

大 气 的 激 光 监 测

邱元武 汤晓

(同济大学物理系)

在人口稠密的工业区,大气污染已成为严重的问题,研究污染物以及它们和大气组分的反应已成为迫切的需要了。为了预示与日俱增的污染源对环境的影响和采取及时而有效的措施,需要建立大气的数学模型。这些模型的发展、完善和与之相关的连续监测,要求具有广泛的监测功能。

地球上的生命不仅直接或间接地受近地面的大气组分的影响,而且还受到平流层及平流层以上的大气组分的影响。要用合理的成本来恰当地监测这广阔的区域,为此激光监测是唯一可能提供这种功能的技术。

一、大气遥感技术的特点

激光器的发现促进了人们对物质的非线性特性的研究,以及关于固体、液体和气体的光谱的研究,特别是可调谐激光器的发展,使高分辨光谱学领域获得了重大的进展。电磁辐射与原子和分子间的相互作用,成了用激光探测和监测大气组分和特性的基础。

历史上,大气污染监测是用湿的化学技术和取样后的实验室分析进行的。近二十年来,发展了能满足许多监测要求的物理的和自动化的方法,这些仪器一般是精密的和准确的,但是只限于单点测量。远程监测仪器(特别是用激光的主动技术)提供了三维的污染浓度测量。这些系统可用来快速而无干扰地测量主污染源和污染物的输运,监测环境污染物的浓度。

远程监测能够定性或定量地传感环境中的化学或物理参量,其中监测仪器和被研究的参量在空间上是分离的。大气遥感技术可以分

为两大类,即主动的和被动的。所谓被动技术,是利用大气中的辐射(例如太阳光的和地面反射或发射的辐射),并观察这辐射与被研究物质的相互作用(吸收和散射)或被研究物质的热发射而推得浓度。所谓主动技术,是将特定辐射(例如激光)引入大气,观察辐射与大气的相互作用(散射、吸收、荧光),从而推算出被研究物质的浓度。主动技术又可分单端系统和双端系统两类。

在单端系统中,激光源和望远镜接收机处在同一位置,而且一般以散射作为探测大气的主要手段。这里所指的散射,可以是被研究物质的直接散射,或是其它大气组分的散射,而被研究的物质以可测量的方式影响激光束的传输。在双端系统中,激光发射机与望远镜接收机处在不同的位置,并对准大气中的同一处,这种系统称为收发分置的。发射机和接收机可以在不同位置但彼此相对,或在同一位置而通过远处的后向反射器或地形靶使两者联系起来,这种系统称为长程吸收的。

远程监测方法可以提供与实地方法一样准确和精密的测量,它还具有一些独特的优点。

1. 无干扰: 远程监测污染源处的发射是无干扰的,因为它是无探头的技术,不要求取样,所以消除了测量过程中影响样品的可能性。此外,它可以在不干涉被测工业设施的正常工作下进行流出浓度的测量,因此也可以不必事前宣布而进行检查。

2. 累积测量: 在检验和发展污染输运模型所要求的累积测量的情形中,远程监测激光技术提供了可与大气模型预示相比的空间范围的测量。在对人类的污染的总剂量的测量中,累

积测量可以在被研究的人口活动区的大面积上获得信息。

3. 地面和上空的测量：为了更好地了解空气品质,除地面测量外,还必须进行上空测量。激光监测是监视上空污染浓度的有效方法。此外,估算光化学反应的影响和跟踪从源到受体之间的污染物,还必须用三维测量。由于大多数大气模型并不具体地预示地面污染浓度,所以模型的检验和发展要求测量出污染浓度-高度的函数的关系。

4. 大面积测量:常规的野外监测仪器通常只能提供一处的准确测量。然而,该处周围大气的污染物浓度会有显著的变化,局部源、气象、地貌和人造结构都可能引起变化,从而使代表较大面积的测量失效。位于该处的单个远程监测仪器能提供准确的具有代表性的测量。遥感可用于初始普查,以确定最佳布局的实地监测网。此外,装在活动平台(飞机、汽车)上的激光仪器是测量大范围内空气品质的最有效手段,根据最初的测量可以预示未来的变化。

