

基于光学原理的地面气象观测仪器及应用分析

高太长 江志东 刘磊 刘西川

(解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要 介绍基于光学原理的云、能见度及天气现象的器测原理和仪器,探讨应用中需关注和解决的问题。从相关技术、设计研发和业务使用的角度做了一定的思考,认为需要从加强基础理论研究、构建相关识别模型和建立器测标准等方面来推进地面气象观测全要素的自动化观测,提高我国气象观测自动化水平。

关键词 大气光学; 大气探测; 地面气象观测仪器; 光电技术; 自动识别; 测云技术; 天气现象

中图分类号 P414.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.040101

Application Analysis of Ground Meteorological Instruments Based on Optical Techniques

Gao Taichang Jiang Zhidong Liu Lei Liu Xichuan

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

Abstract Measuring instruments and principles of cloud, visibility and present weather based on optical technique are introduced. Considerations are mainly taken on correlative techniques, research and development and operational applications. In order to promote the automatic observation of all meteorological elements in our country, some basic theoretical researches should be strengthened, observation model based on multi-sensors and multi-parameters should be proposed, and instrumental principle should be developed.

Key words atmospheric optics; atmospheric sounding; meteorological observation instrument of ground surface; electro-optic technology; automatic identification; cloud sounding techniques; present weather

OCIS codes 010.0280; 010.1290

1 引言

地面气象观测是指在地面上以目力或者仪器对近地面层的大气状况和天气现象进行的观测^[1]。我国《地面气象观测规范》中规定,气象台站的业务观测项目有云、能见度、天气现象、温度、湿度、气压、风和辐射等。目前,温度、压力、湿度、风向、风速和降水等六要素已经实现器测并投入业务化使用。基于光强衰减和散射等原理的能见度观测仪器已基本成熟并投入业务化使用^[2];云、天气现象等气象要素的器测也有相关的仪器产品出现。云的器测主要是在获取可见光波段或红外波段云图的基础上,通过对云图的处理进行云量计算、云高计算和云状识别;由于天气现象涉及的气象要素众多、实现技术复杂,迄今为止,能够对所有天气现象类型进行有效业务观测的仪器尚未出现,已有的仪器也只是对天气现象中的某几项进行观测,如能见度仪、光学雨强计、地面状况探头等,比较成熟的是降水类型的自动探测识别技术。目前在我国的业务中,云、能见度及天气现象的观测主要为人工目测,人工目测的弊端在于:因人而异、主观性强、观测频次少、易出现漏记,且在环境恶劣地区无法进行有效人工观测。与此同时,相关气象要素资料的获取无法满足天气预报和气候研究等科研领域的需求,因此实现地面气象全要素的自动化观测,全面推动观测仪器的业务化是国内外气象机构所关注的热点。

光电技术的发展为地面气象全要素自动化观测的需求提供了有效的解决途径,各种光学理论^[3,4]和光电技术^[5,6]及新型光电传感器^[7,8]逐步应用于地面气象观测仪器之中。本文介绍了云、能见度和天气现象的探测原

收稿日期: 2010-08-21; 收到修改稿日期: 2010-12-03

作者简介: 高太长(1958—),男,教授,主要从事军事大气探测等方面的研究。E-mail: jzd1985@126.com

理、发展现状和存在问题,分析了光电传感器在实际应用中的注意事项及需要关注和解决的关键问题,就如何进行研发及应用做了一定的思考和展望,以期光电技术能更好地应用于气象探测仪器的设计和应用中。

2 基于光学原理的地面气象观测仪器

2.1 云的观测仪器

云是大气中水气凝结(凝华)成的水滴、过冷水滴、冰晶或者它们混合组成的漂浮在空中的可见聚合体^[1]。云的观测项目包括云量、云状和云底高的观测,并利用云的编码来报告云天状况。目前在气象台站的业务观测中,云高主要依靠云幕灯、激光测云仪等来测量,云量和云状主要依靠观测员的目测。随着气象观测自动化水平的不断提高,国内外相继涌现出许多基于光学原理的自动测云仪器。

根据仪器的工作波段可分为可见光波段和红外波段测云仪器。

可见光波段测云法直接采用照相机对天空进行拍摄,通过获取天空可见光亮度(辐射)分布来确定天空状况。当天空某部分视野内有云时,天空亮度(辐射)减小,结合一定的阈值可以区分云和晴空。基于此原理的仪器有总天空成像仪(TSI)^[9]和可见光全天空成像仪(ASI)^[10]。这类仪器缺点是无法获得夜间的云量信息,不利于实现云量的自动连续观测,白天容易受到大气能见度的影响,测量准确度难保证。

