差。透射比的探测误差又与发射器光源强度的误差、光电系统的误差、发射器和接收器透镜脏污程度等诸多因素直接相关。

3.1.2 修正模型的误差

该装置在实验数据处理中, 除了运用基本的能见度数学模型以外, 还进行了如下修正:

对应 $0.84 \mu\text{m}$ 近红外光的消光系数修正: 非可见光谱波长的修正依据也为经验公式, 分别采用对应不同范围能见度的修正系数^[1]。能见度测量仪器光源发出的光均是有一定带宽的复合光, 近似认为是中心波长的单色光, 如该装置实际光谱范围约为 $(0.84 \pm$

0.035) μm 。实际大气对不同波长光的衰减特性是不同的,包括吸收、散射比重的不同,以及总体消光的不同,因此,采用经验公式,同时假设光辐射为单色光均导致了一定的算法误差。

二系数整体修正(一阶拟合)得到的修正系数是经验值^[2],将其用于其他时间的能见度测量,也会引入一定误差。

应肯定采用以上各种算法或修正都是为了更加精确地计算能见度。尽管采用修正与校准后的能见度计算数学模型反演能见度,误差将会大大减小,但在能见度精确计算中也会引入一定的算法误差,且不容忽视。

综上,能见度测量理论与数学模型的完善,是提高仪器能见度测量精度的必要基础。

3.2 硬件系统的误差

硬件系统的误差主要指装置光电系统引入的误差。依据装置提取信号的产生、转换、处理、传输和显示等途径,能见度测量装置各部件误差的因素有:光辐射(发光功率)稳定性误差、光学系统参数和调整误差、光电器件噪声误差、电路放大处理误差、信号传输数字显示的误差等。

3.2.1 光学系统的误差

该装置测得的大气透射比包括了所有的衰减因素。但要测得准确的大气透射比首先需要很稳定的光源。根据WMO关于能见度测量准确度的要求,1500 m以上为 $\pm 20\%$,那么,5 km能见度时只要光源波动1.2%就超出要求了。

光源(发光二极管)的性能误差主要由:控制电路参数误差、环境温度变化、工作时间长短等,造成光辐射的稳定性误差。能见度测量仪器长期户外作业造成光源老化,会使发光功率稳定性急剧降低,因此,能见度仪器需定期检测光源的性能。

装置的光学零件加工误差、光学系统装调误差等,能造成光学系统参数和调整误差,光学器件的固定、发射器和接收器的准直性也会影响能见度测量精度。如光源的中心位置安装固定不正确,将直接造成仪器测量能见度的很大误差。

3.2.2 电路系统的误差

装置光电探测器的参数误差、环境温度变化、工作时间长短等,能造成光电探测器的噪声误差;所采用雪崩二极管自身工作区间的调试需要较大的高压偏置,对于偏压的控制也引入一定误差。

大气透射比是由接收探测器的信号输出,经过电

路处理、放大、转换而以电压或频率信号给出的,由于电路放大倍数等参数是由器件参数决定的,而器件参数又有一定的允许变化范围,从而造成了电路参数有一定范围内的离散性。电路参数的离散性必然导致测量误差^[3]。

其他电子器件的参数误差、环境温度变化、工作时间长短等,能造成电路放大处理的误差。具体而言,体现于电路中的噪声将叠加到电压幅值上,从而使得能见度测量不稳定或造成一定的偏差量。

3.3 实验方法的误差

实验方法的误差主要分为两部分:装置独立进行户外实验的误差与采用比对实验方法的误差。

3.3.1 装置实验的误差

在进行外场调整、对准过程中,由于手动操作等人为因素将引入微小的误差。尽管装置采用了原全站仪的一套成熟的调焦对准系统,便于调整且对准精确,但肉眼瞄准十字的吻合程度仍然存在一定误差,且长时间频繁的人工采样会使对准十字逐渐产生偏差。

严格来说,装置发射的光经过长距离传输均会产生一定发散,随着距离的加长,接收到的光斑逐渐扩大。加上光学镜头面积有限,使得接收端接收到的光波不是全部反射回来的光,而反演计算能见度认为接收到的是经反射镜反射的全部的光,这种光的损失必将引入相应的误差。为了尽量避免光的扩散引入的误差,该装置采用适当的较短基线的采样空间进行实验。

此外,尽管采用调制光以减少背景杂散光的影响,但由于发射光实际为一定波谱范围的复合光,从而引入一定的背景噪声。实验中设计了挡光措施,以减小杂散光叠加到电信号上的背景噪声。

