2004年4月

Journal of Nanjing Institute of Meteorology

文章编号: 1000-2022(2004) 02-0230-08

前向散射型能见度仪 原理样机的主要性能分析

莫月琴¹, 刘 钧¹, 吕文华¹, 李祥超², 王改利¹, 陈钟荣²

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 南京气象学院 电子工程系, 江苏 南京 210044)

摘 要:从对散射强度的测定来估算大气能见度的理论出发,给出了前向散射型能见 度仪的测量原理。将能见度仪原理样机的外场实验数据与观测员目测能见度进行分 析,基本符合通过测定散射强度,估算大气消光系数,进而确定大气能见度的关系,分 析表明该样机设计原理是正确的。同时,从实验数据的统计中发现有时方差较大,动 态范围小。经过深入研究认为主要是背景噪声干扰所致,特别在无云晴天,阳光充足 时,背景噪声十分显著,严重影响测量结果。对原理样机存在的问题进行了探讨,进而 提出了改进意见。

关键词: 能见度仪; 测量原理; 背景噪声; 性能分析

中图分类号: P422.9 文献标识码: A

能见度是重要的气象要素之一, 它对航空、航海、铁路、公路运输、电力、气象等部门的业务 运行有着十分重要的作用。

能见度首先是为了气象目的而定义的通过人工观测者目测,然后进行定量估计的量,这种 观测方式一直被国内外广泛采用。它的规范性、客观性较差,难以实现自动观测。

早在 20 世纪 50 年代中期国际上就出现了透射型能见度仪,它是基于光的透射率来确定 大气能见距离的。但透射型能见度仪体积大,基线较长,安置复杂,价格昂贵,仅被重要机场所 采用,难以在高速公路和气象观测等部门中普及。60 年代又出现了散射型能见度仪,它是根据 粒子对光的散射特性确定能见距离的。这种仪器成本较低,安装方便,弥补了前者的不足,在以 后的发展中又得到了进一步的研究和应用^[1-2]。

我国在 20 世纪 70 年代就开始了器测能见度的探索。吕达仁等^[3]利用红宝石激光雷达在 北京地区测量了水平方向大气平均衰减系数,并与目测能见度做了比较。之后赵燕曾等^[4]又利 用激光雷达进行了斜视能见度的测量。目前我国也有几个部门在探讨能见度的测量,如北京市 气象局与中国科技大学合作,利用 CCD 摄像方法来测量能见度,长春气象仪器研究所也研制 过前向散射型能见度仪,它们各有所长,都有不同程度的进展,但还不能适用于机场、高速公 路、气象台站等能见度的日常观测。中国气象科学研究院与南京气象学院合作,研究前向散射 型能见度探测仪,于 1999年研制了第一台原理样机,同年 8 月 16 日—11 月 30 日在中国气象 局大气探测试验基地进行了外场实验,取得了大量数据,为仪器的进一步技术改进、功能完善 提供了重要依据。

1 利用散射强度测量能见度的方法和原理

能见度是一个复杂的心理—物理现象,测量能见度的主要依据是悬浮在大气中的固体、液体微粒引起的大气消光系数,其估计值依赖于个人的视觉和对可见的理解,同时受光源特征和透射因子的影响,因此能见度的目测估计值是主观的。

1957 年 WMO 建议用大气透明度对能见度进行客观测量,用气象光学视程(MOR)表示, 并定义为白炽灯在色温 2 700 K 时发出的平行光束,光通量在大气中削减至初始值的0.05时 所经过的路径长度^[5]。简言之,即透射比 *T* 为0.05的大气路径长度。

测量能见度的基本方程是:

$$F = F_{0} e^{-\theta_{y}}$$
(1)

式中, *F* 是光在大气中经过路径长度 *y* 接收的光通量, *F*⁰ 是 *y* = 0 时的光通量, σ 为消光系数。 透射因子为:

$$T = F/F_0 = e^{-\sigma_y}$$
(2)

若此定律应用于 MOR 定义的 T = 0.05, 可写出下列关系:

$$T = 0.05 = e^{-\sigma_y}$$
 (3)

因此,大气的路径长度 γ (即气象光学视程 MOR) 对消光系数 σ 的数学关系式为:

$$y = \frac{1}{\sigma} \ln(\frac{1}{0.05}) \qquad \frac{3}{\sigma}$$
 (4)

