

激光探测机场斜视跑道视程的实验研究

邱金桓 黄其荣 赵红接 郑斯平

(中国科学院大气物理研究所)

李树蓬

(中国民航上海管理局)

提 要

本文主要分析了采用激光雷达、载人热气球和光度计等设备于合肥和屯溪两个机场进行斜视跑道视程的探测实验结果:光度计主要用于研究近地平天空亮度特性以及目标物和背景的反射特性,根据这些特性我们进一步改进了斜视能见度的理论计算公式,对于100至4000m的能见度变化,激光探测的机场斜视视程与从气球和飞机上人目测的斜视视程比较吻合,对500m以下的能见度,两者的偏差一般小于100m,对1000至4000m的能见度,偏差一般小于10%。

一、引 言

斜视能见度的探测对于保证飞机的安全着陆是非常重要的。斜视能见度主要依赖于倾斜路径消光系数分布,激光雷达正是探测后者的有效手段。国内外许多学者作了不少工作研究激光探测斜视能见度的原理^[1-3]。赵燕曾等人^[1]于1977年在北京地区机场采用激光雷达探测消光系数分布,采用光度计测量目标物和背景的真亮度以及低仰角的天空亮度,再由这些资料确定斜视能见度,其结果与飞行员目测的结果较吻合,但对低于1km的能见度,由于缺乏飞行员的目测资料,没有加以研究。邱金桓根据辐射传输的计算资料^[4],拟合得到了关于向下的平均天空亮度与近水平天空亮度之比的一个经验表达式,提出了一个新的计算斜视能见度公式,避免采用光度计测量目标物和背景的真亮度,但对目标物和背景作了“朗伯反射体”的假设。考虑到机场主要关心低能见度的情形,本文侧重研究100m至4000m范围内斜视能见度的探测问题。此外,本文采用光度计研究了近水平天空亮度特性以及机场水泥跑道和跑道上的白漆梯子步标志的反射特性,引进“有效反射率”的概念,改进了斜视能见度的理论计算公式。

二、观 测 实 验

实验分两个阶段,第一阶段于1985年11月在安徽合肥机场进行,主要研究1km至4km的能见度。第二阶段于1986年3月在安徽屯溪机场进行,侧重于低于1km的能见度探测。图1为现场观测设备布局示意图。激光雷达置于离机场跑道始端300m的位

1986年10月16日收到,1987年4月3日收到修改稿。

置,向着跑道方向探测。热气球在跑道上放飞,气球下的吊篮可乘坐四人,气球飞行高度在 220m 以下,吊篮中两位气象观测员用眼睛对着激光雷达方向目测跑道斜视视程,其观测方向与雷达的探测方向基本上相差 180° ,这样,两者探测的斜视视程基本上依赖同一路径上的消光系数分布。跑道上每隔 50m 有一白色标志,便于吊篮上观测员目测时较准确地确定最大视程。

实验采用中国科学院大气物理研究所研制的染料调 Q 红宝石激光雷达,激光波长为 694.3nm,发射能量约为 0.9J。光度计具有 1° 视场角,其五种滤光片的中心波长分别为 450, 550, 650, 750 和 850nm

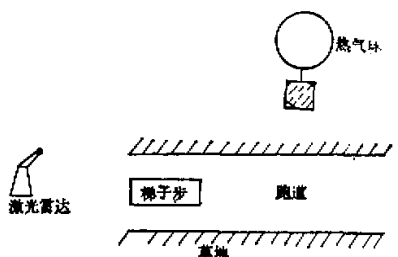


图 1 观测设备现场布局示意图

三、实验结果分析

根据理论研究^[4],在目标物和背景为“朗伯反射体”以及大气水平平均一的条件下,近水平的空对地斜视能见度可足够准确地表示为

$$R = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{0.955(1 + \sin \alpha) \cdot D(A_T - A_G - \varepsilon A_G) + 1}{\varepsilon} \right], \alpha \leq 10^\circ \quad (1)$$

