

基于积分球分光与接收的透射式能见度测量系统

张世国,方海涛,汪 玮,王 敏,王毛翠,刘 振

(安徽省大气探测技术保障中心,安徽 合肥 230031)

摘 要:介绍了一种新型透射式能见度测量系统,积分球在光源能量监控和光信号接收中起到重要作用。光源采用白色 LED,外部高频脉冲调制,信号测量端同步解调,有效消除外界光干扰。积分球分光实时监控光源发射能量的变化,消除光源自身不稳定带来的误差。准直和扩束透镜组将光源发散角控制在 1 mrad。反射镜组反射光路实现了有限空间光程的增加,同时增加了采样体积,缩短了透射系统的安装基线。积分球配合望远镜接收光束减小了光路调节的压力。系统研制完成后开展了实验室内模拟能见度测量实验,与现有测量大气散射系数的设备积分浊度计进行对比分析,通过积分浊度计传递定标参数。结果表明:两个系统在 1.7~20 km 测试区间相对偏差小于 4%。

关键词:能见度; 透射测量; 积分球; 分光

中图分类号: TP765 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1017003

Transmission measurement system for visibility based on integrating sphere applied to light splitting and receiving

Zhang Shiguo, Fang Haitao, Wang Wei, Wang Min, Wang Maocui, Liu Zhen

(Anhui Meteorological Observation Technical Center, Hefei 230031, China)

Abstract: A new transmission visibility measurement system was introduced. Integrating sphere played an important role in monitoring and receiving light. The white LED light source in this system was modulated by external high frequency pulse signal and demodulated in receiver, which would effectively detach the interference by stray light. Integrating sphere was applied to monitor variation of the light source, which can eliminate the error caused by the instability of light source. The collimation lens and beam expanding lens group makes divergence angle in 1 mrad. The high reflection mirrors increase the optical path in the limited space, which also increases the volume of sample and shorten the baseline of transmission system. Adjusting optical path becomes easy by telescope and integrating sphere. After completion of the system, comparison experiment was made with nephelometer. The result shows that the relative deviation between two systems is less than 4% from 1.7 km to 20 km.

Key words: visibility; transmission measurement; integrating sphere; light splitting

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 中国气象局小型气象建设项目(2014)155

作者简介: 张世国(1986-),男,工程师,硕士,主要从事光学大气探测技术与光学系统设计方面的研究。Email:zgq1124@126.com

0 引言

能见度最初以人的视觉观测估计距离作为定义的气象参量^[1],是大气中分子和粒子对光的散射和吸收的直观表达。能见度容易受大气中灰尘等气溶胶的影响,因此可以作为大气污染程度的指示参数之一。交通运输安全受能见度影响较大,所以观测能见度对于交通运输安全有保障。国内气象部门把能见度观测纳入常规观测要素之一。

能见度自动化测量采用光学成像处理技术和光电探测技术。前者采用成像和数字图像处理技术^[2]。后者依据光的散射和透射原理设计自动化光电测量系统。随着激光技术发展,科研人员尝试通过激光雷达探测大气后向散射系数获取水平能见度和垂直能见度^[3-4]。目前测量能见度常用前向散射能见度仪和透射式测量设备。前向散射能见度仪采用单点测量,假设采样区大气与周围大气均匀,通过测量大气某一方向散射系数计算大气能见度^[5]。这类设备价格低廉,安装方便,维护简单。透射式测量依据于消光理论直接获取大气消光系数,包含吸收系数和散射系数总和,因此基于透射式测量方法更加准确。现有透射式系统光路设计复杂、安装基线长、设计成本高,目前仅在机场等对能见度测量精度要求高的场

所应用。

在现有技术基础上自主研发了一种基于积分球分光 and 接收的透射式系统,依据光在积分球稳定分布特点,实现了光源能量实时监测,同时解决了光电探测器光敏面光强分布不均匀问题。使用反射镜折返光路,增加采样体积同时缩短光路安装基线。采用望远镜实现全光束接收,减小了光路对准的复杂程度。同时牛顿望远镜全光束接收没有盲区,因此不受几何因子的影响。系统研制完成后进行了连续完整的循环实验,在能见度约为 20 km 时采用浊度计对系统定标,通过控制实验室内空气能见度从低到高不同区间逐渐变化,在四次不同的实验中保持系统常数不变,长时间采集透射系统与浊度计同步数据,给出不同区间两者数据变化趋势图,同时计算两者之间的测量相对误差。相对误差维持在较小的范围内,表明透射测量系统在有定标溯源点确定系统常数后,系统稳定可靠。同时实验测量了在水汽产生了雾环境中,不同能见度对应的相对湿度。

