

文章编号: 1001-3806(2003)05-0419-04

## 一种透射式跑道能见度激光测量仪研究

施德恒<sup>1,2</sup> 刘新建<sup>3</sup> 黄国庆<sup>1</sup> 李继芳<sup>3</sup> 赵保强<sup>1</sup><sup>(1)</sup>空军第一航空学院基础部, 信阳, 464000) <sup>(2)</sup>四川大学原子与分子物理研究所, 成都, 610064)<sup>(3)</sup>信阳师范学院物理系, 信阳, 464000)

**摘要:** 介绍了一种利用激光测量跑道水平及斜视能见度的原理与方法。通过合作目标的使用, 使得能够较简单地实现对斜视能见度的测量且大幅度地提高了仪器回波信号的幅度与灵敏度, 并由此确定了仪器可选用 PIN 光电二极管作光电转换器件; 通过透射率标尺的引入, 改善了仪器对能见度测量的相对误差曲线, 提高了能见度, 尤其是低能见度的测量精度。能见度的测量精度优于 12%。

**关键词:** 跑道视程; 水平能见度; 斜视能见度; 激光探测; 合作目标

**中图分类号:** TN206 **文献标识码:** A

### Study on transmission laser detection instrument for runway visibility

Shi Deheng<sup>1,2</sup>, Liu Xinjian<sup>3</sup>, Huang Guoqing<sup>1</sup>, Li Jifang<sup>3</sup>, Zhao Baoqiang<sup>1</sup><sup>(1)</sup> Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang, 464000)<sup>(2)</sup> Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu, 610064)<sup>(3)</sup> Department of Physics, Xinyang Teacher's College, Xinyang, 464000)

**Abstract:** This paper presents the principle and measuring method of a laser instrument used to measure runway horizontal visibility and approach visibility. By means of the co-operation target, the instrument could simply measure approach visibility, greatly increase amplitude of receiving signal and improve its sensitivity. PIN photodiode can be used as photoelectrical transformation unit to detect the amplitude of receiving signal. By means of transmission ruler, curves of relative errors are optimized. Measurement precision of visibility, especially lower visibility is improved. Measurement error of runway horizontal visibility and approach visibility is less than 12%.

**Key words:** runway visual range; horizontal visibility; approach visibility; laser detection; corporation target

## 引言

复杂气象条件下,跑道的水平能见度与飞机降落时在决断高度上的斜视能见度往往差别很大。当水平能见度大于斜视能见度时,按水平能见度标准接收或放行飞机会给飞行安全带来威胁;当水平能见度小于斜视能见度时,按水平能见度标准接收或放行飞机又可能会影响航班或训练的正常性。因此,准确对水平及斜视能见度进行测量,对保障飞机的起降安全极为重要。

目前,各机场、气象台站多沿用传统的目测法对能见度进行估测,虽快捷方便,但误差较大;也有利用飞机实测或热气球进行观测的,但在伴有降雨的

气象条件下难以使用;还有采用红外探测仪或利用激光作为辅助光源进行测量的<sup>[1]</sup>,但这些仪器多只能测量水平能见度,在测量斜视能见度时有困难,且精度较差。

本文中所述的这一透射式跑道能见度激光测量仪,既克服了以往某些测量方法在伴有降雨等复杂气象条件下较难使用、甚至不能使用的缺点,又克服了以往某些测量仪器难以测量斜视能见度,或者在测量低能见度时存在较大的相对误差的缺陷,具有较好的应用前景。

## 1 原理

### 1.1 水平能见度的测量

能见度被定义为在一定的大气透明度下,人眼能发现以水平天空为背景的黑色目标物(视场角大于 30°)的最大距离<sup>[2]</sup>。对其进行测量是以大气具有空间分布均匀的消光系数,且在均匀的天空照明

