

激光测斜视能见度的初步试验

赵燕曾、陶丽君、郝南军*

(中国科学院大气物理研究所)

一、引言

斜视能见度,特别是空对地斜视能见度的测量,是飞机安全着陆的重要气象保证工作之一。然而斜视能见度目前还只能根据水平能见度及目视垂直方向天空的混浊程度作粗略估计。这种估计的准确性差,带有较多的主观因素。因而研究一种能客观测定斜视能见度的探测方案及相应的仪器是十分必要的。

近十年来,国内外对激光探测斜视能见度问题作了不少工作,但都还处于原理试验阶段。我们在本所72—75年有关工作^[1,2]的基础上,提出了在水平平均假定下探测大气光学厚度及平均消光系数的简化方案,并于1977年初在机场上进行了原理试验,与飞行员目测结果对比。在试验过程中,除了用激光雷达探测大气平均消光系数外,还测量了目标、背景和天空的亮度比值,考虑了高速运动中人眼的对比感阈,这些因素在一些用大气透明度推算能见度的测量中通常是被忽略的。初步观测表明,探测原理方案在一定条件下是合理的,但所取数据不多,还需要在不同地区、不同天气条件下进一步验证原理,并简化仪器设备,以满足实用的需要。

二、观测场地及设备

1977年1—3月,我们在北京地区机场进行原理试验。观测点选在跑道南端的指挥台,与多数情况下飞机的起落地点一致。考虑到冬季烟层高度多在500米以下(通常在300米以下)以及飞机着陆前在远台和近台的规定高度,我们只观测200米、300米、500米三个高度上的空对地斜视能见度。有时还观测水平能见度和气溶胶垂直分布。观测时间多数在07—10点左右。能见度在5—6公里以上、1公里以下或缺少飞行员目视对比条件时不观测。

所用激光雷达为本所III型激光气象仪,根据观测需要红宝石激光器调整到发射能量0.4焦耳,功率40兆瓦,光束发散角约2毫弧度,其他参数同前。激光雷达配有数字式激光能量监测器,测量发射能量的相对值,用以校正回波幅度,消除能量起伏带来的影响。

1978年11月30日收到。

* 参加过这一工作的还有伍少明、郑钰、黄其荣等同志。

三、工作原理

1. 斜视能见度方程 设目标物视亮度为 B_T , 背景视亮度为 B_G , R 是能见度, ε 是对比感阈, 则按能见度定义可推出如下方程 (见 [1]):

$$\varepsilon = c^* \frac{e^{-\int_0^R \sigma(r) dr}}{e^{-\int_0^R \sigma(r) dr} + B(R)/B_T^*}, \quad c^* = \frac{B_T^* - B_G^*}{B_T^*} \quad (1)$$

式中 B_T^* 、 B_G^* 分别为目标和背景的真亮度, σ 是大气消光系数, $B(R)$ 是观测者到目标之间的气柱亮度. c^* 是目标的真反差, 它决定于背景与目标的反射率特性及光源的特性.

假定低空气溶胶相对谱分布随高度变化不大, 而且气柱的照明是均匀的, 则经过简单推导可得气柱的亮度

$$B(R) = \sigma \left[I_0(\theta_0, \varphi_0) x(\alpha_0) + \int_{4\pi} B_\infty(\theta, \varphi) x(\alpha) d\omega \right] (1 - e^{-\int_0^R \sigma(r) dr}) \quad (2)$$

式中 I_0 是太阳的直接辐射光强, θ_0 、 φ_0 分别是阳光与 z 轴的交角及方位角, $B_\infty(\theta, \varphi)$ 是散射照明的亮度, $x(\alpha)$ 是散射函数, 即单位入射光强下单位散射截面的粒子群在 α 角度上单位立体角内的散射光通量, α 是散射光与入射光的夹角.

$$\text{令 } I_0(\theta_0, \varphi_0) x(\alpha_0) = K_1, \quad \int_{4\pi} B_\infty(\theta, \varphi) x(\alpha) d\omega = K_2,$$

$$\sigma(K_1 + K_2) = K,$$

$$\text{则 } B(R) = K\sigma(1 - e^{-\int_0^R \sigma(r) dr}) \quad (3)$$

其中 K_1 和 K_2 分别表示一次散射光和二次以上的散射光对气柱亮度的贡献.