红外辐射测云法通过测量云的红外辐射强度可以得到云的亮温,结合云的辐射率,可得到云的实际温度,根据温度的不同可以区分云与晴空。基于此原理的有红外云成像仪(ICI)^[11]、红外云分析仪(CIR)^[12]和全天空红外测云系统(WSIRCMS)^[13]等。其中,ICI的镜头视场较窄,不能对全天空进行测量,无法得到总云量,而CIR只将天空分为181 pixel,空间分辨率较差,要提高天空分辨率,则需增加扫描时间(单点)或增加红外辐射计探头。WSIRCMS采用320 pixel×240 pixel的红外焦平面阵列,工作时通过按顺序扫描天顶和天边8个方位的红外辐射得到全天空的红外辐射信息。此类仪器的主要缺点是红外器件特性时漂大,每次观测时都需进行定标,同时受环境影响大,保护措施要求高^[14]。

2.2 能见度的观测仪器

能见度是指目标物的能见距离,即观测目标时能从背景上分辨出目标物轮廓的最大距离^[1]。能见度测量主要是基于光学原理测量大气的消光系数 σ ,然后通过Koschmieder定律或Allard定律来求得能见度值。其中Koschmieder定律是确定白天目标物能见度的基础,而Allard定律是测量夜间能见度的基础。Koschmieder定律公式为

$$C = \exp(-\sigma d), \quad (1)$$

式中 C 为视觉对比度,是目标物和背景之间的相对亮度差; σ 为消光系数,是表征任意情况下大气透明度的一个特征量; d 为观测员距离目标物的距离。如果目标物恰好可以看见,即视觉对比度 C 达到眼睛的对比阈值 ϵ ,取 $\epsilon=0.02$,则有

$$d = -\ln \epsilon / \sigma = 3.912 / \sigma. \quad (2)$$

根据测量方法的不同,可分成透射式能见度仪、散射式能见度仪和数字摄像法三类,其中应用最为广泛的是透射式能见度仪和散射式能见度仪。透射式能见度仪通过测量水平空气柱的平均消光系数来测量能见度,测量示意如图1所示。这是最接近气象光学距离定义的测量方法。典型的透射仪有Vaisala的MITRAS大气透射仪和LT31大气透射仪。透射式能见度仪是机场观测系统中使用较多的仪器,但其基线长,占地范围大,不适用于海岸台站、灯塔自动气象站及船舶上。散射能见度仪工作机理是建立在散射光理论基础之上的,通过测量一定采样空间内的散射光强,利用散射光强计算消光系数。按照接收器接收不同方向的散射光,可以把散射仪分为3种:后向散射仪、前向散射仪和侧向散射仪,其中应用较多的是前向散射仪(如图2),代表仪器有Vaisala公司的FD12P单光路前向散射仪、美国Qualimetrics公司的双光路前向散射仪VS8364。散射仪以其体积小和性价比高而广泛应用于码头、航空和高速公路等地,其不足主要表现在有效采样空间小,数据代表性相对较差。

数字摄像法测量能见度^[15]的原理是通过数字摄像机模拟人眼,直接获取选定目标物的图像,对获取的图像信息进行分析处理,从而获取能见度的数值。该系统完全仿照人工目测能见度的方法测量能见度,却避免了人的主观性,比传统的透射式、散射式能见度仪更具客观性,具有广阔的发展前景。