1 透射式能见度测量系统结构

透射式系统结构如图 1 所示,其构成分四部分:光源发射单元、折返光路、光信号接收单元和电子学测量单元。

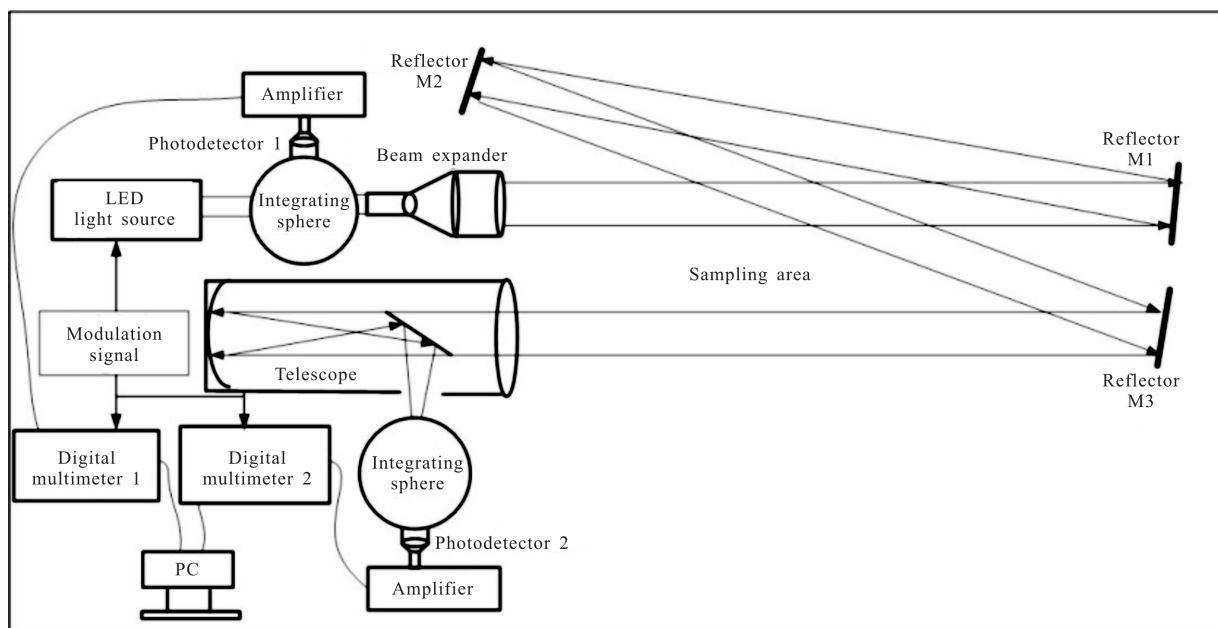


图 1 透射式能见度测量系统结构

Fig.1 Structure of transmission measurement system for visibility

白色 LED 光源拥有精密的电路驱动模块,受外部信号调制,电信号测量端可以同步解调,避免背景光干扰,提高信噪比。预先实验表明光源长时间运行能量会发生漂移,运行 7h 漂移量约为 1%。如果 40m 光程,代入朗伯-比尔定律计算,把消光系数转换为能见度,光强 1%的漂移,在 1km 时产生误差 9.1%,5 km 时误差迅速增加到 71.0%,所以必须消除光源能量漂移产生的误差。

光源在准直扩束之前经过分光积分球,光入射到积分球内部,形成稳定能量分布^[6-7],测量积分球内部某一位置的光强变化可以代表光源自身的变化。一部分光穿过积分球入射到准直扩束透镜组,形成平行光,发散角约为 1 mrad。为了实现有限的空间内长光程传输,使用反射镜折返光路,如图 1 所示,M1、M2、M3 为反射镜。光束三次反射,最后由望远镜聚焦入射到接收积分球,光电探测器将光信号转换为电信号,经过放大输出,高精密度万用表测量电信号。光路通过采样区,大气消光的变化引起光束能量的变化,接收端积分球内光强随之变化,即可反映能见度的变化。为减小背景光影响,增加信号检测信噪比,采外部电路调制光源,同时调制信号连接数值万用表同步解调信号,保证同步有效信号被测量。系统拥有专门数据采集软件,自动化采集和保存数据,实时显示计算结果。

