

激光遥测烟、尘*

孙景群

(中国科学院大气物理研究所)

激光是六十年代初出现的一种新颖光源,由于具有单色性好、相干性强、方向性高以及大能量、大功率等特点,而日益广泛地应用于各个领域。近年来,激光在探测大气污染方面也日益显示出很大优越性,并已实际应用于大气污染监测和大气污染扩散的研究。

激光遥测烟云和大气尘埃,就是激光探测大气污染的一个方面。烟云是工厂排放的一种可见固体微粒污染物,与其同时从烟囱排入大气的,往往还伴有二氧化硫、一氧化碳等有害气体,它们随着烟云一起在大气中扩散。因此,激光遥测可见烟云,就能获得烟云及二氧化硫等大气污染物的空间分布和时间演变。大气尘埃也是一种有害的大气污染物,激光探测大气尘埃,亦可获得大气尘埃的时、空分布。因此,激光遥测烟云和大气尘埃,对于监视大气污染,了解各种天气条件下污染物的扩散和稀释,以及预报大气污染扩散等都是极有价值的。

一、激光雷达和光雷达方程

探测烟云和大气尘埃通常采用固体激光雷达。我们以红宝石激光雷达为例,简单说明其工作原理。

红宝石激光雷达主要由发射系统和接收系统两大部分组成。图1为激光雷达原理方框图。

激光雷达的发射系统包括激光器和发射望远镜。

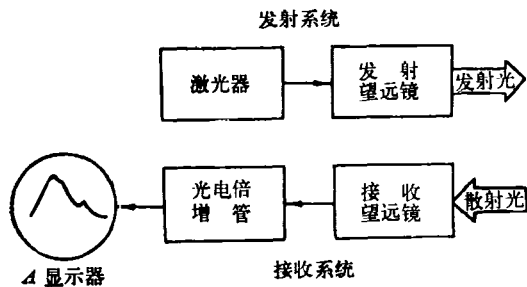


图1 激光雷达原理方框图

激光器产生一束单色、相干和能量高度集中的光脉冲,经发射望远镜以准直光束的形式发射出去。激光光束在大气中传播时,如遇到诸如大气分子、大气尘埃和烟云等目标物时,将产生散射,其中部分能量返回激光雷达,被接收系统所接收。

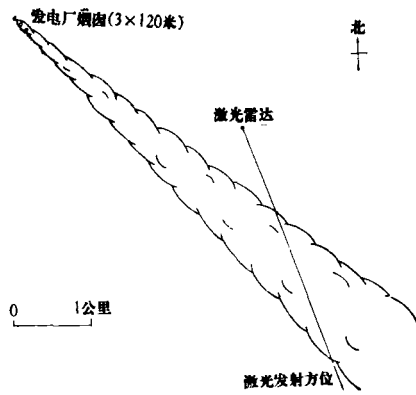
激光雷达的接收系统由接收望远镜、光电倍增管及电子放大显示系统三部分组成。接收望远镜以一定的视场角接收所观测目标物的后向散射光信号,并通过一中心波长与激光波长相同的干涉滤光片,从而提高信号与噪音之比。然后经光电倍增管把光信号变为电信号。最后经电子放大系统,在示波器的荧光屏上,以振幅(电压)—时间(即斜距)描述显示出来,供分析使用。

红宝石激光雷达所发射的波长为6943埃,能量一般从十分之几焦耳至几焦耳,脉冲功率从几十兆瓦至几百兆瓦,发射角约为1毫弧度,重复频率从几次/分至几次/秒。而接收系统的性能取决于接收望远镜有效孔径的大小、干涉滤光片的质量、光电倍增管的灵敏度,以及电子放大显示系统的性能。激光探测大气尘埃的能力通常为几公里,而探测烟云的能力有时可达十几公里。

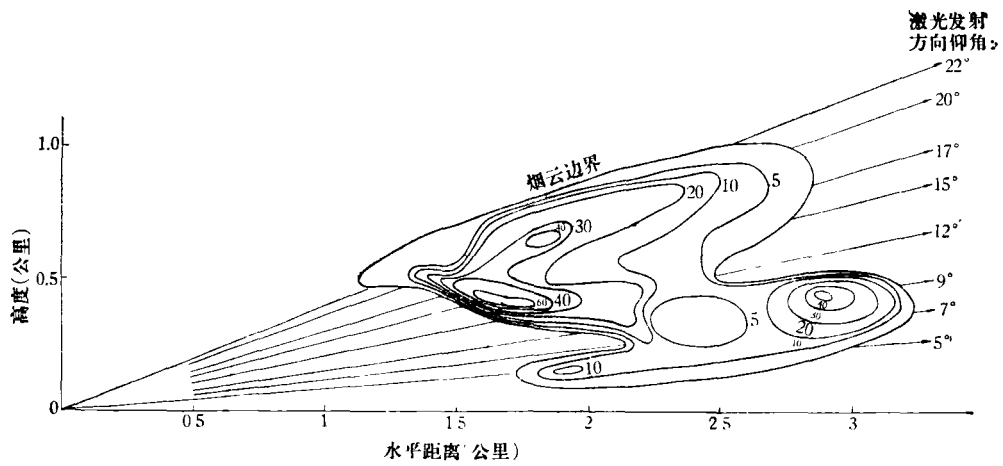
当激光雷达向大气中发射一束脉冲激光,这束激光在传播过程中,如果遇到烟云和大气尘埃等固体微粒时,这些微粒将产生子波,即向四面八方产生波长与激光相同的散射光,而其中的后向散射光即与激光传播方向反向传播的散射光,则能返回到观测点,并被仪器所接收。由于在一定条件下,后向散射光的强度与散射微粒的浓度有关,因此从被接收的后向散射光强,就能探测烟、尘微粒浓密稀疏的分布,有时甚至可以定量获得浓度的分布。