**作者简介:** 施德恒,男,1964年6月出生。教授,博士研究生。现从事光电子技术及应用及原子分子与光物理研究。

收稿日期:2002-10-15;收到修改稿日期:2003-05-17

下为前提的。

$$\text{由 Koschmider 定律}^{[3]}: \quad = e^{-V} \quad (1)$$

$$\text{很容易导出:} \quad V = \frac{1}{\ln} \quad (2)$$

式中, 为视觉反应阈值,是人眼将目标从背景中区别出来的最小亮度对比; 为观测方向单位距离上的大气消光系数;  $V$  为以水平天空为背景的黑色目标物的能见度。

对以水平天空为背景且具有较大视场角的黑色目标物,气象学上常取  $= 0.02^{[2]}$ 。于是(2)式可改写成:

$$V = \frac{1}{\ln} \frac{1}{0.02} = 3.912 \quad (3)$$

### 1.2 斜视能见度的测量

跑道斜视能见度的测量一般采用如下经验公式:

$$V = \frac{1}{\ln} \left[ \frac{0.955(1 + \sin) \cdot D \cdot (A_t - A_g - A_g)}{+ 1} \right] \quad (4)$$

式中, 为观测仰角(飞机降落时的下滑角,正常值为  $2^\circ$ ),  $A_t$  为目标的反射率;  $A_g$  为背景的反射率;  $D$  为气象常数。

对以跑道为背景的白漆梯子步目标物,(4)式可简化为:

$$V = 3/ \quad (5)$$

### 1.3 的测量

当反射目标物充满接收视场时, 由下述方程确定<sup>[3]</sup>:

$$P = P_0 \frac{D^2}{4L^2} \cdot R(\theta) e^{-2L} \quad (6)$$

式中,  $P_0$  为激光器的发射率;  $P$  为仪器接收到的回波功率;  $R(\theta)$  为当入射角为  $\theta$  时,反射目标物对激光束的回归反射系数;  $L$  为仪器与反射目标物间的距离;  $D$  为回波接收口径。

对于不同的反射目标物,  $R(\theta)$  有不同的表达式。但当反射目标物为激光合作目标用玻璃微珠时,可以认为  $R(\theta)$  是一个与  $\theta$  无关的常数<sup>[4]</sup>。于是(6)式可以简化为:

$$T = \frac{RD^2}{4L^2} \cdot e^{-2L} \quad (7)$$

式中,  $T = P/P_0$ , 为仪器接收到的回波功率与激光器的发射功率之比。令:

$$= \frac{4L^2}{RD^2} \quad (8)$$

$$\text{则(7)式可简化为:} \quad T = \cdot e^{-2L} \quad (9)$$

### 1.4 测量公式

(3)式代入(4)式中,化简后有:

$$V = - 7.824L/\ln(T) \quad (10)$$

同理,由(5)式、(9)式亦可以导出:

$$V = - 6L/\ln(T) \quad (11)$$

由于激光器的发射功率  $P_0$  易于监测得到,因此,只需测出激光的回波功率  $P$ ,就可算出透过率  $T$ 。如再能测得仪器与合作目标间的距离  $L$ ,就可利用(10)式、(11)式方便地求得水平或斜视能见度。

## 2 系统描述

### 2.1 总体结构

该测量仪主要由光学发射与接收系统、信号放大与处理系统及显示系统 3 部分组成。其详细构成如图 1 所示。

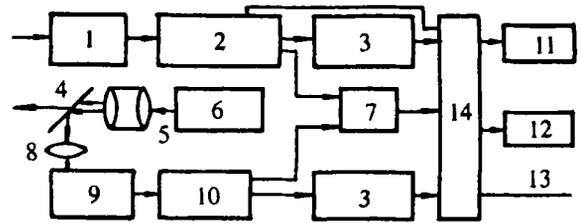


Fig. 1 Schematic diagram of the system

1—photo-electrical transformation system 2—program controllable gain amplifier 3—A/D converter 4—beam splitting mirror 5—lens 6—Nd YAG lasers 7—time circuit 8—focusing lens 9—PIN photodiode 10—voltage amplifier 11—printer 12—display system 13—output 14—computer system

