

文章编号: 1672-8785(2006)06-0035-06

# 太阳辐射计

赵志刚

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 本文简要介绍了太阳辐射测量的基本概念和太阳辐射计的发展背景。在此基础上, 针对国内外现有的能够用于测量直接太阳辐射的太阳辐射计, 从仪器系统设计、光学系统设计、探测器选择、电子系统及数据处理等各个角度进行分析比较, 总结得到了该类仪器目前基本的发展状况。

**关键词:** 太阳辐射计; 直接太阳辐射; 辐射测量

**中图分类号:** TH765 **文献标识码:** A

## Sun Photometer

ZHAO Zhi-gang

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)*

**Abstract:** The basic concept of solar radiation measurement and the development background of sun-photometers are presented in this paper. After analyzing and comparing the aspects of system design, optical system design, choice of sensor, electronic system and data processing of the existing sun-photometers at home and board, the basic development status of this series of instruments is obtained.

**Key words:** sun photometer; direct solar radiation; radiation measurement

### 1 引言

气象学和气候学中的辐射及其物理过程是大气物理学中的一个重要组成部分, 也是诸如生物科学、环境科学、材料科学等学科研究的必备要素。因此, 科学地研究和观测气象辐射是现今科学技术的重要内容。气象辐射观测仪器作为气象辐射观测的工具, 是取得气象辐射要素的惟一途径。

太阳辐射计是用来测量太阳辐射光谱特性的仪器, 可用于同时测量不同波长的太阳直接辐射、天空散射辐射、地面反射辐射或太阳总辐射等辐射量。其中, 通过直接辐射测量可得到各个波长的大气光学厚度, 由它可计算出大气浑

浊度; 测量太阳直接辐射和天空光角散射特性的光谱特性可以较好地了解大气中气溶胶粒子的平均尺寸谱, 从而可以计算出大气中水气、臭氧以及氮氧化物等污染气体分子在整个大气层中的总含量, 反演出气溶胶粒子谱和光学特性等参数。因此太阳辐射计是大气光学、气象研究和空气污染监测的一种很好的仪器。利用太阳辐射计测量太阳直接辐射的光谱特性, 通过相关计算和分析得到在中分辨率成像光谱仪定标过程中的大气有效透过率; 另外, 在定标时, 用成像光谱仪对一组不同反射率的标准反射率板进行测量, 可得到不同的反照率和对应的信号输出, 结合以上数据, 使用线性回归就可得到定标方程中的定标系数。

**收稿日期:** 2005-08-29

**作者简介:** 赵志刚(1981—), 男, 汉族, 在读研究生, 研究方向为便携式自动太阳辐射计。

## 2 辐射测量的基本概念

### 2.1 辐射基本量

辐射就是以电磁波和粒子形式向周围发射和传递能量的一种方式。辐射既具有无线电波的波动性,又具有有一定质量、能量和动量的微粒子性。这些粒子称为量子(或光量子)。任何温度在绝对零度以上的物质都发射着和吸收着辐射。发射辐射的物质称为发射体。辐射及其物理过程是一种基本物理现象。衡量其大小强弱及其变化过程的分析求解都有其基本单位和量纲。气象辐射现用的比较规范的单位和量纲是世界气象组织最新推荐的“辐照度”,基本单位为  $W/m^2$  和“辐通量”,基本单位为  $J/m^2$ 。此外还有一些光谱量单位等,可参照世界气象组织的最新推荐指南。

### 2.2 太阳辐射的光谱分布

太阳辐射是电磁辐射的一种,它是物质的一种形式,既具有波动性,也具有粒子性,在本质上与无线电波没有什么差异,只是波长和频率不同而已。太阳辐射光谱的主要波长范围为  $0.15\mu m \sim 4\mu m$ ,而地面和大气辐射的主要波长范围则为  $3\mu m \sim 20\mu m$ 。在气象学中,就根据波长的不同,常把太阳辐射叫做短波辐射,而把地面和大气辐射叫做长波辐射。太阳辐射的光谱可以划分为几个波段。波长短于  $0.4\mu m$  的称为紫外波段,  $0.49\mu m \sim 0.75\mu m$  为可见光波段,而波长长于  $0.75\mu m$  的则称为红外波段,它还可以细分为近红外 ( $0.75\mu m \sim 25\mu m$ ) 和远红外 ( $25\mu m \sim 1000\mu m$ ) 两个波段。如图 1 所示。