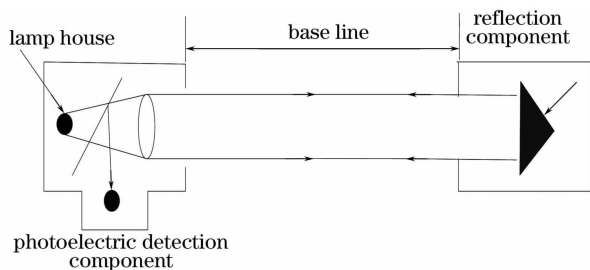


图 1 透射式能见度仪示意图
Fig. 1 Sketch map of visibility sensor of transmissivity meter

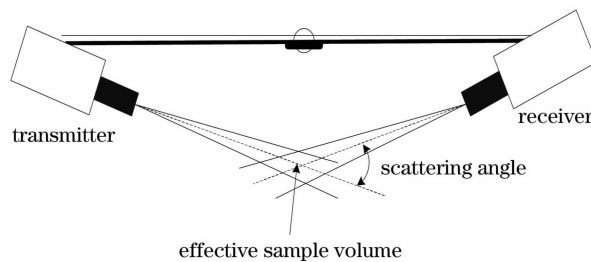


图 2 前向散射式能见度示意图
Fig. 2 Sketch map of forward scattering visibility meter

2.3 天气现象的观测仪器

天气现象是指发生在大气中、地面上产生的降水、气凝结物、冻结物、干质悬浮物和风、光、电的各种现象，包括降水现象、视程障碍现象、地面凝(冻)结现象、雷电现象和风暴现象等共 34 种^[1]。尽管天气现象传感器有多种，但是所能探测的气象要素大多局限于降水现象和视程障碍现象等部分现象，本文重点介绍技术比较成熟的降水类型自动识别技术。

基于光学原理的降水类型自动识别方法主要是利用降水粒子穿过光束时对其正常传播产生一定的影响^[16]，通过对光信号的特征提取和分析实现降水现象的观测和自动识别。目前应用比较广泛的方法主要有以下两种原理：

1) 通过光强信号的闪烁特征来判断降水类型，其测量原理是对降水粒子的散射信号进行频谱分析^[17]，不同的信号频谱信息对应不同的天气现象，如图 3 所示。基于此原理的仪器主要有美国 OSI 公司生产的 WIVIS 和 OWI 两种类型的天气现象传感器、美国 ASOS 系统

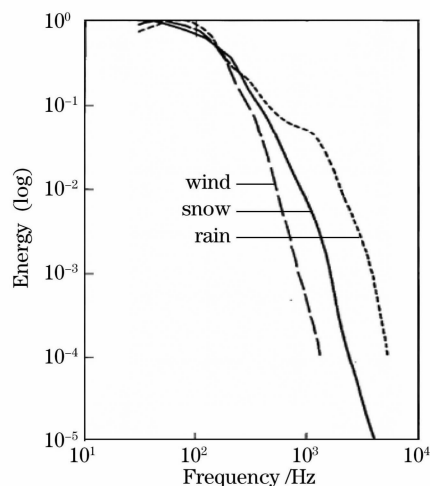


图 3 不同天气现象产生的能谱分布
Fig. 3 Energy spectrum of different present weather

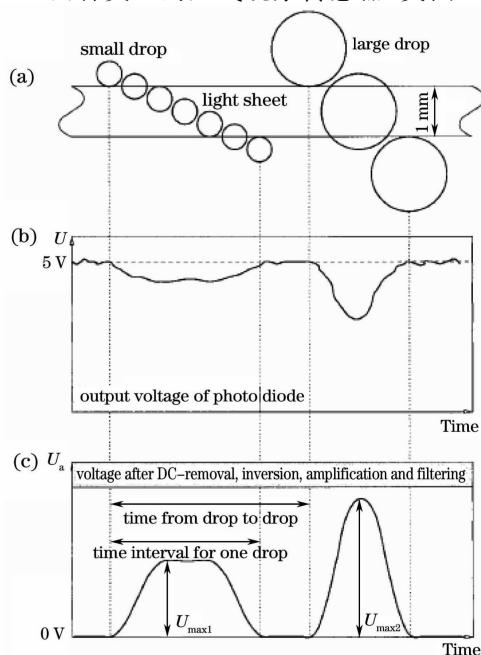


图 4 系统结构及粒子穿过光束信号示意图
Fig. 4 System structure and signals of particles falling through the light sheet

所采用的 LEDWI^[18] 以及美国 NOAA/ERL/WPL 研制的激光天气现象识别系统 LWI^[19,20]。此类仪器能区分雨、毛毛雨、雪和冰雹等天气现象,具有很高的准确度。其中 WIVIS 加装了前向散射接收端,可探测能见度,但由于该方法基于频率谱,空气的正常扰动及其他信号对其有一定的干扰,因此受环境影响较大。

2) 直接获取降水粒子大小和速度,然后根据二者的关系来判断降水类型。获取降水粒子大小和速度的方法有光强衰减法^[21,22] 和图像采集法^[23,24]。此类方法有效地避免了各种复杂形状粒子的散射问题,能够直接获取粒子的尺度和速度信息,根据粒子的尺度-速度分布关系判断降水的种类。其缺点是不能探测毛毛雨滴,还存在的问题是粒子通常不是理想球形,垂直尺度和水平尺度不相同,需要进行一定的修正,对于粒子下落过程的重合现象不能很好的解决。

