

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2009.02.010

# 新型太阳光度计 DTF-5 的研制及标定

李建玉, 詹杰, 高亦桥, 饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 介绍了一种基于 VC 平台可实时监控的可视化多波长新型便携式自动太阳光度计 DTF-5, 它可实现瞬时太阳辐照度、现场环境温度及加热温度的实时测量与显示, 同时具有电机运转、太阳跟踪、加热温度等强大的在线检测功能。该仪器在本单位自行研制的第三代太阳光度计的基础上进行了很大改进, 使仪器更方便使用、更适应恶劣环境、更小型化和有更高的性能价格比。对实测结果的分析比较表明, 该仪器令人满意, 并对其测量标定原理及应用进行了阐述。

**关键词:** 太阳光度计; Visual C++; 标定

中图分类号: TH765.2

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2009)02-0141-09

## Development and Calibration of DTF-5 Sun-Photometer

LI Jian-yu, ZHAN Jie, Gao Yi-qiao, RAO Rui-zhong

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A set of new-style portable autocontrol multi-wavelength sun-photometer based on Visual C++ is introduced, which can be real-time monitored and visualized. It can measure and display instantaneous solar radiation, heating temperature, and temperature of work field as well. It has the on-line detection function of electric engine operation, sun tracing, heating temperature *et al.* The new-style sun-photometer is portable, adaptable to the abominable environment, smaller and has higher ratio of performance and price. The device is satisfactory according to the analysis of the measurement results. Also the instrument calibration and its application are described.

**Key words:** sun photometer; Visual C++; calibration

## 1 引言

太阳光度计是一种用于气象观测、地基测量、大气研究的重要仪器, 国外许多国家已经研制出全自动太阳光度计, 如日本的全波段光栅太阳光

度计 pgs100、法国 CMEL 公司研制的自动跟踪太阳光度计 CE318 等。自 1989 年安徽光机所自行研制出了我国的第一代太阳光度计以来<sup>[1]</sup>, 研究人员对其进行了不断的改进, 于 1999 年研制出基于

收稿日期: 2009-01-16; 修改日期: 2009-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40775028)、中国科学院知识创新方向性项目 KG CX2-SW-413

E-mail: yuzi83715@yahoo.com.cn

单片机控制系统实现自动控制跟踪的太阳光度计 DTF-3<sup>[2]</sup>, 多年来一直用于大气探测实验<sup>[3]</sup>. 实践证明, 该仪器在大气光学测量方面发挥了重要作用, 但一直以来该仪器只在本单位使用, 随着国家对大气科学研究的重视, 越来越多的研究单位需要使用, 但由于我国市场上还没有商业化的产品, 太阳光度计都是从国外进口, 且费用很高, 故设计出有更高的性能价格比、面向用户、更适合推广应用的太阳光度计势在必行. 新型便携式自动太阳光度计 DTF-5. 在很多方面对 DTF-3 做了很大改进, 如: 仪器的一体化设计、可视化操作、实时测量显示、全天候工作、长数据线传输等, 使其更适合推广应用, 适宜相关单位普遍使用, 为我国气象事业做出不可磨灭的贡献.

本文主要介绍了新研制的太阳光度计 DTF-5 的组成及其控制系统、光学及跟踪系统设计、软件界面的设计<sup>[4-5]</sup>、仪器指标, 利用 Langley 法对仪器进行标定, 得到仪器的标定值, 并将仪器的测量结果与日本的光栅太阳光度计 pgs100 的测量结果进行对比, 对比结果表明新研制的太阳光度计 DTF-5 的测量结果是合理的.

## 2 仪器整体设计

该新型太阳光度计 DTF-5 在整体设计上的改进主要体现在以下几个方面: 外观上采用一体化设计, 将各数据线、电路系统和跟踪台融为一体, 外出携带方便; 采用多功能集成化的 RTU6100 系列远程终端设备替代原先的单片机使得仪器在电路设计上变得简洁, 且便于仪器的功能扩展, 同时也使得仪器轻盈便携; 采用 Visual C++ 编程, 设计了友好的用户操作界面, 可对实验测量数据及计算结果进行实时显示和存储. 下面就该仪器研制的各单元进行详细的阐述.

