

前向散射式能见度仪检测不确定度评定方法

王敏 张世国 方海涛 王毛翠 汪玮

(安徽省大气探测技术保障中心, 合肥 230031)

摘要 根据能见度计量检测实验室(合肥)前向散射式能见度仪检测实例,展示了前向散射式能见度仪检测结果的测量不确定度评定方法。首先,介绍了能见度检测系统组成和技术要求;其次,建立前向散射式能见度仪示值误差测量模型,分析了测量不确定度来源;最后,依据不同的评定方法,对测量不确定度分量进行评定。研究表明:前向散射式能见度仪检测结果的不确定度分量主要有被测能见度仪、测量标准器、试验舱引入的标准不确定度。在 50 m 和 200 m 检测点,示值误差的扩展不确定度 $U(k=2)$ 分别为 4.9 m 和 14.3 m;在 500~10000 m 检测点,相对扩展不确定度 $U(k=2)$ 在 8.5%~11.0% 之间。

关键词 前向散射式能见度仪;测量不确定度;透射仪;能见度

中图分类号: P412.17 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200359 **文献标识码:** A

引言

能见度是气象观测常规项目,是雾霾天气判断的主要气象要素,在环境、交通等专业气象服务中极为重要^[1-4]。进入 21 世纪以来,我国雾霾天气发生的频率和严重程度有增加的趋势,对我们生产、生活的影响越来越大。因雾霾等低能见度天气而造成的交通事故成为危害交通运输的主要因素之一^[5-6]。为了客观、精细、自动地对区域能见度进行连续监测,大量能见度仪投入业务观测。按探测方法区分,能见度仪主要分为透射式、前向散射式和后向散射式 3 种^[7-8]。其中,前向散射式能见度仪以其体积小、易于维护和价格低廉而广泛应用于气象、高速公路、码头等系统^[9-12]。目前,全国 2400 多个国家级自动气象站基本实现能见度自动观测设备的列装。2010 年安徽省建成了高速公路气象条件监测预警服务体系。截至 2020 年 6 月,安徽省 5200 km 里程的高速公路上,安装 740 多台能见度仪,平均间距约 7 km。在低能见度多发路段,约每 3 km 安装一台能见度仪。由于能见度仪的型号不同,系统结构、测量精度也不尽相同。同时,能见度仪在使用过程中存在仪器老化引起的系统测量误差漂移。开展前

向散射式能见度仪定期检测,是气象技术装备保障系统建设的重要任务之一,也是实现气象现代化建设的一项基础性保障工作。

国外能见度仪检测方面,Tomas 等指出透射仪为能见度测量标准器的首选设备^[13]。英国诺森比亚大学建立长度 5.5 m 的室内大气能见度实验室,用于 CCD 相机和激光二极管测量能见度的精度比较^[14]。国内能见度厂商多采用标准校准板或多台比较方法,确保测量结果的一致性。由于缺乏能见度溯源系统和统一的检测方法,不同能见度厂商之间产品的一致性无法保证。2014 年,中国气象局在上海和合肥组建能见度计量检测实验室,部分省份气象部门和相关行业也积极筹建能见度检测实验室。2020 年 1 月,中国气象局发布行标 QX/T 536—2020《前向散射式能见度仪测试方法》,解决前向散射式能见度仪室内测试方法缺失难题。由于检测环境、检测设备、检测方法等影响,测量结果中不可避免的引入测量不确定度。同时,测量不确定度评定是衡量其测量质量高低的重要参数,也是计量中一项必不可少的工作。文中以能见度计量检测实验室(合肥)为例,根据行标 QX/T 536—2020 测试方法,分析了室内检测前向散射式能见度仪示值误差

