

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1355-07

透射式能见度仪校准装置的研制及测量结果分析

李 勃¹, 张瑛欣¹, 张 帆², 台宏达³, 何华阳⁴, 李 奕¹

(1. 陕西省计量科学研究院 国家市场监督管理总局重点实验室(计量光学及应用), 陕西 西安 710100; 2. 江苏省计量科学研究院 长度计量研究所, 江苏 南京 210023; 3. 中国民航大学 航空气象系, 天津 300300; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要: 为了解决国内外能见度参数量值无法绝对溯源的问题, 利用透射式能见度仪的工作原理、结构特点以及环境条件, 提出了溯源至几何量的量值复现方法, 设计了1套高透射比量具作为主标准器, 实现了对透射式能见度仪的校准, 促进了能见度参数量值溯源体系的发展。主标准器遮光体采用精密机械加工工艺, 遵循几何量参数测量的绝对溯源法, 可大幅减小透射比量值的测量不确定度; 主标准器滤光片根据几何量测量和光学透射比参数测量相结合的溯源链, 解决了现有技术中高透射比无法复现和准确测量的问题。此外, 使用锥形遮光体, 可避免引入除旋转因素外的其他不确定度来源, 大幅提升了能见度仪分辨率的校准能力。

关键词: 能见度仪; 透射式能见度仪; 大气透过率; 校准系统

中图分类号: TN206; TH765

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0605001

Development of transmission visibility meter calibration device and analysis of measurement results

LI Qing¹, ZHANG Yingxin¹, ZHANG Fan², TAI Hongda³, HE Huayang⁴, LI Yi¹

(1. Key Laboratory of Metrological Optics and Application for State Market Regulation, Shaanxi Institute of Metrology Science, Xi'an 710100, China; 2. Institute of Length Metrology, Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing 210023, China; 3. Department of Aviation Meteorology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 4. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to solve the problem that the quantity value of visibility parameters at home and abroad cannot be absolutely traceable, the quantity value reclaiming method tracing to the geometry amount was proposed by using working principle, structural characteristics, and environmental conditions. A high transmission visibility instrument as the main standard device was designed to calibrate the transmission visibility meter, which promoted the development of visibility value to trace the origin system. The main standard device used precision processing technique, which followed the absolute traceability method of geometric parameter measurement, and could greatly reduce the measurement uncertainty of the transmission ratio. The traceability chain combined with measurement of geometry and optical transmittance parameter solved the problem that could not reproduce and accurately measure the high transmission ratio in existing technologies. In addition, the use of cone occulter could avoid the introduction of other sources of uncertainty except rotating factors, which greatly improved the calibration capability of the visibility meter resolution.

Key words: visibility meter; transmission visibility meter; atmospheric transmittance; calibration system

引言

能见度是大气中分子、水汽及气溶胶等粒子

对光的吸收与散射的直观反映, 是表征近地表大气污染程度的重要指标之一。气象学中对能见度

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-10-10

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目 (2022MK120)

作者简介: 李勃 (1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学、振动、声学计量检测技术研究。E-mail: 912250023@qq.com

通信作者: 李奕 (1979—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事光学计量、光电探测研究。E-mail: 12965105@qq.com

定义为具有正常视力的人在当时的天气条件下能够从天空背景中看到和辨认出目标物的最大水平距离,用气象光学视程(meteorological optical range, MOR)来表示^[1]。实时、准确地测量大气能见度,对航空飞行、交通运输、农业生产以及军事活动具有重要意义。

