

大气激光监测

〔美〕 E. D. 欣克利 编

科学出版社

大气激光监测

[美] E. D. 欣克利 编

宋正方 孙凤仪 韩景诚 译

孙毅义 吴际华 校

科学出版社

1984

内 容 简 介

本书阐述激光监测大气的气体分子、原子和气溶胶粒子的原理和方法。书中概括了国际上直至1976年在这方面的主要成就,并对监测大气污染物的各种先进激光雷达技术与应用实例作了较系统而详尽的介绍。

本书可供大气物理、大气污染、激光物理和激光工程以及环保、管理等方面的研究人员与工程技术人员参考,也适合作为高等院校上述专业的补充教材。

Edited by E. D. Hinkley

LASER MONITORING OF THE ATMOSPHERE

Springer-Verlag 1976

大气激光监测

[美] E. D. 欣克利 编

宋正方 孙凤仪 韩景诚 译

孙毅义 吴际华 校

责任编辑 刘海龄

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984年3月第一版 开本: 787×1092 1/32

1984年3月第一次印刷 印张: 13 1/4

印数: 0001-2,650 字数: 300,000

统一书号: 15031·545

本社书号: 3363·15-4

定价: 2.10元

序 言

连续监测大气成分的必要性在日益增长。最近，通过高空飞行器、宇宙飞船乃至气溶胶喷射燃料对平流层中生物赖以生存的臭氧层可能产生有害影响的辩论，更强调了这种连续监测的重要性。此外，由于能源日趋匮乏，广泛使用污染较大的燃料可能导致的严重后果迄今尚未充分认识（例如减少到达地面的有用的太阳能会改变地球的热平衡并恶化低层大气的空气纯度）。为了预告日益增长的污染源对环境的影响，并以合适的代价及时采取必要的补救措施，大气的数学模式是必不可少的。发展这些模式以及与此相关的连续监视措施，需要具备广泛的监测能力。

借助光学技术实现观测式的监测通常效果最好，代价最小。最近激光技术大有进展，激光在大气监测应用中的地位已稳步提高。事实上，所有提议用于监测的主要激光方案（以散射、荧光、吸收和发射为基础）均已为实验所证实。因此，以大气激光监测为题在本丛中单独列卷是合适的。

本书以易于理解适于自学的方式，阐述激光探测气体和粒子的基本方法。每一章都含有诸如各物理过程的数学表达式及有关参数的典型数值之类的基础知识，并列举了现场实际测量的例子。因此，本书是从事这方面工作的科学家和工程师的一本有价值的参考书，同时也是环境研究方面研究生课程和大学生专业课程的补充教材。如果考虑到地面激光系统可用来探测平流层以上大气层内的原子并测定其浓度，而气球携带的可调谐激光系统则可用来监测平流层以内各种气

体, 那么就能正确估价激光监测的宽广使用范围了. 在低层大气中, 还可用激光技术遥测污染气体、粒子、风速和大气温度; 而长距离激光测量则有助于发展污染物迁移、扩散和转换的数学模式.

本书每一章研究一种特定类型的激光监测技术; 但各章之间有许多地方相互参照, 并且统一采用引论(第一章)中所定义的一套符号, 故有很强的连贯性. 第二章讨论大气结构, 并论述激光技术如何能满足未来空气纯度管理的某些要求. 第三章讨论大气传输和选择合适的激光波长的问题. 第四章至第七章专题论述具体的激光技术. 对于主动激光监测系统必须加以考虑的安全防护问题, 本书也进行了讨论.

人们现在认识到, 地球上的生物均直接或间接地不仅受地面附近的大气成分的影响, 而且也受对流层和平流层甚至更高的整个空间的各种大气成分的影响. 日趋明显, 欲以适当的代价在这样宽广的范围内实现恰当的监测, 看来只有激光监测技术所呈现的能力才能满足. 作者希望, 本书能成为评价和发展未来激光监测系统的有用指南.