太阳辐射通过大气时会遇到各种粒子和气

体,它们会吸收并散射太阳辐射。地球上某一点接受的太阳能,一部分来自直接辐射(指来自日盘  $0.5^\circ$  立体角内与该立体角轴垂直的面的太阳辐射),另一部分则是散射辐射(指地平面上收到的来自天穹  $2\pi$  立体角向下的大气等散射和反射的太阳辐射),二者之和称为太阳总辐射。实际观测的物理量主要是辐射强度  $E$ ,指单位时间内通过单位面积上的辐射能量(单位为  $W/m^2$ )。无云的中午,在太阳光与地球表面垂直方向上,当空气含水量近  $1cm$ 、臭氧含量近  $2mm$ 、空气混浊系数为  $0.05$  悬浮微粒时,从太阳和天空辐射到地球表面的总辐射强度可达到  $1.12kW/m^2$ ;当太阳光对地面的入射角大于  $60^\circ$  时,对于无工业污染的城市,此值具有一定的代表性。

图 2 所示曲线  $e$  表示在地球表面上直接太阳辐射的光谱分布。这条曲线只有在太阳高度为  $90^\circ$  且太阳辐射是垂直入射的情况下才正确。在太阳高度很低时,总的能量水平降低了,而且光谱分布朝红区漂移。直接太阳辐射的强度随空气混浊度的增加而减少。亚热带气候混浊度较温带和寒带高,城市上空比农村高,同一地点夏季比冬季高。

### 2.3 光源光谱能量分布的测量

光源的光谱辐射照度(或光谱辐射通量,或光谱辐射亮度)与波长的关系称为光源的光谱能量分布,一般以光谱辐射照度(通量,强度)为纵坐标、波长为横坐标来表示。从光谱能量分布可以知道光源辐射的波长范围、某一段的辐射通量值以及这一波段的能量占总辐射能量的百分比等。在大多数光谱测量中,并不需要知道光谱

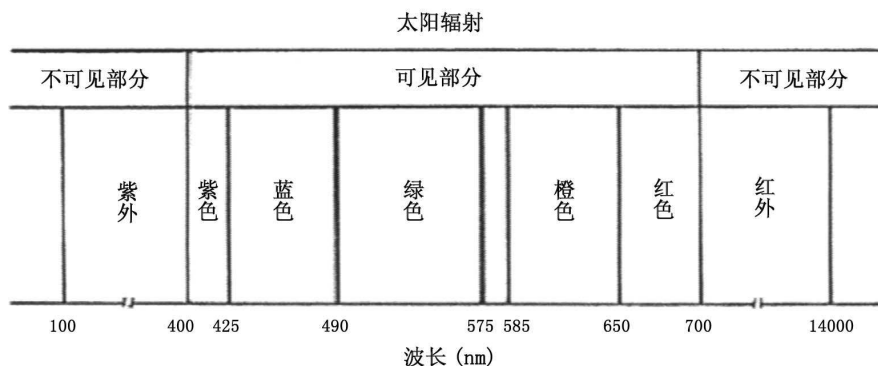


图 1 太阳辐射光谱

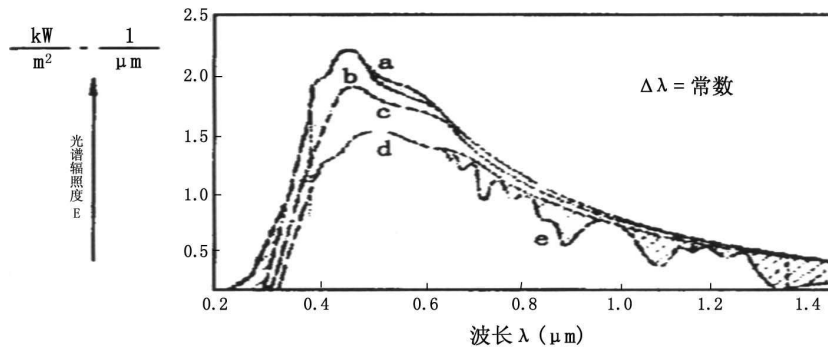


图 2 直接太阳辐射的光谱分布

辐射亮度的绝对值, 而只需要知道它们的相对值 (即以某一波长的光谱辐射照度为 100, 其他波长的光谱辐射照度与其相比的百分数)。光谱辐射照度的相对值与波长的关系称为光源的相对光谱能量分布。

