

一种基线长度改变的能见度测量和评价方法

庄子波^{1,2} 台宏达^{2,3} 蒋立辉²

¹中国民航大学飞行技术学院, 天津 300300

²中国民航大学民航气象研究所, 天津 300300

³中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300

摘要 针对能见度真值难以确定和能见度仪测量结果难以评价的问题,提出了一种基线长度改变的能见度测量和评价的方法,并采用整体最小二乘拟合方法来降低基线长度的定位误差和透射率测量误差对消光系数的影响,提高了消光系数的测量精度。为验证方法的有效性和评价该方法在不同能见度条件下的测量性能,设计了移动测试平台,在大气模拟舱模拟了一次能见度由高到低持续变化的过程,采用多点多次测量的方式测量了环境的消光系数及能见度。实验结果表明该方法在不同能见度条件下,均有较高的测量稳定性和一致性。确定系数随能见度的降低而增大,能见度大于3000 m时,确定系数也达到0.9以上,低能见度时可以达到0.99。各种能见度条件下,单位权方差在 10^{-4} ~ 10^{-2} 之间,表明该方法测量的离散性很小,测量精度高,可作为能见度仪校正和标定的参考。

关键词 大气光学;能见度;消光系数;变基线长度测量;整体最小二乘拟合

中图分类号 P412.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0201001

Changing Baseline Lengths Method of Visibility Measurement and Evaluation

Zhuang Zibo^{1,2} Tai Hongda^{2,3} Jiang Lihui²

¹Flight Technical College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

²Civil Aviation Meteorological Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

³College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract To improve the accuracy of the visibility measurement and the evaluation of the measurement results, one method of changing baseline lengths visibility measurement is proposed. The least squares method is used to reduce the impact of errors of the position of the receiver and transmittance measurement on extinction coefficient. This can improve the measurement accuracy of the extinction coefficient. To verify the effectiveness of the method and evaluate the performance of the method under different visibility conditions, one mobile measuring platform is designed. Meanwhile a continuous atmospheric environment changing from high to low visibility is simulated in the atmospheric simulation chamber. In the simulation chamber, using the mobile platform, multi-point and multiple times measurements method is used to measure the extinction coefficient under different visibility conditions. The results show that this method has a high measurement stability and consistency under different visibility conditions. In the fitting process, coefficient of determination R^2 increases with the visibility decreasing. When visibility is more than 3000 m, coefficient of determination can reach 0.9. Coefficient of determination can reach 0.99 in lower visibility. The unit weight variance is between 10^{-4} and 10^{-2} regardless of high or low visibility, this indicates the method has very smaller discrete and higher accuracy, which makes it potential to be used as the calibration of instrument and calibration of reference.

Key words atmospheric optics; visibility; extinction coefficient; changing baseline lengths measurement; total least squares fitting

OCIS codes 010.1290; 010.7295; 290.2200; 230.7370

收稿日期: 2015-08-25; 收到修改稿日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金民航联合重点项目(U1433202)、民航安全能力建设资金(TMSA1458)

作者简介: 庄子波(1980—),男,硕士,讲师,主要从事航空气象方面的研究。E-mail: zbzhuang@cauc.edu.cn

1 引 言

能见度主要用于机场运行最低标准、飞行计划最低标准、精密进近着陆的运行分类标准以及航空公司的各类运行条件中。能见度观测的准确性直接影响机场能否正常开放、航班能否正常起飞和着陆、航班备降场的选择以及精密进近方式的确定。

在现有航空气象的业务运行中,能见度采用仪器观测和人工观测两种观测方式,而跑道视程(RVR)的确定只能使用仪器观测^[1]。大气透射仪和前向散射仪是国际民航组织(ICAO)推荐的主要的能见度测量仪器^[2-3],然而透射仪发射接收端的对正、设备部件的硬度与光源的稳定性、校准误差、环境的多变性及不均匀性等原因导致两种能见度测量仪器的测量误差较大^[4],ICAO和中国民航局对于大气透射仪和前向散射仪的最大允许测量误差规范为10%~20%^[2-3]。由于大气能见度受多种因素的影响,在能见度误差的确定与评价中,能见度测量真值的确定和对测量结果的评价始终是难于解决的问题。

