

数字摄像能见度仪的设计与实现

雷鸣^{1*}, 聂凯², 姜罕盛¹, 戴庞达³, 王京丽⁴¹天津市气象信息中心, 天津 300074;²北京市气象探测中心, 北京 100089;³中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;⁴中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘要 目前,国内外尚没有完全按照能见度定义研制的大气能见度自动观测仪出现。针对这一问题,基于人工观测能见度原理,有效利用 CCD 数字摄像技术构建了数字摄像能见度自动观测系统(DPVS),研制出一款完全按照能见度定义的新型大气能见度自动观测仪,这为国内外大气能见度的观测提供了一个有效的解决方案。实验结果表明,该系统能够有效观测大气能见度,能见度较低时,该系统对比透射仪器的观测误差在 10% 左右,而能见度较高时,该系统对比透射仪器的观测误差则在 20% 左右,且新型自动观测仪的各项指标均符合世界气象组织对能见度仪研制标准的要求。

关键词 大气光学; 大气观测; 自动观测; 数字摄像; 大气能见度

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1701001

Design and Implementation of Digital Camera Visibility Instrument

Lei Ming^{1*}, Nie Kai², Jiang Hansheng¹, Dai Pangda³, Wang Jingli⁴¹Tianjin Meteorological Information Center, Tianjin 300074, China;²Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100089, China;³Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;⁴Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089, China

Abstract At present, no automatic observation instrument for atmospheric visibility is available according to visibility definition. To solve this problem, on the basis of the principle of artificial observation visibility and the effective use of CCD digital photography, this paper builds a digital photographic automatic observation system for visibility (DPVS) and develops a new type of automatic observation instrument for atmospheric visibility completely in accordance with visibility definition, which provides an effective solution for the observation of atmospheric visibility. The experimental results show that the system can precisely observe the atmospheric visibility, and the observation error of the proposed system compared to the transmission instrument is about 10% when the visibility is low and about 20% and the visibility is high. All the indices of the new automatic observation instrument meet the requirements of the World Meteorological Organization for the development standard of visibility meters.

Key words atmospheric optics; atmospheric observation; automatic observation; digital photography; atmospheric visibility

OCIS codes 010.1290; 100.2960; 250.3140

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-03-11; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(41575156)、气象关键技术集成项目(GMAGJ2014M02)、科技部公益性行业专项(GYHY201106047)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IUMKY201605)

通信作者: *lmeagle01@163.com

1 引言

能见度是三大基本气象观测参数之一,不仅是常规天气预报关注的对象,更是陆上交通、航空、航海,以及环境等诸多领域关注的目标^[1-2]。尤其是近些年来,随着雾霾天气的剧增,持续低能见度天气在我国各省市造成多起恶性交通事故^[3]。大气能见度的实时观测与预报,越发成为生活中不可缺少的重要内容。与此同时,能见度的观测条件和现状却相对滞后。因为传统大气能见度观测仪不但价格昂贵,而且容易受沙尘与雨雪天气的影响^[1-4]。所以,国内外针对大气能见度的观测,大多仍是基于人工观测的方式^[5]。

目前,能见度观测一般分为两种方式:人工目测与器测。虽然前者的观测方式更符合能见度定义,但是其客观性比较差,容易因人而异。而器测方式目前基本上都是采用光学仪器进行测量^[6],如透射能见度仪、散射能见度仪^[7-9]。前者利用光束透过两固定点间的大气柱来计算气柱的透射率,进而获取大气能见度值。但该方法存在较大的局限性,因为它要求光束所穿过的气柱要足够长,这无疑对观测条件提出了更高的要求。不但如此,对于人们更为关注的低能见度天气,如雨、雾等天气,该仪器会因为水汽吸收等复杂因素出现较大的误差。后者则通过测量微小范围内的空气散射光强,计算大气消光系数,从而获得最终的大气能见度值^[10-11]。这种测算模式通常是基于大气均匀分布、分子吸收效应为零等诸多假设条件。显然,这些假设在实际当中难以成立。不但如此,实际环境当中大气环境通常是极不均匀的,在这样的情况下,利用有限体积的采样空气消光系数去估算几千米,甚至是几十千米范围的大气能见度,显然是不准确的。

随着计算机和摄像技术的高速发展,计算机和 CCD 的价格也越来越低廉,这为数字摄像能见度自动观测仪的研制进一步提供了便利。20 世纪末我国中国科学院周秀骥院士首先提出了数字摄像能见度仪(DPVS)的观测思想和构架^[1],美国也在同年开始了 DPVS 的研制^[12]。随后,利用数字摄像技术,基于人眼观测原理,完全按照能见度定义进行的大气观测研究不断展开,但这些研究基本上都处于昼夜观测分离的状态,并没有形成完整的观测系统^[13-19]。

本文给出的能见度观测系统,是完整的昼夜观测系统,目前在国内外尚属首创,而随着 CCD 技术的高

速发展,在硬件价格不断下降的背景下,利用数字摄像技术探测大气能见度无疑具有无可比拟的优势。

2 DPVS 系统硬件架构

2.1 DPVS 观测系统架构图

DPVS 从物理结构上可分成两大部分:室外单元和室内单元。观测目标与 CCD 探头构成了室外单元,主要用来获取所需要的视频图像;DPVS 系统与主机则构成了室内单元,主要用于对所得到的视频图像数据进行分析和计算,从而获得最终的大气能见度值。仿照人眼观测原理的 DPVS 系统的观测示意图如图 1 所示。

