

第9章 能见度的测量

9.1 概述

9.1.1 定义

能见度 (Visibility) 是首先为了气象目的而定义的通过人工观测者定量估计的量, 以这种方式进行的观测现正广泛地采用。然而, 能见度的估计受许多主观的和物理的因素的影响; 基本的气象量, 即大气透明度, 可以客观地测量, 并用气象光学视程 (MOR) 表示。

气象光学视程 (Meteorological optical range) 是指由白炽灯发出的色温为 2700K 的平行光束的光通量在大气中削弱至初始值的 5% 所通过的路径长度。该光通量采用国际照明委员会 (ICI) 的光度测量发光度函数未确定。

白天气象能见度 (Meteorological visibility by day) 定义为: 相对于雾、天空等散射光背景下观测时, 一个安置在地面附近的适当尺度的黑色目标物能被看到和辨认出的最大距离。必须强调的是, 采用的标准是辨认出目标物, 而并非仅看到目标物却不能辨认出它是什么。

夜间气象能见度 (Meteorological visibility at night) 定义为:

(a) 假想总体照明增加到正常白天的水平, 适当尺度的黑色目标物能被看到和辨认出的最大距离; 或

(b) 中等强度的发光体被看到和识别的最大距离。

空气光 (Airlight) 是指来自太阳和天空由观测者视野圆锥中的大气悬浮物 (和更小尺度的空气分子) 散射入观测者眼中的光线。也就是说, 空气光以漫射的天空辐射到达地球表面相同的方式进入眼睛。空气光是限制黑色目标物白天水平能见度的主要因素, 因为沿从目标物到眼睛的视野圆锥对空气光积分, 使一个充分远的黑色目标物的视亮度提高至不能从天空背景下辨认出来的水平。同主观的估计相反, 大多数进入观测者眼睛的空气光来源于离他较远的视野圆锥的部分。

以下四个光度测定量是以不同标准详细定义的, 诸如由国际电子技术委员会 (IEC, 1987):

(a) 光通量 (Luminous flux) (符号: F (或 Φ_v), 单位: lm (流明)) 是由辐射通量导出的量, 按其对国际照明委员会 (ICI) 标准光度观测仪的作用确定的辐射量。

(b) 发光强度 (Luminous intensity) (符号: I , 单位: cd (坎德拉) 或 lm sr^{-1} (流明每球面度)) 每单位立体角中的光通量。

(c) 光亮度 (Luminance) (符号: L , 单位: cd m^{-2} (坎德拉每平方米)) 每单位面积上的发光强度。

(d) 光照度 (Illuminance) (符号: E , 单位: lux (勒克斯) 或 lm m^{-2}) 每单位面积上的光通量。

消光系数 (Extinction coefficient) (符号: K) 是色温为 2700K 的白炽光源发出的平

行光束经过大气中单位距离的路径损失的那部分光通量。该系数是对由于吸收和散射造成的衰减的测量。

亮度对比 (Luminance contrast) (符号: C) 是目标物的亮度与其背景亮度之差同背景亮度之比。

对比阈值 (Contrast threshold) (符号:) 是人眼能察觉的最小亮度对比, 例如, 允许目标物从背景中消失的值, 对比阈值随各人而异。

照度阈值 (Illuminance threshold) (E_t) 在特定亮度背景下人眼察觉点源的光的最小照度。因而, E_t 的值随光照条件而变化。

透射因数 (Transmission factor) (T) 定义为对由色温为 2700K 的白炽光源发出的平行光束在大气中经过给定长度的光学路径后的剩余的光通量的分数。透射因数也叫做透射系数。当限定路径时, 即一个特定长度 (例如在透射表的情况下), 也采用透射比或透射率一类的术语。在这种情况下, T 通常乘以 100 以百分数表示。

9.1.2 单位和标尺

气象能见度或气象光学视程 MOR 用 m 或 km 表示。测量范围随应用而变化, 对天气尺度要求, MOR 的尺度从小于 100m 到大于 70km, 而在其他应用时测量范围可有相当的限制。对民用航空来说, 上限为 10km。当应用于描述着陆和起飞条件的能见度较小情况下的跑道视程的测量时, 这个范围还要进一步缩小。跑道视程仅要求在 500m 和 1500m 之间 (见第二编第 2 章)。对于其他应用, 诸如陆路或海上交通, 按照测量的要求和位置有着不同的限度。

能见度测量的误差与能见度成比例增加, 测量标度考虑到了这一点。反映在天气报告使用的电码中通过用三种线性分段逐步降低分辨率, 即 100m 到 5000m, 步长为 100m, 6 到 30km, 步长为 1km, 35km 到 70km, 步长为 5km。除了能见度低于 900m 外, 这种标度可使报告的能见度值比测量准确度更好。

9.1.3 气象要求

能见度概念在气象学中广泛地应用, 主要表现为两个方面: 首先, 它是表征气团特性的要素之一, 特别是满足天气学和气候学的需要。此时以能见度表示大气的光学状态。其次, 它是与特定判据或和特殊应用相对应的一种业务性变量。为了适应这一要求, 把它直接表示成能见度的特殊标志或发光体的可视距离。

一个特别重要的应用是对航空的气象服务 (见第二编第 2 章)。

气象学采用的能见度测量应不受极端气象条件的影响, 但必须与能见度的直觉概念和普通目标物在正常情况下能看到的距离直接相关。MOR 业已确定能满足这些要求, 且昼夜均便于用仪器测量, 与能见度的其他测量具有完全明确的关系。MOR 已由 WMO 正式确定为普通的和航空用的能见度的测量 (WMO, 1990a)。它也由国际电子技术委员会确认 (IEC, 1987) 可应用于大气光学和可见的信号。