测量光源的光谱能量分布, 首先必须用分光仪器把光分成光谱, 然后用适当的探测器去探测, 最后和光谱能量标准的光源去比较。而分光仪对各种不同波长的光的透射系数各不相同, 它有一个随波长而变化的透射率分布, 我们用符号  $\tau(\lambda)$  表示。光探测器对不同波长的光的敏感程度也不同, 因此光探测器也有一个光谱灵敏度, 用  $R_i(\lambda)$  表示。设探测器表面接收到的辐通量为  $P(\lambda)$ , 光学系统入瞳面积为  $A$ , 光学系统透过率为  $\tau_0(\lambda)$ , 直接太阳辐射光谱辐照度为  $E_0(\lambda)$ , 光谱带宽为  $\Delta\lambda$ , 则

$$P(\lambda) = E_0(\lambda)\Delta\lambda A\tau_0(\lambda) \quad (1)$$

$$\tau(\lambda) = \tau_1(\lambda)\tau_2 \quad (2)$$

式中,  $\tau_0(\lambda)$  为光学系统透过率,  $\tau_1(\lambda)$  为单色仪的透过率,  $\tau_2$  是光学系统除了单色仪外其余镜片的透过率。

所以有

$$P(\lambda) = E_0(\lambda)\Delta\lambda A\tau_1(\lambda)\tau_2 \quad (3)$$

另一方面, 设探测器响应率为  $R_i(\lambda)$ , 探测器输出光电流为  $I$ , 其中探测器光谱响应率曲线如图 3 所示。则

$$I = R_i(\lambda)P(\lambda) = R_i(\lambda)E_0(\lambda)\Delta\lambda A\tau_1(\lambda)\tau_2 \quad (4)$$

由此得到

$$1/\tau_1(\lambda) = R_i(\lambda)E_0(\lambda)\Delta\lambda A\tau_2/I \quad (5)$$

式中,  $E_0(\lambda)$  用最大光谱辐照度代入,  $I$  用探测器的短路光电流  $I_{sc}$  代入, 其它各量用已知的数值代入, 就可以得出保证探测器在线性范围内正常工作所需的单色仪在各个通道波长处的透过率  $\tau_1(\lambda)$ , 这样的透过率可以通过加衰减片来实现。此时由已知的  $\tau_0(\lambda)$  和  $R_i(\lambda)$  可求得光源的光谱能量分布  $P(\lambda)$ 。

### 3 直接太阳辐射计

直接太阳辐射 (光度) 计是一种用来测量太阳直接日照强度的仪器。由于太阳辐射 (光度) 计被设计为直接指向太阳光, 所以它只测量直接日照, 而不测量由天空、云雾散射产生的散射光。

#### 3.1 直接太阳辐射计的组成

##### 3.1.1 光学系统

世界气象组织规定的太阳辐射计 8 个光学通道的中心波长分别为 340nm、380nm、440nm、500nm、675nm、870nm、936nm 和 1020nm, 规定视场角 (FOV) 为  $2.5^\circ$  (WMO #7)。

(典型的) 光学系统由以下几部分组成:

- (1) 石英窗, 用来防止灰尘和湿气进入仪器, 从而最大限度地减少对光学器件的损坏;
- (2) 放在石英窗后面的光阑, 作为仪器入口的场阑, 从而最大限度地减少透镜的象差;
- (3) 一组直径大小相同的 (石英) 透镜, 对应入射光的不同波长选取不同的焦距;
- (4) 各个通道相配合的衰减片, 用来把探测器的输出限制在一定范围内以获得良好的精度;