### 2.1 仪器硬件组成及控制系统

该仪器主要由计算机、采集控制系统和自动跟踪装置组成. 计算机采用笔记本电脑, 外出实验携带方便, 只完成数据处理和通信工作. 采集控制系统采用阿尔泰科技发展有限公司开发研制的 RTU6100 系列远程终端设备<sup>[6]</sup>, 它可实现对现场信号的采集和对现场设备的控制. 自动跟踪装置主要由步进电机、驱动电源和跟踪台组成. 图 1 是该仪器的硬件组成方框图.

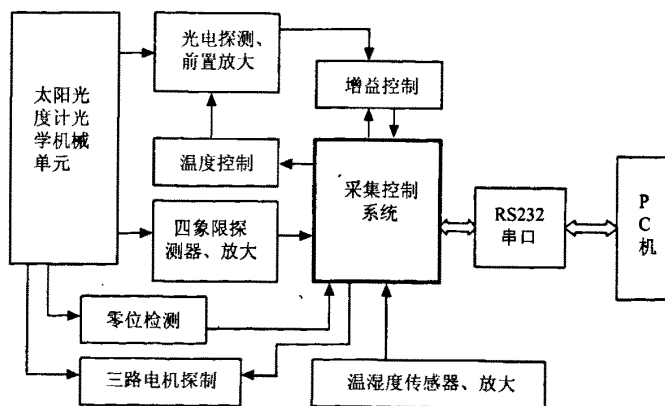


图 1 硬件组成方框图

Fig.1 Block diagram of hardware composing

RTU6100 系列远程终端设备的硬件基于功能强大的 32 位 ARM7 核心的 AT91SAM7X256 处理器, 拥有 256 K Flash、64 K SRAM、16 Mbit 的数据存储器、8 路的 14 位带保护的模拟量输入和 4 路的 12 位模拟量输出、32 个可每 8 路配置的数字量输入 / 输出口, 总线有 RS232、RS485 和 10/100M 自适应以太网, 并带有兼容 CAN2.0 的总线接口。在板上还搭配精确的温湿度传感器和 RTC 时钟, 为现场应用提供功能强大的硬件平台。采用 RTU6100 提高了仪器的测量速率, 同时, 它集采集与控制系统于一体, 为仪器的一体化设计提供了方便, 通过 RTU6100 可完成光度计的自动跟踪、自动控温、数据采集、通讯等各项功能。通过 RS232C 标准接口, 可用较长的通讯电缆线与笔记本或台式计算机连接 (主机), 实现主从控制。要达到足够高的测量精度, 采用高性能的光伏探测元件 (带有低噪音前放), 并能控制其工作温度, 采用变增益放大器以达到较大的动态范围。采用四象限光电探测元件和步进电机驱动, 仪器运行时可自动跟踪和对准太阳中心。

仪器各主要部件功能简介:

- 1) RS232 串口实现主机与采集控制系统的数据通讯;
- 2) 数字温湿度传感器输出数字信号给控制系统并通过串口传给计算机, 实时显示环境温度和湿度;
- 3) 三路电机中两路用于光学机械部件的俯仰

和左右旋转, 另一路旋转 8 个波段的滤光片;

4) 四象限探测器利用四个象限探测太阳辐射值并转换为电压信号, 通过检测各象限电压信号判断其差值从而驱动光学机械部件旋转达到自动跟踪太阳的目的;

5) 零位检测单元用于多块滤光片的定位;

6) 探测元件的温度控制保证探测器恒温工作, 减少探测器的温漂对测量信号的影响;

7) 太阳直接辐射通过凸透镜聚光到光电倍增管探测截面, 光电倍增管将光信号转换为电压信号并进行不同档次的增益控制, 然后通过控制器采集部分进行数据采集, 转换为数字信号, 通过 RS-232 串口传到计算机进行实时处理和显示。