### 2.2 工作过程

仪器工作时,由 Nd YAG 激光器产生的脉冲激光束,先经准直镜准直、扩束镜扩束、再经分束镜分束后发射出去。一方面,由分束镜分出的一小部分监测激光能量,经窄带干涉滤光片滤光后由 PIN 光电二极管构成的光电转换系统转变成电信号。该电信号经电压跟随放大电路放大后分成两部分:一部分( $V_1$ )去触发计时电路开门计时,另一部分( $V_2$ )则经模-数转换后送入计算机系统。另一方面,进入大气中的激光束,遇到合作目标后即被反射回来。接收镜头接收到的激光能量,经光电转换系统进行抗干扰处理后也由 PIN 光电二极管转变成电信号。此电信号送入可编程可变增益放大电路进行放大,其输出亦被分成两部分:一部分( $V_3$ )用于触发计时电路关门,另一部分( $V_4$ )则送至模-数转换电路进行模-数转换,随即送入计算机中与前述的  $V_2$  进行比较计算,以求出激光回波信号的标准幅度,并进行相关的信号处理与数字计算,直至得出所需的结果。

### 2.3 仪器的标定

对水平能见度而言,选择 3 名有经验的气象观测员并沿跑道每间隔约 2m 设置黑色目标物,用目视实测值对仪器进行标定。

对斜视能见度而言,当飞机进入五边后,按正常

下滑角(2°)着陆,由飞机对白漆梯子步目标物的实测值对仪器进行标定。

### 3 讨论

#### 3.1 光、电干扰及其抑制

电干扰的来源主要有两种,一是由电源带入,一是经各个器件间的连线进入。对于前一种干扰,采用多级 LC 及 RC 滤波器对电源进行滤波、同时输入端采用“双线”输入等方法,可较好地予以抑制;对于后一种干扰,采用屏蔽的方法亦可予以消除。

日光、月光、火焰、白炽灯等的光辐射构成了该测量仪的主要光干扰。这些光辐射主要是以背景光的形式出现的,有时也以缓变脉冲信号的形式出现<sup>[5]</sup>。对于这些干扰光,该仪器除采用窄带干涉滤光片滤光外,还采用门限技术及累加求和取平均等数据处理方法,通过这些措施的采用,也可解决光干扰问题。

另外,该仪器在硬件电路中采用的数据延时采集技术,也有助于抑制光电干扰。即仅当  $V_1, V_2$  信号处于“平顶”时(见图 2)才开始采样,并在“平顶”上等间隔采集 5 个点,平均后作为该波形的特征值。

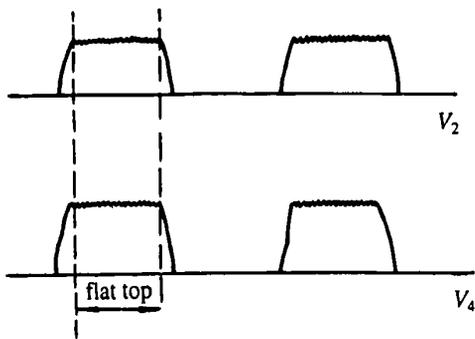


Fig. 2 Schematic diagram of the detector output

#### 3.2 灵敏度

对跑道能见度进行测量时,保证激光束垂直入射反射目标物以得到最大的反射激光能量而不是得到漫反射激光能量是极为困难的,对斜视能见度进行测量时尤其如此。为能在一个较大的偏离目标物反射面法线的角度范围内进行测量,要求该仪器要么有足够的灵敏度,要么能接收到较强的回波信号。提高仪器的灵敏度(如采用雪崩光电管作光电转换器件等)代价高昂、且难度较大,而采用激光合作目标用玻璃微珠作为反射目标物,则很容易解决这一问题:一是玻璃微珠能提供较大的有效作用角,能使能见度的测量在偏离合作目标反射面法线的一个较

大的角度内进行,这将给能见度、尤其是斜视能见度的测量带来极大的方便;二是玻璃微珠的回归反射系数可以看成是一个与入射角无关的常数,因而对合作目标的放置位置没有严格的要求,且可免去激光入射角这一参量的测量;三是玻璃微珠的回归反射系数较大,仪器可接收到较强的激光回波信号,因而能大大降低对激光发射与接收系统及后续的信号处理电路的灵敏度要求。