我要对几位同事的有益意见和评论致谢; 特别是马省理工学院林肯实验室的 P. L. Kelley 和 W. E. Bioknell, 国家海洋和大气管理局的 V. E. Derr, 以及斯坦福研究所的 P. B. Russell. 此外, 对本书的参加者及其家属, 对我的妻子和孩子们的耐心和鼓励, 表示衷心的感谢.

E. D. Hinkley

1976年5月于马萨诸塞, 康科德

• x •

目 录

第一章 引论 (E. D. Hinkley).....	1
符号汇编表	4
参考文献	10
第二章 空气纯度管理的遥感 (S. H. Melfi).....	11
2.1 大气	12
2.1.1 大气结构	13
2.1.2 对流层	14
气溶胶和粒子	15
碳的氧化物	17
硫化物	17
氮化物	18
烃	19
臭氧	19
2.1.3 平流层	20
气溶胶和粒子	20
次要的分子成分	21
2.2 污染物一般迁移模式	22
2.2.1 数学模式描述	22
2.2.2 发展和验证模式所必需的监测	24
2.3 激光系统的遥测能力	24
2.3.1 单端系统	25
激光雷达	25
喇曼激光雷达	26
共振激光雷达	26
差分吸收散射的激光雷达	26

测量能见度的喇曼激光雷达	27
2.3.2 双端系统	27
收发分置的激光雷达	27
长光程吸收	28
2.4 空气纯度管理的遥测	28
2.4.1 遥测的优点	29
无干扰监测	29
光程的积分测量	29
地面和高空测量	30
远景监测	30
在辽阔的地域内测量	30
2.4.2 遥测的应用	31
2.5 结论	31
参考文献	32
第三章 激光通过大气的传输 (V. E. Zuev)	33
3.1 分子吸收	33
3.1.1 基本定义	33
3.1.2 分立谱线的吸收	37
3.1.3 大气气体吸收光谱的一般特性	40
3.1.4 实验	46
3.1.5 理论	53
3.1.6 布给定律对吸收的适用范围	54
3.2 分子散射	57
3.3 微粒散射	59
3.3.1 散射系数; 吸收系数; 衰减系数	59
3.3.2 单个粒子的散射	60
3.3.3 云和雾的散射	61
3.3.4 霾的散射	62
3.3.5 降水的散射	64
3.3.6 气溶胶散射相函数	65

3.3.7 布给定律对散射的适用范围	65
3.4 总衰减: 激光大气探测的有效波段	66
3.4.1 非浑浊大气	66
3.4.2 霾	68
3.4.3 云和雾	69
3.4.4 降水	70
3.5 大气模式	70
3.6 均匀性偏差	70
3.6.1 大气湍流效应	70
3.6.2 气溶胶闪烁	72
参考文献	74

第四章 用弹性后向散射与差分吸收激光雷达

测量粒子和气体 (R. T. H. Collis

和 P. B. Russell)

4.1 背景材料	76
4.2 光探测与激光测距(激光雷达)原理	78
4.2.1 激光雷达方程	82
4.2.2 激光雷达系统与装置	84
激光器	84
探测器	85
光学元件	86
数据的获得、显示与处理	86
系统的组合	88
4.2.3 人眼安全	91
4.3 测定接收激光雷达信号的大气影响	92
4.3.1 弹性后向散射	94
气体分子的后向散射	94
粒子的后向散射	95
4.3.2 衰减	102
气体分子的衰减	102

粒子的衰减	103
4.3.3 多次散射	105
4.4 差分吸收激光雷达技术	107
4.4.1 工作原理	108
4.4.2 测量灵敏度	110
4.4.3 潜在误差	113
4.5 按照大气意义阐明单一波长的激光雷达测量	115
4.5.1 微粒物质的半定量测绘与监测	115
4.5.2 激光雷达方程的解	116
4.5.3 由光学测量导出气溶胶物理量	118
4.6 激光雷达测量实例	125
4.6.1 弹性后向散射应用	126
观察云与雾	126
在视觉上“清晰”的空气中观察	133
观察大气运动	147
4.6.2 差分吸收法应用	149
水汽	149
污染气体	150
4.7 结论	153
4.7.1 现有能力与局限性	153
4.7.2 未来展望	154
参考文献	155