目前应用于气象、交通和航海等领域的自动化能见度检测设备各式各样,其中前向散射式能见度仪和透射式能见度仪应用最为广泛,但是在能见度仪的校准方面,国内外并没有统一的计量技术规范。国内的相关标准现有 GB/T 26944.3-2011《隧道环境检测设备 第 3 部分:能见度探测器》和 JT/T 714-2008《道路交通气象环境能见度探测器》,仅给出了特定用途和行业对此类仪器产品质量和性能的要求,并未给出具有可操作性的校准方法和明确的溯源链。文献[2]从能见度仪标准器建设、环境模拟和检测方法方面进行讨论,提出了在能见度环境模拟试验方舱内实现气象光学视程 3 km 以下能见度仪检测的方案。文献[3]研制了雾环境模拟舱,可实现 10 km~50 km 能见度内的模拟还原,并且消除了前向散射式能见度仪中由于空气不均匀而引入的误差对测试结果的影响。文献[4]利用激光腔增强技术,搭建了一套开放式能见度仪校准系统,实现对前向散射式能见度仪的高精度校准。文献[5]采用角反射器的单端透射式能见度测量方案,不仅利于校准透射式能见度仪光路,又增加了基线长度,能扩大能见度的测量范围。世界民航组织相关文件介绍^[6-9],前向散射式能见度仪通过与透射式能见度仪比对,可以溯源到透射式能见度仪,透射式能见度仪再经中性滤光片可溯源到光学,进而形成相对完整的量值溯源链。但是在实际应用中,中性滤光片的材料表面会对入射光有一定的反射,透射比仅能做到 0.93 左右。厂家根据行业标准 JB/T 8226.1~8-1999《光学零件镀膜》对中性滤光片进行镀膜^[10],通过减反、增透镀膜可以提高特定光谱范围内的透射比,最高能达到 0.99 左右。但对光谱增透的波段,使用分光光度计作为主标准器校准某一波长下的光谱透射比,其光谱透射比的测量不确定度并不会因为改变了测量对象而减小^[11]。因此,对于透射比大于 0.97,乃至 0.99 以上的高透射比,仍缺乏有效手段在提高可见光区全光谱透射比的同时,还能减小透射比参数的测量不确定度。

因此,本文提出了一种透射式能见度仪校准装

置,研制了一套超高光谱透射比标准量具,能见度测量范围能达到 5 m~450 a(a 为基线长度,单位 m)之间。其中,在 5 m~30 a 区间使用可见光区域光谱的中性透射比标准滤光片组进行校准;在 30 a~5 000 m 区间需使用高透射比量具进行校准。本装置有助于解决现有技术中高透射比无法准确测量的问题,大幅提升了能见度仪的校准能力。针对透射式能见度仪校准系统的组成,扇形滤光片的同心度、线性度及主要不确定度来源进行了分析,按照 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》规定方法,对其测量结果不确定度进行了评定。

1 透射式能见度仪测量原理

透射式能见度仪利用光在大气中传播受到的直接衰减原理,将大气对光的吸收、反射、散射等都作为衰减,以厚度等于基线长度的气柱为样本,发射机发射一定强度的光,经气柱衰减后到达接收器,得到接收光强,再由处理器获得大气透过率,反演出能见度,常应用于气象预报及监测(道路、机场、港口)、边界安全、海上作业、隧道烟雾探测等领域^[12-15]。根据 Koschmieder 定律,以天空为背景的黑体目标物,其与背景视亮度的对比度表示为

$$R_m = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: R_m 为气象能见距离; ε 为视觉对比阈值; σ 为大气消光系数^[16]。结合 Bouguer-Lambert 定律,得到大气能见度的表达式:

$$V_R = \frac{-3.912 L}{\ln(F/F_0)} \quad (2)$$

式中: L 为基线长度,指光源到接收器探头之间的光程; F_0 为光源发射功率; F 为光线经过 L 长度气柱衰减后的接收功率。透射式能见度仪的光学原理图如图 1 所示。

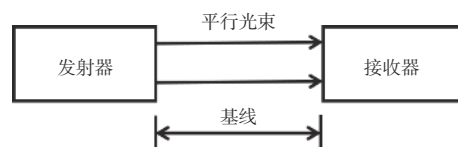


图 1 透射式能见度仪原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of transmissometer

由式(2)可知,只需测出光源的接收功率与发射功率的比值,就能反演出能见度。超高光谱透射比的标准量具通过在固定件上设置扇形遮光体、调节有效遮光面积占比,可以将能见度测量范

围的上限大幅扩展至 20 km, 用于解决现有技术中一些高能见度的测量及相关参数测量不确定度大的问题。

2 透射式能见度仪校准装置组成

为提高透射式能见度仪的测量范围和测量准确度, 需要提高中性滤光片的透射比和减小测量过程中的不确定度。为此, 设计了 1 套透射式能见度仪校准装置, 示意图如图 2 所示。超高光谱透射比标准量具是一种高速旋转且透射比确定的扇形滤光片, 其扇形面积占比可以根据需求设定。当连续光(可见光、紫外光或红外辐射)照射到标准量具上时, 部分光透过滤光片射出, 部分光透过滤光片外的其他介质射出。使用超高光谱透射比标准量具对能见度仪进行校准, 通过调节有效遮光面积占比, 可以大幅提升能见度测量范围的上限。