(1)式中 σ 为消光系数的平均值, ε 为对比感阈, A_T 和 A_G 分别为目标物和背景的反射率, α 为飞机降落时的下滑角,通常为 3° 左右。 D 为向下的平均亮度与 2° 高度角向下的天空亮度之比值,可近似表为

$$\begin{cases} D = f_1/f_2, \\ f_1 = 2.6 + 11(\mu_0^{0.8} - 0.6)[1 + 0.6 \exp(-100\tau_T^2 \mu_0^2)] \exp(-\tau_T^{0.6}/\mu_0^{0.6}) \\ f_2 = 1 + 0.15g(1 + c_1)^6(1 - \mu_0^2)^{0.5} \exp[-(0.04\tau_T^{0.5} + 0.28\tau_T^{1.4})/\mu_0^{0.5}] \\ c_1 = 0.0466\mu_0 + \sqrt{1 - \mu_0^2} \cos \phi_0 \end{cases} \quad (2)$$

(2)式中, τ_T 为总光学厚度, μ_0 和 ϕ_0 分别为太阳的天顶角余弦和方位角, g 为不对称因子。

由光度计测量 2° 高度角向下的天空亮度信息,再由 (2) 式可近似确定总光学厚度 τ_T 和 D 值^[5]。激光雷达远距离回波信息基本上是噪音,其直流成份即天空亮度,因此实际上可省去光度计。

问题在于上述模式在大气非水平平均一以及目标物和背景不满足“朗伯反射体”条件时是否适用,下面分别加以讨论。

1. 目标物和背景的反射特性 对机场而言,目标物为白漆梯子步标志,背景为水泥跑道,或目标物为跑道,背景为草坪。根据国际民航的规定,水平跑道视程是指看到梯子步标志的最大距离。本文主要研究以该标志为目标物的情形。

用于测量目标物和背景的反射特性的标准靶,基本上符合朗伯反射体要求^[6],在 550 nm 波长,反射率为 86.4%。

图 2 表示在阴天条件下用光度计测量的水泥跑道和梯子步相对真亮度的角分布, θ 为高度角。先研究干跑道情形,接着又在跑道上洒上水以研究湿跑道情形。探测过程中,向下的天空漫射通量的变化小于 4%。如图所示,对于白色梯子步,不管干湿与否,当 θ 从 3° 至 60° 变化时,真亮度 $B^*(\theta)$ 的变化小于 22%,当 $\theta \geq 20^\circ$ 后,变化很小,基本上可视为朗伯反射体。水泥跑道的情形大为不同,对干跑道,基本上可视为朗伯反射体,但当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,与梯子步的情形相反,真亮度随着 θ 的变小而增大。对湿水泥跑道,真亮度密切依赖于 θ 角,远不满足朗伯反射体要求,当 $\theta \geq 30^\circ$ 时,湿水泥道的真亮度比干水泥道减小两倍左右,反射率大大变小。因此在雨天情形下,在垂直方向梯子步和水泥道真反差变大,空对地垂直能见度变好,这与飞行员观测的结果相吻合。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,湿水泥道的真亮度随 θ 变小显著增大,增大近两倍。有趣的是,在 3° 左右,干湿水泥道的真亮度相差甚小,表明两者在 3° 附近的角反射率基本一样。国际民航规定 $2^\circ 40'$ 作为飞机降落时法定下滑角。因此,本文引进如下的有效反射率 A^* 的概念

$$\begin{cases} A^* = \pi A(\theta = 2^\circ 40') \\ A(\theta = 2^\circ 40') = B^*(\theta = 2^\circ 40')/\pi B_0 \end{cases} \quad (3)$$