能见度最初是用于表示人眼能够观测到目标的最大距离。杨玉霞等^[6]对比了霾浮尘烟、雨雪、轻雾三类天气条件下目测能见度与前向散射仪的测量结果,测量结果表明目测能见度均比前向散射仪测量偏大10%以上。谭浩波等^[7-9]对比了目测能见度与不同种类能见度仪,比对结果均表明二者的测量结果存在较大差异。由于目测能见度的目标物、目标灯在实际工作中难于寻找或设置,不同观测员在不同地点、不同时间、不同季节、不同天气条件下对能见度变化规律的认识不同,其视觉对比感阈不同,对“刚好能见”和“轮廓清晰”的理解也不同,能见度人工观测真实值确定的主观性太大,人工观测能见度值不能作为测量比对的真值。

能见度的器测值同样难以作为能见度测量的真值。基于对大气透射率和消光系数进行直接测量的大气透射仪在多次能见度测量结果的比对中常被作为能见度标准值的参考仪器^[10-11],但其本身仍有较大的测量误差。何驰^[12]进行了贵阳机场的大气透射仪与前向散射仪的对比实验,测试结果表明两种仪器测量结果偏差较大。濮江平等^[13]对比了北京两套大气透射仪、两套双光路前向散射能见度仪和一套前向散射能见度仪,测量结果表示各仪器的总体偏差均达10%以上,两套大气透射仪的总体偏差分别为16%、18%。田丽^[14]对比了低能见度条件下的大气透射仪和前向散射仪测量数据,在雾、雨和雪天气条件下,两种仪器的测量偏差均为20%以上。在国外多次能见度仪对比实验中,大气透射仪虽经校准和维护后作为标准的参考仪器,其本身的不一致性仍可达10%^[11,15]。较大误差的参考真值使得能见度和消光系数的测量误差无法衡量,对能见度及消光系数的测量结果进行精确的测量和评价变的十分迫切。

近年来,除了大气透射式和前向散射式消光系数及能见度测量方法之外,其他的一些消光系数及能见度测量方法也在逐渐发展。通过摄像机和图像处理的方式进行能见度测量的方式逐渐被民用航空业所关注^[2,4],后向散射式激光雷达在测量水平能见度和斜程能见度方面逐步得到应用^[16-21]。盛新志等^[22]利用多次反射池、激光器和数字摄像机发明了一种大气低能见度的测量方法和装置。马千里等^[23]利用积分浊度计进行了能见度的计算,并与Vaisala的FD12P能见度仪进行了测量数据的比对。程绍荣等^[24]研制的国产化的大气透射仪样机也已经完成,并与Vaisala的大气透射仪进行了数据的比对。赵力等^[25]设计了一种多次反射法透射式能见度测量系统。王宗俐等^[26]利用反射镜构成激光往返式能见度测量方案,改进了透射法和后向散射法测量能见度的原理。宫纯文等^[27]利用光在镀膜玻璃管管壁的多次折返增大光程,测得了在一定气溶胶含量下的消光系数。但对于这些新型的能见度和消光系数测量方式而言,其准确性的衡量方式仍然是与国外仪器进行直接对比,而系统性能与国外能见度测量设备的性能差别并不能反应能见度测量误差的大小。

本文提出了一种基线长度改变的能见度测量方法,设计了一种基于532 nm激光的滑轨式基线长度可变的测量系统,在50 m长的高精度滑轨上每5 m测量一次透射率,每往返2次做一次整体最小二乘拟合,消光系数即为所拟合直线的斜率,由消光系数计算出大气的能见度。在可控的大气模拟环境中做了不同能见度条件下的测量实验,拟合的确定系数和单位权方差的分析证明了方法的稳定性和测量的一致性。

