

多功能太阳辐射计

谭 锬 王 浩 屠瑞芳 汪 超 胡欢陵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

提 要

太阳辐射计是测量太阳直接辐射光谱特性的仪器, 本仪器的设计特点是不仅能测量太阳直接辐射的光谱特性, 还能测量太阳角散射(日晕)辐射特性。仪器在 PC 微机控制下, 能自动对准和跟踪太阳, 完成转换滤光片、调整增益、定时采集和存储数据等全部测量工作。现场实验表明所得大气光学厚度数据有较高的精度, 甚至可以得到其变化情况。

关键词: 大气光学, 太阳辐射计, 大气光学厚度, 微机应用。

一、引 言

太阳辐射计(solar radiometer)又称太阳光度计(sun-photometer), 是用来测量太阳直接辐射光谱特性的仪器。它测量不同波长的太阳直接辐射随太阳高度角的变化, 以得到该波长的大气光学厚度及大气浑浊度。大气浑浊度在气象和环境研究上都有重要意义, 常用来衡量空气中微粒物质的荷载量或污染程度。测量大气浑浊度的早期方法是用直接日射强度计和截止型滤光片, 该方法局限性较大^[1, 7]。第一个太阳辐射计发表在 1959 年^[2], 它采用干涉滤光片分光, 结构简单, 造价便宜, 但是灵敏度不足。六十年代里研究者的注意力转到了利用人造卫星和激光雷达技术, 虽然都取得了很大的进展, 但是都存在一些困难, 不能取代太阳辐射计的作用。七十年代后期人们的兴趣回到了能够提供直接、稳定和便宜的太阳辐射计技术, 设计了新一代的高性能的仪器。

为了便于比较各种各样的太阳辐射计的测量数据, 世界气象组织对太阳辐射计的设计提出了基本要求^[3]。这主要是能够在足够窄的波段上精确地测量太阳直接辐射的相对强度。其次是自动工作和使用方便; 降低成本, 以便推广应用。目前已有的太阳辐射计大致可分成三种, 一是便于普及的简易型, 如 Volz 型^[4], 需要人工瞄准和记录, 精度不高但成本低。第二种为实验室型, 通常采用光电倍增管及光栅单色仪, 因而可达到很高的性能。但是操作复杂, 成本高昂, 一般只用于基地测量。第三种是八十年代发展起来的, 它采用最新的光电元件和电子技术, 在比较简单的装置上达到了很高的性能指标。例如采用微机控制实现主动式跟踪, 程控工作, 自动采集和存储数据等, 因而大大简化操作, 便于推广, 成为当前的发展方向^[5-8]。

选取合适波长的滤光片, 从大气光学厚度数据可以计算大气中降水, 臭氧及一些污染气体含量。或者利用反演方法得到大气中气溶胶粒子的粒谱特性。而测量辐射的散射特性可以得到更多的大粒子信息。太阳是一个高质量的且可以廉价使用的光源, 故利用太阳辐

射计的研究工作在大气物理、气象研究、环境保护等许多领域都受到重视。本仪器的设计目的是要在—台设备上同时实现直接太阳辐射和散射辐射(即日晕)的测量,只需调用不同的应用程序便可用于不同目的,因而扩大了仪器的适用范围。

二、仪器设计

对多功能太阳辐射计的基本要求是在测量直接辐射时应有较高的精度,而在测量散射辐射时要有足够的灵敏度和很低的杂散光干扰。要在一个系统上实现这两种功能是有一定困难的,必须具备三个数量级以上的动态范围和极低的系统噪音。仪器应该使用方便,操作简单,能自动完成测量工作。同时也应考虑元件立足国内,降低成本,以便推广应用。

图 1 是 DTF-1 型多功能太阳辐射计结构框图,主要由以下部件组成:

1. 跟踪系统,包括蜗轮传动的、由步进电机驱动的二轴转动系——跟踪台(6)。其上装有跟踪准直筒(7),它可指向空间任意方向。准直筒轴线后部装有四象限元件(8)。当它对准太阳中心时,四象限元件的四个输出信号恰好相等;如有偏离则四个信号发生变化。利用微机来处理误差信号,并驱动步进电机,转动准直筒直到对准太阳中心,这便实现了自动跟踪。