此外,脉冲激光在大气中以光速 c 传播,若发射激光后经过 t 时间,接收到了烟、尘微粒的散射光信号,

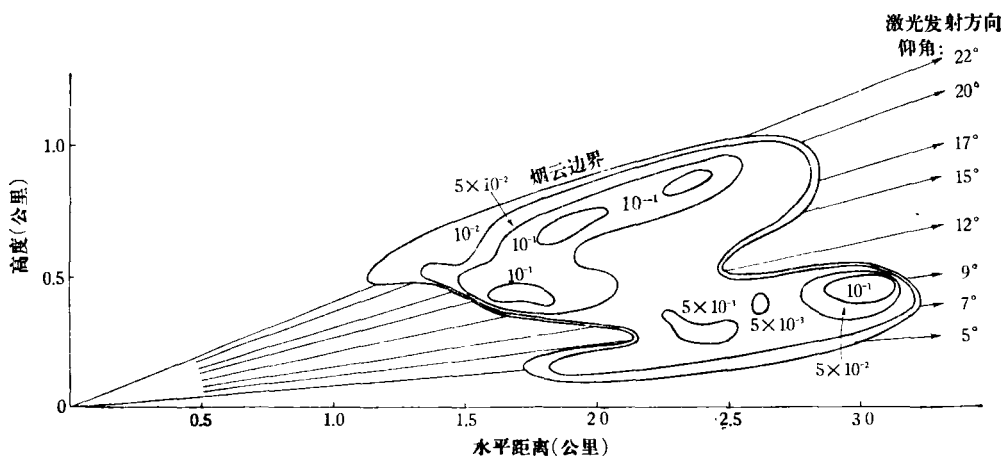
* 1975年1月22日收到。



(a) 激光发射方位和烟云扩散的平面示意图



(b) 烟云回波强度垂直剖面图(图中等值线表示烟云回波强度与背景大气回波强度之比)



(c) 烟云相对浓度垂直剖面图(图中等值线为烟云的体后向散射截面,单位是公里⁻¹·立体角⁻¹,即表示烟云相对浓度值)

图2 1974年10月27日19时激光实测某发电厂的烟云垂直剖面

那么这些微粒离观测点的斜距 $R = \frac{1}{2} ct$ 。因此,根据发射脉冲激光后不同时刻所接收到的散射光信号,就能获得不同距离处烟、尘微粒的分布情况。

由激光雷达所测烟、尘的回波波形进行定量分析时,是以激光回波信号所满足的光雷达方程为出发点。普遍的光雷达方程可简单表达为

$$V(R) = \frac{C_A \beta(R)}{R^2} e^{-1 \int_0^R \sigma(r) dr}, \quad (1)$$

式中 $V(R)$ ——激光回波电压, C_A ——由仪器性能确定的常数,称为仪器常数, $\beta(R)$ ——表征被探测物散射特性的物理量,称体后向散射截面, R 、 r ——距离, $\sigma(r)$ ——表示传输介质对激光衰减的物理量,称为消光系数。

光雷达方程表明,回波信号 $V(R)$ 正比于仪器常数 C_A ; 与 R^2 成反比; 与被探测物的散射特性有关的 $\beta(R)$ 成正比; 并与传输介质对激光的累积衰减 $e^{-1 \int_0^R \sigma(r) dr}$ 有关。

二、烟云的探测

1. 烟云扩散的探测

激光可以探测几公里远的可见烟云,甚至可以测出肉眼看不清的一些稀薄烟云。这对直观了解烟云扩散的高度和水平范围,定性了解烟云内部的不均匀结构,都是很有帮助的。

激光探测烟云扩散,是将激光雷达置于烟道侧面,并使激光雷达的方位角固定不变,而以不同仰角对准烟云不同部位,发射一组激光光束,由此获得一组激光回波波形。再将回波电压值 $V(R)$ 对距离平方反比效应进行订正后,便得到回波强度 $I = V(R)R^2$ 与斜距 R 的关系。将观测结果表示在距离—高度图上,便得到烟云回波强度的垂直剖面图。图 2(b) 为激光探测某发电厂所排放烟云回波强度的垂直剖面图。如果激光雷达的重复频率足够高,就能在短时间内获得离烟源不同距离的烟云垂直剖面图,从而得到整个烟道的空间分布。如果不同时刻探测烟道的空间分布,便能获得烟云扩散的变化过程。

激光探测烟云的时、空分布,可以提供不同天气条件下,烟云的上升高度、烟云运行的轨迹、烟云水平扩散范围、烟云的不均匀结构及其演变等资料。探测烟云的上升高度,配合其他气象资料,可以验证烟云上升高度的计算公式,这对正确设计烟囱高度是很重要的。此外,烟云高度又是正确估计地面大气污染浓度的重要参数。图 3 为激光实测某工厂 120 米高烟囱所排放烟云的上升高度。不同天气条件下,探测烟道轨迹和水平扩散范围及其演变,有利于了解大气污染的影响