将 (2) 代入 (1), 经简单整理, 得

$$\int_0^R \sigma(r) dr = \ln \left[\frac{B_T^*}{K} \left(\frac{c^*}{\varepsilon} - 1 \right) + 1 \right] \equiv A \quad (4)$$

$\int_0^R \sigma(r) dr$ 即从 O 到 R 路程上的大气光学厚度. (4) 式的物理意义是: 当斜程光学厚度等于 A 时, 相应的距离即为能见度.

假定大气是水平均一的, 则 σ 仅是高度 h 的函数, 因此

$$\int_0^R \sigma(r) dr = \frac{R}{H} \int_0^H \sigma(h) dh = R \bar{\sigma} \quad (5)$$

式中 $\bar{\sigma} = \frac{1}{H} \int_0^H \sigma(h) dh$ 是从地面到 H 高度的平均消光系数. 将 (5) 代入 (4), 得到简化的能见度方程

$$R = \frac{A}{\bar{\sigma}} \quad (6)$$

由 (6) 式可见, 某一高度上的斜视能见度不仅决定于垂直平均消光系数 $\bar{\sigma}$, 而且决定

于 A 的大小。在许多有关能见度的文献中,尽管讨论了目标、背景、气柱亮度的影响,但在实际推算能见度时 A 都取作常数。在以天空为背景的条件下这种近似还比较符合实际,但在空对地的斜视情况下会得到不合理的结果。在观测初期我们取 $A = 3.4$ (见 [2]), 结果计算出的能见度比飞行员目测值偏大很多,而且不同条件下偏大的数量也不一样。这说明,当观测员处于高速运动的情况下 A 比 3.4 小很多,而且不是常数。事实上,由于 B_g^* 、 B_T^* 和 K 随太阳直接辐射和散射辐射强度、视线与太阳的相对位置以及低空大气光学特性而变, A 不是常数,因而同一时刻、同一 σ , 不同方位的能见度可能有显著差异。基于上述认识,我们通过一些实际测量把不同时间和方位的 A 值计算出来,从而改善了能见度的计算结果。

2. 斜向大气光学厚度的测量 在独立散射和一次散射条件下大气回波幅度服从光雷达方程

$$v(r) = \frac{c_A \beta_\pi(r)}{r^2} e^{-2 \int_0^r \sigma(r') dr'} \quad (7)$$

式中 $v(r)$ 是回波幅度, c_A 是仪器常数, β_π 是后向散射系数, r 是距离。

在斜视情况下要从光雷达回波中提取大气光学厚度 $\int_0^r \sigma(r') dr'$ 这一信息还必须作出某种假定。一种作法是假定 σ 和 β_π 之间存在正比关系(见 [1])。我们则采用水平平均假定。

在水平平均假定下 (7) 式可以写成

$$v(r) r^2 = c_A \beta_\pi(h) e^{-2 \frac{r}{h} \int_0^h \sigma(h') dh'} \quad (8)$$

等式两边取对数后得直线方程

$$\begin{aligned} \ln [v(r) r^2] &= \ln c_A \beta_\pi(h) - 2 \left(\frac{1}{h} \int_0^h \sigma(h') dh' \right) r \\ &= \ln c_A \beta_\pi(h) - 2 \bar{\sigma} r \end{aligned} \quad (9)$$

测出同一高度不同斜距上多个点的回波幅度,用最小二乘法即可得直线的斜率 $2\bar{\sigma}$ 和截距 $\ln c_A \beta_\pi$ 。

3. 目标、背景和气柱亮度的测量 根据 (4) 式

$$A = \ln \left[\frac{B_T^*}{K} \left(\frac{c^*}{\varepsilon} - 1 \right) + 1 \right].$$