光强衰减法测量的原理是当降水粒子穿越有效采样空间时其光强发生变化,幅度和信号变化持续时间与粒子的大小和速度成正比,据此可以计算降水粒子的尺度、速度和谱分布等,如图 4 所示。基于此原理的传感器有德国的 OTT Parsivel 和 Thies Clima 激光降水监测(LPM)。

图像采集法的测量原理是基于线阵图像传感器以固定频率扫描通过采样区的降水粒子,获得粒子的投影信息,然后重构粒子图像,根据图像信息进一步计算粒子大小和速度信息,如图 5 所示。基于此原理的代表仪器有 2DVD^[7],气象粒子传感器(MPS)^[24]等。此种技术主要依赖图像处理技术、计算速度及其他参数。

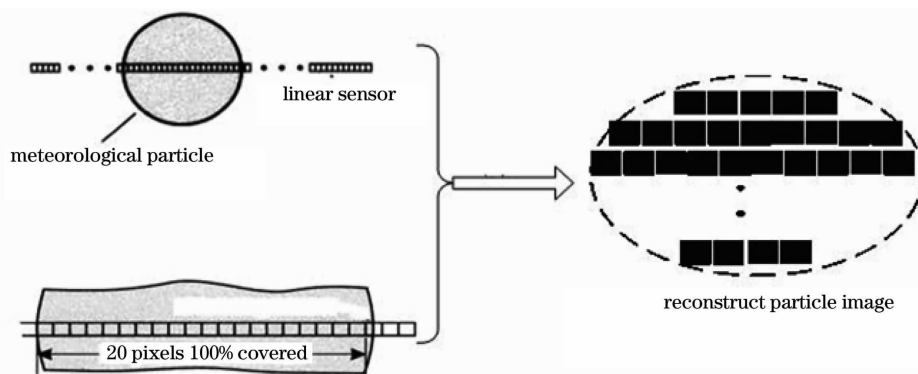


图 5 粒子成像示意图

Fig. 5 Sketch map of particle imaging

3 光学气象观测仪器在应用中的关键问题探讨

3.1 良好的环境适应性是仪器正常工作的前提

气象观测仪器通常需长期工作在户外,工作环境复杂,易受灰尘、雨雪、露、霜等的影响。为保证探测仪器正常工作及数据的准确性和代表性,仪器需要能够抗击高低温、高湿、降水和沙尘等恶劣天气的影响。环境对仪器正常工作的影响有以下几方面:环境温度的变化使得光源输出功率不稳定,此外,观测窗内外温差过大时,还会在光学镜头表面形成水气凝结,造成镜头污染参数过高的假象;在干旱地区,沙尘暴和扬沙污染光学镜头和堵塞电机系统;雨或伴随强风的猛烈暴雨的大量水滴和固体颗粒覆盖在光学系统上,是导致能见度测量误差的主要因素之一;雪融化时会冻结电机系统,使基于扫描方式的工作设备的传动装置不能正常工作。

针对以上情况,除日常的镜头清洁维护外,在不影响仪器探测性能前提下,可以采取以下措施:

1) 对核心观测部分采取密闭腔体结构,除观测窗口外,密闭腔体将传感器以及核心电路和自然大气隔离开,有效避免灰尘、降水及其他污染等影响。

2) 采取温控装置,包括观测镜头加热控制和光学腔体的恒温控制。前者可以有效避免结露、结霜以及灰尘的吸附,后者的温度控制还可以保证光源及传感器性能不受温度影响,减少传感器的温度响应效应。如温度每升高 1 °C,作为光源的二极管能量减少 0.6%,若不补偿 20 °C 的温差就可造成 10%~15% 的测量误差^[1],而一般光电传感器在不同温度条件下也有不同的响应特性。

3) 采取吹风的措施,对镜头及相关部位进行吹风,结合加热措施,可以使系统不受灰尘积淀和雪融化时易冻结的影响。

以上措施在实际应用中通常综合使用,如 WSI 在设计之初采用的是半圆形浇铸树脂玻璃进行防护,但浇铸的树脂玻璃在周围部分容易产生光学畸变,且易累积露、霜。后来采用了高质量的平板磨砂玻璃,里面加装加热设备以防止结露结霜^[25]; WSIRCMS 采用了密闭腔内设计,为了防止密闭腔内以及锗玻璃窗上结霜、结露和积尘等污染情况的发生,采用了加热、吹风及干燥等相应的防护设计措施^[13]; OTT 的镜头处有自动温控装置,保证传感器的工作环境和露霜等的影响^[26]; MPS 系统设计了随动装置,使得光轴方向始终和风的来向平行,减少风对测量结果的影响。通过长期运行和实验对比,上述措施的有效性得到了很好的检验。