范围,这对山区复杂地形条件下大气污染的扩散尤为重要。由烟云回波强度的不均匀分布垂直剖面图,则可以半定量地了解烟云浓密稀疏的不均匀分布,为细致研究烟云扩散提供依据。

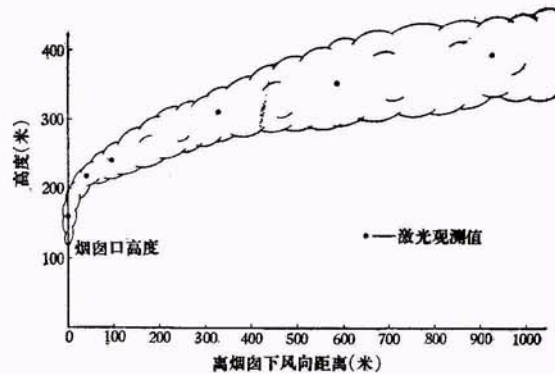


图 3 1974 年 11 月 12 日 7 时 50 分某工厂所排放烟道宽度和上升高度的实测结果

如果激光雷达采用距离平方补偿电路,进一步提高重复频率,并将激光回波信号调制成亮度。这就能得到类似于微波雷达的距离—高度显示图象,在荧光屏幕上迅速而直观地显示出烟云的垂直剖面,这对于监视大气污染的扩散带来很大方便。图 4 为激光所测烟云垂直剖面的距离—高度显示图象,所使用的激光雷达的重复频率高达 30 次/分。图中亮斑为肉眼已经不能分辨的烟云,但这种稀烟对激光的散射回波仍然很强,呈现出十分直观的烟云轮廓。图中还显示出近地面混合边界层一直延伸到 1.5 公里高,该层中气溶胶粒子均匀混合而形成大气尘埃的郁积,因而激光回波较为明亮。在 1.5 公里高度以上,回波亮度显著减弱,图象变得十分暗淡。

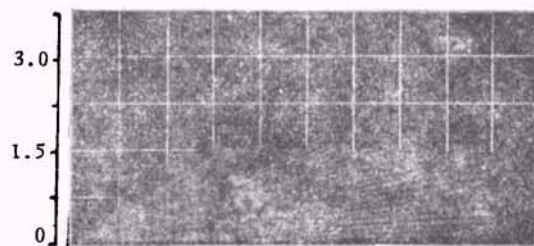


图 4 烟云的距离—高度亮度显示图象

2. 烟云浓度的探测

自 1970 年以来,中国科学院大气物理研究所已利用激光探测了人造烟云的浓度,并在实际工作中得到应用。

利用人造烟云作为示踪物质,观测它的扩散规律,是研究大气污染扩散的常用实验手段。探测人造烟云

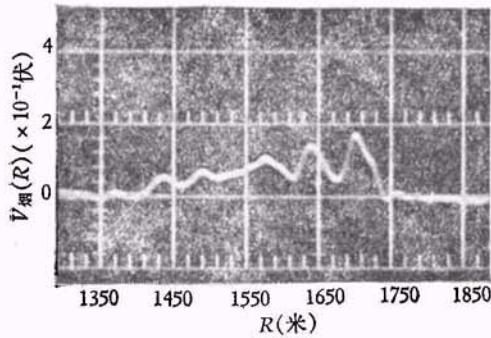
的浓度分布,可以确定在不同天气条件下,被模拟大气污染物的稀释程度和安全区域的范围。这对山区厂矿建设的合理布局、烟气排放高度等提供十分有价值的依据。此外,人造烟云浓度的探测还能进一步推算出大气湍流扩散系数,这对研究点源和多源扩散的规律,估计地面大气污染浓度的分布,都是极为重要的。几年来的实际应用表明,激光探测人造烟云浓度,已成为研究大气污染扩散的可靠、简便而有生命力的新手段。

当人造烟云粒子的几何形状、光学折射率和粒子尺度谱分布都确定不变,在烟云不太浓密的情况下,即在保证一次散射和独立散射的条件下,人造烟云粒子对激光的后向散射光强,就只与人造烟云粒子的浓度有关。于是,可由激光雷达所接收的回波波形,来探测激光穿透路径上人造烟云的浓度分布。这时,人造烟云的体后向散射截面 $\beta_{\text{烟}}(R)$ 正比于烟云粒子的数密度 $N(R)$,即 $\beta_{\text{烟}}(R) = C_1 N(R)$ 。而人造烟云的消光系数 $\sigma_{\text{烟}}(r)$ 亦正比于人造烟云粒子的数密度 $N(r)$,即 $\sigma_{\text{烟}}(r) = C_2 N(r)$ 。为叙述方便,暂不考虑大气对激光的衰减。于是,由光雷达方程可以得到激光回波电压 $V_{\text{烟}}(R)$ 与烟云浓度的关系式