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

安徽省中央引导地方科技发展专项“全固态公路交通气象观测系统开发与示范”(YDZX20183400004206)资助

作者简介:王敏,女,1981 年生,硕士,高级工程师,从事气象仪器检定与计量方法研究工作,Email:491152390@qq.com

收稿日期:2020 年 8 月 28 日;定稿日期:2021 年 5 月 18 日

的不确定度来源,展示了不确定度评定方法,为今后实验室内示值误差的测量不确定度评定和能见度计量检测实验室间比对提供参考。

1 检测系统

能见度室内检测系统由测量标准器、试验舱、粒谱仪、环境监测仪、照明、空气循环、视频监控系统等组成,其检测系统示意如图 1 所示。测量标准器可采用透射仪或准确度相当的其他设备,其最大允许误差为:±5%(能见度≤1500 m),±7%(能见度>1500 m)^[15]。试验舱可模拟能见度高低变化过程,一般由相对密闭的舱体构成。能见度模拟介质可以是便于清洁、无毒无害的气体或悬浮颗粒物,并对被测前向散射式能见度仪不造成污染或损坏。粒谱仪用于实时监测粒径尺寸,环境监测仪用于测量环境温度、湿度。照明、视频监控系统便于工作人员查看检测环境。空气循环系统可改善能见度模拟的均匀性,提升扩散速度。

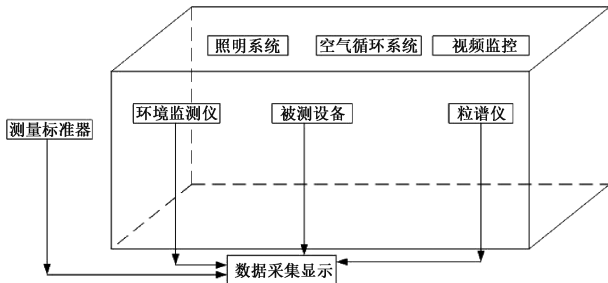


图 1 能见度室内检测系统示意

2 建立示值误差模型

测试前向散射式能见度仪时采用直接比较法。测试方法为:将被测前向散射能见度仪固定安装在试验舱工作区域内。启动试验舱能见度模拟系统,使试验舱内能见度降至 10 m 以下,关闭能见度模拟系统。试验舱内空气样本自然沉降、扩散,能见度示值缓慢上升。在此过程中,计算机自动采集测量标准器和被测设备示值。当试验舱内能见度升至最高能见度检测点(以测量标准器示值为准)时,停止采集,能见度示值误差检测完毕。计算前向散射式能见度仪示值和测量标准器示值差值。行业标准 QX/T 536-2020 前向散射式能见度仪误差技术要求为:±50 m(能见度≤500 m),±10%(500 m<能见度≤1500 m),±20%(能见度>1500 m)。当能

能见度≤500 m 时,示值误差采用绝对误差表示;当能见度>500 m 时,示值误差采用相对误差表示^[15]。

$$\Delta L = L - L_0 \text{ (能见度} \leq 500 \text{ m)} \quad (1)$$

$$M = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \text{ (能见度} > 500 \text{ m)} \quad (2)$$

式中:ΔL 为示值绝对误差(单位:m);L 为被测前向散射式能见度仪示值(单位:m);L₀ 为测量标准器示值(单位:m);M 为示值相对误差(单位:%)。

根据测量不确定度评定方法,测量结果和测量不确定度的计量单位应统一。因此,能见度>500 m 时,测量不确定度以相对不确定度表示。

3 不确定度评定

由前向散射式能见度仪测量模型式(1)、(2),其示值误差的测量不确定度主要来源有输入量 L 的标准不确定度和输入量 L₀ 的标准不确定度。

3.1 输入量 L 的标准不确定度 u(L)

3.1.1 重复性引入的标准不确定度 u₁(L̄)

能见度试验舱波动度、被测能见度仪示值的重复性等各种随机影响因素导致的不确定度,采用 A 类评定方法。选取 1 台前向散射式能见度仪进行检测,测试曲线如图 2 所示。