3.2 仪器长期稳定性是仪器业务化运行的保证

随着仪器户外运行时间的增加,传感器的性能可能会发生漂移,这会对系统的测量精度产生一定的影响。为保证数据的准确性和一致性,在应用中需要关注和解决光电传感器长期性能稳定性及校准维护的问题。图 6 列出 WSIRCMS 的红外焦平面阵列工作一定时间后响应率变化情况,分别选取 06 年 10 月份和 09 年 11 月份的数据。经定标实验对比,发现探测器在不同温度条件下辐射响应率发生了较为显著的变化^[27]。因此,对光电传感器进行定期校准和维护对于保证仪器长期运行的准确性有着重要的意义。

为保证仪器长期工作的稳定性,除需要定期对仪器进行校准和维护外,即对仪器关键部位进行清洗、擦拭和对关键信号进行检测外,可以采取以下措施:

1) 关键信号的实时监测。当相关性能参数漂移达到设定阈值时,触发“报警”以请求校准和维护。此外,实时监测系统的工作环境,可以在应用中修正诸如温度、湿度等环境参数对探测器的影响。

2) 自校正技术。仪器内部集成自定标单元,采用现场定标工作的方式,如 WSIRCMS 内部集成有内黑体,采取基于内定标黑体的工作方式^[27]。

3) 实时非均匀性校准技术。高速现场可编程阵列(FPGA)的发展为实时校准提供了条件^[28],如在利用线阵 CCD 进行粒子图像采集的系统中,阈值的设置是影响系统成像质量的关键,可以在每次系统运行前(或定时进行)进行一定次数的信号采集并计算每个像素单元的响应特性及设置各个像素的阈值,将相关系数存放在 FPGA 内部存储器,在系统工作中根据每次运行计算的系数进行实时校正。

合理校准和维护好设备是仪器设计过程中需要考虑的重要问题之一。在将来的仪器设计中,应该将光电传感器和微处理器有机结合,充分利用微处理器的计算和存储功能,使仪器具有自诊断、自校准和自补偿等功能,此外,可将人工神经网络、人工智能和信息处理技术等应用于光电传感器的设计及其应用中,使其具有分析、自适应和自学习的功能,以满足设备的长期稳定性要求且保证数据的一致性和准确性。

3.3 定标和数据处理及分析是仪器应用的关键环节

光电传感器定标是将传感器数字响应转换为相关物理量的关键步骤,是探测数据准确性和一致性的保证。光电传感器的定标主要是进行响应的非均匀性校正。光电传感器的非均匀性主要由自身存在的各种噪声(如散粒噪声、热噪声、电荷转移噪声等)引起,此外由于制造工艺的影响使不同探测单元对相同特征值具有不同响应特性。目前已有的校正方法主要是针对红外聚焦平面^[29]、光电二极管阵列^[30]以及 CCD 和 CMOS 器件图像的校正算法^[31~33],其原理是根据输出数据的特性和光电响应模型对非均匀性进行校正。

图 7 为 WSIRCMS 校正前后所采集的标准黑体的图像,通过对比可以看出非均匀性得到了很好的校正^[16]。

数据的处理是在获取原始探测信息的基础上,利用相关理论和工具对数据进行加工,计算相关物理量和二次产品。如对于 WSIRCMS 所获取的红外辐射图像信息,首先根据红外辐射理论考虑影响大气向下红外辐射的因子,修正诸如水气含量、天顶角和气溶胶等因素的影响,随后采用晴空红外阈值与纹理特征相结合的方法进行云的识别^[34],进一步利用小波工具,灰度共生矩阵等理论工具提取云的纹理特征进行云的分族