MOR 通过对比阈值 () 与能见度的直觉概念相联系。1924 年 Koschmieder, 遵从 Helmholtz 提出将 0.02 作为 的值, 其他作者提出了别的数值。这些值从 0.0077 到 0.06, 或者甚至 0.2。对给定大气条件, 较小的 值得出较大的能见度估算值。对航空要求而言, 人们认为 应大于 0.02, 可取作 0.05, 因为对于一个飞行员来说, 相对于周围地域的目标物 (跑道标记) 对比要比相对地平的目标物的对比低得多。常假设当观测者能看到和辨认一个相地于地平的黑色目标物, 目标物的视对比为 0.05, 其解释下面将给出, 由此得出在 MOR 的定义中把透射因数选为 0.05。

准确度要求在第一编第 1 章中讨论。

9.1.4 测量方法

能见度是一个复杂的心理——物理现象, 主要受制于悬浮在大气中的固体和液体微粒引起的大气消光系数; 消光主要由光的散射而非吸收所造成。其估计值依从于个人的视觉和对可见的理解水平而变化, 同时受光源特征和透射因数的影响。因此, 能见度的目测估计值都是主观的。

当观测者估计能见度时, 并不仅仅是取决于所理解的或应当理解的目标物的光度测定的和尺度的特征, 还取决于观测者的对比阈值。在夜间, 取决于光源强度, 背景照度, 若由观测者估计的话, 还取决于观测者的眼睛对黑暗的适应能力和观测者的照度阈值。夜间能见度的估计存在着特殊的问题。9.1.1 节中夜间能见度的第一种定义是通过与昼间能见度等效方式给出的, 以保证在黎明和黄昏估计能见度时不出现人为变化。第二种定义具有实际应用价值, 尤其是对航空要求, 但与第一种定义不同, 通常得出不同的结果。两者显然都是不精确的。

MOR 可以用仪器方法测量消光系数从而计算得出。于是能见度可由对比阈值和照度阈值计算得出, 或指定与它们一致的值。Sheppard(1983)指出:“严格的遵从 (MOR 的) 定义应要求把具有适当光谱特性的发射器和接收器安置在可以分离的两个平台上, 例如沿铁路线, 直到透射比为 5%。任何其它方法都只能给出 MOR 的估计值。”

然而, 使用固定的仪器是在消光系数与距离相互独立的假设基础上的。一些仪器直接测量衰减, 另一些仪器测量光的散射, 均用以得出消光系数。9.3 节中对这些方法进行了说明。本章中有关能见度物理学的主要分析, 对理解消光系数各种测量方法之间的关系以及对能见度测量的仪器的考虑是很有用的。

视觉——适光的和暗光的视觉

目测视觉基于人眼在可见光谱中相对于单色辐射的适当效率的测量。适光和暗光分别指白天和夜间的情况。

修饰语适光指白天光照环境下, 眼睛的适应状态。更精确地说, 适光状态定义为具有正常视力的观测者对光线射入视网膜中央凹 (视网膜最敏感的中枢部分) 的刺激所作出的反应。在这种适应条件下, 中央凹可区别出细微的清晰度和颜色。

在适光的视觉下（通过中央凹感光），眼睛的相对感光效率随入射光的波长而变化。在适光条件下眼睛的感光效率在波长为 550nm 时达到最大值。以波长为 550nm 时的效率作为参照值，可以建立人眼在可见光谱中各种波长的相对效率的反应曲线。图 9.1 中的曲线就是如此得出的，已由 ICI 采用作为正常观测者的平均相对感光效率。

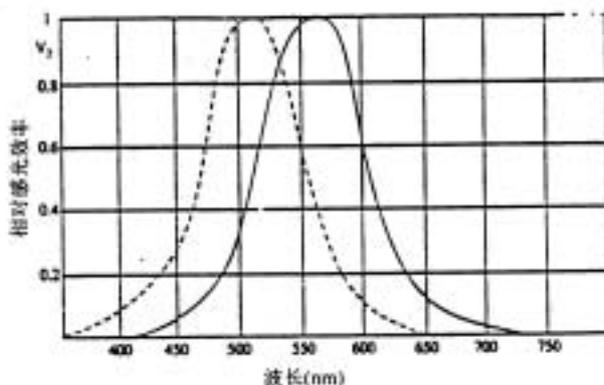


图 9.1——人眼对单色光的相对感光效率。实线表示白天的视觉，虚线表示夜间的视觉

夜间视觉视作是暗光的（以视网膜的视杆细胞取代中央凹产生视觉），视杆细胞作为视网膜上的外围部分对颜色和细微清晰度不敏感，但对低的光强度特别敏感。在暗光视觉中，最大感光效率与 507nm 波长相对应。

暗光视觉需要长时间的适应过程，长达 30 分钟，而适光视觉只需 2 分钟。

基本方程

能见度测量的基本方程是 Bouguer-Lambert 定律：

$$F = F_0 \cdot e^{-\sigma x} \quad (9.1)$$

式中，F 是在大气中经过 x 路径长度接受的光通量，F₀ 是在 x=0 时的光通量，σ 为消光系数。求导可得：

$$\sigma = \frac{-dF}{F} \cdot \frac{1}{dx} \quad (9.2)$$

注意，此定律仅在单色光时有效，但可以作为一个好的近似值应用于光谱通量。透射因数为：

$$T = \frac{F}{F_0} \quad (9.3)$$

MOR 与代表大气光学状态的许多变量的数学关系可以从 Bouguer-Lambert 定律推得出。

根据方程 (9.1) 和 (9.3)，有：

$$T = \frac{F}{F_0} = e^{-\sigma x} \quad (9.4)$$

若此定律应用于 MOR 定义的 T=0.05，则 x=P，T 可写成下列关系：

$$T = 0.05 = e^{-\sigma P} \quad (9.5)$$

因此，MOR 对消光系数的数学关系为：

$$P = \frac{1}{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{1}{0.05}\right) \approx 3/\sigma \quad (9.6)$$