二、几种典型的大气遥感技术

1. 弹性散射和差分吸收

用于远程大气探测的激光雷达(LIDAR)的基本要素:光探测和测距。图1表示最简单的激光雷达的形式,激光器提供了一个具有一定幅度和一定脉冲宽度及周期的能量发射源,并由合适的光学系统形成光束。由于激光能量几乎是单色的和高度相干的,所以这种光束是高度准直的。当发射的激光能量通过大气时,相遇的气体分子和粒子或微滴发生散射。这能量的一小部分被后向散射到激光雷达系统的方向。除散射外,气体和粒子对射出去的光和后向散射的光都存在吸收,引起了光束强度衰减。

后向散射的能量借助于反射的或折射的光学系统被收集到接收机中,并随之转到光探测器中以产生电信号。这信号的强度在任何时候都正比于接收到的光功率。由于光以已知的速度传播,所以在任何时刻产生的被接收信号的

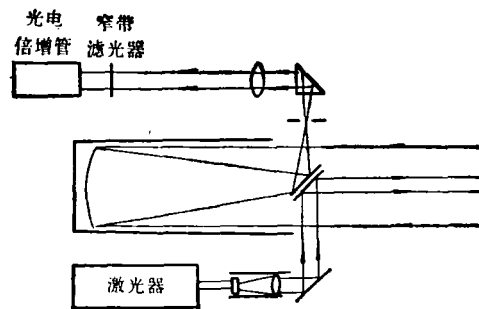


图1 激光雷达的示意图

散射体积,可以唯一地从脉冲发射以来的时间间隔来确定,这就是测距。大气对于激光束的后向散射特性,以及来回路程上大气对于特定波长的光能量的衰减,确定了所接收到的信号的大小,这就是光探测。大气后向散射又依赖于所用激光能量的波长和与入射能量相遇的粒子或微滴(或分子)的数目、大小、形状和折射特性。虽然来自散射体系的后向散射是复杂的,但是一般来说,后向散射随散射体的浓度增大而增大。因此,来自光探测器的电信号包含大气散射体和吸收体的存在,以及它们的距离和浓度的信息。有多种方式显示和分析这种信号,最简单的形式是在示波器上显示出信号强度作为距离的函数。电信号也可以在显示或进一步处理前由磁带、磁盘或数字存储器件做记录。

由于在共振吸收峰附近,气体的吸收系数强烈地依赖于激光波长,所以可用二个波长分别在所测气体的适当吸收线内(λ_0)和线外(λ_0')的激光,在相同的路程上先后进行几乎同时的相继测量,然后由比较先后测量所得结果而将所测气体的吸收与大气中其他消光成分分开。两种波长不同的激光可由同一台激光器交替提供。这种方法称为差分吸收激光雷达(DIAL)。这种技术也可由测量来自固定的远程靶的信号而获得路程累积的污染气体浓度,在这类测量中所要求的发射功率可以显著地降低。如果远程靶是地形物,则仍有单端实验系统的简便性。用专门设计的远程后向反射器可以获得更高的灵敏度。