(3)式中, $A(\theta = 2^\circ 40')$ 为 $2^\circ 40'$ 高度角的角反射率, B_0 为向下的天空平均亮度, $B^*(\theta = 2^\circ 40')$ 为 $2^\circ 40'$ 高度角物体的真亮度。对朗伯反射体则有

$$A = \pi A(\theta), A^* = A \quad (4)$$

即有效反射率等于反射率,对非朗伯反射体,只要公式(1)中的反射率 A_r 和 A_g 代之以有效反射率 A_r^* 和 A_g^* ,则仍适用,于是有

$$R = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{0.955(1 + \sin \alpha)(A_r^* - A_g^* - \epsilon A_g^*)D}{\epsilon} + 1 \right] \quad (5)$$

由于 A_r^* 和 A_g^* 包含在对数内, R 对它们的观测误差并不敏感。根据上面的分析,对阴天情形,无论对水泥道还是梯子步,不管干湿与否, A_r^* 和 A_g^* 均可取干跑道时的测值。又如表 1 所示,阴天条件下, $2^\circ 40'$ 高度角水泥道和梯子步的真亮度随方位角 ϕ 的变化小于 5% (正北方向, $\phi = 0^\circ$)。因此,阴天时,可忽略 A_r^* 和 A_g^* 对太阳的方位角和天顶角的依赖关系。

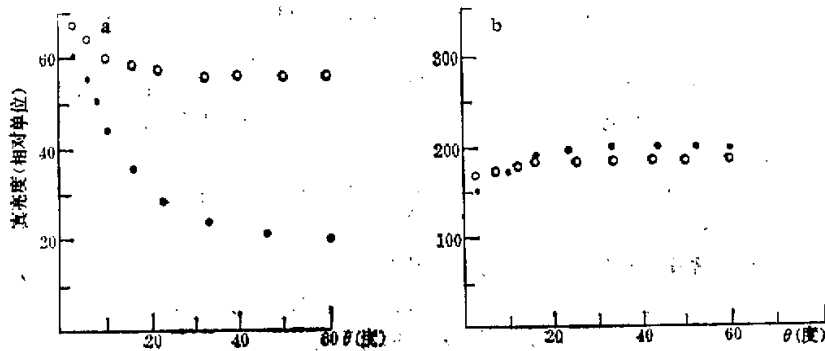


图 2 阴天下(a)水泥道和(b)梯子步相对真亮度角分布
○——干, ●——湿

表 1 阴天 $\theta = 2^\circ 40'$ 时梯子步和水泥道相对亮度随 ϕ 的变化

ϕ (度)	0	45	90	135	180	225	275	315
$B_T^*(2^\circ 40')$	220	229	225	223	218	219	224	226
$B_G^*(2^\circ 40')$	84.0	85.6	82.3	83.9	81.8	81.4	83.3	82.5

当太阳的直射光很强时, 水泥道和梯子步的反射特性都有很大的变化, A_T^* 和 A_G^* 密切依赖于太阳的天顶角和方位角。图 3 表示晴天时 $[\tau_r(550\text{nm}) \approx 0.3]$ 水泥道和梯子步的相对真亮度的角分布。观测时太阳的天顶角在 71.4° 至 69.1° 之间变化。取 $\phi_0 = 0^\circ$, 则沿着跑道方向的方位角约为 12° 和 192° , 分别称为向着太阳方向和背着太阳方向。如图所示, 不管干湿与否, 水泥道和梯子步都不满足朗伯反射体条件, 背着太阳方向, 真亮度对 θ 的变化较不敏感, 但当 $\theta \leq 10^\circ$ 时, 水泥道的真亮度随 θ 的变小有较明显的增大。向着太阳方向, 两者的真亮度都强烈依赖于 θ 角, 在 $\theta \leq 30^\circ$ 范围内, 尤为明显, 湿跑道又比干跑道情形更为突出。如对湿水泥道, $\theta = 3^\circ$ 的真亮度比 $\theta = 50^\circ$ 的亮度偏大一个数量级以上。