第五章 喇曼散射和共振荧光探测原子和分子

(H. Inaba)	162
5.1 散射机理和荧光机理	162
5.2 喇曼散射和共振荧光的基本特征	167
5.2.1 喇曼散射	167
5.2.2 共振喇曼散射和荧光的区别	177
5.2.3 近共振喇曼散射	179
5.2.4 共振散射	185

5.2.5	大气中的荧光及其猝灭	190
5.3	应用喇曼散射与共振荧光的 激光雷达方法的工作原理和特性	194
5.3.1	基本概念和激光雷达方程	194
5.3.2	大气透射和消光	198
5.3.3	喇曼散射方案和共振荧光方案的 基本特性及其比较	199
5.3.4	喇曼散射法测量大气温度的原理	201
5.4	实验激光雷达系统和测量	204
5.4.1	喇曼散射方案	205
	大气中主要分子成分的探测	205
	大气中水汽分布的测量	207
	监测大气中的分子污染物	210
	大气温度的遥测	217
5.4.2	探测高层大气原子的共振荧光方案	219
5.4.3	共振荧光法的室内实验	224
5.5	激光雷达监测系统的探测灵敏度及其性能	227
5.5.1	探测方法与接收系统的信噪比	227
5.5.2	喇曼散射方案用于地面监测低层 和高层大气的探测能力	231
5.5.3	低层大气中近共振喇曼散射 方案和共振散射方案的探测能力	235
5.5.4	共振荧光方案用于地面 监测低层和高层大气的探测能力	240
5.5.5	机载探测、气球载探测和卫星测量的探测能力	247
	参考文献	250

第六章 用吸收激光辐射的方法探测分子污染 的技术 (E. D. Hinkley, R. T. Ku

和 P. L. Kelley)

6.1	分子污染物的吸收光谱	256
-----	------------------	-----

6.1.1	分子激励的类型与光谱区之间的关系	256
6.1.2	吸收线的特征	259
6.2	监测所用的激光器	265
6.2.1	染料激光器	267
6.2.2	光混频器与参量振荡器	268
6.2.3	半导体二极管激光器	271
6.2.4	自旋反转喇曼激光器	273
6.2.5	高压气体激光器	275
6.2.6	可调谐激光器小结	275
6.3	信号探测技术	276
6.3.1	直接光子探测	276
	室温红外探测器	277
	致冷红外探测器	278
6.3.2	光声探测	279
6.3.3	外差探测	285
6.4	差分吸收法监测的理论	285
6.4.1	分立波长监测	286
6.4.2	导数法监测	289
	多普勒增宽谱线的导数法监测	289
	压强增宽谱线的导数法监测	292
	佛克脱型谱线的导数法监测	293
6.5	差分吸收法监测的应用	294
6.5.1	分子污染物的单点取样法	295
	环境空气取样	296
	车辆排气取样	296
	烟囱气体取样	300
6.5.2	现场定域监测	301
	车辆排气监测	301
	烟囱气体监测	302
	对流层与平流层现场监测	302
6.5.3	长距离大气监测	305

	用分立可调谐激光器的长距离监测	305
	用连续可调谐激光器的长距离监测	307
	垂直分布监测	309
6.6	激光安全	311
6.7	结论	312
	参考文献	312
第七章	激光外差探测技术 (R. T. Menzies)	318
7.1	外差辐射测量原理	320
	7.1.1 热辐射	320
	7.1.2 迪克 (Dicke) 微波辐射计	322
	7.1.3 红外波段中的光混频	324
	7.1.4 信噪比考虑	327
	本机振荡器起伏的限制	327
	其它噪声源	334
7.2	被动外差辐射计	336
	7.2.1 气体红外发射率	336
	7.2.2 组件要求	339
	本机振荡器	339
	光混频器	341
	7.2.3 气体的外差探测实验	344
	7.2.4 与迈克耳孙干涉光谱仪的比较	348
	7.2.5 地面监测应用	350
	7.2.6 空中监测应用	351
	7.2.7 湍流对被动外差辐射计的影响	357
7.3	主动监测系统的外差技术	358
	7.3.1 用外差技术改善灵敏度	358
	连续波发射机	359
	脉冲发射机	359
	7.3.2 大气造成的收发分置系统性能的下降	360
	湍流效应	360