图 2 透射式能见度仪校准装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of transmissometer calibration device

平行光束在大气中经过给定基线长度的光学路程后, 剩余的光通量会有所衰减。若改变遮光体的圆心占比面积, 则需要考虑金属材质和玻璃材质的透过特性。金属是完全遮光无透射比的, 可绝对溯源到几何量, 但对于透射式能见度仪, 透射比与能见度测量范围成负相关。使用金属滤光片测量能见度时, 其遮光面积要足够小才能测得较大的范围, 但小角度的金属遮光片一方面在加工过程中较难; 另一方面, 小角度遮光片在高速旋转过程中易出现位错现象, 从而影响材料的强度。为解决这一难题, 设计了一种玻璃材质的滤光片, 其自身有透射比, 在测量透射比大于 0.97 时, 容许滤光片圆心角度更大, 较好地避免了旋转过程中因偏转影响引入的不确定度。此外, 透射比标准系统会根据光源的大小及高度自动进行对准, 并根据实际测量的需要启动旋转驱动装置, 将

不同透射比的扇形滤光片分级驱动, 由此可完成能见度的量值溯源。

校准系统中的高透射比量具是一种高速旋转的确定透射比的扇形滤光片, 当扇形装置的透射比 a 等于 0 时, 称为遮光体透射比量具; 当扇形装置为透射比 a 大于 0.90 的滤光片时, 称为超高透射比量具。高透射比量具是用来校准透射式能见度仪的标准器, 滤光片的透射比和面积占比对能见度测量结果的影响如表 1 所示, 其中 $T=a \times p+1 \times (1-p)$ 。

表 1 滤光片透射比 a 和圆心角占比 p 对能见度 V_R 的影响
Table 1 Influence of filter transmittance a and central angle ratio p on visibility V_R

a	p	T	$U_{\text{rel}}(k=2)$	V_R/m
0.250	1/10	0.925 0	0.000 6	50
0.750	1/10	0.975 0	0.000 6	155
0.950	1/10	0.995 0	0.000 6	780
0.950	1/5	0.990 0	0.001 2	389
0.950	1/20	0.997 5	0.000 3	1 563

注: 基线长度 L 为 1 m。

由表 1 可知, 面积占比相同时, 透射比越高, 能见度测量范围越大; 透射比相同时, 圆心角占比越小, 透射比量值的测量不确定度越小, 测量范围越大。透射比量值的微小变化能引起能见度测量范围的成倍变化, 因此在能见度溯源时, 测量范围的提高需要用高透射比标准器进行校准。

3 测试实验结果与分析

3.1 滤光片圆心角分析

超高光谱透射比标准量具采用高精密加工工艺, 扇形滤光片的同心度、切面平整度以及扇面与切面的垂直度是加工制造中的关键技术问题。加工精度、材料选择都是影响透射比不确定度的因素。该标准量具的溯源遵循光学透射比参数测量的溯源链, 并优先遵循几何量参数测量的溯源链。

高透射比量具作为主标准器时, 先进行启动, 使斩光器高速旋转, 然后调节测量窗口放置位置和角度。为保证滤光片旋转平面垂直于光束, 待稳定后再读取仪器示值。在透射式能见度仪校准装置中采用了两种材质的滤光片, 如表 2 所示, A、B 为金属滤光片; C~G 为玻璃滤光片。当滤光片与空气相间或不透明介质相间设置时, 超高光谱透射比标准量具的透射比 T 也可以计算得到。

表2 两组滤光片对应的能见度理论值

Table 2 Theoretical values of visibility corresponding to two sets of filters

序号	圆心角/(°)	透射比	能见度理论值/m	
			L=1	L=2
A	2.8	0.984 4	249.5	499.1
B	1.8	0.990 0	389.2	778.5
C	1.7	0.999 2	4 600	9 201
D	2.0	0.999 0	3 910	7 820
E	3.1	0.998 5	2 522	5 044
F	2.2	0.998 9	3 554	7 109
G	3.5	0.998 3	2 233	4 467