2. 喇曼散射和激光感生荧光

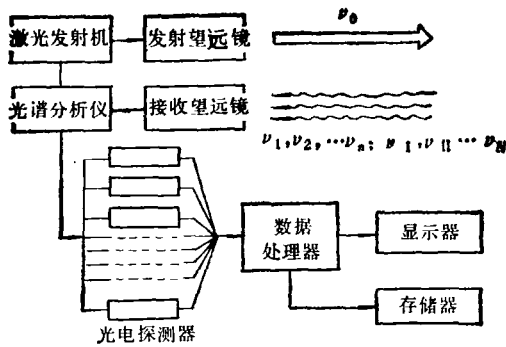


图2 用喇曼散射和激光感生荧光方法的激光雷达系统的示意图

激光雷达能获得从大气中各种物质后向散射的光信号的距离分辨测量结果,得到不同距离上回波信号的光谱强度或偏振特性,从而提供关于原子和分子组分及其浓度的信息。图2表示以光谱方法为基础的激光雷达系统的示意图,从激光器通过准直望远镜发射的光束,被大气中的微粒散射体和气体组分的混合物散射。后向散射能量的光谱成分包括两部分:第一部分的散射谱的中心频率与激光频率相一致,这是瑞利散射和米氏散射。第二部分的散射谱的频率与激光频率不一致,这就是喇曼散射频率 $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$,以及各种荧光成分 $\nu_1, \nu_{11}, \dots, \nu_n$,这些喇曼散射和荧光成分大都叠加在大气中的各种气体物质所产生的连续谱或带状谱结构上。这些光谱成分经滤光器和光谱分析仪后,被灵敏的探测器阵列探测,然后经过数据处理实时地显示各种信息(诸如气体污染物的位置和浓度以及它们与粒子的关联)。

正常喇曼散射方法的特点是:(1)与激光感生荧光或共振喇曼散射方法不一样,它不要求特定频率或频率可调谐的激光束,因此可以在大气不吸收的光谱区域中选择激光频率。也可以选择激光的频率使每种分子产生的喇曼光谱都明显地分离,从而实现无干扰或减小了干扰的探测。(2)可以避免由于瑞利或米氏散射引起的、在激光频率处的后向散射干扰,保证了大气中任何分子密度轮廓的测量而与气溶胶分布无关。(3)因为后向散射信号总是包括来自严格相同位置处大气的主要成分(例如 N_2 和

O_2) 的喇曼回波,所以可以从这回波强度推算各次要成分的绝对强度,从而消除了计算中所要求的复杂的大气和仪器参量。(4)正常喇曼散射方法不能用于探测散布在大气中的污染物等的次要组分(因为散射截面小),但是可用于探测来自诸如烟囱等的稳定源的集中流出物。(5)在实际应用中严重地存在人眼的安全问题。

激光感生荧光的特点是:(1)即使在大气压强下荧光被猝灭时,共振荧光的截面一般比正常喇曼散射的大几个数量级。(2)由于存在发射激光束的共振吸收,所以不能象喇曼散射方法中那样,根据返回的荧光信号的强度测量容易地确定绝对浓度。由于猝灭因子沿着光程局部地变化,所以截面也无法精确地知道。(3)为了从测量结果中推得定量的信息和有效地利用发射激光束,常对波长的精确性和高的光谱稳定性有一定的要求。

3. 激光外差探测

以激光器为本机振荡器的外差辐射计,对于探测光谱宽度较窄的弱辐射信号是有用的,这种弱辐射有如来自气体的热辐射,从气体或气溶胶粒子散射的激光辐射,或从远处的源发射的或从远处的表面反射的激光辐射。每种这类信号的探测在大气的监测中都是有用的。

大多数大气污染物在红外波段与辐射相互作用。红外波段的外差探测与直接探测相比有一些优点。远程红外传感器的光谱范围被限制在某些“窗”区域,其中水蒸气和二氧化碳没有强的吸收带。幸运的是几乎一切污染物都在窗区域的某处有吸收。特别是,如果监测仪器具有高的光谱分辨,则来自水蒸气、二氧化碳和其它污染物本身的干扰可以减少。外差接收机只对很窄的光谱范围有响应,范围由本机振荡器频率和中频电子学的带宽确定,而不由常规的滤光器或色散仪器确定。背景辐射和光探测器的内禀电流起伏不代表基本的噪音极限。对于延伸的信号源,由空间相匹配条件确定的外差接收器的窄视场是一个缺点,这一缺点在近红外和可见区域更为明显。图3为外差辐射计的

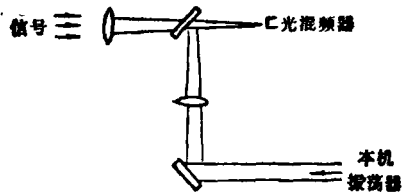


图3 外差辐射计的光学示意图

光学示意图,信号辐射与本机振荡辐射在光混频器中产生拍频,由拍频和本机振荡辐射的频率可以推知信号辐射的频率,从而监测大气的组分。

用于探测主动大气监测系统中的红外激光辐射时,外差辐射计比直接探测灵敏几个数量级。探测器增大的灵敏度使得在长程吸收的双端系统中可以用漫反射面。当外差探测用于传感热辐射时,可以部分地抵消接收机的低噪音。设计激光辐射机时,应要求激光束在空间确定的区域中完全在外差接收机的视场内,从而不使效率降低。