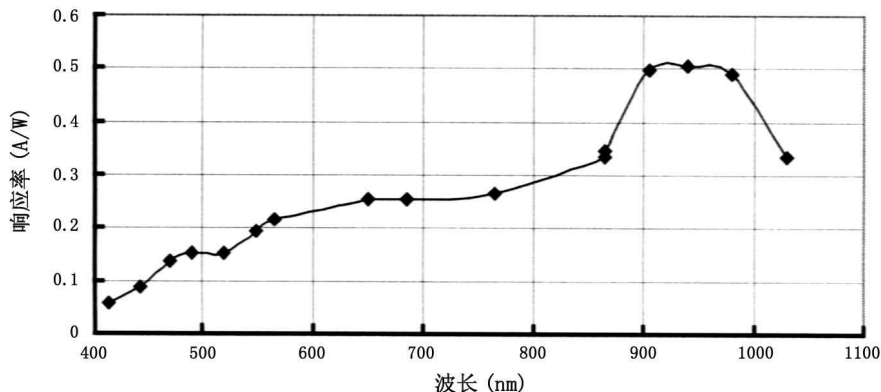


图 3 探测器光谱响应率

(5) 分光仪器。

3.1.2 探测器

大部分太阳辐射计中使用的探测器有光电二极管、光电倍增管、硅太阳电池、光伏探测器和热电堆探测器。

3.1.3 自动太阳跟踪装置

(1) 四象限探测器

激光导引头、激光经纬仪等光电跟踪仪器常用四象限探测器件作为光电传感器，探测目标的方位。在跟踪过程中，来自目标的光信号经光学系统汇集投射在四象限探测器的光敏面上，形成目标像斑。四象限探测系统就是通过目标像斑在四个象限上的能量分布状况来解算目标相对跟踪系统光轴的方位偏差角。理想的探测系统希望解算出的偏差数据与目标相对四象限中心的实际偏差呈线性关系。然而由于各种因素的限制，理想条件很难得到。

目标像斑在四象限上的分布偏差数据有多种计算方法，比较典型的有四象限加减法和对角相减法。

四象限加减法有 (见图 4)

$$\begin{cases} E_x = S_a + S_d + S_b - S_c \\ E_y = S_a + S_b - S_c + S_d \end{cases} \quad (6)$$

对角相减法有 (见图 5)

$$\begin{cases} E_x = S_a + S_c \\ E_y = S_b + S_d \end{cases} \quad (7)$$

式中， $E_x$  为偏差数据在 x 方向的分量， $E_y$  为偏差数据在 y 方向的分量， $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$ 、 $S_d$  为