2. 步进电机驱动电源(5),由微机(1)控制其工作,它可供三台电机同时用。

3. 辐射探测系统包括接收准直筒及限光光阑(9),会聚透镜(16),可安放八块滤光片(10)的转盘(14),滤光片驱动电机(15),恒温室(13),光伏探测元件(11),前置放大器(12)等。

4. 微机系统(1)。为了兼顾数据处理能力和通用性,我们采用 IBM-PC 兼容机,可达到最高性能价格比。系统配备了专用的 I/O 接口(3)和多通道 12 bit 高性能的 A/D 转换板(2)。

5. 电子单元(4),包括 4096 倍程控变增益放大器,四象限信号放大器及其它接口电路。

6. 温度控制器(17),用来控制探测元件室的温度,使其保持在 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 范围内,以提高仪器的长期温度稳定性。

仪器的主要特点有:

1. 采用微机(IBM-PC 兼容机)控制仪器的全部测量与数据处理工作,采用步进电机驱动和四象限自动跟踪技术,实现了自动工作。只要修改软件便可进一步扩充其应用范围。

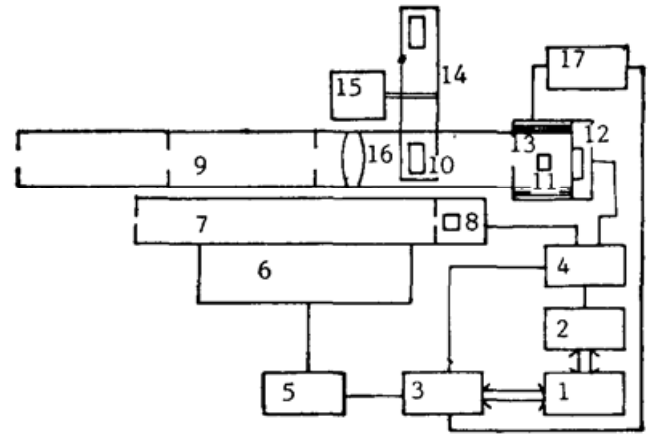


Fig. 1 The block diagram of multipurpose sunphotometer

1—PC computer. 2—A/D converter. 3—I/O interface. 4—electronic unit. 5—power of stepmotors 6—tracer. 7—trace aiming. 8—quadrant. 9—receiving diaphragm. 10—interference filter. 11—photo-detector. 12—pre-amplifier. 13—thermostat. 14—the filter wheel. 15—stepmotor. 16—convergent lens. 17—temperature controller

2. 兼顾了直接太阳辐射和散射辐射两种测量。采用程控变增益放大器达到四个数量级的动态范围,接收强弱信号可有相同量化精度。采用矩形限光光阑是为在减小筒内反射光干扰时不使接收灵敏度降低太多。进入接收筒内的直接太阳辐射的反射杂光是限制小角散射测量精度的主要因素。

3. 为了提高测量精度,减少光伏探测元件灵敏度的温度依赖关系的影响,必须对探测元件室的温度进行恒温控制。

4. 为适应流动测量减小仪器的体积重量,设计了一个控制面板,备有必要的按钮和显示灯。仪器工作可通过面板,不一定要显示器和键盘。操作面板即可选择测量项目,选择滤光片号,校准机器时钟。还可显示工作温度,滤光片号,增益变化,跟踪情况及出错报警等。

仪器采用四象限元件、步进电机和微机控制实现了主动式跟踪,跟踪精度为 $1.5'$ 。分光系统采用八块干涉滤光片,波长范围在 $400\sim 1100\text{ nm}$ 之间,可根据测量目的选定。探测元件用 HUV-1100 BQ,其响应波长为 $200\sim 1150\text{ nm}$,要求滤光片在很宽的范围上不能有次峰。辐射接收视场角为 1° ,故可忽略背景散射。限光光阑设计成可以挡住 2° 以外的直射光,以减小杂散光影响,实验表明测量散射时,最小角度可小于 3° (参见后面图 3)。温控精度为 $\pm 1^\circ$ 。放大器增益为 $1\sim 4096$ 倍。信号经 12 bit A/D 转换器量化,计算机处理后存于软盘。