2 测量方法

在能见度仪器观测中,消光系数的精确测量是能见度准确测量的关键。根据Koschmieder定律得到了观测目标物为绝对黑体时,能见度与消光系数之间的关系,即

$$V = \frac{-\ln \varepsilon}{\delta}, \quad (1)$$

式中 V 为能见度, δ 为大气的消光系数, ε 为人眼的对比视觉阈值。若气象观测员的视力正常, 则取 ε 为 0.02。在航空运行中, 考虑飞机的运动速度较高, 背景环境多变, 故选用较高的 ε 为 0.05^[14], 则(1)式可写为

$$V = \frac{-\ln 0.05}{\delta} \approx \frac{3}{\delta}. \quad (2)$$

在能见度仪器测量中, 使用光线的波长也是应考虑的因素之一。人眼对光的波长 λ 的敏感性并不一致, 对绿光 ($\lambda = 0.55 \mu\text{m}$) 最为敏感。同时不同波长的光对大气的穿透性也有所不同, 一般波长越长, 穿透性越强^[28]。因此(2)式可以结合波长进行修正为

$$V = \frac{3}{\delta} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^q, \quad (3)$$

式中 q 是与能见度有关的波长修正因子。

2.1 变基线长度测量

所谓基线长度是测量仪发射端和接收端的距离^[4]。基线的长度直接影响着测量仪测量大气的采样体积, 是影响消光系数和能见度测量精度的一个重要因素。基线长度改变的测量方式可消除大气不均匀、镜头污染等方面的影响, 提高测量精度。图 1 为基线长度改变的测量示意图。

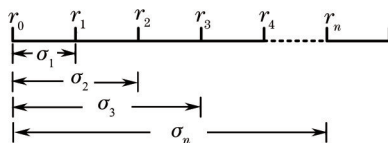


图 1 基线长度改变的测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of changing baseline lengths measurement

根据 Beers-Lambert 定律, 激光在大气中的衰减可以表示为

$$\tau(r) = \frac{P(r)}{P(0)} = \exp[-\sigma(\lambda)r], \quad (4)$$

式中 r 为基线长度, $\tau(r)$ 为透射率, $P(0)$ 为发射端激光的发射功率, $P(r)$ 为接收端激光的功率, $\sigma(\lambda)$ 为大气的消光系数。在基线长度改变的测量过程中, 基线长度分别为 $r_n (n=1, 2, 3, \dots, n)$, (4)式可以写为

$$\begin{cases} \tau(r_1) = \frac{P(r_1)}{P(r_0)} = \exp(-\sigma_1 r_1) \\ \tau(r_2) = \frac{P(r_2)}{P(r_0)} = \exp(-\sigma_1 r_2) \\ \vdots \\ \tau(r_n) = \frac{P(r_n)}{P(r_0)} = \exp(-\sigma_n r_n) \end{cases}. \quad (5)$$

对(5)式取对数可得

$$\ln \tau(r_n) = -\sigma_n r_n \quad (n = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (6)$$

在基线长度改变的多点多次测量中可以得到 n 对测量值 $(r_n, \ln \tau(r_n))$, 由这 n 对数组可以计算出 n 个消光系数:

$$\sigma_n = -\frac{\ln \tau(r_n)}{r_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (7)$$

由于在实际测量中 r_n 和 $\ln \tau(r_n)$ 都不可避免地存在测量误差, 使得(7)式计算出的消光系数存在一定的偏差。为提高消光系数的精度, 减少移动测量过程中定位误差和透射率测量误差的影响, 选用可同时考虑自变量和因变量误差的整体最小二乘直线拟合, 根据(6)式, 将 r_n 作为自变量, $\ln \tau(r_n)$ 为因变量, 则拟合直线的斜率即为消光系数, 消光系数的表达式可由整体最小二乘的奇异值解法^[29-30]求得, 为提高拟合的运算效率, (7)式中某单次测量的消光系数可作为整体最小二乘拟合斜率的初猜值。整体最小二乘拟合示意图如图 2 所示, x 轴表示测量距离, y 轴表示透射率的对数 $\ln \tau$ 。