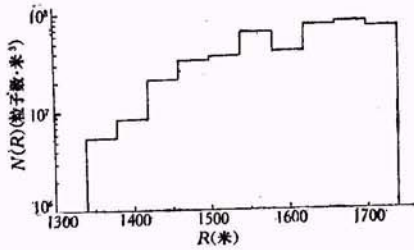
$$V_{\text{烟}}(R) = \frac{C_A C_1 N(R)}{R^2} e^{-2C_2 \int_{R_1}^R N(r) dr}, \quad (2)$$

式中 R_1 为烟云近边界的斜距。

实际采用的人造烟剂由三种物质组成:生烟剂氯



(a) 烟云回波波形



(b) 烟云浓度 $N(R)$ 随距离 R 的分布

图5 1973年10月某地探测烟云浓度的实例

化氨,按重量比占30%;燃烧剂蒽,占40%;助燃剂氯化钾,占30%。燃烧时产生大量单晶状氯化氨烟云,同时掺杂了部分未燃烧的蒽和其他杂质,所以烟云呈乳黄色。烟粒的尺度谱分布十分集中,直径稳定地集中在1—2微米之间。因此,人造烟云基本满足所要求的条件。如果事先通过实验测定人造烟云的系数 C_1 、 C_2 和仪器常数 C_A 。于是由烟云的回波电压 $V_{\text{烟}}(R)$,通过数值计算,就能获得激光穿透路径上的烟云浓度分布。图5为实测的烟云回波波形和由此而计算得到的烟云浓度分布。

如果能进一步探测工业排放烟云的浓度,则不仅可以实际监测烟云的稀释程度,定量研究不同天气条件下烟云的扩散规律,而且由于工业烟云排放稳定,这就给实际探测带来许多方便之处。

探测工业排放烟云的浓度,同样要求烟粒的光学折射率和尺度谱分布比较稳定,以及一次散射、独立散射等条件。但因无法类似于探测人造烟云浓度那样,用实验方法确定烟云的光学系数,因此给实际探测带来一定困难。不过在上述假设条件下,可引入关系式

$$\sigma_{\text{烟}}(r) = k_{\text{烟}} \beta_{\text{烟}}(r), \quad (3)$$

其中 $k_{\text{烟}}$ 为常数,可由激光实测烟云来确定。将上式代入光雷达方程(1),可得 $\beta_{\text{烟}}(R)$ 的解析表式

$$\beta_{\text{烟}}(R) = \frac{V_{\text{烟}}(R) R^2 e^{2 \int_{R_1}^R \sigma_{\text{烟}}(r) dr}}{C_A e^{-2 \int_{R_1}^R \sigma_{\text{烟}}(r) dr} - 2 k_{\text{烟}} \int_{R_1}^R V_{\text{烟}}(r) r^2 e^{2 \int_{R_1}^r \sigma_{\text{烟}}(r') dr'} dr} \quad (4)$$

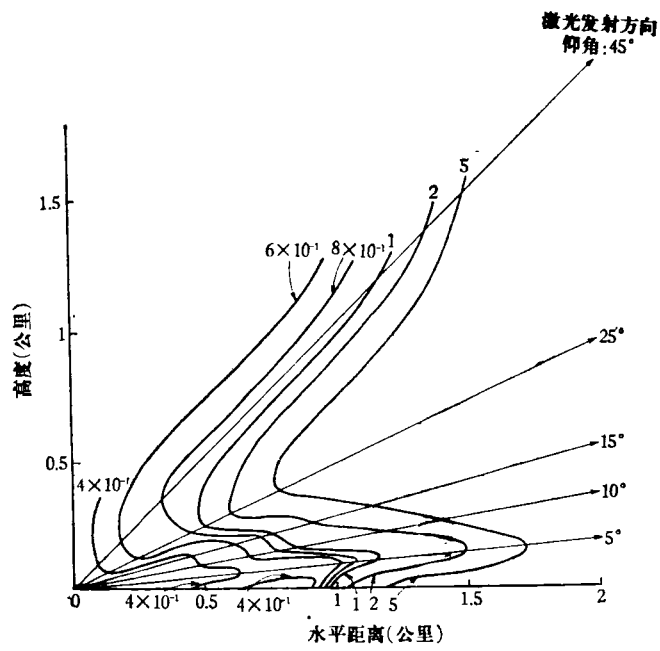
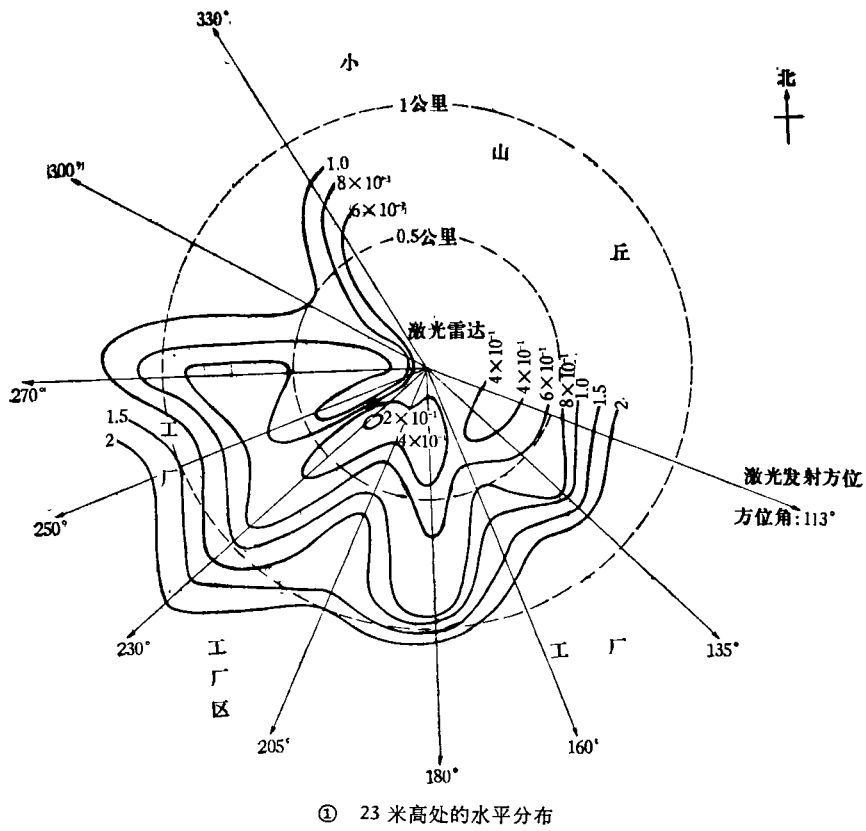
式中 R_1 为烟云近边界的斜距, $\sigma_{\text{烟}}(r)$ 为大气消光系数,由激光实测确定。于是,由烟云激光回波波形,利用(4)式经数值计算就能获得激光穿透路径上烟云体后向散射截面 $\beta_{\text{烟}}(R)$ 。