DPVS 系统以摄像机为基点,按照由近至远的顺序依次设定不同距离的观测目标物,大气能见度的最终数值是根据观测到的最远目标距离与清晰程度进行计算而获得的。

这里值得一提的是 CCD 探头系统。因为它较为复杂,也是室外单元的重点。其核心部件不但包括 CCD 与镜头,而且还配有目标光源开关遥控发射电路、主控制单片机电路、风扇控制电路、CCD 供电电源电路、温度检测电路,以及与主机通信的接口电路等。

观测目标主要包括三部分:用于白天观测的特制目标黑体、用于夜间观测的特制目标光源,以及自然目标,如:烟囱、建筑物和远山等。其中,自行研制的目标光源比较复杂,主要是由目标光源及其开关遥控接收电路和驱动电路等组成,系统结构如图 2 所示。而室内主机则利用探头内的单片机,针对探头内各核心部件的工作状态进行自动监控。

2.2 LED 光源系统设计

夜间观测准确与否的关键在于,双光源初始亮度比是否能够保持稳定。这里作为光源的发光二极管管统一选择 GHC-YR1S2/3T,峰值波长 λ_p 在 518 nm 左右,光谱辐射带宽 $\Delta\lambda$ 在 35 nm 左右(波长范围正好在可见光谱内),工作温度 TOPR (Operating Temperature)为 $[-40\text{ }^\circ\text{C}, 85\text{ }^\circ\text{C}]$ 。同时,针对购买的光源组件进行严格测试,以确保双光源的特征参数一致,有效保证双光源初始亮度比在 0.9932 左右。

通过设计 LED 恒压恒流驱动电路、自动增益控制电路,以及基于 FPGA 的微弱光电信号检测与处理电路(图 3),实现对 LED 光强数据的实时采集处理,从而实现 LED 光强的检测,并通过精准控制 LED 光强,使双光源初始亮度比能够保持高度稳定。