气溶胶后向散射效应	362
7.3.3 用收发分置系统作污染物探测实验	364
7.3.4 空中激光吸收光谱仪	368
7.4 在光谱适应性上的进一步改进	372
7.4.1 红外二极管激光器	372
7.4.2 高压气体激光器	373
7.4.3 参量振荡器	373
7.4.4 光电二极管可变电抗混频器	374
7.5 结论	374
参考文献	375
附有标题的补充参考文献	379
内容索引	383

第一章 引 论

E. D. Hinkley

在这套应用物理丛书的前几卷中，已着重讨论了激光对近代科学研究的重要性及其导致的技术应用。从早期基于激光高辐射强度的实验开始，就出现了物质非线性特性的研究，产生了关于固体、液体和气体性质的有用的光谱学资料。随着可调谐激光的发展，高分辨光谱学领域已有了重大的进展。本丛书第二卷对此已有专门讨论。

激光探测和连续监测大气成分及其特性是以电磁辐射与原子和分子之间的相互作用为基础的。随着工业生产、动力发电、运输和其他可能的空气污染源的不断增长，显然需要对现用的大气监测新技术加以扩大^[1.1,2]。现有的大多数测试设备均以取样法为依据；当然也有某些例外，例如使用非相干（非激光）电磁辐射的相关技术^[1.3]、色散技术^[1.4]和多光谱技术^[1.5]等。但是若使用激光技术，一般具有更大的工作适应性，且由于其分辨率更高而能对各种污染物进行监测。

所有建议用于监测大气气体和粒子的基本激光技术，实验上已证明有效。本卷的目的是对这些技术及其应用和局限性进行统一的带有引导性的讨论。书中包括了迄今（至1976年）所获得的成果，以便读者能对目前激光监测的具体应用能力做出评价，并对改进后的装置的使用前景进行推测。读者也可参考 Derr 所编的专著^[1.6]（包括1972年前的有关遥感的大量论文）和 Wright 等人^[1.7]最近的研究报告。

本卷包括探测和连续监测大气中微粒物质、气溶胶、原子

和分子的激光技术应用。“大气”一词的含义,包括对流层(或低层大气)和平流层(高层大气较低的部分),前者处于地面至高度 10—15 km 的对流层顶之间,后者以对流层顶为下限向上伸展到 28—30 km。为确定我们所呼吸的air的纯度,对近地面污染物的监测是必要的;同时,为发展预测各种环境空气纯度的数学模式,必须进行近地面监测和空中监测(至少到逆温层高度)。平流层的气体 and 粒子虽然对我们的直接影响不大,但意义同等重要;并曾证明,激光技术对平流层的连续监控特别有用^[1,8]。其他一些重要的大气参数,例如温度和风速等,也可用激光遥测。

既然现在已能大批生产多种类型监测仪器,为何尚需发展用于大气监测的激光仪器呢?此问题在第二章中论述,该章起始讨论目前的大气结构,接着评述激光监测设备的现有能力。一般认为遥感取代不了点取样,而只是一种辅助手段。然而,在某些情况下,遥感是经济上或技术上可行的方法。可以预料,激光监测的一个重要应用,就是在监视区域内核查污染源排放条例的遵守情况。第二章研究了这种应用以及将来很有可能出现的其他应用。

第三章详细介绍激光辐射通过大气的传输。由于正常大气气体的强烈吸收,对探测某些污染物最合适的波长不可能全部都加以利用(这种限制在高空不那么严重);另外,由于有时激光束必须传播数公里以上,必须仔细考虑吸收、散射、非线性效应、湍流和闪烁的影响。某些激光技术的监测过程与上述一种或多种相互作用有关,第三章为最佳地权衡这些影响提供了有用的资料。