2 透射式系统理论计算

2.1 大气透射测量基本原理

光束在大气传输受到大气分子和粒子吸收和散射影响,能量逐渐衰减,如图 2 模型所示,平行光束初始光强 I_0 ,传输距离 L ,光强衰减为 I_1 ,根据朗伯-比尔定律^[8],接收光强与初始光强的关系由公式(1)表示。假设传输路径上大气均匀, σ 表示大气消光系数。

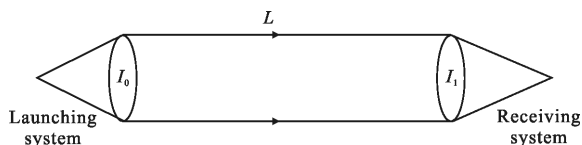


图 2 透射模型

Fig.2 Model of transmission

$$I_1 = I_0 e^{-\sigma L} \quad (1)$$

根据世界气象组织定义,色温为 2700 K 的白光强度衰减为初始值的 5%时传输的距离^[9],得到气象光学视程 MOR,可以表示当前大气能见度值。用公式(2)表示:

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\sigma \text{MOR}} = 0.05 \quad (2)$$

获得 MOR 值用公式(3)表示:

$$\text{MOR} = -\frac{\ln 0.05}{\sigma} \approx \frac{3}{\sigma} \quad (3)$$

2.2 光源监控透射式系统计算

透射式系统光源光强 I_0 未知,分光积分球光电探测器测量光强为 I_0' ,积分球内光能量稳定分布, I_0' 与 I_0 之间为线性关系。

$$I_0 = k_0 I_0' \quad (4)$$

式中: k_0 为比例常数,同理接收端的光强 I_1 与接收端积分球内的光强 I_1' 有公式(5)的关系。

$$I_1 = k_1 I_1' \quad (5)$$

式中: k_1 为比例常数,由公式(1)、(4)和公式(5)联合代入公式(3)获得:

$$\text{MOR} = -\frac{3L}{\ln\left(k' \frac{I_1'}{I_0'}\right)} \quad (6)$$

式中: $k' = k_1/k_0$, k' 为常数; L 为折返光路总长度。光电探测器把光信号转化为电信号,二者为线性关系。图1中数字万用表 1 测量的光电压为 V_1 ,数字万用表 2 测量的光电压为 V_2 ,用电压表示的 MOR 见公式(7):

$$\text{MOR} = -\frac{3L}{\ln\left(k \frac{V_2}{V_1}\right)} \quad (7)$$

式中: k 为系统常数,由光束传输距离 L 确定,确定常数 k 即可计算得到气象光学视程。

3 透射式系统定标与测量结果

3.1 定标方法描述

定标既是确定系统常数 k ,发射单元光源能量变化,准直扩束引起能量衰减,反射镜对光能量衰减,接收单元光电转换效率,电子学测量单元等因素共同决定了系统常数。系统常数确定有两种方式:第一种方式是空气分子定标;第二种方式采用参考设备定标。空气分子定标净化采样区的大气,除去气溶胶粒子,空气分子消光系数已知^[10],从而确定系统常数 k 。这种方式难点在于完全除去气溶胶粒子,如果

净化不彻底,会引入气溶胶消光的误差。若透射式系统放置在野外,只有在大气干洁时会采用此方法定标。参考设备定标使用可靠准确的测量设备,给透射系统传递参考值。这种方法操作简单,假设采样区大气样本均匀,将参考设备放置在与透射式系统接近的采样区,获得当前大气样本的能见度。代入公式(7)获得系统常数。