对于较为稀薄的烟云,一次散射和独立散射条件成立,于是烟云浓度 $N(R)$ 正比于烟云的体后向散射截面 $\beta_{\text{烟}}(R)$,即

$$N(R) = \xi \beta_{\text{烟}}(R), \quad (5)$$

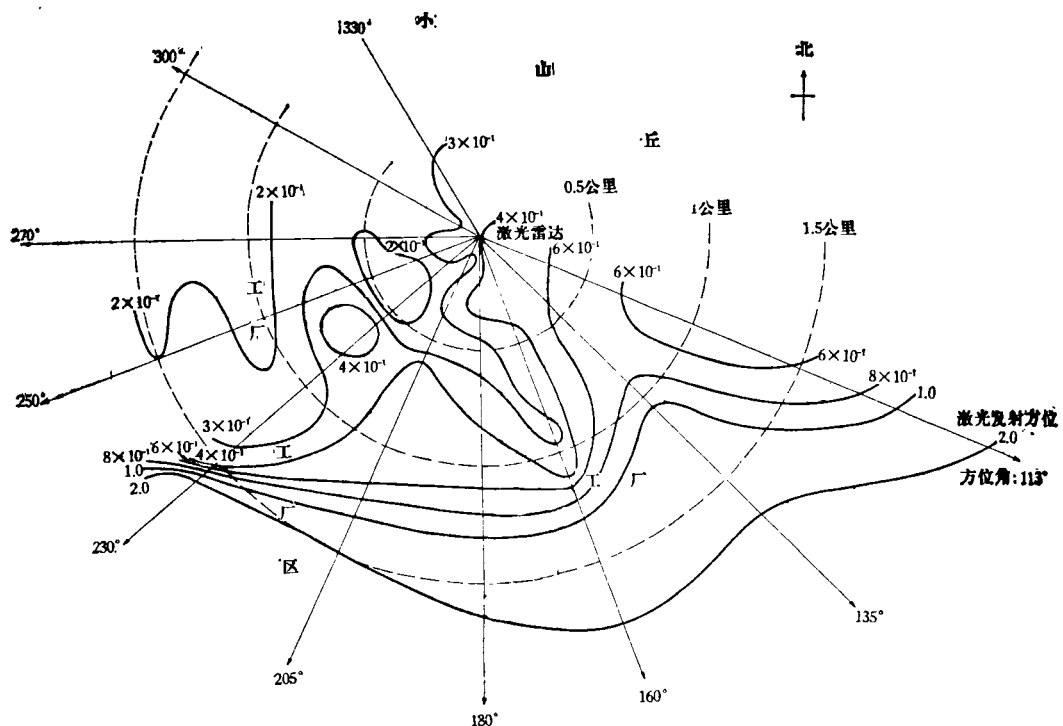
ξ 为比例常数。这样,通过激光探测烟云的体后向散射截面 $\beta_{\text{烟}}(R)$,就能获得烟云的相对浓度。如果与其他测烟浓度的方法事先作对比观测实验,就能进一步获得烟云绝对浓度的分布。

1974年10月利用激光探测了某发电厂3个120米高烟囱所排放烟云的浓度。该发电厂采用直径大部小于88微米的煤粉悬浮燃烧,燃烧较为完全。燃烧后的烟气经过两级消烟除尘措施,这时约有85%的烟粒沉降下来,尤其是颗粒较大的烟粒,大多都已沉降。因此,最后由烟囱口排放到大气中的烟云大多由颗粒较小、不易沉降的烟粒所组成,呈灰白色。估计烟云在离烟源1公里以外,烟粒的光学折射率和尺度谱分布应较为稳定。如果估计正确,那么烟云的消光系数 $\sigma_{\text{烟}}(r)$