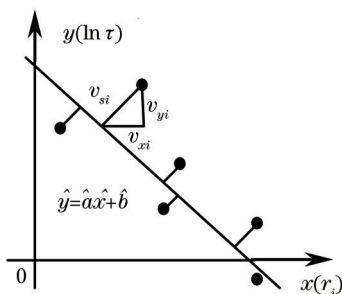


图2 整体最小二乘拟合

Fig.2 Total least squares fitting

2.2 整体最小二乘拟合

整体最小二乘法在数据处理和误差分析中应用非常广泛,可提高数据处理的效率和精确度。其算法实质为测点到拟合直线的正交距离的平方和最小,算法综合考虑了系数阵和观测向量存在的误差,同时顾及了自变量和因变量的误差。从几何特性方面而言,整体最小二乘的准则为

$$\min \sum_{i=1}^n \left\| \frac{(ax_i + b - y_i) / \sqrt{1 + a^2}}{\sqrt{1 + a^2}} \right\|^2, \quad (8)$$

式中 a 为直线的斜率, b 为直线的截距, (x_i, y_i) 为第 i 个测量点的坐标。图2中正交距离的残差为

$$v_{si} = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}, \quad (9)$$

式中 v_{si} 为第 i 个测量点到直线的正交距离, v_{xi} 和 v_{yi} 分别为第 i 个测量点在 x 方向和 y 方向的测量误差,整体最小二乘的求解准则是要求正交距离的残差平方和最小,因此,观测值精度的评定应按照正交距离的残差来计算。

单位权方差 δ_{TLS} 和确定系数 R^2 是评价拟合精度的两个重要参数。其中单位权方差反映了测量数据集的偏离程度,单位权方差 δ_{TLS} 可以写为

$$\delta_{\text{TLS}} = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_x^T \mathbf{v}_x + \mathbf{v}_y^T \mathbf{v}_y}{m - 2}}, \quad (10)$$

式中 m 为测量的次数, \mathbf{v}_x 为 x 方向的测量误差向量, \mathbf{v}_y 为 y 方向的测量误差向量。单位权方差 δ_{TLS} 越小,测量值的偏离度越小。在基线长度改变的测量中,单位权方差 δ_{TLS} 衡量了各个测量点测量值的稳定度, δ_{TLS} 越小说明测量结果离散性越小,测量结果越稳定。

确定系数 R^2 是表征拟合效率的参数,确定系数 R^2 定义为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (11)$$

式中 \hat{y}_i 为第 i 个测量点的预测值, \bar{y}_i 为第 i 个测量点的均值, y_i 为第 i 个测量点的测量值, w_i 为第 n 个测量点的测量次数, n 为测量点的个数。 R^2 取值范围为 $[0, 1]$, R^2 越接近 1 说明该直线对数据的拟合效果越好。在本文基线长度改变的测量中, R^2 越接近 1,说明该次拟合的消光系数的精度越高。

3 系统实现

3.1 测量系统

能见度测量评价系统由激光发射单元、光电接收探头、高精度 55 m 的滑动导轨、光电感应定位单元、移动测量平台、信号采集和数据处理单元组成,如图 3 所示。

激光发射单元固定于轨道一端,激光器发射出 532 nm 的激光,光斑大小为 2 mm,全发散角为 1.2 mrad。激光经 20 倍扩束后成 40 mm,压缩发散角为 0.06 mrad。激光传播 50 m 之后光斑变大为 43 mm。激光接收镜头的口径为 100 mm,以消除小车在滑轨上滑动时因移动误差带来的光路偏转影响。

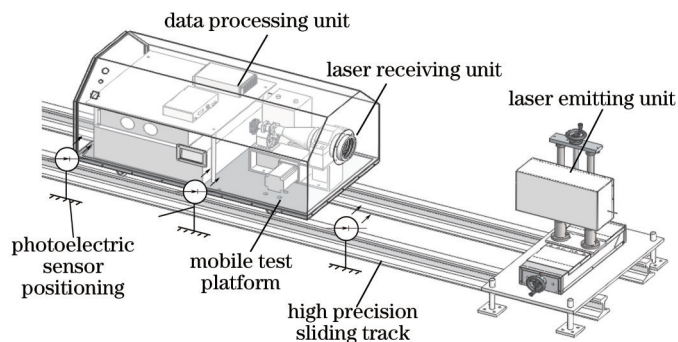


图 3 能见度测量评价系统

Fig.3 Visibility measurement and evaluation system

系统工作过程示意图如图 4 所示。导轨上放置移动测量平台,移动平台内部搭载光电接收单元和信号采集数据处理单元。接收光路上,会聚透镜聚焦接收的平行光。斩波器的参考信号输入到锁相放大器的参考通道,斩波器透过的光由会聚透镜聚焦到探测器表面,探测器输出的模拟信号接入到锁相放大器的信号输入端,在锁相放大器中类似相干探测出作用激光的信号强度。无风扇小型计算机连接锁相放大器和斩波器,采集锁相放大器中的数字信号。系统通过无线网络与操作室内的计算机相链接,操作室内计算机编有上位机程序,能够逐一读取每个测量点位的激光光强大小。