三、进展和展望

为监测大气气体和粒子而设想的一切基本的激光技术在实验上都已实现,不少激光雷达已搬出实验室进行地基的、车载的和空载的测量。已有人分析了将激光雷达装在宇宙飞船上的可行性^[1]。

激光雷达的未来显然依赖于系统本身的进一步完善,降低成本,对眼没有危险并能满足观察和测量的要求。

美国国家宇航局(NASA) Langley 研究中心建立了多用途空载 DIAL 系统,用来遥测对流层和较低的平流层中各种气体和气溶胶的浓度分布^[2],工作波长范围从 280nm 至 1064 nm,可以探测 O₃, SO₂, NO₂, H₂O, 还可以测量温度、压强和气溶胶的后向散射。激光发射机由两台窄线宽的、Nd: YAG 泵浦的染料激光器组成, DIAL 波长以 100 μs 的时间间距发射。用同轴接收机系统收集并在光学上分开 DIAL 及气溶胶激光雷达回波,经光学滤波后,

光电倍增管探测到这种回波并产生模拟信号,数字化后存储在高速率磁带上。

美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室建立了脉冲双波长双 CO₂ 激光器的 DIAL 系统^[3]。有两台光栅调节的 TEA CO₂ 激光器提供 10 μm 附近可调谐的单频脉冲辐射,由两台稳定的光栅调谐连续波 CO₂ 激光器组成本机振荡器。此系统可同时对同一激光雷达回波进行直接和外差探测,并将这两种探测技术进行比较。比较的结果表明:在近距离处,直接探测的 DIAL 系统的灵敏度和准确度更好,而在远距离处,外差系统的平均信噪比增加,导致更好的探测精度。

美国加州理工学院(CIT)喷气推进实验室建立了外差探测的 TEA CO₂ 激光雷达系统,用来测量气溶胶后向散射系数轮廓^[4]。TEA CO₂ 激光系统是用光栅调谐的,可以在不同的波长处测量后向散射和衰减。TEA 激光器经注入锁定,为外差探测提供可调谐的单频脉冲。注入振荡器(连续波波导激光器)和本机振荡器(不锈钢结构的低气压连续波激光器)都是光栅调节的,并用压电元件控制波长。TEA CO₂ 激光脉冲射到输出直径为 15cm 的反射式离轴发射望远镜,接收望远镜为直径 15cm 的 f18 反射式牛顿型望远镜,望远镜的焦平面用中继透镜成像在冷却的光混频器上。

日本国家环境研究所建立了大规模的激光雷达系统,用来测量大范围的气溶胶分布^[5]。系统由重复率为 25pps 的、平均输出能量为 30W (1.064 μm) 和 10W (532nm) 的大功率 Nd: YAG 激光器和有效直径为 1.5m 的接收望远镜组成。来自光电倍增管的信号由直流放大器放大,经低通滤波器后由瞬态记录仪转换成数字形式。数据处理系统由微计算机和大型计算机组成,前者控制激光雷达系统和数据采集,后者进行数据分析。

瑞典国家环境保护局建立了车载 DIAL 系统,用来监测大气污染^[6]。系统采用 Nd: YAG 泵浦的双波长染料激光器和双波长探测系统,可以在两个波长处同时进行激光雷达测量,并

用多波长 DIAL 测量和将测量结果模拟被研究气体的吸收轮廓来提高准确度和探测度。

法国 Haute Provenance 天文台建立了 DIAL 系统,用来测量从地面至 50 km 高度的 O_3 的垂直分布^[1]。发射机是用 Nd:YAG 泵浦的倍频染料激光器,可以自动地相继发射两个波长。后向散射信号由直径为 80 cm 的卡塞格伦望远镜收集,并由光电倍增管探测。由两个采集系统提供的数据送入 PDP11-34 计算机,并存储在软盘上。PDP11-34 计算机控制 DIAL 测量的整个程序。

西德 Battelle 研究所建立了装在飞机上的双连续波 CO_2 DIAL 系统,用来遥测大气中的痕量物质^[2]。回波信号由激光束在地面的反射提供。系统由发射和接收两个激光束的光学装置及模拟数据处理机组成。由于回波信号很弱,所以采用外差探测的方法。本机振荡与发