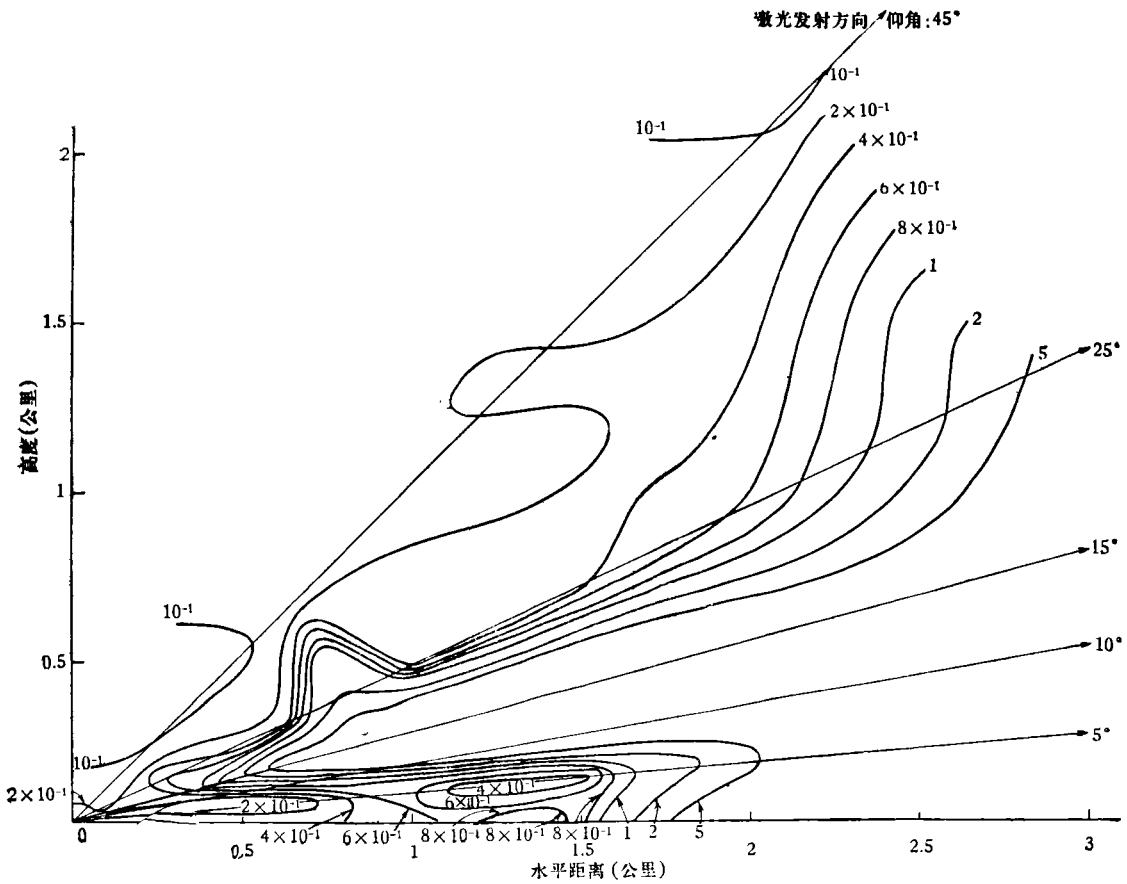


(a) 1974 年 10 月 10 日 6 时 9 分至 6 时 34 分, 大气较混浊时的观测结果

图 6 大气尘埃消光系数空间



① 23 米高处的水平分布



② 正南方向的垂直剖面分布

(b) 1974 年 10 月 11 日 19 时 1 分至 19 时 36 分, 大气透明度较好时的观测结果

分布的观测实例(单位: 公里⁻¹)

与烟云体后向散射截面 $\beta_{\text{后}}(r)$ 的比值 $k_{\text{后}}$ 应为一稳定常数, 激光实测结果证实了这一点。于是, 由激光遥测烟云的回波波形, 根据式 (4) 就能推算出激光穿透路径上烟云的体后向散射截面, 即烟云的相对浓度。图 2(c) 为激光实测烟云相对浓度的垂直剖面分布。

三、大气尘埃的探测

大气尘埃是大气污染物之一, 它来源于自然尘埃, 以及工业排放的烟灰和工业生产中的粉尘。大气尘埃的成分除了二氧化硅, 还含有对人体有害的重金属元素和致癌物质等。特别是一些直径小于 10 微米的飘尘, 因长期悬浮在大气中, 容易随呼吸进入人体, 还往往与二氧化硫起协同作用, 危害人体的健康。因此, 大气尘埃就成为监视大气污染的重要观测项目。

激光探测大气尘埃与激光探测工业烟云相类似, 由激光雷达所接收的大气尘埃的回波波形, 获得激光穿透路径上大气尘埃消光系数的分布, 从而可以得到大气空间混浊状况的时、空分布。