目标像斑在 A、B、C、D 四个象限的面积。(注：这里假设目标像斑光强均匀分布)。

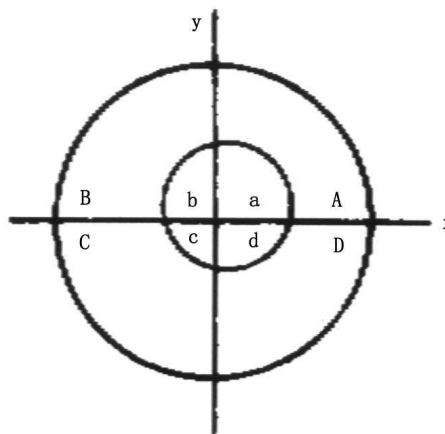


图 4 四象限加减法

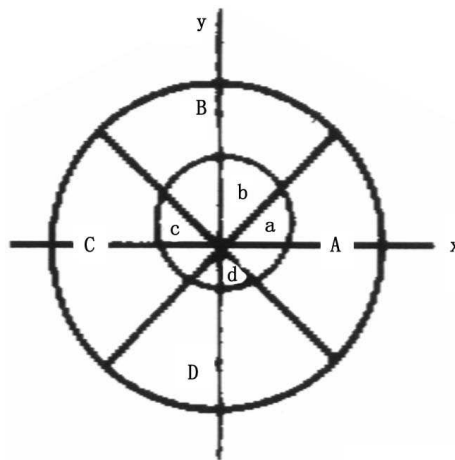


图 5 对角加减法

通常，为了消除像斑强度的影响还要对上述数据进行归一化处理。

(2) 使用图像传感器跟踪

目前, 应用中的图像传感器主要有电荷耦合器件 (CCD) 和互补金属氧化物半导体 (CMOS) 两种。CCD 传感器由于具有读取噪声低、动态范围大、相应灵敏度高优点而能获得高于 CMOS 传感器的图像质量, 因而也成为此前应用中的主流器件。但它功耗高, 体积大, 生产成本低, 且不易与主流的 CMOS 技术集成于同一芯片中。而 CMOS 图像传感器技术近几年发展迅速。与传统的 CCD 传感器相比, CMOS 最明显的优势是集成度高、功耗小、生产成本低, 容易与其它芯片整合。CMOS 芯片几乎可以将整个图像系统, 包括传感器阵列、时序逻辑、可编程控制功能和 A/D 转换器集成到一块芯片上, 特别适应当今微型化成像产品的需要。由于以上优点, CMOS 图像传感器已成为研究和应用的热点。

#### 3.1.4 电子学及数据处理分系统

太阳辐射计中还有一个很重要的部分就是电子学及数据处理分系统, 电路将探测器产生的光电流放大后, 对应每个波长的模拟输出信号与入射光谱辐照度成正比; 之后经过模 / 数 (A/D) 转换得到各通道的数据, 这些数据可以存储在仪器内部的存储器中, 利用已存储在仪器中的算法计算出最终结果; 也可以通过电缆下载到计算机上, 再使用专门设计的软件进行处理得到所需数据结果, 并将它们显示、归档等。

#### 3.1.5 其余设备

除上述基本设备外, 有些太阳辐射计还有以下一些附加设备。

**温度控制装置:** 为了使探测器的温度保持稳定, 以便保持探测器的精度, 许多太阳探测器都具备温度控制功能。

**GPS 接收器:** 使用 GPS 接收器, 可以获取决定太阳天顶角的时间和位置信息, 有助于提高仪器测量的准确度和精度, 也为测量提供了方便。

### 3.2 各种太阳辐射计的比较

#### 3.2.1 TERC VHS-1 太阳辐射计

VHS-1 太阳辐射计是美国 Haze-SPAN 项目中使用的仪器, 其主要功能是通过测量直接太阳辐射来测量薄雾, 还可用于测量宇宙常数 (ET

constant)、气溶胶光学厚度 (AOT) 等。该仪器原理简单, 所需要的原材料少, 制作也很简单; 关键在于使用了普通的发光二极管 (LED) 作为光探测器, 可以探测窄波段的波长。

#### 3.2.2 意大利大气和海洋研究所

这里的太阳辐射计专门用来测量在选定频谱间隔内的直接太阳辐射, 使用的带通滤光片被放置在对应的大气窗口位置上; 从 1980 年开始, 该所在意大利、南极洲、德国、葡萄牙等地做了许多重要的现场测试, 所有参加测试的太阳辐射计都是多波段太阳辐射计 FISBAT (1983) 的升级版, 仪器上的光学和电子设备都与之非常相似。

#### 3.2.3 SP01 太阳辐射计和 SP01-A 日晕计

SP01 和 SP01-A 由澳大利亚气象局研制, 用于支持世界气象组织的全球大气观测项目。SP01 太阳辐射计用于窄带频谱太阳辐射测量, 只能以太阳辐射计模式工作; SP01-A 日晕计用于窄带日晕测量, 准确地测量 4 个选取的太阳直射束带宽, 可灵敏地测量大气粉尘含量, 有 4 个独立的分光日射强度计, 它们以轴向对齐的方式装在一个密封的外壳内。

该仪器的特点是 4 个窄带同时测量, 保持探测器和滤光片在恒温下工作, 增强了稳定性, SP01-A 中的机动化场阑可以暂时关闭以进行零信号检测。

#### 3.2.4 SPUV-6/10 太阳辐射计

SPUV 是由美国 Yankee 环境系统公司生产的一种精确太阳辐射计, 它最多能在 UV-B 和可见光区域的 10 种波长处测量直接太阳光谱辐射; 它超过了 WMO 规定的太阳辐射计的技术指标, 而且是第一台商用的能测量 UV-B 区域窄带的太阳辐射计; 测量臭氧厚度或大气混浊度时, 要求测量太阳频谱中的分离光谱线, SPUV 能达到扫描分光辐射谱仪的准确度, 却只需要其一部分花费以及更少的间接维护费用。