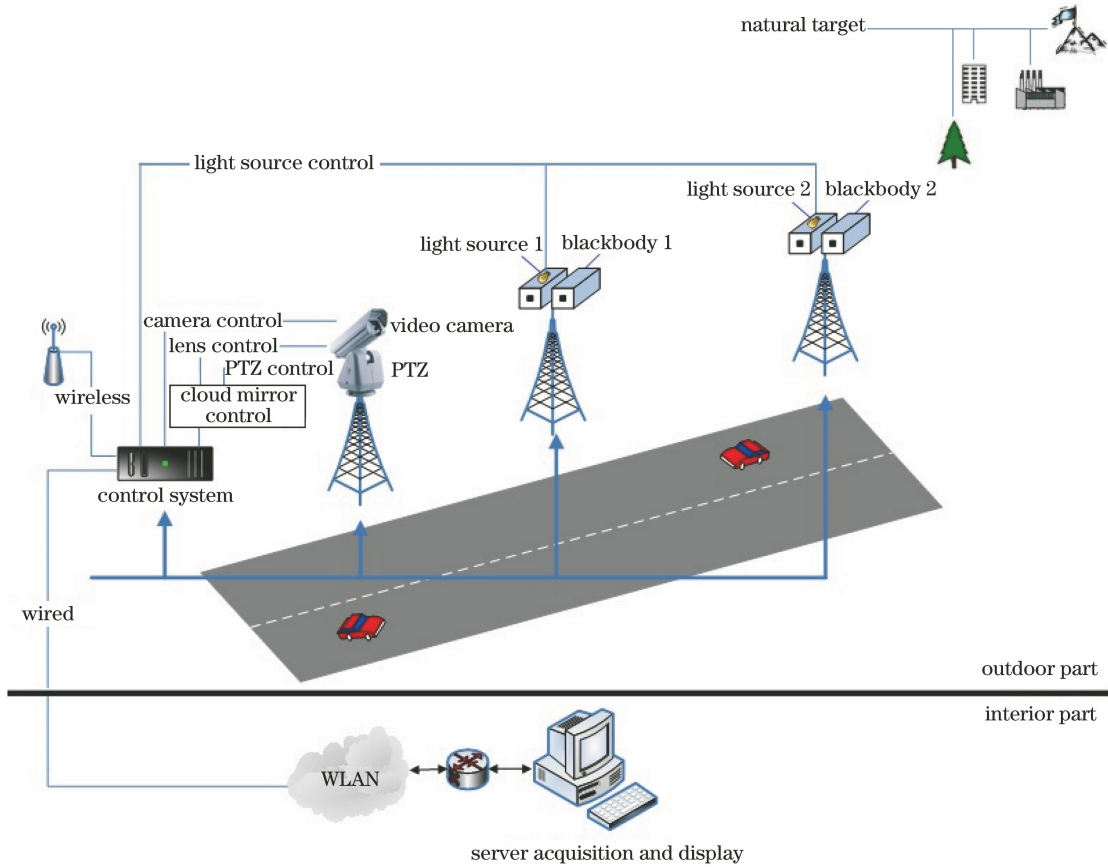


图 1 DPVS 系统观测示意图

Fig. 1 DPVS system observation diagram

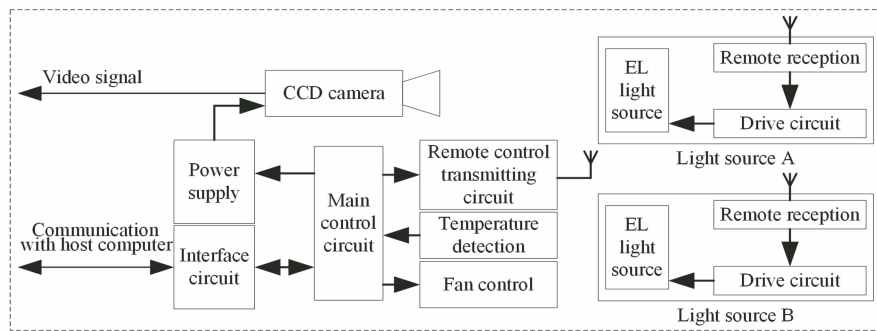


图 2 DPVS 目标光源系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of DPVS target light source system

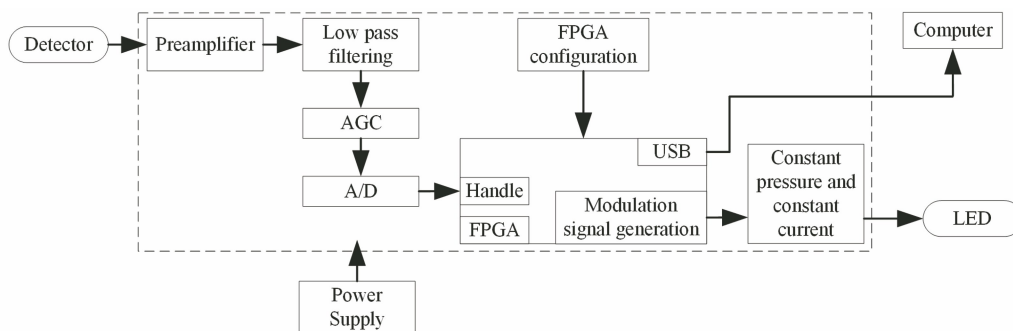


图 3 基于 FPGA 的信号检测与处理电路框图

Fig. 3 Block diagram of signal detection and processing circuit based on FPGA

光源采用的是电压低、响应时间短、性能稳定、抗震性强的 LED^[20-23],其伏安特性曲线如图 4 所示。

从图 4 可知,LED 在正向导通后,其正向电压的微小变化会引起 LED 电流的很大变化,LED 的光输出功率与 LED 电流直接相关,所以在 LED 驱动电路的输入电压和环境温度等因素发生变化的情况下,为了保持 LED 电流大小恒定不变,设计 LED 恒压恒流驱动电路,如图 5 所示。其中 RPot 为可变电阻器。

恒压部分采用 DC-DC 稳压芯片 XL4015,通过电阻 R1(其阻值大小用 R_1 表示)、R2(其阻值大小用 R_2 表示)控制调节输出电压 V_{OUT} (其大小用 V_{OUT} 表示): $V_{OUT} = 1.25(1 + R_2/R_1)$ 。