三、测量原理及结果

根据 Lambert-Bear 定理,地球表面上波长为 λ 的直接太阳辐射通量 I_λ 可以写做:

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \exp[-\tau_\lambda m(\theta)], \quad (1)$$

这里忽略了天空散射辐射的影响。 $I_{0\lambda}$ 是在大气层顶波长 λ 的太阳辐射通量, τ_λ 是波长为 λ 的指向天顶方向的大气光学厚度, $m(\theta)$ 是沿天顶角 θ 的光路上的相对大气质量。由(1)式可以看到,只要大气相对稳定(即 τ_λ 保持不变), I_λ 和 $m(\theta)$ 有确定的关系,即

$$\ln I_\lambda = \ln I_{0\lambda} - \tau_\lambda m(\theta), \quad (2)$$

$\ln I_\lambda$ 与 $m(\theta)$ 有线性关系,其斜率即为大气光学厚度,其截距同太阳常数及仪器常数有关。相对大气质量主要与天顶角有关,考虑到地球曲率影响后有如下近似关系:

$$m(\theta) = \sec \theta - 0.001867(\sec \theta - 1) - 0.002875(\sec \theta - 1)^2 - 0.0008683(\sec \theta - 1)^3. \quad (3)$$

天顶角度可以直接测量,也可以根据标准时间和当地的经纬度从天文年历上查算出,或者用公式计算。这里采用计算比较方便。这样求大气光学厚度的任务简化为在一定的时间内(此时大气质量需要有较大的变化,例如 $2\sim 5$)不断的依次对八个波长的干涉滤光片记录太阳辐射相对值和北京时间,然后根据(2)式作图。图 2 即为一例,是在合肥地区的一次实际测量。直线是数据的回归线,其斜率就是大气光学厚度,图上已经注明了所用的七个波长及光学厚度值。

常用的定标方法即所谓 Langley 法,就是按(2)式作图,检验这些数据点是否在一条直线上。这项工作通常要在没有空气污染的高山上进行。可以看到图 2 的数据有些偏离直线,

显然合肥郊区不是一个理想的定标场所。要检验这一结论需要进行严格的定标实验,但是我们可以做一验证。我们在第八块滤光片的位置上放置了一张散射片,它与波长几乎无关。可以看到 8 号的数据变化相当平坦,证明数据的波动不是仪器稳定性不良造成的,似乎同大气中某些成分的选择性吸收有关,即同空气污染物有关。当仪器主要用于测量大气光学厚度时,定标与否并不重要。实际上,为避免仪器性能长期稳定性不好或仪器常数随地球和太阳之间的距离而变造成的误差,人们总是根据在一段时间内的多次测量数据来求取大气光学厚度的平均值。实验证明,由于测量精度的提高,测量时间可以缩短。例如,以前的测量要 3 小时左右(大气质量变化 4 左右),现在只要一半时间就可得到满意的数据。

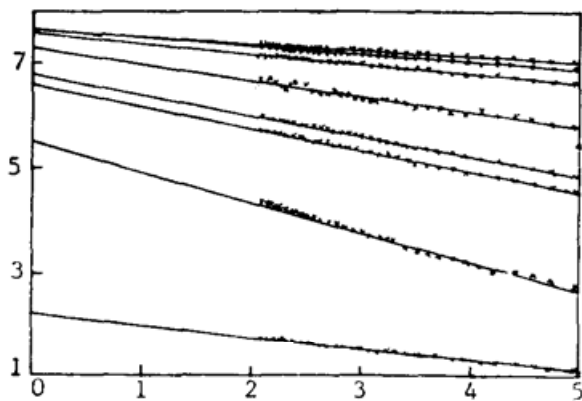


Fig. 2 The measurement example of sunphotometer in Hefei

X: atmospheric mass (dimensionless)