消光系数是由于大气气溶胶和分子的散射和吸收作用而造成的光的衰减,它等于吸收系数与散射系数之和,即*σ*= *b*+ *c*,*b*为散射系数,*c*为吸收系数。大气对光的吸收与散射相比一般都很小,因此可通过测量有限体积空气对光的散射系数估计大气消光系数。当光程有限、可 忽略大气对光的吸收时,在一定范围内,可认为所测的散射系数与消光系数成线性关系^[6]。

散射系数与消光系数呈线性关系,散射强度的大小又由散射系数决定。散射型能见度仪就 是通过测量散射强度,估计大气消光系数,进而确定大气的能见距离。

2 原理样机简介与外场实验数据分析

2.1 原理样机的构造特点

根据上述能见度与散射强度的关系,设计了前向散射型能见度仪的原理样机。样机主要由发射器,接收器,信号采集与处理,控制器,加热器,调制解调器,电源等单元组成(图1)。

能见度仪的光束简图^[7]见图 2。当发射器发出的光照射到采样体积,采样体积中的气体分子,固态、液态颗粒等对光产生散射。散射信号进入接收器的光敏二极管,根据二极管接收信号的强弱,建立前向散射能量与能见度的联系。

当发射器发出的光束照射在采样体积上,接收器接收的能量就是空气中粒子对入射光散 射能量的一部分与背景光能量之和。关闭发射器,接收器接收的完全是背景光的信号,两者之 差即为粒子对入射光散射的部分能量,根据这一散射能量可计算出能见度。

对于前向散射,一些研究者认为最好的散射角在 20 [∞] 50 ℃间,即散射光的强度与散射系 数在这一散射角范围内基本呈线性关系^[6,8]。





Fig. 1 Block diagram of a visibilimeter's prototype

该原理样机的散射角设计为 33 ° 发射光 束与地面平行。发射光源为峰值波长 930 nm 的红外发光二极管,接收元件为 PIN 光电二极 管,接收波长范围为 550~1 050 nm。

2.2 背景噪声对能见度测量的影响

1999 年 8 月 16 日—11 月 30 日在中国气 象局大气探测试验基地对研制的原理样机进 行了为期三个半月的外场实验,取得了大量数 据,现分析如下。

图 3、图 4 给出了两个具有代表性的输出 信号日变化趋势。横坐标为数据采集样本数



Fig. 2 Beam of light for a visibilimeter's prototype

(与24 h对应),纵坐标为散射能量(转换成频率输出)。最上面的一条曲线是发射信号,被调制 成2.3 kHz频率发送,用于抑制来自其他光源的干扰(因为接收器接收到的仅是 2.3 kHz 散射 光信号的强度)。为解决因取样空间小代表性较差的问题,进行了大量的样本测量,剔除极端 值,并进行了滑动平均。

如图 3、图 4 所示,发射信号在 09 时之前开始不稳定,随着太阳升高廓线呈下降趋势,约 13 时降到最低值,到了下午又开始回升,逐渐趋于正常,可见功率随太阳高度角有一定程度的 漂移。另外发射管具负温度特性,温度系数约为-0.6 %/。10 月 22 日的最大温差为 13 , 10 月 25 日的最大温差为 10 ,仅由于环境温度的升高能量信号就有约 7 % 的下降,如果考 虑到仪器内部的热量累积,下降的将会更大。发射信号的不稳定也将直接导致接收信号的波动,因此在发射器的设计中应有温度补偿或温度控制装置。

中间的一条曲线(粗实线)是发射器开机时接收器接收的信号,也就是入射光的散射能量 与背景光的能量之和。根据散射理论,能见度低时粒子散射较强,能见度高时散射较弱,因此该 曲线随能见度的变化和背景信号的大小而波动。它与最下面的一条曲线(背景光曲线)之差即 为计算能见度的因子。

最下面曲线为背景光变化曲线,也就是发射器关闭时测得的能量,具有以下特点:

(1) 夜间取值基本一致。

夜间背景噪声主要来自于热辐射、城市灯光等,同时还受大气对流、局部湍流等影响,它比 较稳定且量值较小。

(2) 白天取值波动较大。



图 4 输出频率日变化趋势(1999 年 10 月 25 日)