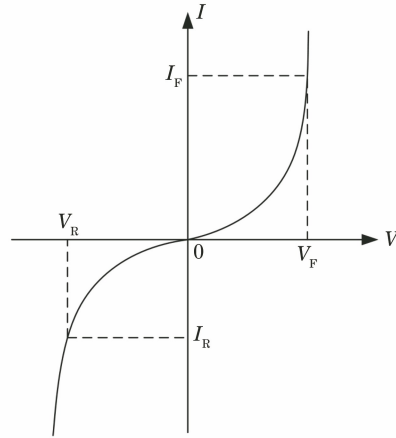


图 4 LED 伏安特性曲线

Fig. 4 Volt ampere characteristic curve of LED

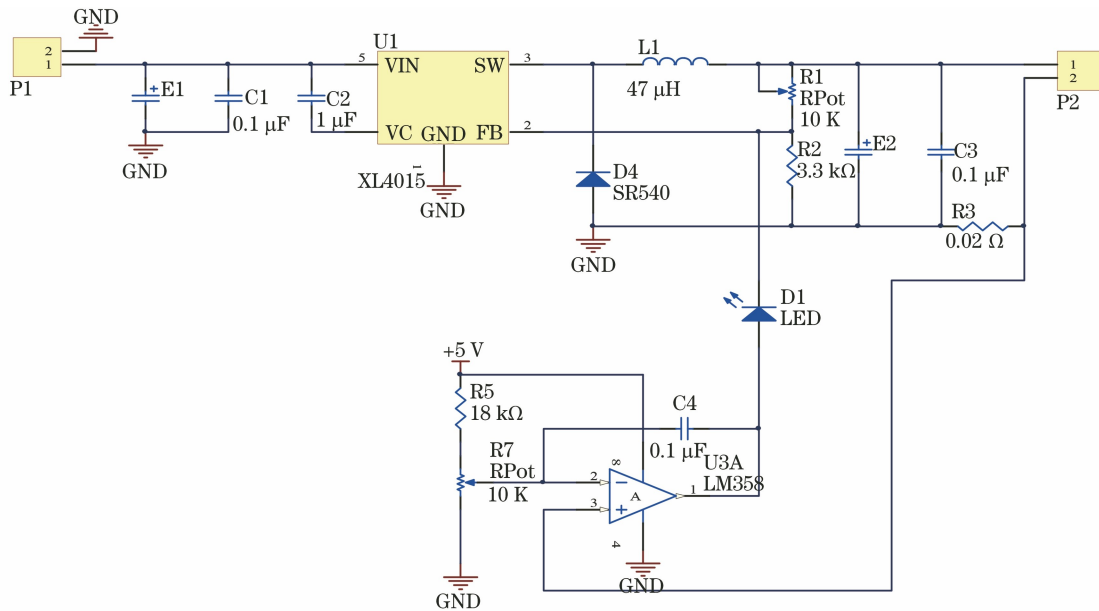


图 5 LED 恒压恒流驱动电路

Fig. 5 Constant voltage and constant current driving circuit for LED

通过调节滑动电阻器 R1,可以改变输出电压。恒流部分通过 LM358 实现,输出电流流经电阻 R3 产生压降,将其送入 LM358 的正向端,+5 V 信号经过 R5、R7 分压后输入 LM358 的反相端,对两个电压进行比较,产生一个误差电压,将其送入 XL4015 的 2 脚(FB),改变 XL4015 内部振荡器的频率,进而改变输出功率,由于输出电压恒定,因此输出电流发生改变,从而实现恒流输出。调节滑动变阻器 R7 可以改变输出电流,实现对 LED 亮度的控制,实物如图 6 所示。

整体光源系统设计比较复杂,因为涉及 LED 光强检测、遥控发射和接收单元,系统还包括前置放大电路设计、低通滤波电路、自动增益控制电路、A/D 转换电路和自动增益控制模块等。

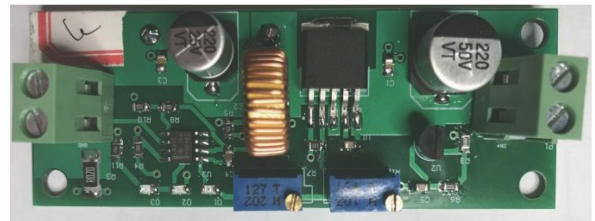


图 6 LED 控制电路实物图

Fig. 6 Physical diagram of LED control circuit

3 DPVS 系统硬件架构

新型数字能见度仪的观测一共可以分为两部分:夜间能见度的观测和白天能见度的观测。大气能见度观测值的大小取决于目标物与天空背景间的亮度差异(或亮度对比度)^[24]。

3.1 夜间能见度的获取

夜间能见度观测数值的大小与目标光源与摄像机的距离, 以及其清晰程度息息相关, 即与目标光源的视亮度、真亮度、气柱亮度, 以及其距离摄像机的远近有关。其中, 除了光源真亮度较难测量之外, 其余各项参数均比较容易获得。为了有效消除这一难以测量的变量, 特别将 DPVS 夜间观测系统设计为双光源观测系统, 如图 2 所示。

图 2 中, 2 个光源的真亮度相等, 以 B_0 表示。2 个黑体目标物完全按照标准黑体的规格进行设计和制作, 其真亮度均约等于 0。 B_1 、 B_2 分别表示 2 个目标光源的真亮度, B'_1 、 B'_2 则表示 2 个目标光源的视亮度, B_{t1} 、 B_{t2} 为 2 个黑体的视亮度, L_1 和 L_2 分别表示近目标和远目标到摄像机的距离, σ 为大气消光系数。则 2 个目标光源的视亮度可表示为^[25-26]

$$B'_1 = B_1 \exp(-\sigma L_1) + B_{t1}, \quad (1)$$

$$B'_2 = B_2 \exp(-\sigma L_2) + B_{t2}. \quad (2)$$

因为同一组目标黑体和目标光源与摄像机的距离是相等的, 而且两个目标黑体是完全按照真正的黑体规格进行设计和制作, 所以其真亮度均可以视为 0。则有

$$B_{L_1} = B_{t1}, \quad (3)$$

$$B_{L_2} = B_{t2}. \quad (4)$$

消光系数和能见度的关系满足^[27-29]

$$V = \frac{\ln 50}{\sigma} = \frac{3.912}{\sigma}, \quad (5)$$

式中: V 为能见度。由(1)~(5)式可得, 夜间能见度的计算公式为

$$V = \frac{(L_1 - L_2) \ln 50}{\ln\left(\frac{B'_2 - B_{t2}}{B'_1 - B_{t1}} \frac{B_1}{B_2}\right)}. \quad (6)$$