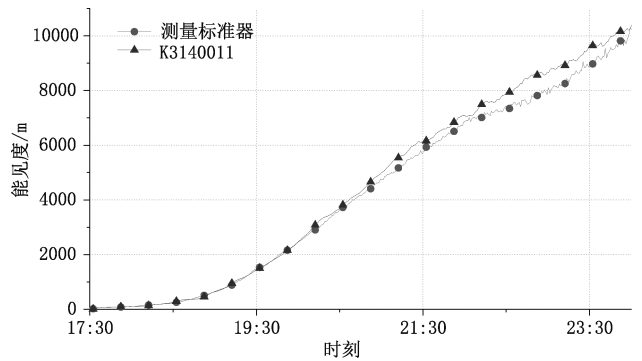


图 2 2016 年 9 月 8 日前向散射式能见度仪分钟值测试曲线

在 50 m、200 m、500 m、750 m、1000 m、1250 m、5000 m 和 10000 m 检测点,分别读取 6 组数据。利用贝塞尔公式计算得到单次测量值的试验标准偏差^[16]。

$$s(L) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

式中:s(L) 为试验标准偏差;L_i 为被测能见度仪第 i 次测量值(单位:m);L̄ 为被测能见度仪 n 次测量

值的平均值(单位:m); n 为测量组数。

以 6 组数据的算术平均值 \bar{L} 作为被测量估计值,其估计值的标准不确定度按式(4)计算,计算结果如表 1 所示。

$$u_1(\bar{L}) = \frac{s(L)}{\sqrt{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{m(n-1)}} \quad (4)$$

式中: $u_1(\bar{L})$ 为能见度仪算术平均值 \bar{L} 的标准不确定度; m 为平均值样本数。

表 1 被测能见度仪检测结果、算术平均值及其标准不确定度、标准器平均值和示值误差

组序号	检测点							
	50 m	200 m	500 m	750 m	1000 m	1250 m	5000 m	10000 m
1	60	190	487	692	987	1204	4919	10205
2	65	194	511	711	1021	1231	4950	10275
3	66	198	538	732	1050	1258	5008	10385
4	67	202	567	758	1075	1289	5041	10432
5	68	208	594	786	1095	1320	5079	10489
6	69	215	615	816	1115	1354	5135	10544
平均值 \bar{L} /m	65.8	201.2	552.0	749.2	1057.2	1276.0	5022.0	10388.3
不确定度 $u_1(\bar{L})$ /m	1.30	3.76	20.05	19.07	19.47	22.90	32.86	52.52
标准器平均值 \bar{L}_0 /m	65.3	194.5	568.5	760.1	998.2	1292.7	4765.5	10187.4
示值误差	+0.5 m	+6.7 m	-2.9%	-1.4%	+5.9%	-1.3%	+5.4%	+2.0%

根据式(1)、(2)可分别计算被测能见度仪示值误差。在 500 m 检测点,测量标准器示值为 568.5 m,被测能见度仪示值误差以相对误差表示。前向散射式能见度仪在 50 m、200 m 检测点示值误差分别为 +0.5 m 和 +6.7 m,500~10000 m,示值误差在 -2.9%~+5.9%之间,满足 QX/T 536-2020 中误差技术要求。

3.1.2 能见度仪分辨力引入的标准不确定度 $u_2(L)$

采用 B 类评定方法,被测能见度仪的分辨力为 1 m,在 ±0.5 m 区间服从均匀分布,其分辨力引入的标准不确定度为 $u_2(L) = 0.5/\sqrt{3} \approx 0.29$ m。

由上述可得,输入量 L 的标准不确定度 $u(L)$ 可由式(5)计算得到,计算结果见表 2。

$$u(L) = \sqrt{u_1^2(L) + u_2^2(L)} \quad (5)$$

表 2 输入量 L 的标准不确定度 $u(L)$ m

	检测点/m							
	50	200	500	750	1000	1250	5000	10000
$u(L)$	1.33	3.77	20.05	19.07	19.47	22.90	32.86	52.50