式中， \ln 是底数为 e 的对数或自然对数。与由 Bouguer-Lambert 定律导出的方程(9.4) 9.6 联立，得出下列方程：

$$P = x \cdot \frac{\ln(0.05)}{\ln(T)} \quad (9.7)$$

此方程是采用透射表测量 MOR 的基本原理，此时， x 等于方程 (9.4) 中透射表的基线 a 。

白天气象能见度

亮度对比为：

$$C = \frac{L_b - L_h}{L_h} \quad (9.8)$$

这里 L_h 是地平天空背景亮度， L_b 是目标物亮度。

地平天空背景亮度是由沿观测者视线的大气散射的空气光产生的。

必须注意的是，若目标物比地平天空背景暗，则 C 为负值，若目标物是黑色的($L_b=0$)，则 $C=-1$ 。

1924 年，Koschmieder 建立了远处的观测者在地平天空下看到的目标物的视亮度对比 (C_x) 与其固有亮度对比 (C_0)，即假想从很近处看到的地平天空下的目标物的亮度对比之间的关系，此即其后变成众所周知的 Koschmieder 定律。Koschmieder 的关系式可写成：

$$C_x = C_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (9.9)$$

当散射系数与方位角无关，且沿观测者、目标物和地平天空之间的整个路径上的照度均匀时，此关系式成立。

若黑色目标物针对地平天空可观测到 ($C_0=-1$) 且视亮度对比为-0.05，则方程 9.9 可简化为：

$$0.05 = e^{-\alpha x} \quad (9.10)$$

将这一结果与方程 9.5 相比较表明，在地平天空背景下，当一个黑色目标物的视亮度对比值为 0.05 时，该目标物即处于 MOR (P)。

夜间气象能见度

夜间作为能见度标记的发光体被看到的距离并非简单地与 MOR 相关。它不但取决于 MOR 和发光体光的强度，还取决于观测者眼睛处从其他光源来的照度。

1876 年，Allard 提出了从已知强度的点光源发出的光的衰减定律，它是距离和消光系数的函数，点光源的亮度由下式给出：

$$E = I \cdot r^{-2} \cdot e^{-\alpha} \quad (9.11)$$

当光为恰好可见时, $E=E_t$ 并有下式:

$$\sigma = \frac{1}{r} \cdot \ln\left\{I / (E_t \cdot x^2)\right\} \quad (9.12)$$

考虑 9.6 式 $P = (1/\sigma) \cdot \ln(1/0.05)$, 可以得出:

$$P = r \cdot \frac{\ln(1/0.05)}{\ln\left[I / (E_t \cdot x^2)\right]} \quad (9.13)$$

MOR 与各种发光体的可见距离之间的关系可参见 9.2.3 节中的论述, 此方程在目测中的应用将在 9.2 节中叙述。

9.2 目视估计气象光学视程

9.2.1 概述

气象观测员可以通过自然的或人造的目标物(树林, 岩石, 城堡, 尖塔, 教堂, 灯光等)对 MOR 进行目测估计。

每一测站应准备一张用于观测的目标物分布图, 在其中标明它们相对于观测者的距离和方位。分布图中应包括分别适用于白天观测和夜间观测的各种目标物。观测者必须特别注意 MOR 的显著的方向变化。

观测必须由具有正常视力且受过适当训练的观测员来进行, 不能用附加的光学设备(单筒、双筒望远镜、经纬仪等), 更要注意不能透过窗户观测, 尤其是在夜间观测目标物或发光体时。观测员的眼睛应在地面以上的标准高度(大约 1.5m), 不应在控制塔或其他的高的建筑物的上层进行观测。当能见度低时, 这一点尤其重要。

当能见度在不同方向上变化时, 记录或报告的值决定于所作报告的用途。在天气电报中取较低值能见度作报告, 而用于航空的报告则应遵循 WMO 的规定。

9.2.2 白天气象光学视程的估计

白天观测的能见度目测估计值是 MOR 真值的较好的近似值。

一般应满足以下要求: 白天应选择尽可能多的不同方向上的目标物, 只选择黑色的或接近黑色的在天空背景下突出于地平面的目标物。浅色的目标物或位置靠近背景地形的目标物应尽量避免。当阳光照射在目标物上时, 这一点尤为重要。如果目标物的反射率不超过 25%, 在阴天条件下引起的误差不超过 3%, 但有阳光照射时则误差要大得多。因此, 白色房屋是不合适的, 无阳光强烈照射时, 深色的树林很合适。如果必须采用地形背景下的目标物, 则该目标物应位于背景的前方并远离背景, 即至少为其离观测点的距离的一半远处。例如, 树林边上的单棵树就不适用于能见度观测。

为使观测值具有代表性, 在观测者眼中目标物的对角不应小于 0.5° 。对角小于 0.5° 的目标物相比同样环境下的更大一点的物体即使在较短距离下将会变得不可见。我们注意到: 一个打在卡片纸上的约 7.5mm 直径的孔, 把它放在一只手臂长度处, 其对角即近似等

于 0.5° ；通过此孔能看到的物体都满足引要求。这一点很有用。然而，这类目标物的对角又不应超过 5° 。

9.2.3 夜间气象光学视程的估计

下面描述的方法，用以通过夜间对光源的感觉距离的目测来估计 MOR 的值。

任何光源都可用作能见度观测的目标物。只要在观测方向上其强度是完全确定的和已知的。然而，通常认为是点光源更合乎要求，且其强度在某一特别的方向上并不比在另外的方向上大，同时不能限制在一个过小的立体角中。必须注意确保光源的机械的和光学的稳定性。