Fig. 4 Output frequency as a function of time(October 25, 1999)

白天除了热辐射等影响外,还有太阳辐射、天空散射等背景光的影响。随着太阳辐射的增强,粒子散射和热辐射也在增大,其结果是背景光越来越大,且变化很快。假若仪器漏光,影响则更大。

由于设计时仪器第一级增益太高,当背景光太强时(晴天),其信号强度超出了接收器的测量范围,致使出现饱和状态而导致无法测量,图3中背景光和接收机信号曲线变成了朝下的矩形方波。晴天时这种情况一般延续到13:30左右。背景光减弱以后仪器又可接收到正常信号,和上午的趋势正好相反,逐渐减弱直到日落。10月22日全天基本上晴空无云,出现了饱和溢出现象。在数据分析中发现,几乎所有的晴天都有溢出现象。

另一种情况是背景光不很强,接收器没有达到饱和,日频率变化是一条完整的连续曲线。 尽管 10月 25日这一天也为晴天(图4),但全天都有轻雾,而且风力不大(最大风速 $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

白天和夜间不同。白天背景光较复杂,它不仅有和晚上一样的热辐射、对流、湍流的影响, 还有白天的太阳辐射,多次散射辐射等。

从仪器的结构看,漏光也是不可忽视的因素。尽管用防护罩对样机的光学镜头进行了保 护,但防护罩太短,太阳高度角低时,有太阳光照到了镜头上,而且发射光束平行于地面,接收 光程过长。当背景光强,多次散射较大时,对接收信号的影响就较大。因此设计中除了消除或 减小背景光的影响外,还必须采取措施防止漏光,比如加长防护罩、减小光程、让光束冲着地面 等。

能见度低时(图4),粒子散射信号强,容易从噪声中分离出来。但能见度高时(图3),背景 噪声相对较大,致使散射信号被淹没在噪声中难以分离出来,影响小信号测量。因此提高仪器 信噪比也是提高测量精度的另一途径。

2.3 能见度—频率差的曲线拟合

这里的散射信号是发射器开时接收器接收的频率与发射器关时接收器接收的频率(即背 景光)差值。用人工观测的能见度与频率差来拟合,求出曲线方程的系数。

由上面的讨论可知,对于小的采样空间,可忽略光对大气的吸收,在一定范围内可以认为 消光系数与散射系数相等,散射角在 20 ~ 50 之间时散射强度与散射系数基本呈线性关系(原 理样机的散射角为 33 °,样本中以频率差反映散射强度的大小。因此由式(4)可知,能见度与 频率差的关系应符合幂指数形式。

曲线拟合选择了象图 4 那样具有完整曲线的记录曲线拟合。用于拟合的能见度每小时定 点目测,每天有 24 个能见度记录。而能见度仪是实时观测,每 5 s 采集一个数据,20 s 作一次

滑动平均再输出,因此每天有4000多个数 据。将正点对应的频率差与相应的能见度 进行拟合,拟合曲线、方程及方差如图5所 示。

图 5 中拟合曲线方程的横坐标表示频 率差(kHz),纵坐标表示能见度(km), R²为 均方差。从拟合的结果看,基本符合幂指数 形式,其设计原理是正确的,但分散性较 大。

另外,外场试验中除了与人工观测比 较外,还与芬兰 Vaisala 公司的产品 FD12 进行了比较,其统计结果列于表 1。从表中 结果看,无论与人工观测比较还是与 FD12



3

比较都有一定的一致性, 且与 FD12 的符合率相当(FD12 已作为业务观测设备), 再次说明该 样机采用的原理是正确的。

表1 外场试验中3种对比观测统计结果

	Table 1 Results of the parallel observation in the field experiment						
	相对误差 10%所占的百分数				相对误差 20%所占的百分数		
	人工-样机	FD12-样机	人工-FD12		人工-样机	FD12-样机	人工-FD12
8月	25.4	9.8	16.4		38.7	19.6	27.6
9月	16.2	12.3	13.6		24. 1	21.6	26.5
10月	21.3	6.4	15.0		26.6	10.8	34.7
11月	20.8	6.2	13.2		20.8	10.4	25.0
平均	20.8	8.7	14.6		27.6	15.6	28.5