Y: relative radiance (natural logarithm)

order:	1	2	3	4	5	6	7
wavelength:	1031	872	780	440	612	522	532 (nm)
thickness:	0.116	0.152	0.191	0.574	0.303	0.412	0.399

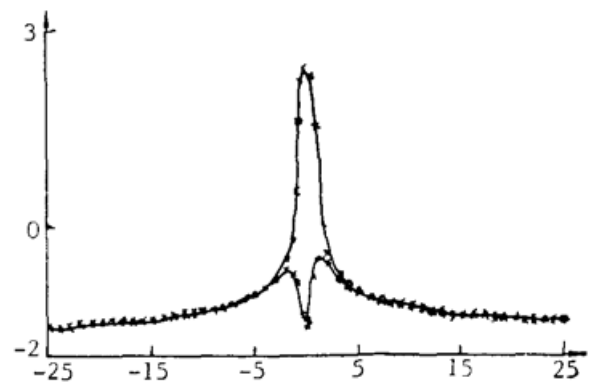


Fig. 3 The example of aureole measurement

X: azimuth angle (°).

Y: relative intensity (normal logarithm).

在作角散射辐射测量时,首先对准太阳中心,以其为零度,然后保持天顶角不变,改变方位角测量辐射大小。图 3 所示为一次实验结果,“+”代表所测辐射的相对变化。注意,在 2° 之内每隔 0.5° 测量一次,之外每隔 1° 测量一次。还要注意方位角 φ 与散射角 ψ 的换算关系为:

$$\sin(\psi/2) = \sin(\varphi/2) \cdot \sin \theta. \quad (4)$$

其中 θ 表示天顶角。当方位角不大时近似有:

$$\psi = \varphi \cdot \sin \theta. \quad (5)$$

实际上对我们所关心的角度,此式的误差不超过 1%。图 3 中, $\sin \theta \approx 0.73$ 。

为了证明该系统测量小角散射的有效性,即消除了杂散光干扰,我们做了如下对比实验。用一个合适的遮光板,在上述测量时挡住,也只挡住直接太阳辐射,即使其影子刚好盖住辐射计入口。测量结果在图 3 上用“x”号代表,可以看出方位角大于 3° 的数据符合的很好,这相当于散射角为 2.2°。

四、结 论

我们采用新一代微机和电子元件,设计并完成了多功能太阳辐射计,它可以同时测量直

接太阳辐射和角散射辐射(日晕)。由于其主要硬件功能是可程控的,故编制不同的软件就可以实现不同测量目的,扩大了应用范围。仪器可以自动工作,包括搜索与跟踪太阳,定时采集数据,改变滤光片,改变散射角,数据与环境参数的记录存盘等,故操作简单,使用方便。

本项工作得到“863”高技术计划的支持,已于1989年12月通过鉴定。

参 考 文 献

- [1] 王炳忠;《太阳辐射能的测量与标准》, (科学出版社,北京,1988), 37, 242.
- [2] F. Volz; *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, 1959, Ser. **B10**, 100.
- [3] C. Frohlich; *Application note of the WMO sunphotometer*, WMO/PMOD, 1979.
- [4] F. E. Volz; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 8 (Aug), 1732.
- [5] C. Tomasi *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 4 (Feb), 622.
- [6] G. A. d'Almeida *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 23 (Dec), 3796.

Multi-purpose solar photometer

TAN KUEN, WAN JIE, TU REIFANG, WANG CHAO AND HU HUANLING

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

(Received 6 August 1990; revised 5 November 1990)

Abst act

This solar photometer is designed to measure not only the spectral characteristics of direct solar radiation, but the angle scattering property of the atmosphere (i.e. aureole). It is controlled by a microcomputer, so can work with functions of searching and tracking the Sun movement, converting filters, adjusting the gain of amplifier, sampling and storing the data on time. The experiments showed that the results measured are in high accuracy, even can obtain the variation of the atmospheric optical thickness.

Key words: atmospheric optics, sunphotometer, solar radiation.