在低层大气, 激光回波波形主要是大气尘埃对激光后向散射光的贡献, 大气分子的作用可以忽略不计。因此, 激光大气回波波形实际上就是大气尘埃的回波波形, 它满足含有大气尘埃消光系数 $\sigma_{\text{后}}(R)$ 和大气尘埃体后向散射截面 $\beta_{\text{后}}(R)$ 的光雷达方程 (1)。若引入关系式

$$\sigma_{\text{后}}(r) = k_{\text{后}}\beta_{\text{后}}(r). \quad (6)$$

代入光雷达方程, 即可得到大气尘埃消光系数的解析表达式

$$\sigma_{\text{后}}(R) = \frac{k_{\text{后}}V_{\text{后}}(R)R^2}{C_A - 2k_{\text{后}}\int_0^R V_{\text{后}}(r)r^2 dr}, \quad (7)$$

式中 $k_{\text{后}}$ 为常数, 可通过激光实测大气尘埃的平均消光系数和平均体后向散射截面之比而求得。

1974 年 10 月在某地利用激光探测了离地 23 米高处, 大气尘埃消光系数的水平分布和正南方向的垂直剖面分布。该地区工厂林立, 排烟较多, 因此大气尘埃较为丰富, 分布也很不均匀。图 6 给出了大气较混浊和大气透明度较好时两种不同天气条件下, 大气尘埃消光系数的观测实例。

图 6(a) 为 10 月 10 日清晨的观测结果, 当时天气晴朗, 近地层形成强烈逆温, 大气十分稳定, 大量工业排放的烟尘郁积在近地层不散, 空气十分混浊, 能见度极差。这时激光实测 23 米高处大气尘埃消光系数 $\sigma_{\text{后}}(R)$ 普遍偏高, 只有离观测点 0.5 公里以内, 方向从东—南—西南一带 $\sigma_{\text{后}}(R)$ 较小, 约 4×10^{-1} 公里⁻¹。随着离观测点距离增大, 大气尘埃的消光系数普遍增大, 例如离观测点 1 公里左右, $\sigma_{\text{后}}(R)$ 约 2 公里⁻¹。继续往南一带延伸, 由于烟囱林立, 郁积的烟尘更为严重, 因

此 $\sigma_{\text{后}}(R)$ 继续增大, 但因激光受到大气的强烈衰减而限制了探测距离。正南方向大气尘埃消光系数的垂直剖面则表明, 大气尘埃的消光系数 $\sigma_{\text{后}}$ 随高度递减, 随后又随高度递增, 以后复又随高度递减。例如离观测点 1 公里处, 近地层 $\sigma_{\text{后}}$ 约为 1.5 公里⁻¹, 到 100 米高处 $\sigma_{\text{后}}$ 下降至 6×10^{-1} 公里⁻¹ 左右, 而在 500 米高处 $\sigma_{\text{后}}$ 又增大至 5 公里⁻¹ 以上, 到了 1.5 公里高处 $\sigma_{\text{后}}$ 又降至 4×10^{-1} 公里⁻¹ 左右。总的趋势是离观测点愈远, 高度愈低, $\sigma_{\text{后}}$ 愈大, 这与工厂的分布及烟尘的扩散情况相吻合。

图 6(b) 为 10 月 11 日傍晚的观测结果。观测时刮西北风, 空气比较清洁, 能见度较好。激光观测的 23 米高处大气尘埃的消光系数 $\sigma_{\text{后}}(R)$ 普遍要小, 尤其在观测点的西北—西—西南方, $\sigma_{\text{后}}(R)$ 约为 3×10^{-1} 公里⁻¹, 正西离观测点 1 公里处, $\sigma_{\text{后}}(R)$ 甚至只有 2×10^{-1} 公里⁻¹。南西南—南—东南方向, $\sigma_{\text{后}}(R)$ 偏高, 而且随着离观测点的距离增大, 由于工厂排放烟尘的影响, $\sigma_{\text{后}}(R)$ 迅速增大, 例如离观测点 1.5 公里处 $\sigma_{\text{后}}(R)$ 约 1.5 公里⁻¹。从东南偏东—东一带 $\sigma_{\text{后}}(R)$ 复又减小, 例如离观测点 1.5 公里处, $\sigma_{\text{后}}(R)$ 只有 6×10^{-1} 公里⁻¹。正南方向大气尘埃消光系数的垂直剖面分布与图 6(a) 的情况十分类似, 例如离观测点 1 公里附近, $\sigma_{\text{后}}$ 随高度迅速增大, 在 250 米高处 $\sigma_{\text{后}}$ 达最大, 数值超过 5 公里⁻¹, 然后 $\sigma_{\text{后}}$ 随高度迅速递减, 如在 800 米高处 $\sigma_{\text{后}}$ 约为 2×10^{-1} 公里⁻¹。又如离观测点 2 公里附近, $\sigma_{\text{后}}$ 先随高度递减, 至 200 米高处数值最小, 然后又随高度递增, 至 400 米高处 $\sigma_{\text{后}}$ 达最大, 随后又随高度递减, 至 1.5 公里高处 $\sigma_{\text{后}}$ 降至 4×10^{-1} 公里⁻¹。总的趋势也仍然是离观测点距离愈远, 高度愈低, 由于工厂排放烟尘的影响愈大, 因而 $\sigma_{\text{后}}$ 值也愈大。