对前向散射型能见度仪改进设计的建议

从上述分析和曲线拟合结果以及外场试验中发现原理样机还存在一些问题:

(1)发射器的功率随环境温度有一定程度的漂移(表现为负温度系数)。

(2) 仪器增益, 特别是一级放大器的增益太高, 当雾很浓或背景光特强时, 接收器很容易饱 和产生溢出。

- (3) 能见度高时(晴天), 阳光产生的背景噪声较大。
- (4) 接收机可能有漏光现象, 是造成背景噪声增大的另一重要因素。
- (5) 仪器信噪比较低, 影响小信号测量。
- (6)由于发射光束与地面平行,光程长,易受杂散光的干扰。

针对样机存在的上述问题,提出以下新的改进设计建议:

- (1)加大发光二极管的驱动电流,适当增加发射功率。
- (2)采用自动增益控制扩大接收器的动态范围。
- (3) 增加接收器一级窄带滤波器, 抑制噪声。
- (4)发射器中增加温度补偿或控温装置,减小温度系数的影响。
- (5) 解决接收器的漏光问题, 抑制背景光的进入。
- (6) 改进结构设计,发射光束冲向地面,增加防护罩长度,减小背景噪声、杂散光的影响。
- (7)保护光学镜头,减小镜面污染。

图 6、图 7 给出了改进后的样机试验结果,不难看出,样机比以前有了实质上的改进,发射 信号比较稳定,提高了信噪比,降低了杂散光的影响。

4 结论与讨论

原理样机外场试验数据的分析,表明该样机设计原理是正确的。但动态性能范围小,背景 噪声干扰强,特别在无云晴天,阳光充足时,这一影响十分显著,严重影响测量结果。文中探讨 了原理样机存在的问题,认为通过改进电路、结构方面的设计,仪器性能将会有较大的提高。 2001 年 3 台正式样机采纳了这些建议,现场试验结果表明,动态范围、测量精度及反映实际能 见度变化趋势有明显的提高。



图 7 输出频率日变化趋势(2001年02月27日) Fig. 7 Output frequency as a function of time(February 27,2001)

参考文献:

- Gaumet J L, Salomon P. A Visibilimeter for the High ways Meteorology [C]. Six th Symposium Meteorological Observations and Instrumentation. 1987: 111-114.
- [2] David C. Burnham. Fog. Snow and Rain Calibrations for Forward scatter Visibility Sensors [C]. Eighth Symposium Meteorological Observations and Instrumentation. 1993: 66-69.

- [3] 吕达仁,魏 重,张健国.激光探测能见度的实验研究[J].大气科学,1976(1):55-61.
- [4] 赵燕曾,陶丽君,郝南军. 激光测斜视能见度的初步试验[J]. 大气科学, 1980, 4(2): 168-175.
- [5] WM O. Guide to meteorological instruments and methods of observation [S]. WM O, 1983.
- [6] 张澄昌,周文贤.大气气溶胶教程[M].北京:气象出版社,1995.
- [7] 涂 钢. 能见度测量的理论原理与方法[D]. 南京: 南京气象学院电子工程系, 1998.
- [8] Ton na G, Shfrin K S. Reliability of the poller nephelometer for the measurement of visibility in Fog App Opt[J]. J M eteor Soc Japan, 1992(31): 2 932-2 940.

Experimental Analysis of a Visibilimeter's Prototype

MO Yue-qin¹, LIU Jun¹, Lü Wen-hua¹, LI Xiang-chao², WANG Gai-li¹, CHEN Zhong-rong²

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
Department of Electronic Engineering, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: The measurement principle of forward scatter visibilimeter is presented in this paper according to the theory of estimating atmospheric visibility with scatter energy. The curve fitting is worked out between visibilities man-observed and real field signals based on from the design field experimental data of a visibilimeter's prototype. It shows that the basic principle of the prototype is correct although it has the limitations such as bigger errors and the smaller range of dynamic state. The main factor leading to the limitationis is random background noises especially in clear day. They severely affect the measurement results. The problems in the prototype are discussed and improving measures are put forward.

Key words: visibilimeter; measurement principle; background noise; performance analysis