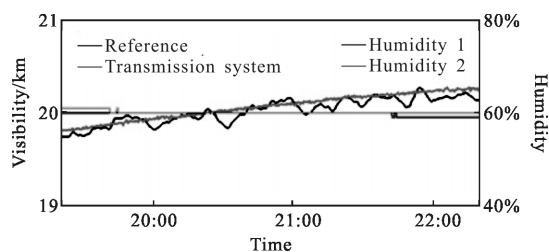
透射式系统选择积分浊度计作为参考设备。积分浊度计可以直接获得大气散射系数^[1],计算出能见度值,获得系统常数 k 。多波长积分浊度计包含波长 450、525、635 nm 三个通道,测量范围 $0\sim 2\ 000\ \text{mm}^{-1}$,散射角度 $9^\circ\sim 170^\circ$,测量精度为 $\pm 0.1\%$ 。三个波长对大气中不同粒径粒子散射响应不同,为了反映大气真实能见度状态选择积分浊度计三波长总的散射系数平均值,依据柯西米德定律计算大气能见度。同时透射式系统白光光源包含了三个波长的光谱,三个波长与大气的综合散射作用与白光光源消光作用更加接近。定标选择大气能见度较好的条件,散射对消光起到主导作用,以减小由于忽略大气的吸收带来定标误差。由积分浊度计计算获得当前能见度值,测量端的数字万用表测得两个电压值,光束传输距离已知,代入公式(7)可以精确获得系统常数。

3.2 实验过程和测量结果

透射式系统安装在实验室内,加雾设备模拟雾的状态,产生不同能见度。实验室两侧安装两台湿度计,测量相对湿度。加雾过程中水汽不断扩散,浓度不均匀,导致积分浊度计与透射式系统不能采集同质空气。等待加雾停止,水汽扩散速度减慢直至浓度接近均匀,开始采集数据。图 3 展示四次不同能见度测量结果。每幅图中含两组曲线:一组表示能见度值,深黑色线代表积分浊度计数值,作为参考值;浅黑色代表透射式系统数值;另一组表示相对湿度,分别用深色台阶线和浅色台阶线表示。每幅图左侧纵轴代表能见度值,右侧纵轴代表相对湿度值。

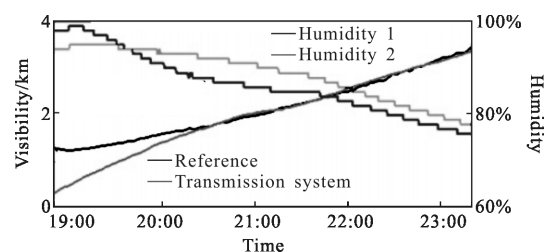
当相对湿度大于 90%,对应 $20\ ^\circ\text{C}$ 下水汽浓度^[11]大于 $15.54\ \text{g}/\text{m}^3$,能见度小于 1.7 km,积分浊度计采样管加热启动,同时气室加热,图 3(b)显示相对湿度最大值 98%,透射式系统测量值约 0.03 km,随着水汽沉降扩散能见度逐渐升高。由于加热采样空气,积分浊度计测量值维持在 1.2~1.7 km 之间,不能反映真实空气状态。图 3(a)~(d)显示不同能见度测量过