根据上述公式, 各项参数均已知, 则可以有效进行大气能见度的实时计算。

3.2 白天能见度的获取

白天能见度的观测与夜间观测相似, 但是并不需要光源, 仅需要获得黑体的视亮度、真亮度和气柱亮度等信息即可。

设近目标物黑体与摄像机之间的空气柱亮度为 I_{01} , 远目标物黑体与摄像机之间的空气柱亮度为 I_{02} ; B_{t10} 、 B_{t20} 分别为两个目标物黑体的真亮度; B_{g1} 、 B_{g2} 分别为目标物黑体 1 和目标物黑体 2 所对应的天空背景的视亮度, 则有

$$B_{t1} = B_{t10} \exp(-\sigma L_1) + I_{01}, \quad (7)$$

$$B_{t2} = B_{t20} \exp(-\sigma L_2) + I_{02}, \quad (8)$$

将(7)和(8)式相减, 可得

$$B_{g1} - B_{t1} = (B_{g10} - B_{t10}) \exp(-\sigma L_1). \quad (9)$$

两边同取对数, 整理可得

$$\sigma L_1 = \ln(B_{g10} - B_{t10}) - \ln(B_{g1} - B_{t1}). \quad (10)$$

同理, 根据第二目标物黑体, 可以求得

$$\sigma L_2 = \ln(B_{g20} - B_{t20}) - \ln(B_{g2} - B_{t2}). \quad (11)$$

将(9)和(10)式相减, 整理可得

$$\sigma(L_2 - L_1) = \ln\left(\frac{B_{g20} - B_{t20}}{B_{g2} - B_{t2}}\right) - \ln\left(\frac{B_{g10} - B_{t10}}{B_{g1} - B_{t1}}\right). \quad (12)$$

考虑到黑体的真亮度均为零, 即 $B_{t20} = B_{t10} = 0$ 。同时, 这里假设天空背景是均匀的, 即 $B_{g1} = B_{g2}$, $B_{g10} = B_{g20}$ 。将以上诸多条件代入(11)式, 并整理可得

$$\sigma = \ln\left(\frac{B_{g1} - B_{t1}}{B_{g2} - B_{t2}}\right) \cdot \frac{1}{L_2 - L_1}. \quad (13)$$

将(12)式代入(5)式中, 即可获得能见度为

$$V = \frac{3.912(L_2 - L_1)}{\ln\left(\frac{B_{g1} - B_{t1}}{B_{g2} - B_{t2}}\right)}. \quad (14)$$

4 观测实验

为有效检验 DPVS 系统的观测性能, 特别选择北京市观象台作为观测比对实验站点。观象台是国家基准气候站, 功能完备、设备齐全, 拥有专业的人工观测员、高分辨率的人工能见度观测数据和各类观测仪器, 以及齐全的气象要素观测数据, 是开展能见度仪比对观测的理想首选站点。

系统选用的相机是微视工业数字 CCD: MVC1450DAM-GE15-S00, 镜头选用的是 Computer 三可变镜头 H10Z0812M。

系统在 2021 年 1 月 7~10 日连续观测的结果如图 7 所示。其中, DPVS79 为 DPVS 观测结果, PWD22 为前向散射仪观测结果, LT31 为大气透射仪观测结果(为观看清晰, 对观测上限进行了不同设定, 非观测差异)。

为了进一步分析系统观测性能, 实验以 LT31 数据为基准, 结合空气中颗粒物浓度, 同时将 DPVS、LT31、PWD22 和人工观测 4 类数据进行对比分析。因为 LT31 的量程为 15 km, 所以以 15 km 为数据上限。

具体方法: 以 LT31 观测数据作为基准, 按照雾霾的轻重程度[这里按照国家气象行业标准《霾的观测和预报等级》规定, 雾霾程度选自能见度划分标

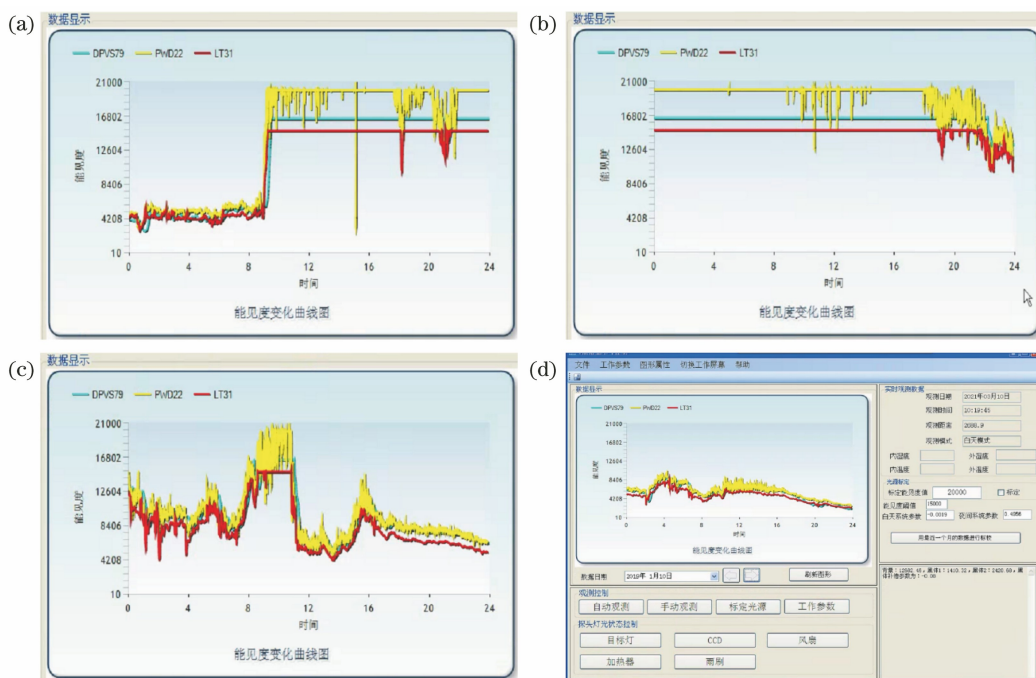


图 7 系统的实测结果。(a) 2021-01-07;(b) 2021-01-08;(c) 2021-01-09;(d) 2021-01-10

Fig. 7 Actual observation results of system. (a) 2021-01-07; (b) 2021-01-08; (c) 2021-01-09; (d) 2021-01-10