射机使用同一台激光器。由外差探测器所产生的光电流含有高频和低频成分。高频外差信号(约 2MHz,等于飞机与地面相对速度的多普勒频移)载有分子吸收或差分漫反射的信息,而低频部分(135 Hz,等于斩波频率)指示被发射激光功率的变化。此外,用多波长 DIAL 测量获得的地面矿物的信息来修正痕量物质的测量。

- [1] E. E. Remsberg and L. L. Gordley, *Appl. Opt.*, **17** (1978), 624.
- [2] E. V. Browell et al., *Appl. Opt.*, **22**(1983), 522.
- [3] D. K. Killinger, N. Menyuk and W. E. Defeo, *Appl. Opt.*, **22** (1983), 682.
- [4] R. T. Menzies et al., *Appl. Opt.*, **23**(1984), 2510.
- [5] H. Shimizu et al., *Appl. Opt.*, **24**(1985), 617.
- [6] K. A. Fredriksson, *Appl. Opt.*, **24**(1985), 3297.
- [7] G. J. Megie, G. Ancellet and J. Pelon, *Appl. Opt.*, **24**(1985), 3055.
- [8] W. Wiesemann and F. Lehmann, *Appl. Opt.*, **24**(1985), 3481.

原子中宇称的不守恒

Carl E. Wieman

弱电理论是理论物理最成功的理论之一,它描述在一个统一的框架中的弱力和电磁力。弱电理论预言:在原子中电子和核之间存在着一个小的作用力,这一作用力使空间对称性(即宇称)不守恒。如果宇称不守恒,这就意味着原子具有某种“左右旋”,从而使它不同于它的镜面映射。这种“左右旋”或宇称不守恒大小的测量,可以用来检验弱电相互作用理论的正确性。由于这种“左右旋”所体现的原子形状的畸变大约只有 10^{-11} 分之一,因此这一测量特别困难。

尽管困难很多,但在若干不同原子中已观察到了这种宇称的不守恒,并且在过去十年中,测量精度已有稳步提高^[1]。在最近的实验中,原子宇称不守恒的测量精度已优于 10%^[2]。实验者采用一台可调谐激光来激发铯原子某两个特定能态之间的跃迁,并在激发区加了垂直方面的电场和磁场。这些场和激光的偏振方向一起为激发过程规定了坐标系或左右旋的方向,从而使激发过程对原子的左右旋方向很敏感。当激发过程的左右旋方向反转时,原子激发速率可以发生虽然很小但可以测量得出来的变化。左右旋方向的反转可以通过改变外加场的方向或激光偏振方向实现,而激发速率的变化则与原子宇称不守恒的大小直接相关。

为了将实验测量结果与电子和核之间基本相互作用力联系起来,必须计算原子的结构,特别是原子核附

近的结构,这是理论原子物理中的一个挑战性问题。全世界现在有好几个小组正采用各种新技术研究这一问题。对许多原子的计算工作已经得到改进,到目前为止,在铯原子获得的数值的不确定性估计为百分之几。

把原子理论和实验结果相结合,可以得到铯原子宇称不守恒的数据。结果表明,在实验误差的范围内,实验值与弱电理论的预计相符得很好。原子宇称不守恒的测量补充了在高能加速器上对这一理论的试验。由于原子宇称不守恒的测量涉及到低能时的情况,所以它们对电子-夸克的不同耦合很敏感。因此,这一测量目前正为对标准弱电理论的各种可能修正(例如超弦理论)提供各种重要的限制因素。

许多实验室正在开展这方面的研究,这些研究在不久的将来将导致原子宇称不守恒具有更为精密的测量。同时,这些在小尺度上的实验也将为自然界中各种基本相互作用力的研究提供新的信息。

- [1] M. A. Bouchiant and L. Pottier, *Sci Am.*, **250**-June (1981), 100.
- [2] S. L. Gilbert, M. C. Noecker, R. N. Watts and C. E. Wieman *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 2680, (张景园译自 *Physics Today* 1987年第1期第 s-24 页)