赵燕曾等曾由下列式子计算斜视能见度^[1]

$$\begin{cases} R = H^*/\bar{\sigma} \\ H^* = \ln \left[\frac{B_T^*}{B_\infty} \left(\frac{C^*}{\bar{\sigma}} - 1 \right) + 1 \right] \\ C^* = (B_T^* - B_G^*)/B_T^* \end{cases} \quad (6)$$

(6)式中, B_∞ 为 4° 高度角的天空亮度, C^* 为目标物和背景的真反差, 两者可由光度计测定。

$$\text{令} \quad H = \ln \left[\frac{0.955(1 + \sin \alpha)(A_T^* - \bar{\sigma} A_G^* - \bar{\sigma} A_G^*)D}{\bar{\sigma}} + 1 \right] \quad (7)$$

理论分析表明^[1,4], H 和 H^* 基本上是等价的。根据国际民航对跑道视程的定义, 本文取 $\bar{\sigma} = 0.05$ 。表 2 和表 3 分别表示如图 2 的阴天条件下和如图 3 的晴天条件下实验测定的有效反射率 A_T^* 和 A_G^* , 真反差 C^* 以及 H 和 H^* 值。对晴天且太阳高度角较低的情形, 观测结果表明, 标准靶并不能很好地满足朗伯反射体条件, 虽其真亮度随高度角变化较小, 但随方位角变化较大。我们取 $\theta = 45^\circ$, 不同方位角的亮度值的平均作为等效朗伯反射体亮度 B_0^* , 于是 A_T^* 和 A_G^* 分别确定如下

$$\begin{aligned} A_T^* &= B_T^*(\theta = 2^\circ 40') A_0 / B_0^*, \\ A_G^* &= B_G^*(\theta = 2^\circ 40') A_0 / B_0^* \end{aligned}$$

$A_0 = 0.864$ 是标准靶的反射率。

如表 2 所示的阴天情形, 当水泥道和梯子步变湿时, 有效反射率都变小, 但真反差基本不变, 取 $D = 2.6$, 则 H 和 H^* 都约等于 3, 相差不超过 4%。

如表 3 所示的晴天情形, A_T^* , A_G^* , C^* , H 和 H^* 都强烈地依赖于太阳方位角和跑道的干湿条件, 且有效反射率可大于 1。对于干跑道, 尽管向着太阳方向的真反差比背着太阳方向还大, 但由于向着太阳方向很强的气柱亮度, H^* 和 H 值比背着太阳方向偏小将近 30%, 斜视视程变差。当跑道变湿时, 有效反射率增大, 但真反差变小, H 和 H^* 值也变

小,能见度变差,特别是向着太阳方向, H 值为0.75,斜视视程只及干跑道时的三分之一左右。 H 和 H^* 值偏差小于18%,比表2所示的阴天情形大些。表3中的 H^{**} 值表示以水泥道为目标物,草地为背景时的 H^* 值。有趣的是,对干跑道, $H^{**} < H^*$,看梯子步更清楚,对湿跑道, $H^{**} > H^*$,看水泥跑道的视程反而大些。

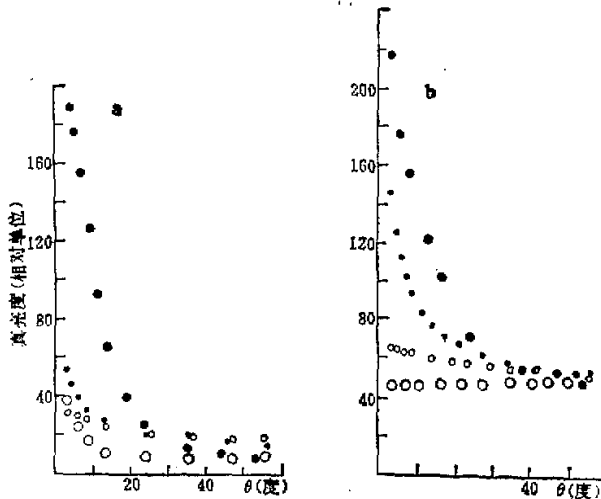


图3 晴天下(a)水泥道和(b)梯子步相对真亮度角分布

— $\phi = 12^\circ$ (干), $\circ$ — $\phi = 192^\circ$ (干) $\bullet$ — $\phi = 12^\circ$ (湿), $\circ$ — $\phi = 192^\circ$ (湿)