由表2可知,两种材质滤光片的圆心角度趋近相同时,玻璃滤光片的能见度测量范围是金属材质的约10倍,大幅提高了能见度的测量上限。

3.2 实验结果与讨论

标准器在高速运转过程中,由于向心力会使圆心发生偏移,因此对能见度进行测量时,要尽可能保证光垂直入射标准器,从而得到最大的反射器接收光。这就要求该仪器要有足够的灵敏度,同时对滤光片的加工精度也提出了较高要求。

以图3为例,我们对加工的7个滤光片的正反面线性度分别进行了测量与分析,得到如下结果(以金属和玻璃各取一种为例):

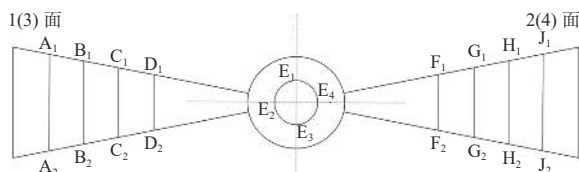


图3 滤光片正反面线性度分析

Fig. 3 Analysis of filter front-back linearity

金属A的1~2面的拟合方程为

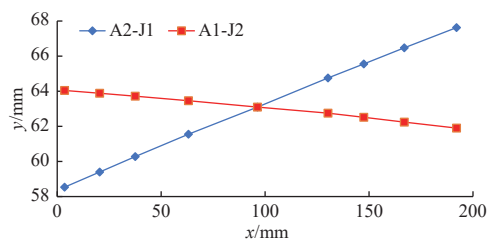
$$\begin{aligned} y &= 0.048x + 58.44 & R^2 &= 0.999\ 8 \\ y &= -0.011x + 64.14 & R^2 &= 0.995\ 7 \end{aligned} \quad (3)$$

交点坐标为(95.91, 63.06),使用万能工具显微镜测得的实际圆心坐标为(96.31, 63.10),相对误差 $\Delta x = 0.42\%$, $\Delta y = 0.05\%$ 。

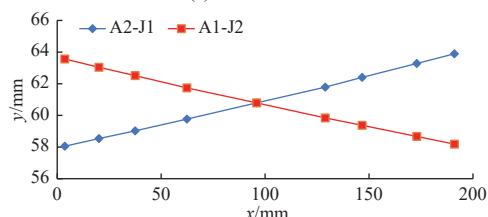
金属A的3~4面的拟合方程为

$$\begin{aligned} y &= 0.031x + 57.87 & R^2 &= 0.999\ 2 \\ y &= -0.029x + 69.14 & R^2 &= 0.999\ 3 \end{aligned} \quad (4)$$

交点坐标为(95.80, 60.84),使用万能工具显微镜测得的实际圆心坐标为(95.93, 63.79),相对误差 $\Delta x = 0.14\%$, $\Delta y = 0.09\%$ 。拟合结果如图4所示。



(a) 金属A的1~2面



(b) 金属A的3~4面

图4 金属滤光片线性度拟合曲线

Fig. 4 Linearity fitting curves of metal filter

玻璃F的1~2面的拟合方程为

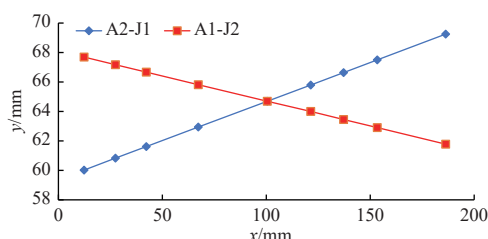
$$\begin{aligned} y &= 0.048x + 57.91 & R^2 &= 0.999\ 9 \\ y &= -0.039x + 66.92 & R^2 &= 0.999\ 9 \end{aligned} \quad (5)$$

交点坐标为(103.92, 62.87),使用万能工具显微镜测得的实际圆心坐标为(104.00, 62.86),相对误差 $\Delta x = 0.03\%$, $\Delta y = 0.01\%$ 。