最先进的激光监测技术是光雷达(激光雷达),它是通过测量气溶胶和粒子散射的激光辐射而进行探测的,目前,激光雷达系统为许多国家所广泛使用,包括为气象业务、大气研

究以及空气污染研究对粒子进行测绘。第四章集中讨论这些包括激光后向散射辐射的激光雷达的应用，也包括在差分吸收激光雷达系统中用可调谐激光器遥测气体污染物的新兴技术。

采用更完善的设备，有可能探测特定散射分子后向散射波长的特征位移，这种现象称为喇曼散射。正如在第五章讨论的那样，利用这种现象，使用一台固定频率激光器就可监测各种气体的变化。然而，喇曼散射截面通常不大，因此这种方法也许将局限于主要大气成分和污染源的监测。第五章也涉及用可调谐激光引起的荧光来探测原子和分子。荧光散射截面一般比喇曼散射截面大，但一般只能在较高的高度上（压强较低）应用，因为在这种高度上，荧光信号的猝灭作用减弱了。

最灵敏的激光监测技术以共振吸收原理为基础，当激光辐射的波长与被探测分子的主要吸收跃迁波长一致时出现共振吸收。在点取样应用中这种技术能提供很好的特性。它也是现场污染源监测设备（不取样）和长距离（至几公里）环境空气监测设备的基础。这种吸收技术的广泛应用，包括从远处后向反射器、建筑物乃至自然树叶返回的激光功率的探测，均在第六章讨论。

窄谱线宽的激光辐射独有的一个特点是可用外差技术非常灵敏地进行探测。外差探测法能监测各种非协作目标的后向散射辐射，也能用气体本身发射的谱线，实现单端被动遥测。第七章用实验中已经完成的一些实例全面地论述了外差探测的各个方面，最后展望了未来的发展。

我们力求使全书所用的文字和符号达到统一。虽有如下习惯用法，即术语“波数”和“频率”交替地使用，但各符号均有十分明确的含意。下面列出所有的符号及其定义和常用单位的一览表：

符号汇编表(常用单位)

a	粒子半径[μm], 激光束半径[mm]
\hat{a}	极化张量的各向异性部分
a_{ij}	态 i 和 j 之间的振荡强度
A	面积[cm^2, m^2]
A_{ij}	态 i 和 j 之间的爱因斯坦系数(跃迁概率)[s^{-1}]
$A(\nu)$	实际的光谱吸收率
$A'(\nu)$	测定的光谱吸收率
\mathcal{A}	吸收函数
b_j	第 j 个振动模的零点振幅[$\text{erg}^{1/2}/\text{s}$]
B	带宽[Hz]
B	分子转动常数[cm^{-1}]
B'	差分吸收方程中的联合散射参数
$B(\nu, T)$	亮度[$\text{W}/\text{cm}^2\text{-Hz-sr}$]
c	真空中的光速($2.998 \times 10^{10} \text{cm/s}$)
C_j	谱线的相对强度
C_P	压强增宽系数[$\text{cm}^{-1}/\text{atm}$]
$C_B(\tau)$	具有随机相位起伏的恒定振幅场自相关函数[W/cm^2]
$C_i(\tau)$	电流自相关函数[A^2]
C_n^2	大气结构常数[m^{-2/s^2}]
C_v, C_p	定容比热, 定压比热[$\text{cal}/\text{gm-K}$]
C_D	光电二极管电容[F]
d_c	外差探测的相干直径[mm]
D	直径[cm]
D_0	聚光孔径的直径[cm]
D_p	粒子直径($=2a$)[μm]
D_{LO}	本机振荡光束的直径[mm]
D_{aa}	$a \leftrightarrow a$ 光学碰撞的总和直径[μm]
D_{ab}	$a \leftrightarrow b$ 光学碰撞的总和直径[μm]
$D_s(d)$	在发射孔径范围内相位差的方差
D_λ^*	探测率[$\text{cm-Hz}^{1/2}\text{-W}^{-1}$]
e	电子电荷($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)
\mathcal{E}	电场强度[V/cm]
$E(t)$	复数光场[$\text{W}^{1/2}/\text{cm}$]