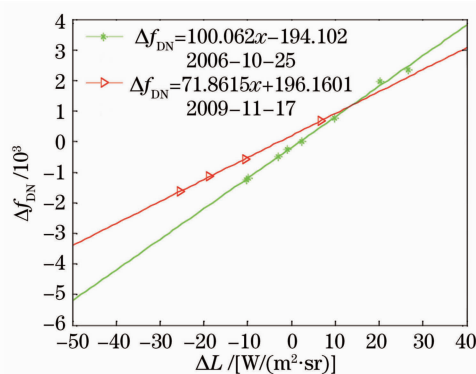


图 6 探测器时间漂移

Fig. 6 Time drift of detector

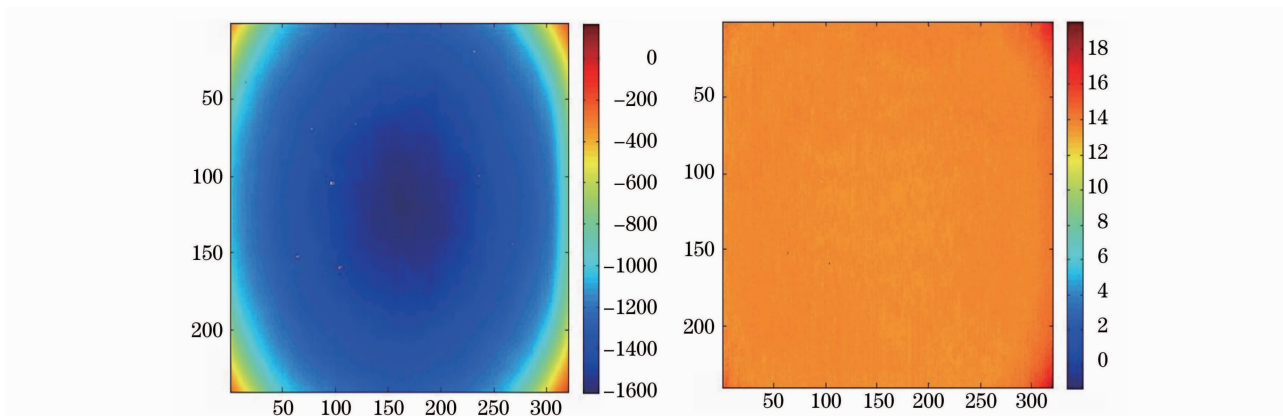


图7 校准前(a)和后(b)黑体原始红外辐射图像

Fig.7 Infrared radiation image before (a) and after (b) calibration

分类^[35];降水类型测量仪器 OTT 和 LPM 的输出为电压信号,需建立粒子尺度和输出电压信号的经验关系,由于降水粒子不是理想球形,垂直尺度和水平尺度不相同,需要进行修正。此外,下落粒子在光束中可能重合,需要定义“重合度”来评估粒子的重合程度进行修正^[36];基于图像采集原理的降水粒子采集仪器,需要考虑光学系统的景深效应和成像阈值的设置,对于不规则粒子还需要计算其等效尺度,这些都依赖于后期图像的处理算法;

定标是仪器应用于探测的前提,而结合相关理论和工具进行数据处理则是仪器发挥功用的保证,因此定标及数据处理和分析是仪器应用的关键环节。

4 结 论

介绍了基于光学原理的云、能见度和天气现象自动观测仪器的探测原理和发展现状,分析了实际应用中需关注和解决的关键技术和问题,认为光电技术为实现地面气象仪器的自动化观测提供了很好的解决途径,是一种有效的手段,而相关气象探测理论则是其应用基础,两者需有机紧密结合。

国外经过几十年的发展,已经有成熟的产品应用于地面气象观测业务中。而国内方面起步较晚,受相关基础理论和传感器技术的限制,目前能投入业务使用的仪器不多,与国际先进水平相比还有一定差距,需迎头赶上和重点发展。在看到国外先进技术及与其差距的同时,我们也应该看到,现有的仪器各有其不足和局限性。此外,国内外并没有形成统一的器测标准,这一点也说明有大量的创造性工作亟待我们去完成。实现云、能见度及天气现象自动化观测的需求牵引以及光电技术、数字信号处理技术、微处理器的不断发展是我们研发此类仪器和推动地面气象全要素自动化观测的契机。在应用光电技术于地面气象观测中,还应该在以下方面做大量的工作:

1) 加强关于探测的基础理论的研究,研究探测对象的微物理本质,为光电技术在气象探测领域的应用提供足够的支撑。研究云、降水微物理特征以及分析各种天气现象的物理本质和特征是光电技术应用于气象探测的前提,如粒子散射特性、云的辐射特性和纹理特征提取等。通过理论分析和本质特征的研究,一方面可以为光电探测提供思路,同时还有助于提高探测结果的准确性。

2) 基于现有引进的国外探测仪器,一方面可以剖析相关仪器的结构、原理特点,借鉴先进技术,利用现有成熟技术和理论,如粒子散射理论^[37]、图像采集和处理技术、谐振探测等多种探测技术,尝试相关光学仪器的设计;另一方面结合业务作业和观测资料,寻找云、能见度和各种天气现象之间以及各气象要素之间的发生、发展规律,进一步确定云、能见度和各种天气现象的特征和规律,为构建基于多传感器的气象探测系统和模型奠定基础