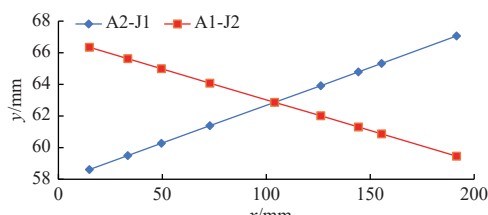
玻璃F的3~4面的拟合方程为

$$\begin{aligned} y &= 0.053x + 59.37 & R^2 &= 0.999\ 9 \\ y &= -0.034x + 68.11 & R^2 &= 0.999\ 9 \end{aligned} \quad (6)$$

交点坐标为(100.51, 64.70),使用万能工具显微镜测得的实际圆心坐标为(100.47, 64.69),相对误差 $\Delta x = 0.03\%$, $\Delta y = 0.01\%$ 。拟合结果如图5所示。



(a) 玻璃F的1~2面



(b) 玻璃F的3~4面

图5 玻璃滤光片线性度拟合曲线

Fig. 5 Linearity fitting curves of glass filter

同理,将各组滤光片的垂直度进行拟合,计算出理论上的圆心坐标。同时,根据拟合曲线,得到

圆心角度如表 3 所示。

表 3 滤光片加工圆心及能见度相对误差
Table 3 Filter actual center and relative error of visibility

序号	圆心角/(°)	圆心角误差/(°)	透射比	能见度/m		相对误差/%
				L=1	L=2	
A	2.82	0.02	0.984 3	247.7	495.4	-0.71
B	1.83	0.03	0.989 8	382.8	765.6	-1.65
C	1.67	-0.03	0.999 2	4 683	9 366	1.80
D	1.99	-0.01	0.999 0	3 929	7 859	0.50
E	3.07	-0.03	0.998 5	2 546	5 093	0.98
F	2.19	-0.01	0.998 9	3 571	7 141	0.46
G	3.47	-0.03	0.998 3	2 252	4 506	0.87

3.3 圆心偏移量分析

为了分析圆心的偏移对能见度测量的影响,假设滤光片不动,使校准装置上的圆孔开始转动,即扇形片与旋转圆环交叠面积的变化量。详细示意图如图 6 所示,滤光片的加工是完全对称的。理想状态下,其中心如实线所示,圆心为 O,但由于加工误差,圆心可能会发生微小偏移。为使结果更清晰,我们将偏移量取稍大的值,圆心为 O'。

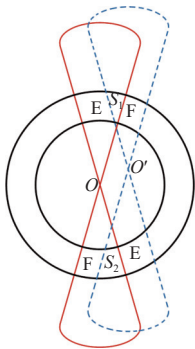


图 6 圆心偏移量对能见度测量的影响
Fig. 6 Influence of circle center offset on visibility measurement

当滤光片的实际加工圆心处于中央位置时,校准装置旋转 1 周后,滤光片扫过的面积 $S = E + S_1 + F + S_2$ 。若由于其他原因使得滤光片的圆心出现偏移,则滤光片两端扫过的面积将不再相等。此时,校准装置旋转 1 周,滤光片遮挡的面积仍为 S,即两种情况得到的遮挡面积是相同的,则表明滤光片圆心的偏移量对能见度的测量没有影响。

此外,使用锥形遮光体时,通过旋转调整锥体就可复现第 1 透射比和第 2 透射比,取两透射比的差值,即可校准透射比测量仪的分辨率。这一操作过程几乎避免了引入除旋转因素外的其他不确

定度来源,大幅提升了透射比分辨率的校准能力。

4 不确定度评定

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》规定方法^[17-18],将标准不确定度的评定划分为 A 类评定和 B 类评定。A 类标准不确定度是对在规定条件下测得的量值用统计分析的方法进行评定,用实验标准差表示;B 类评定信息的来源主要是权威机构发布的量值、有证标准物质的量值、校准证书,以及经检定的测量仪器的准确度等级等。综合考虑透射式能见度仪校准原理及实验过程,对不确定度来源进行了分析,其组成部分如下:

- 1) 标准器测量重复性引入的不确定度 u_1 ;
- 2) 切割光线角度误差引入的不确定度 u_2 ;
- 3) 透射式能见度仪示值误差引入的不确定度 u_3 ;
- 4) 标准器在能见度仪实际校准中的不稳定性引入的不确定度 u_4 ;
- 5) 实验室内大气扰动、杂散光干扰和背景辐射等引入的不确定度 u_5 。