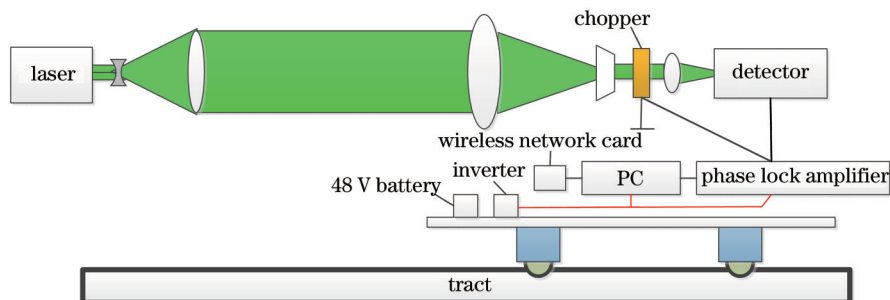


图 4 系统工作过程

Fig.4 Work process of system

当激光发射单元发射出激光束后,通过控制移动平台在轨道上移动,搭载在移动平台上的光电接收单元可获得不同距离的激光衰减信号,经过数据采集和处理,并使用整体最小二乘法进行多点拟合,可以得到此刻的大气透射率。

移动测试平台在滑动轨道上移动速度为 0.4 m/s,每 5 m 为一个测量间隔,每一个测量定位点停留 3 s,移动测量平台可以在滑轨上多次往返测量。系统参数如表 1 所示。

表 1 能见度测量评价系统参数

Table 1 Parameters of visibility measurement and evaluation system

Parameter	Value	
Laser MSL-FN-532	Wavelength /nm	532
	Beam divergence angle /mrad	<1.2
	Beam diameter /mm	~2.0
Optical chopper OE3001	Chopping frequency /kHz	0.02~1
	Blade angle /($^{\circ}$)	18
	Data bits	8
Lock-in amplifier OE1022	Input signal frequency range /Hz	10^{-3} ~ 10^5
	Sensitivity /V	10^{-6} ~1
Photodetector THORLABS DET100A	Wavelength range/ nm	400~1100
	(Output voltage/intensity) /(V/mW)	22.5

为了缩短能见度仪的测试和评价周期,在较短的时间内测试各类大气环境下的能见度系统性能,可建设大气模拟环境来减小外界天气系统在时间和空间上的测试限制。在室外建设了一个高1.8 m,宽1.6 m,长55 m的钢化玻璃方舱,方舱配备气溶胶注入管路,通过雾化气溶胶发生器、粉尘气溶胶发生器和碳黑气溶胶发生器向舱内注入各类气溶胶,通过轴向气流循环系统与横向湍流发生系统的均匀搅拌作用,可在方舱内经较短时间内形成各种不同类型的10 km到200 m可控能见度环境。方舱实物图如图5所示。



图5 能见度环境模拟方舱

Fig.5 Atmosphere simulation chamber

3.2 实验分析

2015年4月16日在能见度环境模拟舱进行了连续5 h的测量实验,实验过程中舱内的温度保持相对恒定(20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,气压在60 min内由1014 hPa增加到1016 hPa,并保持稳定直至实验结束。相对湿度随气溶胶的注入由42%缓慢升高到63%。移动测试平台以0.4 m/s的速度从5 m处到45 m处往返测量,每往返2次(约10 min)的测量结果作一次数据拟合,随着舱内气溶胶浓度的增加,消光系数逐渐增大,能见度逐渐降低,测量过程中能见度及消光系数稳定变化,变化过程如图6所示。