必须将作为点光源的各个光源与其周围无其它光源和或发光区以及发光群区分开来，即使它们之间是相互分离的。在后一种情况下，这样的排列会分别影响到作为目标物的每个光源的能见度。在夜间能见度测量中，只能采用呈适当分布的点光源作为目标物。

还应注意到，夜间观测中采用被照亮的目标物，会受到环境照明、目眩的生理效应以及其它光的影响，即使其它光位于视场之外，尤其是隔着窗户进行观测。因此，只有在黑暗的和适当选择的场地才能得出准确的和可靠的观测值。

此外，生理因素的重要性不可忽略，因为它们是观测偏差的主要来源。重要的是只有具有正常视力的合格的观测员才能从事此类观测。另外，必须考虑有一段适应的时间（通常 5-15 分钟），在这段时间内使眼睛习惯于黑暗视场。

出于应用目的，夜间对点光源感觉距离和 MOR 值之间的关系可用两种方式表述：

(a) 对每一个 MOR 值，通过给定发光强度的光，于是在恰好可见的距离上与 MOR 值之间存在着直接对应关系；

(b) 对给定发光强度的光，通过给出对光的的感觉距离和 MOR 值之间的相应的关系。

因为在不同距离上安装不同强度的光源并不是一件容易的事情，第二种关系要容易些和实际些。这一方法要求用原本存在的或特意安装在观测站周围的光源，并用这些光源的相应值代入方程 9.13 中的 I 、 r 、 E_t 。这样，气象部门可以制定出一份作为背景亮度和已知强度的光源的函数的 MOR 值的表。指定的照度阈值 E_t 明显地随周围亮度的变化而变化。

考虑作为平均观测者的值，应采用以下各值：

(a) $10^{-6.0}$ Lux，黎明和黄昏，或当有来自可感觉的人工光源的光时；

(b) $10^{-6.7}$ Lux，月夜或当天空并不十分黑暗时；

(c) $10^{-7.5}$ Lux，完全黑暗，或除了星光外无其它光。

下表给出了在不同观测条件下在每个上述方法中 MOR 值与对光源的感觉距离之间的关系。该表已编入气象部门作为在夜间能见度观测中用以选择或安装点光源的指南，并为指导观测员计算 MOR 值作准备。

三个 E_t 值下 MOR 与恰好可见点光源的强度之间的关系

MOR	在 P 栏距离上恰好可见的灯泡的发光强度 cd (坎德拉)		
P(m)	曙光 $E_t=10^{-6.0}$	月夜 $E_t=10^{-6.7}$	漆黑 $E_t=10^{-7.5}$
100	0.2	0.04	0.006
200	0.8	0.16	0.025
500	5	1	0.16
1000	20	4	0.63
2000	80	16	2.5
5000	500	100	16
10000	2000	400	63
20000	8000	1600	253
50000	50000	10000	1580

三个 E_t 值下 MOR 与 100cd 的点光源恰好可见的距离之间的关系

MOR	100cd 灯泡的感觉距离 (m) 作为 MOR 值的函数		
P(m)	黎明 $E_t=10^{-6.0}$	月夜 $E_t=10^{-6.7}$	漆黑 $E_t=10^{-7.5}$
100	250	290	345
200	420	500	605
500	830	1030	1270
1000	1340	1720	2170
2000	2090	2780	3650
5000	3500	5000	6970
10000	4850	7400	10900
20000	6260	10300	16400
50000	7900	14500	25900

一个普通 100W 白炽灯泡发出的光强大约为 100cd。

考虑到由于视亮度阈值相对小的变化和不同的总的照明条件所引起的重要差异，显然上表并不作为给出的一个能见度的绝对标准，但却明确了对夜间用于估计 MOR 值的点光源需要进行校准，以尽可能保证在不同地方和由不同部门进行的夜间观测可以相互比较。

9.2.4 缺少远距离目标物时气象光学视程的估计

在某些地方（开阔平原、船舶等），或者因水平视线受限制（山谷或环状地形）或者缺乏适合的能见度目标物，除了相对低的能见度之外直接进行估计是不可能的。在这样的情况下，要是没有仪器方法可采用，MOR 的值比已有的能见度目标物更远时必须根据大气的一般透明度来作出估计。这种估计，可以通过注意那些距离最远的醒目的能见度目标物的清晰程度来进行。如果目标物的轮廓和特征清晰，甚至其颜色也几乎并不模糊，就表明这时的 MOR 大于能见度目标物和观测员之间的距离。另一方面，如果能见度目标物模糊或难以辨认，则表明存在使气象光学视程减小的霾或其它大气现象。

9.2.5 目测的准确度

概述

进行目标物观测的人应受过适当的训练和具有通常所指的正常视力。由于不同的人有着不同的视觉和对可见的理解水平，所以在给定的大气状态下，这种人为因素在能见度的估计中有相当明显的影响。

白天目测估计气象光学视程的准确度

观测表明建立在仪器测量基础上的 MOR 的估计与白天能见度的估计是一致的。若观测者的对比阈值为 0.05（采用认可的标准）且仪器和观测者的周围的消光系数是相同的，