该仪器中,Nd YAG 激光器的脉冲能量  $E = 100\text{mJ}$ ,脉宽  $\tau = 20\text{ns}$ ,因此,激光器的发射功率:

$$P = \frac{E}{\tau} = \frac{100 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-9}} = 5 \times 10^6 (\text{W})。$$

合作目标对激光束的回归反射系数  $R = 0.2$ 。接收镜头口径  $D = 0.06\text{m}$ ,合作目标置于仪器前方  $500\text{m}$  处时,针对水平能见度的测量,由(6)式可算出:  $P = P_0 \frac{D^2}{4L^2} \cdot R(\theta) e^{-2L} = 1.14 \times 10^{-2} \times e^{-3912/V}$ 。

针对较低的能见度,如  $V = 500\text{m}$ ,有:

$$P = 2 \times 10^{-5} (\text{W}) \quad (12)$$

PIN 光电二极管响应微瓦量级的激光信号,因此采用一般的 PIN 光电二极管作为光电转换器件,即足以满足灵敏度要求。

#### 3.3 测量精度

下面分析按(10)式或(11)式进行测量时的相对误差。为此先令  $\alpha = 7.824L$  (针对水平能见度的测量),及  $\beta = 6L$  (针对斜视能见度的测量)。则可将(10)式、(11)式统一表述成:

$$V = -\alpha / \ln(T) \quad (13)$$

对(13)式微分,有:  $dV = \frac{dT}{T[\ln(T)]^2}$  (14)

或  $\frac{dV}{V} = -\frac{dT}{T \ln(T)} \quad (15)$

此即相对测量误差随透射率  $T$  及仪器与合作目标间的距离  $L$  之间的关系。对此式再微分,并令  $d(dV/V) = 0$ ,则可以求得:  $T_0 = (e)^{-1}$  (16) 可见,最小相对测量误差出现在  $T_0 = (e)^{-1}$  处,  $dV/V$  随  $T$  的变化曲线,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,能见度越低,其相对测量误差就越大,而在许多实际应用场合,对低能见度进行准确测量比对高能见度进行准确测量更有意义。故必须对低能见度测量结果甚至测量方法进行修正。

已有多种方法解决上述问题。较实用的是文献[6]中所介绍的参比测量法。该仪器采用此方法进行修正。即:将 0 和某个合适的、小于  $(e)^{-1} \times 100\%$

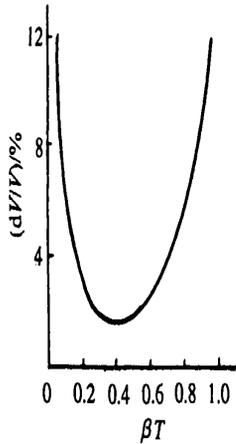


Fig. 3 Relationship between relative error and  $T$

的百分比透射区域内的调百参比  $T_r$  扩大到包括全部透射率的新标尺 ( $T$  标尺) 上。对于小于  $T_r$  的透射率  $T$ , 即低能见度的情形, 在新的透射率标尺中,  $T_r$  相对于  $T_r = 100\%$ , 如图 4 所示。

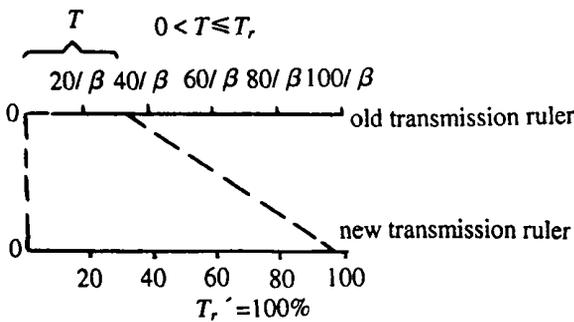


Fig. 4 Ruler of the enlarget transmission ratio

显然, 待测透射率在原标尺 ( $T$  标尺) 上的读数即为 (13) 式所指的  $T$ 。对于小于  $T_r$  的  $T$ , 在新标尺  $T$  中可以定义相对透射率:

$$T = T / T_r \tag{17}$$

即:  $T = T_r T$  (18)