3.3.2 比对方法的误差

由于装置选用了参考仪器(HY-VT100型透射仪)提供的能见度值作为参考值进行校准,并采用校准后的经验公式进行比对实验,从而使得参考仪器的误差,将直接引入该装置测量能见度的数据处理中。参考仪器的主要误差来自两方面:调整对准与高温漂移。

1) 调整对准的误差

一般透射式能见度仪存在光学系统难以对准、调校困难的问题,在长时间工作后,容易产生失准。国外常采用特殊材料的坚实塔柱固定透射仪,安装于机场并投入使用后,除了定期维护、光学系统调校外,基本上不会再移动。参考仪器是双端式有线连接测量系统,其测量适用场合受供电及接线的限制,如未采用坚实的固定方式,在长期观测中,容易产生光学系

统准直性降低而导致能见度测量值严重下降的问题。实验中进行了长时间的精确对准及稳固措施,尽量减少参考仪器因调校对准不准确直接传递给该装置的误差。

2) 高温漂移的误差

尽管参考仪器有关适用环境温度的产品指标是: $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而实际上, 仪器受温度影响大仍然是一个明显的问题。在长期的户外能见度测量实验中, 参考仪器在高温工作条件下, 由于长时间“炙烤”导致器件发热, 使得能见度测量值产生严重温漂, 可见其对高温的反应比较强烈, 将会造成能见度测量误差较大。因此, 在高温条件下, 不宜使用参考仪器的能见度数据。

3.4 环境因素的误差

能见度测量精度受所处环境的各种因素影响显著, 主要包括天气条件与污染导致的误差。

3.4.1 天气条件的误差

实验环境中各种天气条件带来的误差: 主要是实验当时的条件, 如较大的风速、不同的气温、湿度对能见度的测量值都有很大影响, 尤其是当仪器产生强烈温漂时, 会导致能见度测量值急剧降低。各种天气条件(大雾、沙尘等)下不同的修正系数也将引入相当的误差^[4], 当测量环境为雨、雪、大雾、霾等天气, 需要按照气象条件有关的降雨强度、降雪强度、雾和霾粒子浓度来修正^[5], 局地大气状况(阵雨、强风和沙尘等)也会导致不具代表性的大气透射比读数背离(Koschmieder)定律。

该装置适用于日常能见度测量及由雾引起的低能见度测量。由于装置构架于全站仪保守的工作温度指标($-20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$)之上, 进行了必要的背景强光遮挡的改良, 使其在比对实验中并未表现出高温下的明显温漂。

3.4.2 窗口污染的误差

光学系统污染带来的误差是影响该装置测量精度的直接因素。窗口污染的问题也是重要的误差源, 更是透射式能见度装置回避不了的问题。污染的影响主要是由其直接导致透射比急剧下降的特点所决定的: 比如初始能见度校准为 10 km , 若能能见度没变, 而污染

导致系统透射比降低一个百分点, 则反演的能见度值降至 6 km , 引入的误差非常大。该装置采用一定的遮挡结构以减小污染的影响。能见度测量仪器工作场合的特殊性, 即在各种大气环境, 尤其是恶劣天气条件下, 要求其仍然能够精确测量能见度, 对仪器提出了更高的要求。

3.5 误差分析

该装置测量能见度的误差来源主要有四个方面: 数学模型、硬件系统、实验方法和环境。其中, 由数学模型带来的算法误差不可避免, 应该不断完善测量理论及修正模型以减小误差的引入; 硬件系统的误差可以随着光电系统的技术持续改进而不断减小; 实验方法的误差是可以尽量避免的, 如尽量减小实验操作过程引入不必要的误差, 以及采取与真实大气能见度而不是参考仪器的比对方法等; 环境影响的误差可以通过提高测量仪器对环境的适应性予以改善。因此, 对测量结果影响最大的数学模型和硬件系统, 是该装置的最主要误差源。

4 结束语

本文进行了透射式能见度仪器的误差分析, 揭示了此类仪器的主要误差源: 数学模型误差和硬件系统误差, 并对主要误差的具体影响进行了详细分析, 为能见度仪器提高测量精度提供理论参考。

参考文献

- [1] 邢向楠, 崔岩梅, 李涛, 等. 基于透射法的能见度测量装置设计与实验研究[J]. 计测技术, 2011, 31(3): 10-13.
- [2] 邢向楠, 崔岩梅, 李涛, 等. 一种能见度测量修正方法及其应用研究[J]. 计测技术, 2013, 33(3): 44-46.
- [3] 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: 1-132.
- [4] Melina P. Ioannidou. Study of atmospheric visibility pertaining to soot scavenging by sulfate droplets[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 96: 473-485.
- [5] Masaru Matsuzawa, Yasuhiko Kajiya, Masao Takeuchi. The development and validation of a method to estimate visibility during snowfall and blowing snow[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41: 91-109.