表2 阴天跑道的反射特性 ($\theta = 2^\circ 40'$)

A_T	A_G	C^*	H^*	H	条件
0.608	0.241	0.604	3.10	2.99	干
0.571	0.225	0.606	2.98	2.94	湿

表3 晴天低太阳高度角跑道的反射特性 ($\theta = 2^\circ 40'$)

ϕ	A_T	A_G	C^*	H	H^*	H^{**}	条件
12°	1.23	0.464	0.623	2.06	2.23	1.53	干
192°	0.539	0.260	0.525	2.89	3.12	2.42	干
12°	1.90	1.58	0.168	0.75	0.64	2.86	湿
192°	0.44	0.32	0.274	1.91	2.04	2.35	湿

2. D 值 我们主要研究总光学厚度较大,即云天或雾天下的D值。光度计用于测量天空亮度, ϕ 取 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° ,高度角 θ 取 $0^\circ, 2^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 和 90° 。D值根据这些亮度资料计算如下

$$D = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{90^\circ} \sin \theta \cdot B(\phi, \theta) d \sin \theta / \overline{B(\phi, \theta = 2^\circ)}$$

$\overline{B(\phi, \theta = 2^\circ)}$ 是 $\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 四个 2° 高度角天空亮度的平均值。晴天

时, 太阳直射光很强, 实测 D 值是困难的。

表 4 表示在云天和浓雾条件下测得的 82 组 D 值的平均值及其标准差。对 450, 550, 650, 750 和 850nm 五个波长, D 的平均值分别为 2.612, 2.595, 2.608, 2.517 和 2.549, 与 2.6 的理论计算值的偏差都小于 4%。图 4 表示 1986 年 3 月 15 日于屯溪机场观测的 D 值。当天, 满天层积云, 云高 400m 左右, 有时还有零星小雨。根据光度计探测结果, 气柱光学厚度在 60 至 110 之间变化。从上午 7:00 至下午 17:00, 共进行 15 次实验, D 值在 1.9 至 3.2 之间变化, 对 450, 550 和 850nm 三个波长, D 的平均值分别为 2.578, 2.560 和 2.275, 比理论计算值偏小, 但偏小量小于 9%。

云天条件下, 云层往往不满足水平均匀条件。从探测结果看, D 值对 2.6 的偏差小于 30%。

表 4 云天或雾天下探测的 D 的平均值及其标准差

波长 (nm)	450	550	650	750	850
D	2.612	2.595	2.608	2.517	2.549
标准差	0.375	0.329	0.342	0.298	0.316

3. 激光探测和目测的斜视视程比较

实验期间, 低于 4km 的能见度一般都在雾天、云天和雨天下出现, τ_1 较大, 故取 $D = 2.6$ 。这类天气下, 采用光度计探测的梯子步标志, 水泥跑道和草地在 550 nm 波长的有效反射率的均值分别为 0.608, 0.241 和 0.0733。由这些资料以及 $s = 0.05$ 推算的以梯子步为目标物, 水泥道为背景, 下滑角 α 为 $2^\circ 40'$ 的 H 值为 2.97, 即斜视视程的半经验公式为