能见度和 MOR 就应该是相等的。

Middleton(1952)由 1000 次测量结果中发现,一个由 10 位受过气象观测员培训的年青飞行员组成的小组的平均对比率阈值是 0.033,对单次观测来说,该值从小于 0.01 到大于 0.2 不等。Sheppard(1983)曾指出当把 Middleton 的数据在对数坐标上绘出时结果表明与高斯(Gaussian)分布吻合得很好。若 Middleton 的数据代表正常的观测条件,则白天能见度的估计将比 MOR 约平均高出 14%,其标准偏差为 MOR 的 20%。这些计算与 WMO 第一次能见度测量相互比对(WMO,1990b)的结果非常一致。后者发现在白天,观测者对能见度的估计值比 MOR 的仪器测量值高出大约 15%。在观测员和仪器之间的差异的四分位差大约是 MOR 测量值的 30%。若为高斯分布,相应的标准偏差为 22%。

夜间目测估计气象光学视程的准确度

从 9.2.3 节的表中很容易地看到,如果没有适当地考虑光强和视野条件的容差,而简单地由普通光的可见距离得出的 MOR 值是多么容易产生误导。由此必须强调对观测员给予精确的、明确的指导并对能见度观测进行培训的重要性。

实际上,我们注意到上述为建立发光目标物准备的计划所采用的方法和表格并非易于实施,用作目标物的光源不一定在适合的位置或有稳定的已知光强,而且并非总是点光源。对于最后一点,发光体可能是宽的窄的光束、成群排列,或甚至带有不同的颜色,而眼睛对不同颜色有不同敏感度。在使用这些发光体时一定要特别小心。

仅当发光体及其背景经过仔细地选择和观测者的视野条件精心地控制,且有相当长的时间用于观测以确保观测者的眼睛完全适应视野条件时,对发光体的视程的估计才能提供可靠的夜间能见度的估计。WMO 第一次能见度测量相互比对(WMO,1990b)结果表明,在数小时的黑暗中,观测员对能见度的估计值大约比 MOR 的仪器量值高出约 30%,观测者和仪器之间相差的四分位差只是比白天稍大一些(大约是 MOR 测量值的 35%—40%)。

9.3 气象光学视程的仪器测量

9.3.1 概述

采取一些假设,可使仪器的测量值转化为 MOR 值,若有大量合适的能见度目标物可用于直接观测,使用仪器进行白天能见度的测量并非总是有利的。然而,对夜间观测或当没有可用的能见度目标物时或对自动观测系统来说,能见度测量仪器是很有用的。用于测量 MOR 的仪器可分为以下两类:

a) 用于测量水平空气柱的消光系数灵敏或透射因数。光的衰减是由沿光束路径上的微粒散射和吸收造成的。

B) 用于测量小体积空气对光的散射系数。在自然雾中,吸收通常可忽略,散射系数可视为与消光系数相同。

以上两类包括用于观测员目测的仪器和使用光源和由光电池或检测发射光束的光电二极管组成的电子设备的仪器,目测型仪器的主要缺点是如果观测者没有留出充足的时间

使其眼睛适应观测条件时，会出现很大的误差（特别是在夜晚）。

这两种 MOR 测量仪器的主要特征描述如下。

9.3.2 测量消光系数的仪器

光度遥测仪器

若干遥测光度表是按白天测量消光系数而设计的，它是通过对远距离目标的视亮度和天空背景的比较来测定的（例如 Lohle 遥测光度表）。但是，这类仪器通常不用于日常观测，因为正如前面所述，白天最好是直接目测。然而，发现这类仪器对超过最远目标物的 MOR 进行外推是有用的。

目测消光表

这是一种用于夜间观测远距离发光体的非常简单的仪器。它使用标度的中性滤光器按已知比例削弱光线，并能调节使远距离发光体恰好能见。仪器读数给出发光体与观测员之间空气透明度的测量，由此可以计算出消光系数。观测的总的准确度，主要取决于观测员眼睛敏感度的变化以及光源辐射强度的波动，误差随 MOR 成比例增加。

此仪器的优点是，仅需使用合适地分布的 3 个发光体，就能以合理的准确度测定 100m 至 5km 距离上的 MOR，但是如没有这样的仪器，若要达到同等水平的准确度，则需要较复杂的一组光源。然而使用此类仪器的方法（决定光源出现或消失的点）相当大地影响测量的准确度和均匀性。

透射表

透射表采用在发射器和接收器之间测量水平空气柱的平均消光系数的最普通的方法，发射器提供一个经过调制的定常平均功率的光通量源，接收器主要由一个光检测器组成（一般是在一个抛物面镜或透镜的焦点上放置一个光电二极管）。最常使用的光源是卤灯或氙气脉冲放电管。调制光源以防来自太阳光的干扰。透射因数由光检测器输出决定，并据此计算消光系数和 MOR 值。

因为透射表估计 MOR 是根据准直光束的散射和吸收导致的光的损失的原理，所以它们与 MOR 的定义紧密相关，一个优良的，维护好的透射表在其最高准确度范围内工作时对 MOR 的真值能给出非常好的近似。

有两种类型的透射表：

(a) 发射器和接收器分处于两个单元内且彼此之间的距离已知，如图 9.2 所示：

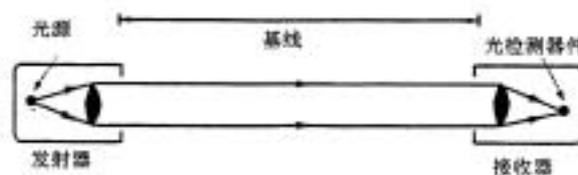


图 9.2——双终止透射表

(b) 发射器和接收器在同一单元内，发射的光由相隔很远的镜面或后向反射器（光

束射向反射镜并返回)反射。如图 9.3 所示。



图 9.3——单终止透射表

发射器和接收器之间光束传送的距离通常称作基线，可从几米到 150m (甚或 300m)，它取决于所测 MOR 值的范围和这些测量值的应用情况。

如在公式 (9.7) 中 MOR 的表达式所见，即关系式：

$$P = a \cdot \ln(0.05) / \ln(T) \quad (9.14)$$

这里 a 是透射表的基线，(9.14) 式是透射表测量的基本公式。它的正确性决定于下列假设，即满足 Koschmieder 和 Bouguer-Lambert 定律，且沿透射表基线的消光系数与在 MOR 上观测者同目标物之间路径中的消光系数相同。透射因数和 MOR 之间的关系对雾滴来说是正确的，但是当能见度的减小是由于其它水凝物，(诸如雨或雪)或大气尘粒(诸如扬沙)引起的时，MOR 的值必谨慎处理。