准,即轻度雾霾(能见度 3000 m 至 5000 m)、中度雾霾(能见度 2000 m 至 3000 m)、重度雾霾(能见度小于 2000 m)],将全部观测数据进行统一比对分析,如图 7 所示。

为了统一标准,数据划分遵循 LT31 的观测规范,将高于 15 km 的观测值均记作 15 km。实验结果表明:4 类观测数据具有相同的变化趋势,但存在一定程度的差异。

由图 8 可以清楚地看到,4 种观测数据的变化

趋势基本一致,而大气能见度的观测数值基本上与颗粒物浓度成反比。这是正常的,因为空气中颗粒物浓度较高时,会影响光线的散射和透射程度。但是在重度雾霾时,虽然 0:00–10:00 时段颗粒物浓度相对较低,但能见度反而要比颗粒物浓度更高的 12:00–21:00 时段要低。这有效地说明了颗粒物浓度对光线的散射与透射的影响并非呈简单的线性关系,并且颗粒物浓度也不是影响大气能见度的惟一因素,当大气环境中的颗粒物浓度增大至一定程度

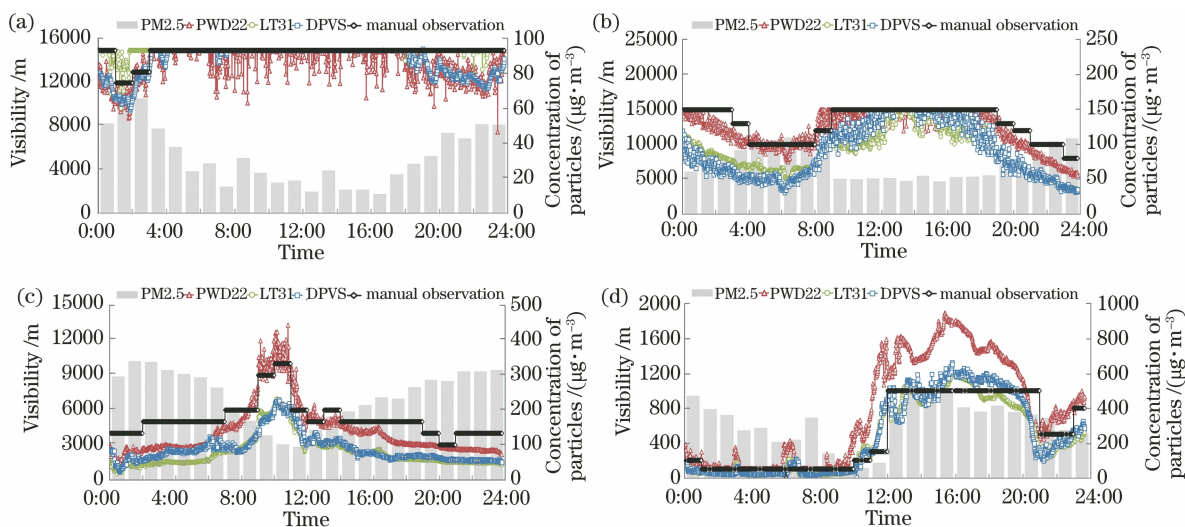


图 8 DPVS,LT31,PWD22 和人工观测比对结果。(a)晴好天气;(b)晴好天气;(c)中度雾霾;(d)重度雾霾

Fig. 8 Comparison results of DPVS, LT31, PWD22, and manual observation. (a) Fine weather; (b) light haze; (c) moderate haze; (d) severe haze

后,它对大气能见度的影响也相对减弱。

此外,DPVS 与 LT31 的观测结果相对较为相近,但当大气能见度处于中低值时,两者的观测结果会更加接近(这里是相比 PWD22 和人工观测的结果而言)。DPVS 观测结果的锯齿现象与 LT31 相近(LT31 更好些),但比 PWD22 的振荡较小。这是因为 DPVS 模拟人眼观测,特别是存在远距离自然目标物时,在相同环境因素,DPVS 较 PWD22 具有更强的抗干扰性。

为进一步掌握 DPVS 与 LT31 观测的差异,特别针对各观测数据分组进行详细的统计分析,由低

表 1 DPVS、LT31 观测数据与平均能见度值的比对结果

Table 1 Comparison of observation results of DPVS, LT31 and average visibility

LT31 visibility	Number of samples	Relative error of DPVS / %	Relative standard deviation of DPVS / %	Relative error of LT31 / %	Relative standard deviation of LT31 / %
$V < 2 \text{ km}$	801	0.11	9.09	-1.26	7.13
$2 \text{ km} \leq V \leq 5 \text{ km}$	4018	0.68	11.67	2.01	8.08
$5 \text{ km} < V \leq 10 \text{ km}$	2326	-1.17	10.78	0.98	11.95
$10 \text{ km} < V < 15 \text{ km}$	1898	1.35	9.15	-1.11	15.22
Average		~0.24	~10.17	~0.16	~10.60