程,包含了水汽自然扩散沉降过程中两个系统测量值变化趋势,同时显示对应不同能见度下的相对湿度,用于指示水汽含量变化,相对湿度降低对应能见度逐渐升高。



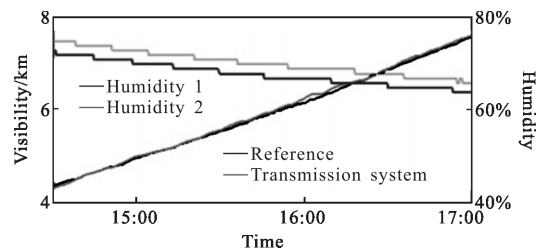
(a) 20 km 附近两个系统测量值

(a) Measurement value of two systems near 20 km



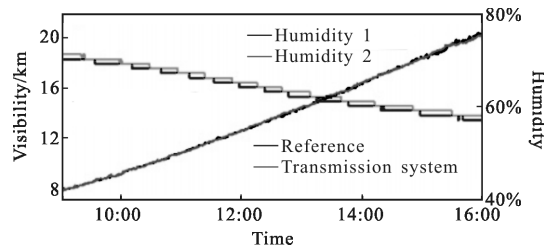
(b) 0.03~3.5 km 两个系统测量结果

(b) Measurement results of two systems from 0.03~3.5 km



(c) 4.5~7.6 km 两个系统测量结果

(c) Measurement results of two systems from 4.5~7.6 km



(d) 7.7~20 km 两个系统测量结果

(d) Measurement results of two systems from 7.7~20 km

图 3 积分浊度计与透射式系统测量结果

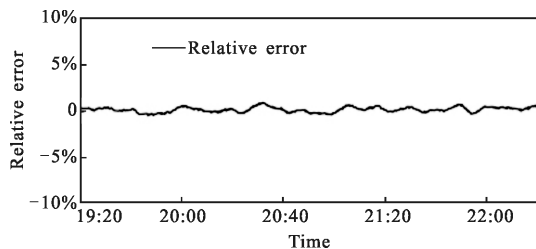
Fig.3 Measurement results of nephelometer and transmission system

图 3 (a) 显示实验室自然状态能见度在 19.6~20.1 km 之间,相对湿度约为 55%,两台湿度计测量值接近,浊度计波动大于透射式系统,表明透射系统

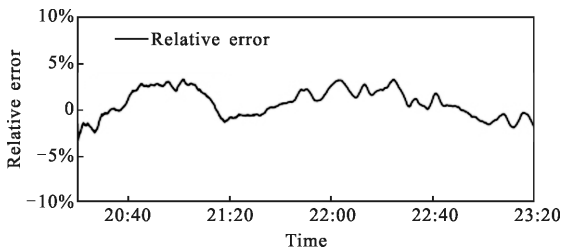
信噪比大于浊度计的信噪比。在当前能见度状态下,积分浊度计传递给透射式系统定标参数,确定系统常数 $k=4.5161$ 。后续图 3(b)~(d)实验,系统常数不变。图 3(b)显示加雾停止后,水汽自然扩散沉降,相对湿度从 98% 开始下降,透射式系统测量值从约 0.03 km 逐渐升高,由于加热采样空气积分浊度计测量值大于 1.2 km,经过约 100 min,相对湿度小于 90%,积分浊度计停止对采样空气加热,两个系统测量值逐渐接近,经历约 3 h 能见度约为 3.5 km,相对湿度降低约 22%。图 3(c)表示能见度从 4.5 km 上升至 7.6 km,相对湿度降低约 9%。图 3(d)显示能见度从 7.7~20 km 升高 12.3 km,相对湿度只降低了约 13%。推论能见度升高比例与相对湿度降低比例是非线性关系。透射式系统在 20 km 由积分浊度计传递定标值,经过三次不同能见度区间测量,在定标点附近,透射系统与积分浊度计测量值仍然一致。

为了评价两个系统接近程度,以积分浊度计测量值为参考,图 4 给出了透射式系统测量值与参考值的相对误差。

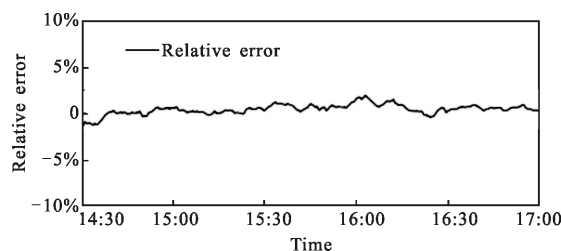
图 4(a)~(d)分别对应图 3(a)~(d)两个系统的相对误差。以积分浊度计传递参数定标,能见度在 1.7~20 km 区间,相对误差-3.25%~3.34%。图 4(b)显示相对误差值最大,同时波动最大,对应图 4(b)能见度



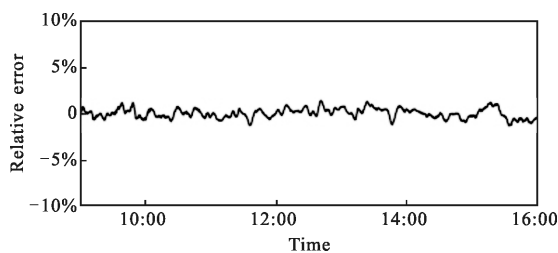
(a) 20 km 附近相对误差
(a) Relative error near 20 km