若要在长时段内保持测量正确，则光通量必须在该时段内保持稳定。当使用卤灯时，灯丝的老化问题并不很关键，而且其通量保持得比较稳定。然而，有些透射表使用反馈系统(通过感应和测量发射通量的一小部分)获得随时间具有较大均匀性的光通量或对其任何变化进行补偿。

正如我们将在涉及 MOR 测量准确度的一节中见到，透射表基线所取的值决定于 MOR 的测量范围，一般认为该范围在基线长度的 1 倍到 25 倍之间。

透射表测量性能的进一步改进可在不同距离处采用两个接收器或后向反射器以便扩展 MOR 测量范围低限(短基线)和高限(长基线)两端。这种仪器称为“双基线”仪。

在一些基线很短(几米)的场合中，光电二极管已用作光源，即近红外单色光。然而，一般建议使用可见光谱中的多色光以获得具有代表性的消光系数。

9.3.3 测量散射系数的仪器

大气中光的衰减是由散射和吸收引起的。工业区附近的污染物的出现，冰晶(冻雾)或尘埃可使吸收项明显增强。然而，在一般情况下，吸收因子可以忽略，而经由水滴反射，折射或衍射产生的散射现象构成降低能见度的因子。故消光系数可认为和散射系数相等。从而，用于测量散射系数的仪器可用于估计 MOR。

测量通常通过把一束光汇聚在小体积空气中，以光度测量的方式确定在充分大的立体角和并非临界方向上的散射光线的比例，从而使散射系数的测量可方便地进行。假定已把来自其它来源的干扰完全屏蔽掉或这些光源已受到调制，则这种类型的仪器在白天和夜晚就都能使用。散射系数 b 可以写成如下形式的函数：

$$b = \frac{2\pi}{\phi_v} \int_0^\pi I(\phi) \sin(\phi) d\phi \quad (9.15)$$

这里 ϕ_v 是进入空气体积 V 中的光通量， $I(\phi)$ 是与入射光成 ϕ 角方向上散射光的强度。

应注意 b 的准确测定要求对从各个角度射出的散射光进行测量和积分，实际的仪器是在一个限定角度内测量散射光并基于在限定积分和全积分之间的高度相关性。

在这些仪器中使用了三种测量方法：后向散射，前后散射和在一宽角度内的散射的积分。

(a) 后向散射。在这些仪器中（图 9.4），把一束光线聚集在发射器前面一小块体积空气中，接收器装置在同一机壳内且位于光源下面，接收取样空气块的后向散射的光。

几位研究者试图找到能见度和后向散射系数之间的关系。但是普遍认为那种相关性并不理想。

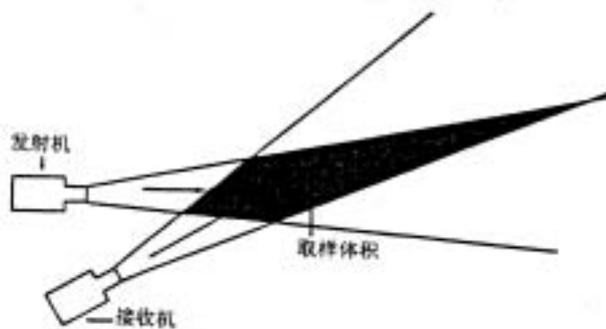


图 9.4——能见度仪测量后向散射

(b) 前向散射。几位作者认为最好的角度在 20° — 50° 之间，因此该仪器由发射器和接收器组成，光束之间的夹角为 20° — 50° 。另一种排列方式就是在发射器和接收器之间的中途放置一个光栏或分别在距发射器或接收器一短距离处放置两个光栏。图 9.5 表示所采用的两种结构。

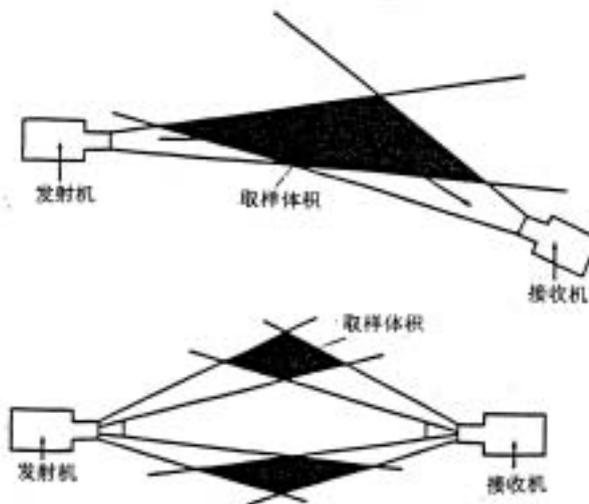


图 9.5——能见度仪以两种设置方法测量前向散射

(c) 宽角度内的散射。如图 9.6 所示,这种通常称为积分能见度仪,是以测量尽可能宽的角度(理想为 0° — 180° ,但实际上大约为 0° — 120°)的原理为基础的。接收器设置在垂直于发射宽角度光的光源轴的位置上。尽管在理论上这样的仪器比在很小的散射角范围测量的仪器给出更好的散射系数估计值,实际上却较难防范仪器在其取样空气中消光系数出现的变异。积分能见度仪并未广泛地用于测定 MOR,但这种仪器却常用于测定污染物。