图7为透射率的对数 $\ln \tau$ 随基线长度 r 的变化图,可根据(3)式和整体最小二乘法拟合得到消光系数,图中虚线是各个测量点4次测量的平均值的连线,实线为整体最小二乘拟合出的直线,其斜率为消光系数,由(1)式可计算出当前大气环境的能见度。从图7可以看出,在高能见度条件下,透射率测量结果的离散程度比较小,整体最小二乘法拟合的结果与平均值的偏差不大。随着方舱内的能见度逐渐降低,透射率测量结果离散程度增大,整体最小二乘法拟合的结果与平均值的偏差在增大。透射率测量的离散性可以用单位权方差来衡量,整体最小二乘法的拟合效果由确定系数来表征。在各种能见度条件下的单位权方差和确定系数见表2。

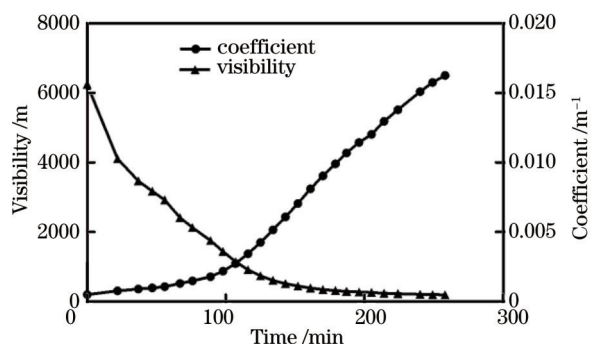


图6 测量能见度和消光系数随时间的变化

Fig.6 Relationship between visibility and extinction coefficient

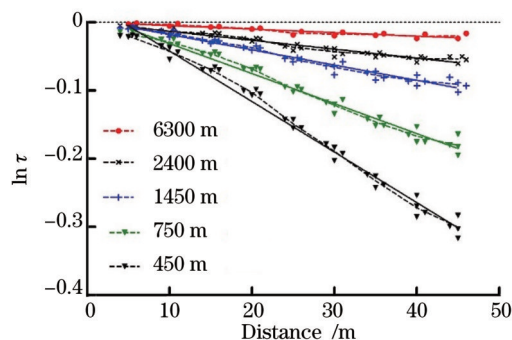


图7 5次能见度拟合测量结果

Fig.7 Five times visibility fitting measurements

从表2可以看出,当方舱内能见度大于2 km时,单位权方差均小于 5×10^{-4} ,这表明在高能见度条件下,透射率测量结果的聚集度较好,但此时确定系数均小于0.97,甚至在能见度大于4 km时,确定系数小于0.9,这表明在高能见度条件下,整体最小二乘法拟合出的效果稍差。从能见度2 km开始下降时,单位权方差在逐渐增大,这与透射率的迅速减小与消光系数的迅速增大有关,仅从单位权方差无法表征该方法的测量性能,而确定系数呈现稳定增长的趋势,当能见度从1 km开始下降时,确定系数始终维持的0.98以上,甚至在349 m能见度时,出现了0.99高确定系数。能见度低于1 km时,该方法具有良好的稳定性和一致性。

表2 确定系数和单位权方差

Table 2 Unit weight variance and coefficient of determination

Visibility /m		Unit weight variance /10 ⁻⁴	Coefficient of determination
Above 3000	6300	1.34	0.8552
	4120	4.37	0.8927
	3491	4.42	0.9194
	3200	4.67	0.9291
3000~2000	2920	3.89	0.9492
	2400	3.89	0.9395
	2131	4.22	0.9699
2000~1000	1763	5.47	0.9739
	1450	11.4	0.9648
	1159	18.84	0.9619
1000~500	921	15.37	0.9811
	750	22.32	0.9818
	622	21.57	0.9885
	525	37.34	0.9863
Below 500	450	46.73	0.9872
	350	49.54	0.9907
	245	115.6	0.9897
	195	223.5	0.9885

随着能见度的降低,拟合的确定系数逐渐增大,表明该方法在低能见度条件下的测量精度高于高能见度时的测量精度。总体说来,在各种能见度条件下,该方法均具有较高的确定系数,表明该方法可以稳定反应大气的消光特性,通过数据积累和修正,可为能见度仪的校正和评价提供参考。