在飞机着陆的情况下, B_T^* 和 B_g^* 分别指跑道和两侧草坪的亮度,是比较简单的可测量。但 (3) 式中 K 的表达式还没有把 K 和简单的可测量连系起来,因而难以实际应用。为了得到 K 的可以实用的近似表达式,我们先考察地对空低仰角视线上的气柱亮度 $B_g(R)$ (空对地和地对空两种情况分别加脚标 e 和 g):

$$B_g(R) = K_g (1 - e^{-\int_0^R \sigma(r) dr})$$

当 $R \rightarrow \infty$ 时, $e^{-\int_0^R \sigma(r) dr} \rightarrow 0$, 所以 $K_g \rightarrow B_\infty$, 即 K_g 近似于该仰角下的天空亮度 B_∞ 。

但是, 在空对地情况下还找不到一个与 B_∞ 对应的量来近似表示 K_r 。由此自然提出一个问题: 在方位相同的空对地和地对空视线上, 如果仰角差不多时气柱亮度是否相近? 换言之, 如果用同一方位的 B_∞ 来表示 K_r 会给 A 值带来多大的误差? 为此, 我们写出 K_g 和 K_r 的表达式加以比较

$$K_g = (K_{1g} + K_{2g})\sigma = I_0(\theta_0, \varphi_0)x(\alpha_{0g}) + \int_{4\pi} B_\infty(\theta, \varphi)x(\alpha_g)d\omega$$

$$K_r = (K_{1r} + K_{2r})\sigma = I_0(\theta_0, \varphi_0)x(\alpha_{0r}) + \int_{4\pi} B_\infty(\theta, \varphi)x(\alpha_r)d\omega$$

两者的差别在于 α_{0g} 和 α_{0r} , α_g 和 α_r 的差别, 即散射角的差别。不过可以看出, K_{2g} 和 K_{2r} 的相对差值比 K_{1g} 和 K_{1r} 可能达到的相对差值要小, 因为前者是散射照明对气柱亮度的贡献, 天空散射光分布愈均匀, K_{2g} 和 K_{2r} 相差愈小。在极端情况下, 若 $B_\infty(\theta, \varphi) = B_0$, 则 $K_{2g} = K_{2r} = B_0 \int_{4\pi} x(\alpha)d\omega = B_0$, 因此如果略去 K_{2g} 和 K_{2r} , 则 K_g 和 K_r 的相对差值最大。以这种情况为上限, 我们计算了以 B_∞ 代替 K_r 给 A 值带来的误差。

在我们的观测时间内太阳的方位在东到东南, 仰角一般在 35° 以下。观测天空亮度时仰角为 4° 。飞行员报告能见度时视线俯角除一次是 30° 外, 其余都在 14° 以下。根据以上数据计算了不同的太阳仰角、方位下 α_{0g} 和 α_{0r} 的值, 再由 Sobolev^[3] 给出的特定气溶胶谱分布下的散射函数, 计算了

$$\Delta = \frac{K_{1g} - K_{1r}}{K_{1g}} = \frac{x(\alpha_{0g}) - x(\alpha_{0r})}{x(\alpha_{0g})}$$

结果表明, 在所有情况下, 若方位向北, $\Delta < 0.06$, 而方位向南时, 若视线俯角 $< 14^\circ$, 则 $\Delta < 0.37$, 俯角 $= 30^\circ$ 时, Δ 的最大值是 0.50。用 $\Delta < 0.37$, 推算出 $|\Delta A|/A \leq 15\%$, 即只考虑一次散射项时计算值与实际值的偏差不大于 15%, 如果考虑二次以上散射项时这个差值还会大为缩小。况且如果只限于观测着陆能见度, 则因视线俯角 $< 5^\circ$, $\Delta A/A$ 就更可以忽略不计了。

用 B_∞ 代替 K_r 后, A 的表达式中除 ε 外各种变量都可以测量。我们用激光雷达的望远镜对准跑道、草坪和低仰角下南北方向的天空, 测出相应的光电倍增管直流分量 i_r , i_g 和 i_∞ , 然后根据水平能见度对测点至跑道的亮度衰减作出订正(二者相距 100 米)。由于 i 正比于视亮度 B , 由订正后的值即可算出 c^* 及 B_r^*/B_∞ , 从而算出 A 值。