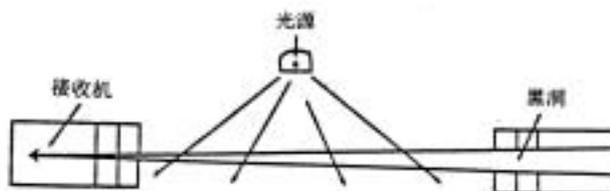


图 9.6——能见度仪测量宽角度内的散射光

在以上的所有仪器中,如大多数透射仪一样,接收器中由光检测器单元或光敏二极管组成,使用的光源是光脉冲(例如加入氙气中的高强度放电)。

此类仪器只要求限定空间(一般为 1—2m)。因此,当没有能见度目标物或光源可资利用时(象船舶、道路旁等),此类仪器是有用的。由于测量只与很小体积的空气有关,对该处大气的普遍状况的测量代表性可能会产生疑问。不过,这种代表性可以通过取大量样本或测量值的平均来改善。另外,有时可采用删除极端值的方法来平滑测量结果。

使用此类的仪器常局限于特殊的应用场合(例如高速公路的能见度测量,或决定是否雾出现)或当 MOR 测量不需要太精确时。由于此类仪器可在较大的测量范围内测量 MOR 以及与透射仪相比对污染的敏感性相对较低,目前它们更多地用于自动气象观测系统。

9.3.4 仪器的安置

测量仪器应设置在能确保测量对预定目的具有代表性的地方。因此,为了一般的天气目的,仪器应安装在远离局地大气污染的地方,例如烟、工业污染、多尘路面等。

用于测量消光系数或散射系数的空气体积应与观测者的眼睛在同一水平面上,大约在地面以上 1.5m 左右。

必须记住用于测量散射系数的透射表和仪器必须安装得使太阳在一天内的任何时刻都不出现在仪器光场内,对纬度直到 50° 的地方,可采用水平地顺南北光轴设置(偏差可达 $\pm 45^{\circ}$),或采用屏蔽或挡板来达到这种要求。

对于航空目的来说,测值代表在机场取得的状况,这种状况同机场的具体的业务操作紧密相关,在第二编第 1 章中概述。

仪器应按照生产厂家的说明书安装,特别注意校准透射仪的发射器和接收器在一条直线上并正确调准光束。安装发射器和接收器的立柱应具有机械坚固性,(当安装在机场上时仍有可能不够坚固)以避免在结冻。特别是在解冻时地面位移造成的准直性偏离。另外,

外露装置在热应力作用下必须不致产生形变。

9.3.5 校准和维护

为了获得满意和可靠的观测结果，对用于 MOR 测定的仪器必须在生产厂家规定的条件下操作和维护，并且持续保持良好的工作状态。依照生产厂家的建议定期检查和校准以确保最佳性能。

应在非常好的能见度下（超过 10—15km）定期对仪器进行校准。必须避免由于大气状况不同而导致的错误校准，例如，当有强大的上升气流或暴雨之后，接近地面的气层中的消光系数会有明显的改变。如果在现场（例如机场）同时使用几种透射表，在其测值中可观测到偏差。在这种情况下，不应进行校准。

注意对大多数透射表，必须定期清洁光学表面，对某些仪器必须安排每天的维护工作，特别是在机场。在主要的大气扰动之中或之后必须对仪器进行清洁，因为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，导致 MOR 的主要测量误差。降雪会堵塞光学系统，同样会造成测量误差。通常将加热系统设置在光学系统前侧，当出现这种情况时用以改善仪器性能。有时采用吹风系统以减少以上问题并可减少清洗的次数。然而必须指出，此类吹风和加热系统会产生比周围空气更热的气流，反而可能影响气团消光系数的测量。在干旱地区，沙尘暴和扬沙会堵塞光学系统甚至损害它。

9.3.6 在测量气象光学视程和准确度估计中的误差来源

概述

所有用来测量 MOR 的实际使用的仪器相对于观测员所观测的大气来说只是采集了相当小范围的大气样本。仪器能对 MOR 提供一个准确的测量仅当它们所取样的空气体积代表了观测点周围以 MOR 为半径的区域内的的大气。很容易设想在出现不均匀的雾或局地的雨或雪暴的情况下，仪器的读数可出现误导。然而，经验表明这种情况并不经常发生，用仪器连续监测 MOR 常会比不用仪器的观测员提前检测到 MOR 的变化，尽管如此，对 MOR 的仪器测量的理解仍必须小心谨慎。

当讨论测量的代表性时，另一个应该加以考虑的因素是大气本身的均匀性。对所有的 MOR 值，一个小体积大气的消光系数通常快速地不规则地波动。由无内装平滑或平均系统的散射仪和短基线透射表得到的单个 MOR 测量值，可表现出明显的偏差。因此有必要进行多次采样并将它们进行平滑或平均以获得 MOR 的具有代表性的值。对 WMO 第一次能见度测量相互比对（WMO，1990b）的结果分析表明，对大多数仪器来说平均时间超过 1min 没有什么好处，但是对“噪声最大”的仪器而言平均时间取为 2min 是合适的。