根据以上不确定度来源,对各不确定度分量进行如下分析:

- 1) 标准器测量重复性引入的不确定度 u_1
校准装置按要求调整后,每个校准点重复测量 3 次,按 A 类不确定度评定,标准器测量引入的不确定度计算公式为

$$u_1 = S(V_i) / \sqrt{n} \tag{7}$$

式中: V_i 为第 i 次测得的能见度值; n 为测量次数; $S(V_i)$ 为能见度测量的标准偏差。以 50% 的校准点为例,测量结果分别为 786 m、791 m 和 788 m,使用极差法,可得到 $u_1=0.22\%$ 。被校仪器分辨力为满量程的 0.1% 或 0.01%,其引入的不确定度分量约为 0.029% 或 0.002 9%,小于重复性所引入的不确定度分量,故不考虑仪器分辨力所引入的不确定度分量。

- 2) 切割光线角度误差引入的不确定度 u_2
由斩光器旋转平面与光路角度误差引入的不确定度分量,估计其最大变化量的绝对值为 20 m,此项服从三角分布,则此标准不确定度 $u_2=1.06\%$ 。
- 3) 透射式能见度仪示值误差引入的不确定度 u_3
根据标准器的检定证书,按 B 类不确定度评定,则透射式能见度仪示值误差引入的不确定度 $u_3=2.05\%$ 。

4) 标准器在能见度仪实际校准中的不稳定性引入的不确定度 u_4

根据滤光片材质的说明给出的技术指标,按 B 类不确定度评定,能见度测量范围在 12 m~1 500 m 之间,透射比不确定度 $u_4=2.50\%$ 。

5) 实验室内大气扰动、杂散光干扰和背景辐射等引入的不确定度 u_5

按 B 类不确定度评定, $u_5=1.00\%$ 。

以上得到的各分量互不相关,合成相对标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 3.55\% \quad (8)$$

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度 $U=ku_c=7.10\%$, 则透射式能见度仪校准装置的测量不确定度如表 4 所示。

表 4 不确定来源和评定结果

Table 4 Sources of uncertainty and evaluation results

不确定度来源	不确定度/%	类别
标准器测量重复性引入的不确定度分量	0.22	A
切割光线角度误差引入的不确定度分量	1.06	B
上级量传引入的不确定度	2.05	B
滤光片透射比引入的不确定度分量	2.50	B
实验室内大气扰动、杂散光干扰和背景辐射等引入的不确定度	1.00	B
相对合成标准不确定度	3.55	
相对扩展不确定度($k=2$)	7.10	

5 结论

高能见度量值的校准因受制于缺少可见光全光谱高透射比标准器,导致无法有效溯源。本文基于透射式能见度仪的测量原理,设计出一种透射比标准量具及透射比校准装置。本装置提高了透射比测量范围的上限,大幅提升了透射比测量装置在进行透射比量值校准时的测量范围,相对扩展不确定度为 7.10,提升了校准分辨率,能满足计量机构对能见度仪测量精度的要求,并为能见度的溯源问题提供了一种可行的解决方法。

参考文献:

[1] 中国气象局. 能见度等级和预报: QX/T 114—2010[S]. 北京: 气象出版社, 2010: 1-2.
China Meteorological Bureau of the People's Republic of China. Visibility grade and forecast: QX/T 114—2010[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 1-2.

[2] 王胜杰, 褚进华, 解淑艳. 能见度仪检测实验室建设的探讨[J]. 环境监控与预警, 2015, 7(6): 63-67.
WANG Shengjie, CHU Jinhua, XIE Shuyan. Discussion on examining the laboratory construction using a visibility meter[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2015, 7(6): 63-67.

[3] 张世国, 汪玮, 方海涛, 等. 前向散射能见度仪测试模拟环境与试验[J]. 气象科技, 2019, 47(3): 408-412.
ZHANG Shiguo, WANG Wei, FANG Haitao, et al. Simulation environment and experiment of forward scattering visibility meters[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(3): 408-412.