4. 对比感阈 ε ε 是一个较难确定的量。它除了受观测时客观条件的影响外, 还受到观测者主观因素的影响。因此 ε 因人而异。特别要指出的是观测者运动速度对 ε 的影响, 显然静止时的凝神观察比高速下的匆匆一瞥会发现更模糊的物体。平均而言, 静止情况下正常人白天观测时 $\varepsilon = 0.02$, 而高速运动下 ε 应大于 0.02。因此, 我们在计算 A 值时对 ε 取 0.03、0.04、0.05 三种值, 尔后根据目测结果加以判断。

四、观测结果分析

观测期间取得比较完整的, 可用于计算能见度并有目测值对比的有效数据约四十组左右(其中包括水平能见度)。由观测结果, 我们考察了上述方案的合理性。在这个方案

中有两个问题是需要通过观测来验证的,其一是水平均一假定下用斜率法求 $\bar{\sigma}$ 的合理性和局限性,其二是用方程(6)推算出的斜视能见度与目测值对比是否大体一致。

1. 水平均一假定的合理性和局限性 直接验证水平均一假定当然比较困难,但如果观测结果显示了 $\ln v r^2$ 和 r 有良好的线性相关,就间接证明了大气的水平均一性。

观测表明,当能见度为 1—5 公里 ($\bar{\sigma} > 0.5$)、水平距离在测点南北 1 公里内时, $\ln v r^2$ 与 r 有良好的线性关系,相关系数多数在 0.8 以上,能见度在 1—2 公里 ($\bar{\sigma}$ 在 0.8 以上)时相关系数多大于 0.9 (见图 1)。这意味着在上述情况下测站上空两公里水平范围内水平均一假定是基本成立的,此时测量误差多数情况下小于 20% (见图 2)。

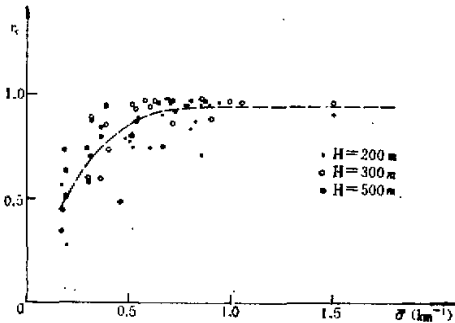


图 1 相关系数 r_c 随 $\bar{\sigma}$ 的变化

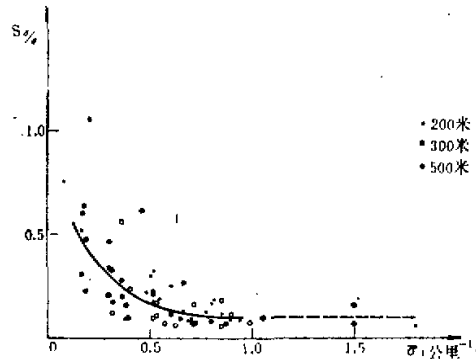


图 2 $\bar{\sigma}$ 的相对均方差 S_r 随 $\bar{\sigma}$ 的变化

但是,在能见度很好而且飞机对空气的扰动很厉害时线性相关不好。能见度 > 10 公里后,相关系数往往很小,离散度大,少数情况下甚至得出 $\bar{\sigma}$ 是负值的荒谬结果。飞机起落频繁时,回波起伏很大,如果能见度不太差,相关系数就很小,作不出一条可靠的回归直线。[前一种情况对机场来说还不会构成一种实际的限制,但后一种情况却限制了斜率法的应用,使这种观测只适于在飞机起落之前进行,除非能见度在 3—4 公里以下。这是斜率法的很大弱点。

斜率法的上述局限性是不难理解的。用脚标 x 表示平均值,加一撇表示起伏量, β_x 和 $\bar{\sigma}$ 可以写成

$$\bar{\beta} = \bar{\beta}_x + \beta', \quad \beta_x = \beta_{xs} + \beta'_x$$

同时令 $v = v^* + \Delta v$, v^* 是回波幅度的真值, Δv 读是数误差。将上述表达式代入(9),得

$$\ln v^* r^2 = \ln c_A \beta_{xs} - 2\bar{\sigma}_x r + \left(\frac{\beta'_x}{\beta_{xs}} - \frac{\Delta v}{v^*} - 2 \int_0^r \sigma' dr \right)$$