$$R = \frac{H}{\sigma} = \frac{2.97}{\sigma} \approx 3.0/\sigma \quad (8)$$

若以水泥道为目标物, 草地为背景, 则有

$$R = H^{**}/\sigma = 2.3/\sigma \quad (9)$$

我们主要研究前者。

图 5 和图 6 表示我们于 1985 年 11 月 22 日在合肥机场探测的消光系数的垂直分布和跑道斜视视程。如图 6 所示, 激光探测的斜视视程和人从同一高度上目测的斜视视程吻合, 最大误差为 17%。清晨 7:30, 地面有轻雾, 粒子大量悬浮在地表附近, 消光系数随高度 Z 的加大迅速变小 (图 5), 激光探测和目测的斜视视程都相应地明显变大。从 7:30 至 10:40, 随着雾的消散, 地面的消光系数变小, 60m 高度以上变大, 到了下午 14:45, 消光系数随高度的变化已很平滑, 斜视视程随高度的变化也不大。人在不同高度目测跑道上目标时, 俯视角是改变的, 就图 6 的情形, 俯角约在 0.7 至 4.7 度之间变化。从图 2 知

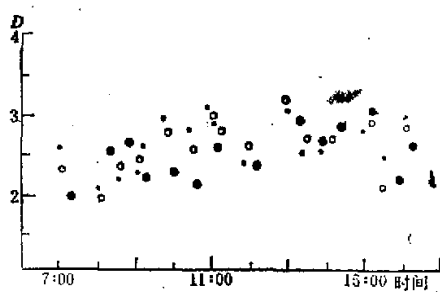


图 4 1986 年 3 月 15 日探测的 D 值
— 450nm, ● — 550nm, ○ — 850nm

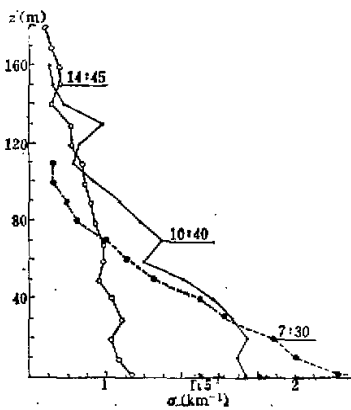


图 5 1985 年 11 月 22 日消光系数垂直分布

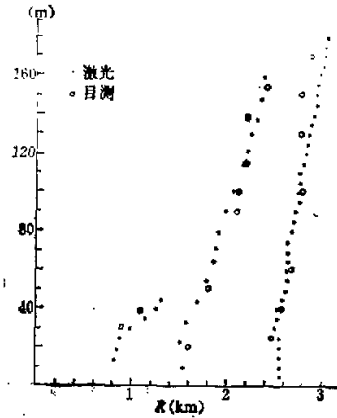


图 6 激光探测和目测斜视视程比较

道,当俯角增大时,梯子步和水泥道的角反射率之差将增大,又根据辐射传输计算,随俯角增大,气柱亮度变小,在 σ 不变的条件下,上述两个因素都将导致斜视视程增大。对 1 至 5 度的 α 变化,后一效应可忽略,而根据观测资料, $A_T^* - A_0^* - \epsilon A_0^*$ 因子的变化小于 13% ,由此引起的斜视视程的误差小于 4% 。由于因子 D , A_0^* , A_T^* 和 ϵ 都含在对数内,斜视视程对这些物理量的误差并不很敏感。如当 $D = 2.6$, $A_T^* = 0.608$ 和 $A_0^* = 0.241$ 时, $H = 2.97$, $R \approx 3/\sigma$,若 D 值或 $A_T^* - A_0^* - \epsilon A_0^*$ 值增大一倍, H 的变化小于 26% ,前者增大 20% , H 的变化小于 6% ,因此,只要这些物理量的探测误差小于 20% 也就足够了,对云天和雾天的情形,在 1° 至 5° 下滑角范围内,无须考虑 A_0^* 和 A_T^* 的角变化,且可取 $D = 2.6$ 。