遥测光度表和目视消光表的准确度

以消光系数为基础的目测很难作好，主要的误差来源是人眼功能的可变性和不确定性。这些误差已经在涉及目测估计 MOR 的相应的节中阐述过了。

透射表的准确度

在透射表测量中的误差来源可以概括为：

- (a) 发射器和接收器的准直性不正确；
- (b) 发射器和接收器安装的刚性和稳定性（地面结冻和解冻、热应力）不完善；
- (c) 灯泡的老化和中心位置不正确；
- (d) 校准误差（能见度太低或在不稳定的情况下进行校准从而影响消光系数）；
- (e) 系统的电子设备的不稳定性；
- (f) 消光系数作为低通信号进行远距离输送时受到电磁场的干扰（尤其是在机场），最好是对此类信号进行数字化；
- (g) 来源于日出或日落的干扰和透射表初始定向不良；
- (h) 大气污染沾污光学系统；
- (i) 局地大气状况（阵雨和强风、雪等）导致不具代表性的消光系数读数或背离 Koschmieder 定律（雪、冰晶、雨、沙等）。

若在仪器光学路径上的消光系数能代表 MOR 范围内任何一处的消光系统值，使用经正确校准并良好地维护的透射表应能提供具有良好代表性的 MOR 测量值。然而，透射表只在一个有限的范围内能提供准确的 MOR 测量，根据对基本透射表公式（见方程 9.7）取微商，即可描绘出 MOR 的相对误差曲线，图 9.7 表示相对误差如何随透射变化而改变，此时假定透射因数 T 的测量准确度为 1%。

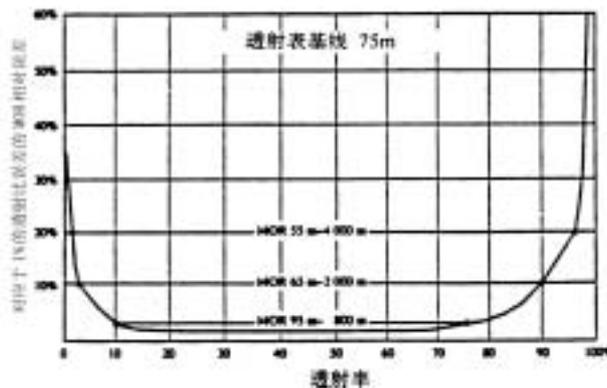


图 9.7——气象光学视程的测量误差表示成透射比误差 1% 的函数

这种 1% 的透射误差值对许多旧式仪器来说可认为是正确的，其中尚不包括仪器的漂移、光学组件积尘、或由于现象本身引起的读数分散。如果准确度降到 2%—3% 左右（考虑其它因素在内），那么图中垂直轴给出的相对误差必须乘以同样的因子即 2 倍或 3 倍，还应注意到在曲线的两端相对 MOR 测量误差呈指数增长，从而决定了气象光学视程测量范围的上限和下限。对基线为 75m 而言，若在每一个测量范围的末端，对 5%、10% 或 20% 的误差均可接受，则曲线所示的例子就表明测量范围的限制。对于 MOR 测量范围在基线长度的 1.25 倍和 10.7 倍之间，假设 T 的误差为 1%，可以推断相应的 MOR 误差应小于或等于在 5%。当 MOR 小于 0.87 倍基线长度或大于 27 倍该长度时，相应的 MOR 误差会超

过 10%。测量范围超过越多，误差增长越快且变得无法接受。

然而，从 WMO 第一次能见度测量相互比对 (WMO, 1990b) 的结果表明，适当校准和维护得最好的透射表，当 MOR 高达 60 倍于其基线时可提供 MOR 的测量值只有约 10% 的标准误差。

散射仪的准确度

由散射仪造成的 MOR 测量值误差的主要来源是：

- (a) 校准误差 (能见度太低或在影响消光系数不稳定条件下进行校准)；
- (b) 当校准中使用不透明散射体时，在程序或材料上缺乏重复性；
- (c) 系统的电子器件的不稳定性；
- (d) 将散射系数以较弱的电流或电压信号进行远程传输时，受电磁场的干扰 (特别是在机场)。这时最好采用数字化信号；
- (e) 日出日落的干扰，以及仪器初始取向的不良；
- (f) 光学系统受大气污染的沾污。(这些仪器和透射表相比，对其光学系统上的灰尘不那么敏感，但是严重的污秽则仍有影响)；
- (g) 大气条件 (雨，雪，冰晶，沙，局地污染等) 得出的散射系数不同于相应的消光系数。

从 WMO 第一次对能见度测量相互比对的报告结果来看，用散射仪测定低 MOR 值远没有用透射表测得准确，在其读数中表现出很大的变动性。还有明显证据表明，散射仪作为一种测量手段，较透射表受降水的影响要大一些。然而，最好的散射仪只很少或不受降水的影响，可提供 MOR 的估计值，其在 MOR 大约 100m 到 50km 的范围内，只有约 10% 的标准偏差。在相互比对中，几乎所有的散射仪都在其部分测量范围内表现出显著的系统误差。散射仪对其光学系统的污染程度显示出非常低的敏感度。

参考文献

- International Electrotechnical Commission, 1987: *International Electrotechnical Vocabulary*. Chapter 845: Lighting, IEC 50
- Middleton W. E. K., 1952: *Vision Through the Atmosphere*. University of Toronto Press, Toronto
- Sheppard, B. E., 1983: Adaptation to MOR. *Preprints of the Fifth Symposium on Meteorological Observation and Instrumentation*, Toronto, April 11-15 1983, pp. 226-269
- World Meteorological Organization, 1989 *Guide on the Global Observing System*. WMO-No. 488, Geneva
- World Meteorological Organization, 1990a: *Guide on Meteorological Observation and Information Distribution Systems at Aerodromes* WMO-No. 731, Geneva
- World Meteorological Organization, 1990b: *The First WMO Intercomparison of visibility Measurement: Final Report* (D. J. Griggs, D. W. Jones M. Ouldrige, W. R. Sparks) Instrument and Observing Methods Report No. 41, WMO/TD.401, Geneva.