3) 建立器测标准是实现气象全要素自动化观测的必要条件。器测标准的制定需要从人工观测的标准出发,结合仪器自身的特点和观测目标的特性,综合相关资料信息,进行长期实验总结。通过器测标准的制定,可以指导和促进探测技术的发展,在云、能见度及天气现象器测领域占据制高点。

近年来,以光电技术为代表的各种高新技术应用于地面气象观测仪器的研制和性能改进中,光学原理作为气象探测仪器中应用广泛的探测方法,具有广阔的发展潜力和应用前景。探测理论是仪器的设计基础,而光电技术是手段,在气象工作者和光电设计人员的共同努力下,相信在不久的将来,地面自动气象观测系统能够实现地面气象全要素的自动观测,实现真正意义上的自动气象站无人值守。

参 考 文 献

- 1 Sun Xuejin, Wang XiaoLei, Li Hao *et al.*. Atmospheric Sounding Science[M]. BeiJing: Meterological Press, 2009
孙学金, 王晓蕾, 李 浩 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009
- 2 D. J. Griggs, D. W. Jones, M. Ouldridge *et al.*. The first WMO intercomparison of visibility measurement[C]. Instrumentand Observing Methods Report, 1990, **41**: WMO/TD. 401
- 3 Alexei Korolev. Reconstruction of the sizes of spherical particles from their shadow images. part I: theoretical considerations[J]. *J. Atmos Oceanic Technol.*, 2006, **24**(3): 376~389
- 4 Michael I. Mishchenko, Larry D. Travis, Andrew A. Lacis. Scattering, Absorption and Emission of Light by Small Particles[M]. London : Cambridge, 2002. 3~8
- 5 J. P. Fugal, R. A. Shaw. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument [J]. *Atmos. Meas. Technol. Discuss*, 2009, **2**(2): 659~688
- 6 R. A. Ellis, A. P. Sandford, G. E. Jones *et al.*. New laser technology to determine present weather parameters[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(7): 1715~1722
- 7 Anton Kruger, Witold F. Krajewski. Two-dimensional video disdrometer: a description[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2002, **19**(5): 602~617
- 8 S. Borrmann, R. Jaenicke. Application of microholography for ground-based in situ measurements in stratus cloud layers: a case study[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1993, **10**(3): 277~293
- 9 C. N. Long, D. W. Slater, T. Tooman. Total sky imager model 880 status and testing results[C]. ARM, 2001. TR-004
- 10 Huo Juan, Lu Daren. Preliminary study on cloud cover using an all sky digital camera[J]. *J. Nanjing Insti. Metro.*, 2002, **25**(2): 242~246
霍 娟, 吕达仁. 全天空数码相机观测云量的初步研究[J]. *南京气象学院学报*, 2002, **25**(2): 242~246
- 11 Brentha Thurairajah, Joseph A. Shaw. Cloud statistics measured with the infrared cloud imager (ICI)[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2005, **43**(9): 2001
- 12 I. Genkova, C. N. Long, T. Besnard *et al.*. Assessing cloud spatial and vertical distribution with infrared cloud radiometer CIR-7[C]. *SPIE*, 2004, **4482**: 341~349
- 13 Sun Xuejin, Gao Taichang, Zhai Dongli *et al.*. Whole sky infrared cloud measuring system based on the uncooled infrared focal plane array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 761~764
孙学金, 高太长, 翟东力 等. 基于非制冷红外焦平面阵列的全天空红外测云系统[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 761~764
- 14 Gao Taichang, Liu Lei, Zhao Shijun *et al.*. Actuality and progress about whole sky cloud sounding techniques[J]. *Quarterly J. Applied Meteorology*, 2010, **21**(1): 101~109
高太长, 刘 磊, 赵世军 等. 全天空测云技术现状及进展[J]. *应用气象学报*, 2010, **21**(1): 101~109
- 15 Thomas Legal, Louis Legal, Waldemar Lehn. Measuring visibilty using digital remote video cameras[C]. 9th Symp. on Met. Observ. & Instr., 1994. 87~89
- 16 Liu Lei, Gao Taichang, Li Hao. Three precipitation type identification techniques based on optical principle [J]. *Meteorological and Hydrological Equipments*, 2007, **2**: 20~22
刘 磊, 高太长, 李 浩. 三种基于光学原理的降水类型识别技术[J]. *气象水文装备*, 2007, **2**: 20~22
- 17 K. B. Earnshaw, Ting-I Wang, R. S. Lawrence. A feasibility study of identifying weather by laser forward scattering[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1978, **17**(10): 1476~1481
- 18 Charles G. Wade. A multisensor approach to detecting drizzle on ASOS[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, **20**(6): 820~832
- 19 K. B. Earnshaw, Ting-I Wang, R. S. Lawrence *et al.*. A feasibility study of identifying weather by laser forward scattering[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1978, **17**(10): 1476~1481
- 20 Ting-I Wang, R. Lataitis, R. S. Lawrence *et al.*. Laser weather identifier: present and future[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1982, **21**(11): 1747~1753