3.2 输入量 L_0 的标准不确定度 $u(L_0)$

3.2.1 测量标准器示值不准确引入的 $u_1(L_0)$

采用 B 类评定方法,根据行标 QX/T 536-

2020 中 5.1 条,测量标准器最大允许误差为:±5% (能见度 ≤1500 m), ±7% (能见度 >1500 m)。按均匀分布,测量标准器示值不准确引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(L_0)$ 分别为: $5/\sqrt{3} = 2.89\%$ (能见度 ≤1500 m), $7/\sqrt{3} = 4.04\%$,根据式(6)及表 1 中 \bar{L}_0 数据,转换为标准不确定度,计算结果见表 3。

$$u_1(L_0) = u_{rel}(L_0)\bar{L}_0 \quad (6)$$

表 3 标准器示值不准确引入标准不确定度 $u_1(L_0)$ m

	检测点/m							
	50	200	500	750	1000	1250	5000	10000
$u_1(L_0)$	1.89	5.62	22.97	30.71	40.33	52.23	192.53	411.57

3.2.2 能见度试验舱不均匀性引入的 $u_2(L_0)$

由于前向散射式能见度仪的采样区域较小,能见度的不均匀性将对测量结果引入不确定度。试验舱不均匀性测试方法是:选取两台型号相同、一致性较好的前向散射式能见度仪,分别安装在试验舱工作区域左右两端。在试验舱内模拟能见度高低变化趋势,实时采集两台前向散射式能见度仪的输出值。计算两台仪器间示值的相对误差,并作为舱内空气样本不均匀性参考数据,计算结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在 2000~10000 m 范围,两台

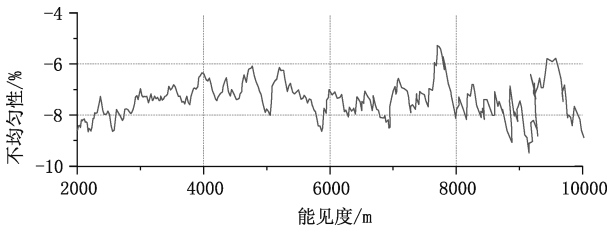


图 3 试验舱内不均匀性测试曲线

仪器的相对误差在 $-9.49\% \sim -5.28\%$ 之间。为获得仪器间的固有误差,两台前向散射式能见度仪送北京交通部气象环境实验室测试。测试结果表明:在不同能见度点,两台前向散射式能见度仪示值误差最大相差 4.61% ,以此作为两台仪器的固有偏差。也可将两台前向散射式能见度仪在外场进行长期的对比观测实验,将示值误差的最大值作为仪器固有偏差。除去两台仪器的固有偏差,能见度舱的不均匀性在 $-4.88\% \sim -0.67\%$ 以间。均匀分布的标准偏差按式(7)^[17]计算。

$$\sigma(x) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad (7)$$

式中: $\sigma(x)$ 为均匀分布的标准偏差, a_+ 和 a_- 分别为均匀分布包含区间的上限和下限。

采用 B 类评定方法,由式(7)可计算得到试验舱不均匀性引入的相对标准不确定度为 $u_{2rel}(L_0) = \frac{-0.67 - (-4.88)}{\sqrt{12}} = 1.22\%$ 。由表 1 中 \bar{L}_0 数据,转换为标准不确定度,计算结果见表 4。

表 4 试验舱不均匀性引入标准不确定度 $u_2(L_0)$

	m							
	检测点/m							
	50	200	500	750	1000	1250	5000	10000
$u_2(L_0)$	0.80	2.37	6.94	9.27	12.18	15.77	58.14	124.29

由上述可得,输入量 L_0 的标准不确定度 $u(L_0)$ 可由式(8)计算得到,计算结果见表 5。

$$u(L_0) = \sqrt{u_1^2(L_0) + u_2^2(L_0)} \quad (8)$$

表 5 输入量 L_0 的标准不确定度 $u(L_0)$

	m							
	检测点/m							
	50	200	500	750	1000	1250	5000	10000
$u(L_0)$	2.05	6.10	24.00	32.08	42.13	54.56	201.12	429.93

3.3 合成标准不确定度 $u_c(\Delta L)$

式(1)中, L 、 L_0 互不相关,对式(1)各分量求偏导,当能见度 ≤ 500 m 时,前向散射式能见度仪示值误差的合成标准不确定度 $u_c(\Delta L)$ 为

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta L}{\partial L}\right)^2 u^2(L) + \left(\frac{\partial \Delta L}{\partial L_0}\right)^2 u^2(L_0)} \quad (9)$$