于是:  $V = -1 / \ln(T_r T)$  (19)

对 (19) 式微分, 得:  $dV = \frac{dT}{T [\ln(T_r T)]^2}$  (20)

所以:  $\frac{dV}{V} = \frac{dT}{T \ln(T_r T)}$  (21)

对 (21) 式再微分, 并令  $d(dV/V) = 0$ , 有:

$$T_0 = (e)^{-1} / T_r \tag{22}$$

针对不同的  $T_r$  绘出的相对测量误差曲线, 如图 5 所示, 其中的  $T_r = (e)^{-1}$  即为图 3 所示的情形。由图 5 并结合 (21) 式可以得出, 就可读标尺而言, 当  $T_r (e)^{-1}$  时, 也即对低能见度进行测量时, 其最小相对误差在  $T$  标尺上始终位于  $T = 100\%$  处。当

$T_r (e)^{-1}$  时, 随  $T_r$  从  $(e)^{-1}$  至  $1$ , 能见度最小相对误差在  $T$  标尺上的位置由  $100\%$  到  $(e)^{-1} \times 100\%$  (36.8%)。

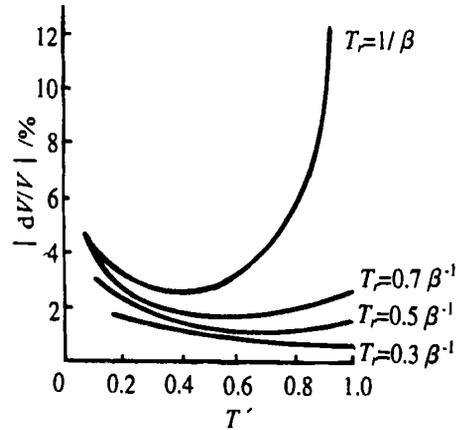


Fig. 5 Curves of relative errors depicted by equation (21) at  $|dT| = 1$

针对低能见度的测量, 为保证  $T = 100\%$ , 作者预先设置  $2^n$  个参比  $T_r$ , 并按图 4 放大  $K_n$  倍, 使  $T_r K_n = T_r = 100\%$ , 记下每个  $T_r$  及其所对应的  $K_n$  值, 存入计算机中供查表使用。实测时, 将每次测得的  $T$  值放大  $K_n$  倍, 使  $T_r K_n = T_r = 100\%$  也达到基准值, 然后再通过随机测得的  $K_n$  值在计算机中查找与相同的  $K_n$  值所对应的  $T_r$  值, 代入 (19) 式中即可方便地计算出能见度。

对高能见度的测量, 按类似的方法进行。

### 4 结 语

经过最优化设计, 该仪器光学部分的主要技术参数为: 激光器发射能量 100mJ; 脉宽 20ns; 重复频率 1 次/s; 波长 1.06μm; 发射部分的发射角为 3mrad, 接收口径 60mm, 接收视场角为 5mrad。测量精度为: 500m 时精度为 ±50m, (500 ~ 1000) m 时精度为 ±100m; 大于 1000m 时精度为 12%, 可以满足实际需要。

### 参 考 文 献

- [1] Fang Q W, Rao J H, Ying Zh X *et al.* SPIE, 1996, 2889: 292 ~ 295.
- [2] 闫 宁, 徐荣甫. 激光技术, 1992, 16(3): 1299 ~ 132.
- [3] Viezee W, Lewis R. 大气边界层探测. 北京: 气象出版社, 1990: 104 ~ 122.
- [4] 曹志峰, 张希艳, 赵志强 *et al.* 光学技术, 1997(2): 19 ~ 21.
- [5] 马玉蓉, 谢建平, 谭慈石 *et al.* 应用激光, 1987, 7(3): 141 ~ 142.
- [6] 王 韬, 孙慧洁. 仪器仪表学报, 1995, 16(1): 76 ~ 80.