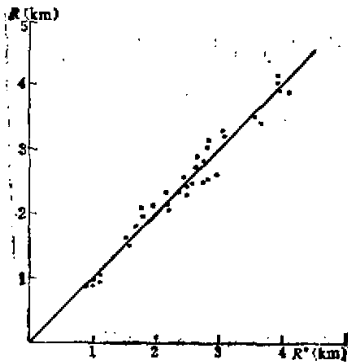
图 7 激光探测和目测的斜视视程 R 和 R^* 比较(合肥)

表 5 比较了 1985 年 11 月 28 日激光探测和飞机上飞行员目测的斜视视程 R 和 R^* 。机场的远台与跑道始端的白漆梯子步的距离为 4km ,记飞机到达远台的时刻为 t_0 ,飞行员看到梯子步的瞬间为 t_1 ,该时刻的飞机高度为 Z ,飞机降落时飞行速度为 V ,则飞行员目测斜视视程为

$$R^* = 4 - (t_1 - t_0)V$$

采用这种方法目测的结果是比较可靠的。如表所示,从 $8:10$ 至 $10:04$,一共进行 8 次对比实验,两者的最大偏差为 12.2% ,平均偏差为 6.3% 。在近 2 小时的时间间隔内,斜视视程的变化近两倍,从 $8:10$ 至 $8:18$,视程变小,之后又变大,10 点后,视程已大于 4km ,激光探测和目测的斜视视程都具有这个变化特点。

图 7 比较了 1985 年 11 月于合肥机场进行的 35 次斜视视程对比试验结果。能见度变化范围为 0.9 至 4.4km ,激光探测的斜视视程与从飞机上或气球上目测的视程之相关

表 5 11 月 28 日激光探测和飞行员目测的斜视视程比较

时间	8:10	8:18	8:30	8:43	8:52	9:01	9:56	10:04
Z(m)	140	95	130	110	122	110	210	220
R*(km)	3.08	2.17	2.85	2.47	2.71	2.47	3.90	>4
R(km)	3.14	2.34	2.54	2.37	2.76	2.70	3.65	4.39
R - R* /R*(%)	2.0	7.8	12.2	4.2	1.9	9.3	6.8	

系数为 0.948, 两者的平均偏差为 8.1%, 最大偏差为 17.6%。实验均在云天和雾天条件下进行。

表 6 比较了 1986 年 3 月于屯溪机场进行的对比试验结果, 侧重于 1000m 以下的能见度。能见度很低时, 多次散射问题值得考虑。吕达仁曾研究了激光雷达方程的二次散射订正^[7]。根据该研究, 当消光系数均一不变时, 二次散射分量正比于光学厚度 σr 。随距离 r 增大, 光学厚度增大, 多次散射分量的贡献也增大。因此, 采用斜率法计算的消光系数值偏小, 以此值作远端边界条件, 采用 Klett 方法反演雷达方程, 消光系数解也系统偏小。当能见度在 100 至 1000m 之间变化时, 在本文用于提取消光系数分布的距离空间内的光学厚度在 2.2 至 0.8 之间变化。激光雷达的接收视场角约为 2mrad, 对文献[7]中 C_2 谱, $G_1 = 0.084017$ 。本文估算了二次散射对求解消光系数平均值 σ 的效应, 发现在 0.1km 能见度情形下, 不考虑二次散射, σ 偏小 5% 左右。随着光学厚度的增大, 二次以上散射的效应逐渐显得重要^[8]。又根据 Bonnre 等人^[9]的研究, 对于能见度为 100 至 300m 的浓雾, 采用 3mrad 接收视场角的激光雷达, 不考虑多次散射所引起的计算能见度的误差为 5% 至 10%。我们的探测结果表明, 不考虑多次散射的激光探测结果往往比目测视程偏大。因此本文对消光系数作如下的经验订正

$$\bar{\sigma} = \sigma^*(1 + 0.0025\sigma^*)$$

σ^* 为不考虑多次散射的解, 对 100m 能见度, 订正量约为 8%。从表 6 看, 对 100 至 500m 的能见度, 一共作了 43 次对比实验, 激光探测和目测的斜视视程的平均偏差为 36m, 最大偏差为 87m, 对 1 至 2km 的能见度, 作了四次对比实验, 平均偏差为 224m, 最大偏差为 490m。对 500 至 1000m 的能见度, 只作了一次对比实验, 偏差为 189m, 较大的偏差跟雾很快的消散过程有关。