4 结 论

大气能见度是民用航空正常运行的重要指标,大气透射率和消光系数的准确测量是进行能见度仪测量和评价的关键。利用基线长度改变和整体最小二乘拟合的方法,设计实现了一种高稳定性和一致性的能见度测量和评价系统,将一个装有光电探测器、锁相放大器等光学设备的可移动平台放置于高精度滑轨之上,往返连续测量不同位置点处激光的衰减,该系统运行在室外大型模拟舱中,可以实现短周期、可重复、多环境的稳定测量。利用在各类高低能见度条件下大气透射率与测量基线长度所得的关系,拟合的单位权方差较小而确定系数较大,这表明该方法测得的能见度可以作为能见度仪测量、评价的参考值。该方法对于各类能见度仪的测试、标定、评价具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 International Civil Aviation Organization. Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation. Meteorological Service for International Air Navigation, Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.
- 2 International Civil Aviation Organization. Doc 9837 AN/454. Manual on Automatic Meteorological Observing Systems at Aerodromes Doc 9837 AN/454[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.
- 3 International Civil Aviation Organization. Doc 9328 AN/908. Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices Doc 9328 AN/908[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2005.
- 4 World Meteorological Organization. WMO No.8. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO No.8[S]. Geneva: World Meteorological Organization, 2010.
- 5 Civil Aviation Administration of China. AP-117-TM-2012-03. Civil Aviation Automated Weather Observing System Technical Specifications AP-117-TM-2012-03[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2012.
- 6 Yang Yuxia, Hu Xuehong. Miriam PWD20 visibility and comparative analysis of visibility and visual[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(F06): 61-63.

- 杨玉霞, 胡雪红. PWD20能见度仪及与目测能见度对比分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(F06): 61-63.
- 7 Tan Haobo, Chen Huanhuan, Wu Dui, *et al.*. The performance evaluation and correction of the forward scattering visibility sensor[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, 26(6): 687-693.
- 谭浩波, 陈欢欢, 吴 兑, 等. Model 6000型前向散射能见度仪性能评估及数据订正[J]. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 687-693.
- 8 Zhang Huichan, Chen Liu. Contrast analysis of visual visibility and instrumental visibility on Guangzhou airport[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2010, 31(A02): 123-125.
- 张慧婵, 陈 浏. 广州新机场目测和器测能见度资料的对比分析[J]. *气象研究与应用*, 2010, 31(A02): 123-125.
- 9 Wu Zhenqiang, Li Wenbin, Yang Senhuai, *et al.*. Comparative analysis of the measured visibility by Belfort M6000 sensors and visual visibility[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2011(32): 99-101.
- 吴振强, 李文斌, 杨森槐, 等. Belfort M6000能见度传感器实测距离与人工目测距离的对比分析[J]. *科技创新导报*, 2011(32): 99-101.
- 10 Griggs D J, Jones D W, Ouldridge M, *et al.*. The first WMO intercomparison of visibility measurements[J]. *Instruments and Observing Methods Rep*, 1990, 41: WMO/TD.401.
- 11 Bloemink H I. KNMI visibility standard for calibration of scatterometers[C]. WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2006), Geneva, Switzerland, 2006: 4-6.
- 12 He Chi. Comparing the detection result of atmosphere transmission instrument and pre-scatter instrument at Guiyang airport[J]. *Air Traffic Management*, 2002, (6): 46-47.
- 何 驰. 对比贵阳机场大气透射仪与前散射仪探测结果[J]. *空中交通管理*, 2002, (6): 46-47.
- 13 Pu Jiangping, Hu Zonggang, Wei Yangchun, *et al.*. Comparison and analysis of property of visibility automatic observation instruments [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2002, 22(1): 60-71.
- 濮江平, 胡宗刚, 魏阳春, 等. 能见度自动观测系统性能对比及分析[J]. *气象科学*, 2002, 22(1): 60-71.
- 14 Tian Li. Measuring data comparative analysis between atmospheric transmission meter and forward scatter meter in the low visibility weather [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2009, 26(3): 46-49.
- 田 丽. 大气透射仪与前散射仪在低能见度条件下的测量数据对比分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 2009, 26(3): 46-49.
- 15 Crosby J D. Visibility sensor accuracy: What's realistic[C]. 12th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 2003.
- 16 Kou Tian, Wang Haiyang, Wang Fang, *et al.*. Study on black-scattering light intensity in airborne laser range-gated imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0113003.
- 寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光距离选通成像大气后向散射光强研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113003.
- 17 Lu Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, *et al.*. A new Micro-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0908005.
- 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0908005.
- 18 Kang Sheng, Wagn Jiang'an, Chen Dong, *et al.*. Measurement of visibility using lidar in rain[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 637-641.
- 康 圣, 王江安, 陈 冬, 等. 激光雷达雨中能见度测量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3): 637-641.
- 19 Jiang Lihui, Huang Wei, Feng Shuai. Design of laser visibility meter based on real-time background compensation[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(4): 399-404.
- 蒋立辉, 黄 炜, 冯 帅. 实时背景噪声补偿的激光雷达能见度仪设计[J]. *激光与红外*, 2014, 44(4): 399-404.
- 20 Ren Xichuang, Wang Jiang'an, Wu Ronghua. The research of extinction coefficient measurement of 1064 nm wavelength by backscatter visibility measuring set[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(1): 32-34.
- 任席闯, 王江安, 吴荣华. 后向散射式能见度测试仪测量 1064 nm 波长激光大气传输消光系数研究[J]. *红外技术*, 2009, 31(1): 32-34.
- 21 Han Daowen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. An algorithm for horizontal visibility based on lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1250-1252.
- 韩道文, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于激光雷达的水平能见度自动反演算法[J]. *激光与红外*, 2007, 37(12): 1250-1252.
- 22 盛新志, 娄淑琴, 吴重庆, 等. 一种大气低能见度的测量方法和装置: 中国, 200510011321.2[P]. 2005-08-10.
- 23 Ma Qianli, Yue Yi, Yu Xiangming, *et al.*. Comparative analysis of the scattering integral turbidity meter calculated and observed visibility [C]. The 27th China Meteorological Society Annual Meeting Atmospheric Physics and Atmospheric Branch of Field Collection, 2010: 5.
- 马千里, 岳 毅, 俞向明, 等. 利用散射积分浊度计计算能见度与实测能见度的对比分析[C]. 中国气象学会, 第27届中国气象