- 21 Martin Loffler-Mang. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2000, **17**(2):130~139
- 22 Danisleh Auserp, Aula Mayenca, N. D. Bernardn Utten *et al.*. A new optical instrument for simultaneous measurement of raindrop diameter and fall speed distributions[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1984, **1**(3): 256~269
- 23 M. Schonhuber, U. Urban, J. P. V Poiares Babtista *et al.*. Measurements of precipitation characteristics by a new distrometer[C]. Proc. Conf. on Atmos. Phys. Dynam. Analy. Progno. Precipit. Fields, 1994
- 24 D. Baumgardner, Greg Kok, W. Dawson *et al.*. A new groundbased precipitation spectrometer: the meteorological particle sensor (MPS)[J]. ams. confex.com 25 T. P. Tooman. Whole sky imager retrieval guide[C]. ARM, 2003. TR-011.1
- 26 Kurt Nemeth, Jens-michael Hahn. Enhanced precipitation identifier and new generation of present weather sensor by OTT messtechnik[J]. *OTT Messtechnik GmbH & Co. KG*
- 27 Zhang Yuntao. Study on the Methods of Calibration of the Whole-Sky Infrared Cloud Measurement System[D]. Nanjin: PLA University of Science and Technology, 2010
张云涛. 全天空红外测云系统校准方法研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2010
- 28 Xu Shuxing, Wang Baoguang, Zheng Yizhong. Study on linear CCD flat field correction and its implementation on FPGA [J]. *J. Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, **27**(6): 34~37
徐树兴, 王宝光, 郑义忠. 线阵 CCD 平场校正及 FPGA 实现的研究[J]. 宇航计测技术, 2007, **27**(6): 34~37
- 29 Cai Sheng, Bai Xuguang, Qiao Yanfeng. Summarize on the nonuniformity correction algorithms for IRFPA based on calibration[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(10): 589~592
蔡 盛, 柏旭光, 乔彦峰. 基于标定的 IRFPA 非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2007, **29**(10): 589~592
- 30 Yu Chuanxiang, Wang Quandi, Liu Xiaoming. Realization for nonuniformity correction of image sensor based on the CPLD [J]. *J. Chongqing University*, 2005, **28**(7): 43~46
余传祥, 汪泉弟, 刘晓明. 基于 CPLD 的图像传感器非均匀性校正[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, **28**(7): 43~46
- 31 Cheng Wansheng, Zhao Jie, Cai Hegao. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): ~314~318
程万胜, 赵 杰, 蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(2): 314~318
- 32 Chen Yingjuan, Zhang Zhijiang, Zhang Zhigian. Correction of CCD pixei nonuniformity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(2): 16~21
陈迎娟, 张之江, 张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学精密工程, 2004, **12**(2): 16~21
- 33 Huilong Yu, Xin He, Zhonghui Wei *et al.*. Design of image nonuniformity correction and real-time record for CMOS camera [C]. ICEMI, 2009, (16~19): 739~742
- 34 Liu Lei. Sky-condition classification using the whole-sky cloud infrared measurement system data[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2008
刘 磊. 基于地基全天空红外测云系统的云识别及分类研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2008
- 35 Qin Jin. Researches on the ground-based cloud classification of whole-sky image based on the structure features[D]. Nanjin: PLA University of Science and Technolog, 2010
秦 健. 基于结构特征的地基全天空云图分类研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2010
- 36 J. Raasch, H. Umhauer. Errors in the determination of particle size distributions caused by coincidences in optical particle counters[J]. *Part. Charact.*, 1984, **1**(1-4): 53~58
- 37 Liu Lei, Li Hao, Gao Taichang. The approximate ellipsoid model for raindrop and its near-infrared scattering characteristics [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, **28**(3): 271~275
刘 磊, 李 浩, 高太长. 雨滴的近似椭球模型及其近红外散射特性研究[J]. 气象科学, 2008, **28**(3): 271~275