括弧中的三项是 $\ln v r^2$ 的随机脉动量。

$\int_0^r \sigma' dr$ 是比较小的一项,因为 0 到 r 间 σ' 有正有负,积分的结果使 $\int_0^r \sigma' dr$ 的均方差要小于 σ' 的均方差。如果 σ' 的相关长度 $\ll r$, 则这一项与 $2\bar{\sigma}_x r$ 相比可以忽略不计。 $\frac{\Delta v}{v^*}$ 的均方差通常控制在 ~ 0.05 。因此,引起 $\ln v r^2$ 起伏的主要因子是 β'_x/β_{xs} 。若 $\ln v r^2$ 的均方差

是 S , 则回归直线斜率的均方差 $S_b = S/\sqrt{\sum(r_i - \bar{r})^2}$. 当 S_b 可以和 $2\sigma_a$ 相比时, 用斜率法求 σ 就很不可靠了, 除非大大增加观测次数. 观测表明, β_a/β_{a0} 常常和 σ 有反相关, 即能见度好时回波强度的起伏大, 因此斜率法在能见度好时不适用. 飞机扰动厉害时情况也是如此.

能见度很好时, 偶尔出现 $\ln vr^2$ 随 r 略有增加的情形, 这可能是由于 β_a 和 σ 的水平变化引起的. 当 β_a 和 σ 很小时, 水平方向微小的绝对变化可能产生不可忽略的相对变化

2. 斜视能见度目测值与仪器观测值的对比 目前获得空对地斜视能见度目测值的唯一办法是听取飞行员的报告, 但可靠性和准确性都较差. 在近距离(1—2 公里)只能估准到 0.5—1 公里, 远距离(> 2 公里)只能估准到 1—2 公里. 加上飞行时间地点与观测时间地点的不完全一致, 飞行时地面目标物的不固定, 飞机速度、飞行员状态的差异等