由表 1 可以清楚地看到:尽管 DPVS 和 LT31 的观测结果存在一定差异,但是显然在全程范围内,两组观测数据(DPVS 和 LT31)与标准值的相对标准差都在 20%之内,均符合世界气象组织对能见度仪研制标准的要求。不但如此,两者间的观测误差其实相差并不多,但 DPVS 要比 LT31 的观测准确性更高,而 LT31 观测数据与平均能见度的相对标准差随着能见度观测距离的增加略呈增大趋势。这是由两者的观测原理差异造成的。因为 LT31 的观测精度和其基线长度密切相关,基线越长,则观测精度越高,但基线的长度终归有限,不可能无限增加。所以,随着测算距离的不断增大,其观测误差也必然会随之不断增大。而 DPVS 因为有远近不同目标物的存在,可以有效克服这种误差。

5 结 论

由 DPVS、LT31、PWD22 及人工能见度观测比对数据可以清楚地看到:在变化趋势上,4 种观测结果完全一致。而对于人工观测模式,因为观测员的视力不尽相同,存在着较大的主观性,所以不可避免地会存在一定的观测误差,观测结果会有大起大落的现象。而其近距离观测误差相比远距离的更小。这是因为距离较近时,可供观测员观测的参考目标物比较多,而距离较远时,可供观测员观测的参考目标物比较少。PWD22 观测的结果明显偏高,且振荡

到高,将观测数据一共分为 4 组:小于 2 km、2~5 km、5~10 km、10~15 km。首先计算 4 种观测数据:DPVS、LT31、PWD22 及人工观测的平均值,并将其作为最终的标准值,然后分别计算标准值与 DPVS 和 LT31 观测数据间的相对标准差与相对误差。而相对标准差表示为

$$\sigma_{rd} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - Y_i)/Y_i]^2}{N}} \times 100\%, \quad (15)$$

式中: N 为样本个数; X_i 是 DPVS 或 LT31 的测量值; Y_i 是 4 种观测数据的平均值。具体分析结果见表 1。

较大。这是因为其观测原理先天不足,实际观测环境无法满足原理假设条件,且采样空间小,因而导致测量数据变化较大,其数据的测量可靠性、准确度与稳定性尚无法和大气透射仪相比。

DPVS 和 LT31 由于是自动观测模式,其观测数据变化相对平缓。但因为它们的观测原理不一样,导致最终观测结果存在一定程度的差异。由于有不同距离目标物的存在,DPVS 的观测结果准确性要比 LT31 略高。LT31 的观测稳定性比 DPVS 要好些。这是因为当前 DPVS 并没有针对数据进行优化和平滑处理。将来,拟根据观测数据的特征,针对数据进行优化处理,以消除明显的异常数据,进一步提升观测的稳定性。

作为唯一符合能见度定义的能见度观测仪,新型 DPVS 数字能见度自动观测仪采用先进的数字摄像技术,其技术实现手段和方法在国内外尚属首创。与此同时,DPVS 观测仪具有成本低、安装便捷、维护工作量低等优势,单套 DPVS 成本在 2 万左右,远比透射仪的价格要低(国内尚无成熟仪器,国内使用的透射仪多为国外 VAISALA 公司所生产的 LT31 和 MITRAS 两种型号的仪器,而其基线最短的单台成本也需要 40 多万),而其安装的复杂程度和维护工作量更是远小于透射仪。这也使它的实用价值和前景十分可观,而随着 CCD-CAMERA 技术的不断进步,其软硬件价格却持续