SPUV 十分结实, 可用于现场长期操作, 它完全封闭, 保持干燥; 所有对温度敏感的元素都放置在温控的外壳内, 保证他们不受周围温度的影响; SPUV 是多用途的仪器, 可以配置 6 个或 10 个不同波长的通道; 另外, SPUV 模块化

的设计使得仪器可以在现场增加或减少各个独立的通道。

### 3.2.5 便携式自动太阳辐射计

目前国内比较具有代表性的太阳辐射计就是由中科院安徽光学精密机械研究所大气光学研究室研制的 DTF 系列太阳辐射计。

DTF-I 型多功能太阳辐射计兼有直接太阳辐射计和日晕计的功能,可用于测量直接太阳辐射和天空散射辐射,该仪器采用滤光片分光、微机控制、数据采集和处理、四象限跟踪系统等技术,可以实现自动搜索和跟踪,并实现自动功能转换,仪器在总体设计和精确测量气溶胶的光学特性方面已达到 20 世纪 80 年代的国际先进水平。

## 4 总结

通过以上比较分析,基本弄清了太阳辐射计当前发展的状况。现有的太阳辐射计在实现主要功能的基础上,有几个发展方向:一是提高精度和准确度,并且不断完善功能;二是尽量实现便携、小型化、高性价比,以适合工程测量的

需要;还有就是根据特殊应用采用特殊设计实现特别功能。

## 参考文献

- [1] Sun-photometer research, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e dell'Oceano-Institute of Atmospheric and Oceanic Sciences, <http://www.isao.bo.cnr.it/radiclim/fotomet1.html>
- [2] SP01 for Narrowband Spectral Solar Radiation Measurement; SP01-A for Narrowband Solar Aureole Measurement, <http://www.carterscott.com.au>
- [3] Sun Photometer Model SPUV BULLETIN SPUV-6-10, <http://www.yesinc.com>
- [4] <http://simbios.gsfc.nasa.gov/Sunphotometers/>
- [5] 薛君敖,李在清,等.光辐射测量原理和方法[M].北京:计量出版社,1980.
- [6] 王岱,杨世洪.采用四象限探测器的双轴跟踪控制技术[J].光电工程,2003,30(5).
- [7] 徐宁,余世杰,杜少武.新型便携式太阳总辐射计的研制[J].太阳能学报,2000,21(1):117-120.
- [8] 詹杰,谭锬,邵石生,等.便携式自动太阳辐射计[J].量子电子学报,2001,18(6):551-555.
- [9] 谢伟.太阳辐射计技术分析[J].红外,2003(3):9-15.

~~~~~

## 简 讯

### 组合式夜视系统

美国电子物理学公司生产出一种名为 AstroScope (天文仪) 9350 的组合式夜视系统,其中包含最先进的第三代像增强管,能够把亮度级低于  $10^{-4}lx$  的景象变换

成明亮的高分辨率图像。一种定制的中继光具能够产生清晰的边到边图像细节而不会有晕光。这种夜视系统可与各种摄像机组件配接,其装配时间不会超过 10s。安装在物镜与摄像机体之间之后,夜视系统可直接利用摄像机的电源,其坚固的、涂有环氧树脂的铝机壳能适应严酷的野外环境。

□ 顾聚兴

~~~~~

## 简 讯

### 傅里叶变换红外成像系统

Varian 公司推出一种适合傅里叶变换红外成像应用的快速红外成像系统。这种成像系统使用该公司自己生产的显微镜、焦平面列阵探测器和快速扫描光谱仪。该

公司的焦平面列阵有 256 元、1024 元和 4096 元三种规格,它们所敏感的光谱范围为  $4000cm^{-1} \sim 900cm^{-1}$ 。成像系统被设计成能够均匀地响应样品的表面,并在数秒内产生二维空间信息。显微镜的双视场光具使得成像系统能以观测或高分辨率的模式工作。集成的软件可控制仪器并对获得的数据进行分析。

□ 顾聚兴