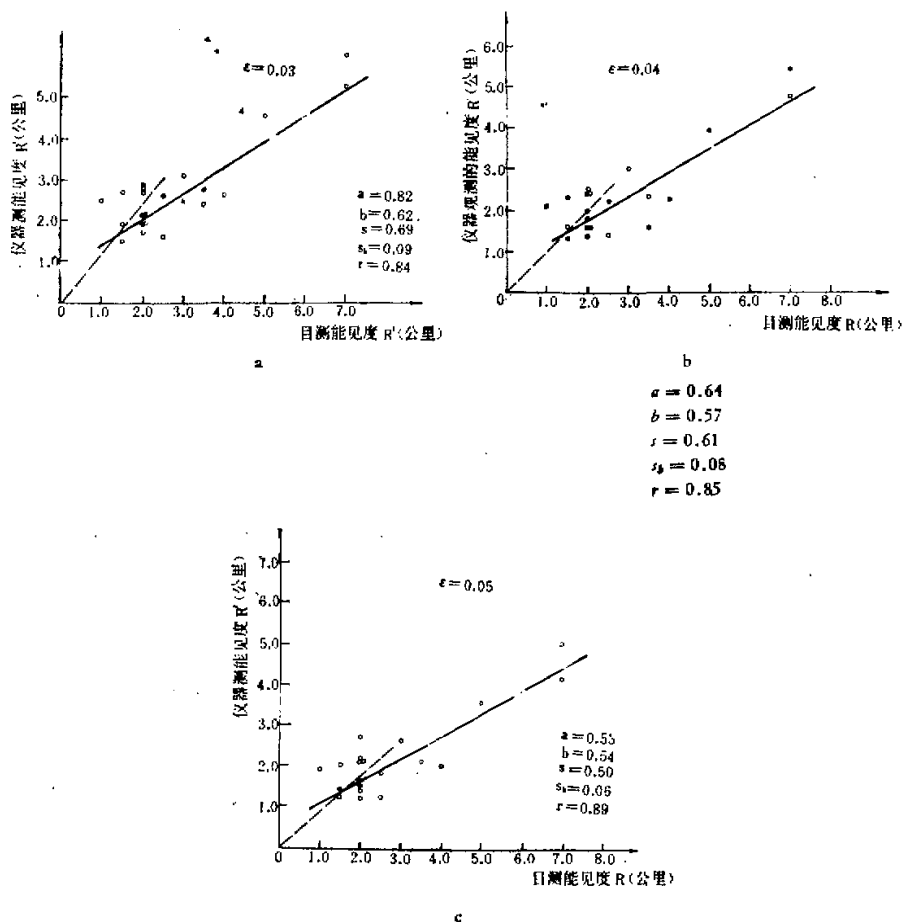


图 3 斜视能见度仪器观测值与目测值的比较

复杂因素,使得目测值与仪器观测的对比原则上只能是一种半定量的粗略对比。但是,多次观测对比的统计结果仍能反映观测方案的合理性。我们对对比结果作回归分析,相关系数还达到了 0.84—0.89。能见度均方差虽有 600—700 米,但有一半来自于目测误差。因此可以预计,如果有更精确的目测值,相关系数会进一步提高,均方差会大为缩小。对比结果见图 3a、3b、3c。(图中各参数的意义: a —截距, b —斜率, S —能见度均方差(公里), S_b —斜率均方差, r_c —相关系数。)

如图所示,目测值与仪器观测值对比的回归直线不通过原点,比值 R'/R 随 R 增加而减小。可能是能见度好时目测值有系统性偏大的倾向。在 $R < 2.5$ 公里、目测准确性较好时,我们统计了 R'/R 的平均值。 $\varepsilon = 0.03$ 时 $R'/R > 1$; $\varepsilon = 0.04$ 时, $R'/R \simeq 1$; $\varepsilon = 0.05$ 时 $R'/R < 1$ 。这说明,在飞行条件下 ε 取 0.04 比较合适。

综上所述,用斜率法求垂直方向大气平均消光系数 $\bar{\sigma}(h)$,受 β_* 和 σ 的起伏及大气水平平均一程度的影响,只有在 $\bar{\sigma} > 0.5 \sim 0.6$ 的条件下才能得到可靠的结果。而用文献[1][2]上的方法,可以求出特定路径上的光学厚度,不受水平平均一条件的限制和散射系数起伏的影响。但层结稳定、垂直混合差时,各高度 K 取作常数会引进一定误差,而且误差大小不易判断。因此这种方法在中等以上能见度范围可能比较合适。今后应同时用以上两种方法计算斜程光学厚度及能见度,并与较精确的目测能见度值对比。通过不同方法的比较,进一步改善斜视能见度的观测方案。

五、结 论

1. 在能见度 1 至 5 公里范围内本文所述的观测方案初步看来是可行的。在推算能见度时,必须同时测量目标、背景及视线方向低仰角天空亮度的比值,并选择合适的对比感阈 ε 。
2. 所得结果仅仅是初步的,尚需在更复杂的天气条件下、在不同地区反复验证原理并比较大气光学厚度的不同的计算方法。
3. 本文所述方案只供原理试验之用,要投入实用还需进一步简化,以提高观测速度和简化设备。
4. 1 公里以下的能见度探测必须从回波中排除多次散射的贡献,这一问题尚待进一步研究解决。

我们对机场气象台、指挥台、飞行员同志及我所一室 104 组全体同志的协助表示深切感谢。

参 考 文 献

- [1] 激光测定大气消光系数及其在能见度探测上的可能应用,《激光在气象探测中的应用》,科学出版社,1973。
- [2] 吕达仁、魏重、张建国,激光探测能见度的实验研究,《大气科学》,55, 1976。
- [3] Sobolev, Light Scattering in Planetary Atmosphere.

AN EXPERIMENT OF SLANT VISIBILITY MEASUREMENT BY LIDAR

Zhao Yan-zeng, Tao Li-jun and Hao Nan-jun

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

A primary experiment was carried out to measure the slant visibility in an airfield by lidar in 1977. In order to extract the optical thickness from the lidar equation the "horizontally homogeneous" model was used for lower atmosphere. Observations show that the "horizontally homogeneous" condition is met provided that the visibility R ranges from 1 to 5 km. It is important to point out that the parameter A in the visibility equation can no longer be taken as a constant along the "air-to-ground" direction. The brightness contrast should be measured simultaneously, and the contrast threshold ϵ will be larger than 0.02 when the observer is in high speed motion. In comparison with pilot observed visibility it was found that 0.04 is a better choice for ϵ .