表 6 激光探测和目测的斜视视程比较(屯溪)

视程范围	500m 以下	1000—2000m
观测次数	43	4
平均偏差(m)	36	224
最大偏差(m)	87	490

四、结 束 语

本文通过实验验证和改善了激光探测机场跑道斜视视程的理论模式。实验结果表明, 当大气柱光学厚度较大而无太阳的直接光照的天气下, 机场的梯子步不管干湿与否,

都近似满足朗伯反射体的条件,水泥道的情形有所不同,干时基本满足,湿时不满足。为此,本文引进有效反射率的概念以取代朗伯反射体条件,使得原来的理论计算公式仍然适用。机场主要关心的是小于 2km 的能见度,而在这种天气下,大气柱光学厚度一般都较大,这时水泥道和梯子步的有效反射率在干湿不同状态下虽然极为不同,但其绝对差变化不大。

实验研究的另一重要结果是,当 τ_T 较大时, $D \approx 2.6$, 与理论计算的结果相吻合。由于上述两个结果,机场跑道斜视程具有与气象能见度一样简单的计算公式,与消光系数的平均值成反比,只是比例系数为不同的常数。我们采用激光雷达探测消光系数,再由该公式计算斜视程,在 0.1 至 4km 的能见度变化范围内,与飞机上或热气球上目测的斜视程比较吻合。

当 τ_T 较小,存在太阳的直接光照时,水泥道和梯子步的有效反射率不仅与其干湿状态有关,而且依赖于太阳的天顶角和方位角,加上 D 值依赖于 τ_T , 太阳的天顶角和方位角,使得问题变得更复杂。但是值得指出的是,对于干跑道,由太阳的天顶角和方位角, τ_T 等引起的斜视能见度的变化远不如理论上估计的那么大。考虑到 τ_T 较小时一般具有较高的能见度,就满足机场的需要而言,可以无须考虑斜视能见度对 τ_T , μ_0 和 ϕ_0 的依从关系,而采用 τ_T 较大时简化计算公式,这个问题还有待于进一步研究。

致谢: 上海民航管理局施成相等同志参加部分实验工作,特此表示感谢。

参 考 文 献

- 【1】 赵燕菁等,1980,激光测斜视能见度的初步实验,大气科学,4,168—175.
- 【2】 Hägerd, A., 1986, Extinction and visibility measurements in the lower atmosphere with UV-YAG-LIDAR, Abstracts of the 13th ILRC, 32—33.
- 【3】 吕达仁等,1976,激光探测能见度的实验研究,大气科学, No.1, 55—61.
- 【4】 邱金桓,1987,斜视能见度的数值模拟实验及其计算公式,大气科学,11,404—411.
- 【5】 Qiu Jinhuan et al., 1986, Near-horinzontal Radiance transfer Characteristics and its application in remote sensing, Abstract booklet of BIRS, 3.17.
- 【6】 夏其林等,1984,气象激光雷达仪器常数的精密标定,应用激光,4,111—114.
- 【7】 吕达仁,1982,考虑二次散射的激光雷达近似方程与低能见度的激光探测,地球物理学报, Vol. 25, No.1, 1—9.
- 【8】 Deepak, A., et al., 1982, Significance of Higher-order Multiple Scattering for Laser Beam Propagation Through Hazes, Fogs, and Clouds, Appl. Opt., Vol. 21, No. 3, 439—447.
- 【9】 Bonner, R. S. and W. J. Lentz, 1979, The Visiocirometer: a Portable Cloud Height and Visibility Indicator, ASL-TR-0042, 8—9.