灵敏系数 $\frac{\partial \Delta L}{\partial L} = 1, \frac{\partial \Delta L}{\partial L_0} = -1$ 时,式(9)可简化为

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{u^2(L) + u^2(L_0)} \quad (10)$$

由式(10)计算前向散射式能见度仪的合成标准不确定度 $u_c(\Delta L)$,计算结果见表 6。

当能见度 > 500 m 时,根据式(11)计算相对合成标准不确定度 $u_{crel}(\Delta L)$ 。

$$u_{crel}(\Delta L) = \frac{u_c(\Delta L)}{L_0} \times 100\% \quad (11)$$

表 6 中,从各标准不确定度分量数值来看,测量标准器示值不准确引入的标准不确定度相对较大。能见度 > 500 m 时,由表 1 中 \bar{L}_0 数据及式(11)将 $u_c(\Delta L)$ 转换为相对标准不确定度。

表 6 被测前向散射式能见度仪示值误差标准不确定度分量

	m							
	检测点/m							
	50	200	500	750	1000	1250	5000	10000
$u_1(\bar{L})$	1.33	3.77	20.05	19.07	19.47	22.90	32.86	52.50
$u_2(L)$	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
$u_1(L_0)$	1.89	5.62	22.97	30.71	40.33	52.23	192.53	411.57
$u_2(L_0)$	0.80	2.37	6.94	9.27	12.18	15.77	58.14	124.29
$u_c(\Delta L)$	2.44	7.17	31.27	37.32	46.41	59.17	203.79	433.12
$u_{crel}(\Delta L)$			5.50%	4.91%	4.65%	4.58%	4.28%	4.25%

3.4 扩展不确定度评定 U

取包含因子 $k=2$,由式(12)计算前向散射式能见度仪示值误差的扩展不确定度 U ,计算结果如表 7 所示。在 50 m、200 m 测试点,被测能见度仪示值误差的扩展不确定度分别为 4.9 m 和 14.3 m;500 ~ 10000 m 测试点,相对扩展不确定度在 $8.5\% \sim 11.0\%$ 之间。

$$U = k u_c(\Delta L) \quad (12)$$

表7 被测前向散射式能见度仪示值误差及扩展不确定度

	检测点							
	50 m	200 m	500 m	750 m	1000 m	1250 m	5000 m	10000 m
示值误差	+0.5 m	+6.7 m	-2.9%	-1.4%	+5.9%	-1.3%	+5.4%	+2.0%
$U(k=2)$	4.9 m	14.3 m	11.0%	9.8%	9.3%	9.2%	8.6%	8.5%

4 结论

前向散射式能见度仪室内检测系统主要由测量标准器、试验舱、粒谱仪、环境监测仪、照明、空气循环、视频监控系统等组成。为了确保检测质量,测量标准器、试验舱的技术指标应满足行标 QX/T 536—2020 中要求。检测结果的测量不确定度主要来源有被测能见度仪和测量标准器引入的标准不确定度。被测能见度仪的标准不确定度包括示值重复性引入的标准不确定度和被测能见度仪分辨力引入的标准不确定度。测量标准器引入的标准不确定度包括测量标准器示值不准确性和能见度试验舱引入的标准不确定度。各不确定度分量中,测量标准器示值不准确性引入的标准不确定度相对较大。从评定结果可以看出,实际检测中可提高测量标准器精度减小对测量结果造成的影响。