- 学会年会大气物理学与大气环境分会场论文集, 2010: 5.
- 24 Cheng Shaorong, Wei Quanzhong, Lü Jun. The development of a new atmosphere transmittance meter[J]. Opto-Electronic Engineering 2011, 38(2): 144-150.
程绍荣, 魏全忠, 吕 军. 一种实用型大气透射式能见度仪的研制[J]. 光电工程, 2011, 38(2): 144-150.
- 25 Zhao Li, Wan Xiaozheng, Qi Yong, *et al.*. Design of multi-reflection transmission method based visibility measurement system[J]. Shandong Science, 2011, 24(6): 67-70.
赵 力, 万晓正, 齐 勇, 等. 多次反射法透射式能见度测量系统研究[J]. 山东科学, 2011, 24(6): 67-70.
- 26 Wang Zongli, Cao Naifeng, Wang Chunlu. New design of laser instrument for detecting the visibility[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 629-632.
王宗俐, 曹乃锋, 王春录. 一种激光能见度仪设计的 .新方法[J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 629-632.
- 27 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu. New method of aerosol extinction coefficient measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- 28 Sun Xinhui, Zhang Tianshu, Lu Yihuai, *et al.*. Optimization solution of atmospheric profile extinction coefficient by scanning lidar[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0314001.
孙新会, 张天舒, 陆亦怀, 等. 扫描激光雷达大气剖面消光系数优化求解[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0314001.
- 29 Markovsky I, Huffel S V. Overview of total least-squares methods[J]. Signal Processing, 2007, 87(2): 0314001.
- 30 Lu Tieding. Research on the Total Least Squares and Its Applications in Surveying Data Processing[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010: 40-48.
鲁铁定. 总体最小二乘平差理论及其在测绘数据处理中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2010: 40-48.

栏目编辑: 史 敏