[4] 张建锋, 潘孙强, 褚进华, 等. 基于激光腔增强技术的前向散射能见度仪校准方法研究[J]. 光散射学报, 2019, 31(2): 160-165.
ZHANG Jianfeng, PAN Sunqiang, CHU Jinhua, et al. Research on calibration method for forward scatter visibility meter based on laser cavity enhanced technique[J]. The Journal of Light Scattering, 2019, 31(2): 160-165.

[5] 田林, 陆亦怀, 桂华侨, 等. 基于角反射器的单端透射式能见度仪的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(5): 390-397.
TIAN Lin, LU Yihuai, GUI Huaqiao, et al. Investigation on one-terminal transmission visibility meter based on using corner reflector[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(5): 390-397.

[6] 国际民用航空组织. 机场自动气象观测系统手册: Doc 9837 AN/454[S]. 蒙特利尔: 国际民用航空组织, 2013.
International Civil Aviation Organization. Manual on automatic meteorological observing systems at aerodromes: Doc 9837 AN/454[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.

[7] 赵静, 肖韶荣. 高精度能见度仪发射系统设计[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(33): 9950-9953.
ZHAO Jing, XIAO Shaorong. Design of high-precision launch system of visibility meter[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(33): 9950-9953.

[8] 张健, 张国玉, 孙高飞, 等. 校准能见度仪用标准散射体定标系统装调技术[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1207-1215.
ZHANG Jian, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Alignment technology for standard scatter plate calibration system used in calibrating forward scattering visibility meter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1207-1215.

- [9] 朱乐坤, 李林. 前向散射能见度仪校准技术[J]. *气象科技*, 2013, 41(6): 1003-1007.
ZHU Lekun, LI Lin. Calibration techniques for forward scattering visibility meters[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013, 41(6): 1003-1007.
- [10] 上海光学仪器研究所. 光学零件镀膜, 中性滤光膜: JB/T 8226.5-1999[S]. 上海: 上海光学仪器研究所, 1999.
Shanghai Institute of Optical Instruments. Coating of optical parts, neutral filter film: JB/T 8226.5-1999[S]. Shanghai: Shanghai Institute of Optical Instruments: 1999.
- [11] 范晓辉, 邱成. 透射比标准滤光器规则透射比的测量不确定度评定[J]. *中国计量*, 2016(2): 87-89.
FAN Xiaohui, QIU Cheng. Measurement uncertainty assessment of transmission ratio of regular transmission ratio of standard filter[J]. *China Metrology*, 2016(2): 87-89.
- [12] 王青梅, 谢邦力, 梅品琛, 等. 前向散射仪测量能见度的原理和标定方法探讨[J]. *气象水文海洋仪器*, 2001, 18(4): 10-16.
WANG Qingmei, XIE Bangli, MEI Pinchen, et al. Discussing the theory and calibration of the forward scatter meter[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2001, 18(4): 10-16.
- [13] 梁婧, 张国玉, 张健, 等. 透射式能见度仪定标光源光谱模拟方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 115-127.
LIANG Jing, ZHANG Guoyu, ZHANG Jian, et al. Spectral simulation method for calibration light source of transmissometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 115-127.
- [14] 黄成栋, 李玮, 刘瑞良, 等. 透射式能见度仪校准方法研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 2018, 35(1): 17-19.
HUANG Chengdong, LI Wei, LIU Ruiliang, et al. Research on calibration methods of transmission visibility meter[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2018, 35(1): 17-19.
- [15] 褚进华, 唐修雄, 矫健, 等. 能见度仪校准系统的不确定度评定分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(2): 180-187.
CHU Jinhua, TANG Xiuxiong, JIAO Jian, et al. Uncertainty analysis of the calibration system of visibility meter[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(2): 180-187.
- [16] PARK S, LEE D H, KIM Y G. SI-traceable calibration of a transmissometer for meteorological optical range (MOR) observation[J]. *Korean Journal of Optics and Photonics*, 2015, 26(2): 73-82.
- [17] 浙江省市场监督管理局. 前向散射能见度仪校准规范: JJF 1154—2019[S]. 杭州: 浙江省计量科学研究院, 2019: 6-8.
Zhejiang Provincial Market Supervision Administration. Calibration specification for the forward-scattering visibility meter: JJF 1154—2019[S]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Metrology, 2019: 6-8.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 8-23.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 8-23.