参考文献

- [1] 宋薇,邱晓滨. 天津地区大气能见度变化特征及影响因子[J]. 气象科技,2015,43(5):898-904.
- [2] 汪玮,张世国,章超,等. 自研透射式能见度仪测量系统性能分析[J]. 气象科技,2020,48(2):163-170.
- [3] Alireza A, Mohammad M-B J A, et al. Analyzing trends of days with low atmospheric visibility in Iran during 1968-2013 [J]. Environ Monit Assess, 2019, 191:249.
- [4] Liu D M, Shen J X, Sun Y J, et al. Design of an aspheric system of optical probe for visibility meter[C]. Proc. of SPIE, 2007, 6722:(1-4).
- [5] 周建平,张蕾,王传辉,等. 大雾临近预报中高密度能见度数据应用[J]. 气象科技,2019,47(5):866-871.
- [6] 李嵩恂,吴昊,柳艳香,等. 我国公路低能见度灾害风险评估与区划研究[J]. 气象,2018,44(5):676-683.
- [7] 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.
- [8] 卫超,肖韶荣. 散射式能见度测量仪的动态特性研究[J]. 光学与光电技术,2012,10(4):37-41.
- [9] 莫月琴,刘钧,吕文华,等. 前向散射型能见度原理样机的主要性能分析[J]. 南京气象学院学报,2004,27(2):230-237.
- [10] 曾书儿,王改利. 能见度的观测及其仪器[J]. 应用气象学报, 1999,10(2):207-212.
- [11] 赵丽. 道路交通气象环境能见度检测器检测方法研究[J]. 交通标准化,2014,42(6):1-4.
- [12] 王敏,张世国,汪玮,等. 前向散射式能见度仪示值比对及标定方法研究[J]. 气象科技,2017,45(2):217-222.
- [13] Tomasz C, Krzysztof P, Grzegorz W. Atmospheric visibility sensor based on backscattering using correlation coding method [J]. Opt Quant Electron,2015,47 : 771-778.
- [14] Muhammad I, Zabih G, Joaquin P, et al. Enhancing the atmospheric visibility and fog attenuation using a controlled FSO Channel [J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2013, 25(13):1262-1265.
- [15] QX/T 536-2020 前向散射式能见度仪测试方法[S]. 北京:气象出版社,2020.
- [16] JJF1059.1-2012 测量不确定度的评定与表示[S]. 北京:中国质检出版社,2013.
- [17] 中国计量测试学会. 一级注册计量师基础知识及专业实务[M]. 3版. 北京:中国质检出版社,2013:237.

Uncertainty Evaluation Method of Forward Scattering Visibility Meter Test

WANG Min ZHANG Shiguo FANG Haitao WANG Maocui WANG Wei
(Anhui Atmospheric Observation and Technical Support Center, Hefei 230031)

Abstract: Based on the testing example of visibility measurement and testing laboratory (Hefei), the measurement uncertainty evaluation method of visibility measurement and testing results with a forward scattering visibility meter are presented. Firstly, the composition and technical requirements of the visibility detection system are introduced. Secondly, the measurement model of the indication error of the forward scattering visibility meter is established, and the source of measurement uncertainty is analyzed. Finally, the measurement uncertainty component is evaluated according to different evaluation methods. The results show that the uncertainty components of the forward scattering visibility meter mainly include the visibility meter to be measured, the measuring standard and the standard uncertainty introduced by the test chamber. At 50 m and 200 m detection points, the indication error's extended uncertainty $U (k=2)$ is 4.9 m and 14.3 m, respectively. The relative extended uncertainty $U (k=2)$ is between 8.5% and 11.0% at the detection point from 500 m to 10,000 m.

Keywords: forward scatter visibility meter; measurement uncertainty; transmissometer; visibility

=====

欢迎订阅《气象科技》

《气象科技》由中国气象局气象探测中心、中国气象科学研究院、北京市气象局、国家卫星气象中心及国家气象信息中心联合主办。报道大气科学和相关科学各领域新理论、新方法和新技术,也刊载反映大气科学各领域发展水平的综合评述。主要栏目:大气探测与信息技术,天气气候与数值预报,应用气象与科学试验,台站实用技术等。欢迎气象部门和相关学科的业务、科研、技术开发人员以及相关院校师生投稿和订阅。《气象科技》为大 16 开本双月刊,全年定价:120 元,全年随时订阅。

联系地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号,中国气象局气象探测中心,《气象科技》编辑部

http: //www.qxkj.net.cn, **邮政编码:**100081, **电话:**(010)68407256, **Email:** qxkj@cma.gov.cn

户名:中国气象局气象探测中心, **账号:**4043200001819900025525, **开户行:**华夏银行北京紫竹桥支行