(b) 0.03~3.5 km 相对误差
(b) Relative error from 0.03-3.5 km



(c) 4.5~7.6 km 相对误差
(c) Relative error from 4.5-7.6 km



(d) 7.7~20 km 相对误差
(d) Relative error from 7.7-20 km

图 4 透射式系统与积分浊度计相对误差

Fig.4 Relative error between transmission system and nephelometer

值最小,空气中水汽浓度大,能见度在 1.7~3.5 km 变化过程,相对湿度平均值大于 85%,对应 20 °C 下水汽浓度大于 14.68 g/m³,两台湿度计平均值差别约 3.4%,表明水汽浓度分布不均匀。另外,积分浊度计定点采样,采样流量约 5 L/min,采样体积小。透射式系统平行光穿过空气经过反射镜反射采样,传输距离 40 m,采样体积约为 130 L。两个系统采样空间和采样体积差别大,水汽浓度空间分布不均,测量相对误差大。随着沉降扩散,水汽浓度减小,能见度逐渐升高,水汽浓度不均引起的相对误差减小,图 3(c)相对湿度 66%~75%,两台湿度计平均差值约 2.1%,相对误差如图 4(c)所示为-1.46%~1.95%。随着水汽浓度越小,不均匀程度减小,相对误差逐渐显小,如图 4(a)、(d)对应相对误差分别为-0.43%~0.96%和-1.27%~1.43%。推论能见度在一定区间内,采样不一致引起的误差是两个系统相对误差的主要来源。

4 结论

基于积分球分光和接收的透射式系统使用积分浊度计传递值作为定标参数,经过一个循环测量,能见度再次达到系统点标点附近,两个设备仍然一致,表明透射式系统具有较好稳定性。光源能量漂移会

引起较大误差,通过积分球分光监控,使误差在 5 km 时 71.0%减小到小于 4.0%,说明积分球可以有效监控光源变化。加雾器模拟雾的状态,水汽的浓度越大,越容易造成不均匀,两系统测量误差在低能见度大于高能见度,同时能见度的变化比例与相对湿度变化比例是非线性关系。

目前透射式测量系统仅在实验室中与参考设备进行对比测试,对烟尘、沙尘、化石燃料燃烧影响能见度没有有效测试,未来将在自然环境中测试系统稳定性和准确性。目前只采用积分浊度计作为系统参考设备进行对比测试实验,接下来将与市场在用大气透射仪。前向散射仪对比测试,验证系统稳定性。系统中光源能量漂移、反射镜反射率、光电镜分球转换效率等因素将会直接影响系统常数变化导致测量误差,下一步将设计实验方案研究不同因素对系统测量误差的贡献。

参考文献:

[1] Park T. Visibility monitoring guidance[P]. US, EPA-454/R-99-003, 1999: 28-50.

[2] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//IEEE International Conference on Computer Vision, 2009: 2201-2208.

[3] Feng Shuai, Jiang Lihui, Xiong Xinglong, et al. Lidar visibility inversion with breakpoint signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0330001. (in Chinese)
冯帅, 蒋立辉, 熊兴隆, 等. 含有突变信号的激光雷达能见度反演[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0330001.

[4] Kreid D K. Atmospheric visibility measurement by a modulated cw lidar: author's reply to comments [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(7): 1823-1831.

[5] Sessa E J, Sessa E J. Automated surface observing system [J]. *Journal of Air Traffic Control*, 1993,35(2): 4-8.

[6] Gao Yuanyuan, Shu Zhifeng, Sun Dongsong, et al. Application of integrating sphere in Rayleigh wind lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3547-3554. (in Chinese)
高园园, 舒志峰, 孙东松, 等. 积分球在瑞利测风激光雷达中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3547-3554.

[7] Liu Hongxing, Ren Jianwei, Li Xiansheng, et al. Radiometric characteristics simulation of large aperture integrating sphere based on LightTools [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 960-965. (in Chinese)

[8] Shi Shunxiang. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 299-314. (in Chinese)
石顺祥. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 299-314.

[9] Organization W M. WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation[M]. US: EOS Transactions, 2008: 1-55.

[10] Sun Jingqun. Laser Atmosphere Detect [M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

[11] Lawrence M G. The Relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: a simple conversion and applications [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 86(2): 225-233.