如果大气尘埃的密度、光学折射率和粒子尺度谱分布都稳定不变, 则大气尘埃的消光系数正比于大气尘埃的浓度。若通过与其他探测大气尘埃浓度的方法作对比观测, 就能确定大气尘埃消光系数与大气尘埃浓度之间的比例系数, 从而可以由激光直接遥测大气尘埃浓度的时、空分布。然而, 这种理想的条件实际上是不能经常满足的, 因此, 直接定量探测大气尘埃的浓度, 在原理上还有一定局限性。虽然也有利用多散射角或多波长等办法, 由激光进一步探测大气尘埃粒子谱分布。不过由于技术上的困难, 计算的繁杂, 以及仍需假设大气尘埃的密度和光学折射率稳定不变等条件。因此, 如何利用激光直接遥测大气尘埃的浓度分布, 还有待于进一步探索。

激光遥测大气污染的历史虽然不长, 但这一新技术的应用已受到普遍重视, 各国竞相开展激光遥测大气污染的研究和应用。目前, 激光不仅可以遥测烟、尘, 根据大气污染物对光的吸收、拉曼散射以及共振吸收、共振散射等光学效应, 还能进一步利用激光鉴别大

气污染物的成分, 遥测大气污染物浓度的空间动态分布。因此, 激光在遥测大气污染方面具有很大潜力。

随着激光技术和定量探测原理的日臻完善, 激光将成为一种与大气污染作斗争的有力监测手段。

激 光 虹 膜 切 除 器*

——激光在眼科治疗上的新应用

上海合力电机厂
上海激光技术试验站 三结合研制组
上海第六人民医院眼科

在毛主席革命路线的指引下, 我们实行了以工厂为基地的科研、生产、使用三结合, 以及以工人为主体的工人、干部、技术人员三结合, 于1970年试制了激光视网膜凝结机^[1], 将激光新技术应用到眼科治疗上, 为广大工农兵服务。几年来, 在封闭视网膜裂孔、防治视网膜脱离以及治疗玻璃体出血等方面, 取得了较好的疗效^[2,3]。

我们遵照毛主席关于“人类总得不断地总结经验, 有所发现, 有所发明, 有所创造, 有所前进”的教导, 在视网膜凝结机的基础上又开展了激光虹膜切除器的研制工作。经过反复试验, 不断改进, 已经在临床上获得较好的应用。

激光虹膜切除器利用红宝石激光进行虹膜切除, 使病人增进视力、降低眼压或重见光明。它对因瞳孔闭锁而引起的继发性青光眼, 有很好的降压效果; 对瞳孔膜闭或闭锁、角膜中央部分的斑翳和白斑、外伤或手术后的瞳孔移位等眼病, 均有较好的增视效果; 还可以对原发性(窄角性)青光眼的早期作预防性虹膜切除。

上述眼病以往均用手术治疗。现用激光治疗, 可以大大减轻病人痛苦, 具有不需住院、不用开刀、不要麻醉、治疗时间短、反应轻、恢复快、无手术感染危险等优点。对于以往手术无法解决的某些眼病, 如晶状体表面色素膜残留等, 用激光却能很好地解决。另外, 若患者的局部或全身情况不允许作手术治疗时, 激光治疗也能安全地进行。

一、工作原理

虹膜(俗称黑眼珠)呈圆盘状, 中央有一圆孔, 为光线进入眼内所必经之孔, 称为瞳孔。瞳孔借助于藏在虹膜组织内的两种肌肉——瞳孔括约肌与瞳孔扩大肌, 对不同强度的光呈现不同的反应: 在强光下瞳孔

缩小, 在弱光下则扩大, 从而调节进入眼睛的光通量, 使到达视网膜上的光强控制在适宜范围之内, 以便能看清外界景物(虹膜的部位如图1所示)。虹膜的作用有点象照相机上的光圈, 改变光圈的大小, 可以控制曝光量, 使底片上得到合适的感光。

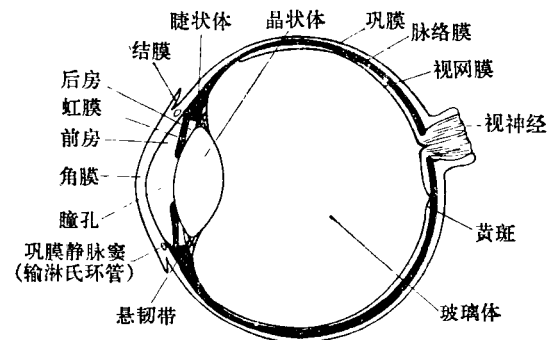


图1 眼球水平切面

虹膜组织中有丰富的色素。不同的人种, 由于虹膜色素不同而虹膜所呈现的颜色也随之不同。欧洲人多数是蓝色虹膜, 而我国则多数是棕褐色虹膜。

激光虹膜切除器是将红宝石产生的脉冲激光聚焦在虹膜上, 被虹膜色素吸收, 在激光热能和冲击波的同时作用下, 使激光聚焦处局部虹膜组织瞬时汽化, 形成穿孔。

由于某些眼病引起瞳孔闭锁, 使光线不能到达视网膜, 病人因此失去视觉。在这种情况下, 如果能在虹膜上重新开一个人工瞳孔, 病人就可以重见光明。过去用手术的办法, 先将角膜打开, 再用镊子钳住虹膜, 然后切除一小块虹膜, 开一个小口, 成为人工瞳孔, 最

* 1975年3月11日收到。