下降,分辨率却早已超过人眼分辨率(1000万像素)。同时,由于它是完全按照人工观测方法进行设计与实现的,因此,它是一款可取代人工能见度观测的最佳仪器。

参 考 文 献

- [1] Wang J L, Liu X L, Gao W F, et al. Control circuit design of digital photography visiometer system[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(5): 633-637.
王京丽, 刘旭林, 高五峰, 等. 数字摄像能见度仪器系统控制电路的设计[J]. *气象科技*, 2006, 34(5): 633-637.
- [2] Wang J A, Kang S, Wu R H. Method for calculating visibility utilizing optic ways[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 283-289.
王江安, 康圣, 吴荣华. 能见度光学测量方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 283-289.
- [3] Wu D, Deng X J, You J P, et al. Forecast system of visibility at speedway foggy area at nanling mountains [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2006, 22(5): 417-422.
吴兑, 邓雪娇, 游积平, 等. 南岭山地高速公路雾区能见度预报系统[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(5): 417-422.
- [4] Xing X N, Cui Y M, Zhang F G, et al. Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2010, 30(5): 15-20.
邢向楠, 崔岩梅, 张富根, 等. 能见度测量技术现状及发展趋势综述[J]. *计测技术*, 2010, 30(5): 15-20.
- [5] Gao T C, Jiang Z D, Liu L, et al. Application analysis of ground meteorological instruments based on optical techniques [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 040101.
高太长, 江志东, 刘磊, 等. 基于光学原理的地面气象观测仪器及应用分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(4): 040101.
- [6] Mao J T, Li J G. Visibility and telephotometer[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1984, 8(2): 170-177.
毛节奏, 李建国. 气象能见度与望远光度计[J]. *大气科学*, 1984, 8(2): 170-177.
- [7] Shi D H. Study and analysis of the laser detecting instrument for measuring runway visibility [J]. *Journal of Applied Optics*, 1997, 18(5): 22-25.
施德恒. 跑道能见度激光探测仪的研究分析[J]. *应用光学*, 1997, 18(5): 22-25.
- [8] Lin Y. The course of atmospheric exploration[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995: 93-97.
林晔. 大气探测学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 93-97.
- [9] Feng S, Xiong X L, Ma Y Z, et al. Variable baseline atmospheric visibility measurement system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210102.
冯帅, 熊兴隆, 马愈昭, 等. 变基线大气能见度测量系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210102.
- [10] Xiao S R, Mao X L. Measuring method of visibility with optical fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 802-806.
肖韶荣, 冒晓莉. 基于光纤的能见度测量方法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 802-806.
- [11] Deng K, Hu J P, Zhang P H. Design of forward scatter infrared visibility meter[J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(2): 19-21.
邓可, 胡建平, 张平华. 基于红外散射原理的能见度仪设计[J]. *测控技术*, 2004, 23(2): 19-21.
- [12] Kwon T M. An automatic visibility measurement system based on video cameras [R]. St Paul: Minnesota Department of Transportation, 1998: 1-68.
- [13] Hautière N, Tarel J P, Lavenant J, et al. Automatic fog detection and estimation of visibility distance through use of an onboard camera [J]. *Machine Vision and Applications Journal*, 2006, 17(1): 8-20.
- [14] Xie X S, Tao S C, Zhou X J. Meteorological visibility measurement by digital camera method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(1): 97-100.
谢兴生, 陶善昌, 周秀骥. 数字摄像法测量气象能见度[J]. *科学通报*, 1999, 44(1): 97-100.
- [15] Lü W T, Tao S C, Liu Y F, et al. Measuring meteorological visibility based on digital photography: dual differential luminance method and experimental study [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(4): 559-570.
吕伟涛, 陶善昌, 刘亦风, 等. 基于数字摄像技术测量气象能见度: 双亮度差方法和试验研究[J]. *大气科学*, 2004, 28(4): 559-570.
- [16] Babari R, Hautière N, Dumont É, et al. A model-driven approach to estimate atmospheric visibility with ordinary cameras [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(30): 5316-5324.
- [17] Graves N, Newsam S. Using visibility cameras to estimate atmospheric light extinction[C]//2011 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), January 5-7, 2011, Kona, HI, USA. New York: IEEE Press, 2011: 577-584.
- [18] Babari R, Hautière N, Dumont É, et al. Visibility

- monitoring using conventional roadside cameras - Emerging applications [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 22: 17-28.
- [19] 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.
- [20] Gao J H, Zhang L, Gao Z F, et al. Analysis of life evaluation method of LED light source [J]. *Semiconductor Technology*, 2013, 38(12): 946-948.
高金环, 张磊, 高兆丰, 等. LED 光源寿命评估方法探讨 [J]. *半导体技术*, 2013, 38(12): 946-948.
- [21] Tian G D. Exploration of the LED light source [J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(18): 22-24.
田国栋. LED 光源的应用探索 [J]. *电子设计工程*, 2013, 21(18): 22-24.
- [22] Huang C, Jiang Y S, Shen Y, et al. Design of scattering netted dots on light guide plate of edge-lighting LED backlight [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 689-692.
黄翀, 姜言森, 沈奕, 等. 侧光式 LED 背光源的导光板网点设计 [J]. *应用光学*, 2008, 29(5): 689-692.
- [23] Jia K J, Yang B R, Lu H, et al. LED nonlinearity mitigation for visible light communication optical-orthogonal frequency division multiplexing system with symbol decomposing techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0406002.
贾科军, 杨博然, 陆皓, 等. 可见光通信光正交频分复用系统符号分解技术抑制 LED 非线性失真研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0406002.
- [24] Wang J L, Liu X L, Liu J C, et al. A study on visibility observation at nighttime using digital photography visiometer system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(6): 1306-1311.
王京丽, 刘旭林, 刘金城, 等. 数字摄像能见度仪夜间观测技术研究 [J]. *电子学报*, 2018, 46(6): 1306-1311.
- [25] Zhou X J, Tao S C, Yao K Y. *Advanced atmospheric physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 804-806, 901-910, 1209-1215.
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. *高等大气物理学* [M]. 北京: 气象出版社, 1991: 804-806, 901-910, 1209-1215.
- [26] Middleton W E K. *Vision through the atmosphere* [M]. Toronto: University of Toronto Press, 1952: 262-263.
- [27] Du K, Mu C, Deng J J, et al. Study on atmospheric visibility variations and the impacts of meteorological parameters using high temporal resolution data: an application of environmental internet of things in China [J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2013, 20(3): 238-247.
- [28] Rao R Z. Vision through atmosphere and atmospheric visibility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2486-2492.
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度 [J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2486-2492.
- [29] Mei L, Guan P, Yang Y, et al. Atmospheric extinction coefficient retrieval and validation for the single-band Mie-scattering Scheimpflug lidar technique [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): A628-A638.