## 2.2 光学系统设计

设计了如图 2 所示的光路来实现可见到近红外波段太阳辐射光谱的测量。

入射的太阳复合光线经过长粗镜筒内部的衰减片、光阑、组合透镜及滤光片将一定波段的太阳辐射光会聚到光电探测器截面, 光电探测器将光信号转化成电压信号并进行前置放大和滤波, 经过后续电路处理后进行采集和显示。由衰减片、光阑、组合透镜组成的光接收系统满足  $32'$  的太阳视场, 考虑跟踪精度设计视场为  $1^\circ$ , 设计组合透镜焦距  $f=90\text{ mm}$ , 口径  $\Phi=30\text{ mm}$ 。光阑处可根据季节及地区太阳光的强弱加适当的衰减片, 避免光电探测元件采集时出现饱和, 对于一天中太阳光的强弱变化在电路中设计了增益控制电路来

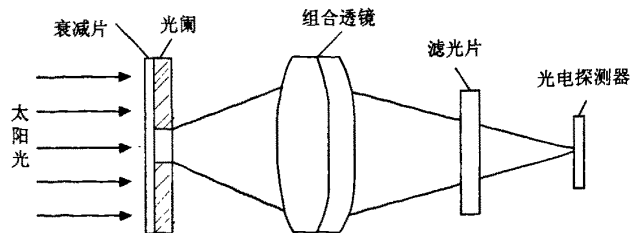


图 2 太阳辐射光谱探测光路图

Fig.2 Optical sketch map of solar radiation spectral exploration

提高探测精度和解决饱和问题。

为了实现多光谱测量,需要使用多块不同波段的滤光片,根据测量需要,选择 1050 nm、940 nm、860 nm、780 nm、670 nm、610 nm、520 nm、400 nm 共八个波段带宽 10 nm 的滤光片,设计了滤光片转盘放置在光电探测器和组合透镜之间,将八块滤光片和一个用于背景测量的黑色不透光块均匀分布于转盘上,采用混合式步进电机驱动滤光片转盘,由控制器自动控制其用于滤光片的

定位和切换。为提高控制精度,电机驱动系统可细分为 2、4、8 等分。转盘转动一圈可完成 350~1100 nm 范围的光谱测量,还可根据需要任意放置其它波段的滤光片,如紫外波段。

### 2.3 太阳跟踪系统设计

设计了采集太阳光的装置及控制程序闭环控制镜筒的瞄准方向(水平和俯仰)来跟踪太阳。采集装置主要由采集光部分、四象限探测部分及信号放大采集部分组成,如图 3 所示。

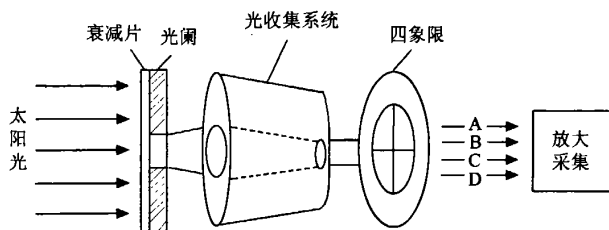


图 3 太阳跟踪光路图

Fig.3 Optical sketch map of sun track

采集太阳光的短细镜筒内部依次放置了衰减片、光阑和光收集系统。太阳光通过衰减片光强有一定的衰减,避免四象限因深度饱和出现跟踪不准确;使用光阑使太阳光斑小到一定的尺度有利于黑色锥柱状光收集系统收集光到四象限探测元件小区域敏感区;镜筒后放高灵敏度四象限探测器。对探测器输出的 A、B、C、D 四个电压信号进行放大和采集,采集到的信号作为判断依据用于实现自动跟踪。控制程序跟踪原理为:按照一定的时间检测四个象限的电压信号值,分析各个象限电压信号差值,判断差值是否处于所要求的范围发出相应指令驱动电机转动使镜筒在水平和俯仰方向进行调整,从而跟踪太阳,跟踪精度为  $\pm 1'$ 。该程序利用 Visual C++ 来编程。

量 RTU6100 接口函数,利用 Visual C++ 6.0 MFC 开发了太阳光度计软件界面,通过串口通讯完成仪器的主从式控制,图 4 给出了串口中断程序。该软件具有友好的用户操作界面,可以完成人机交互、制定测量方案、发送命令和接受返回数据、

### 2.4 基于 Visual C++ 6.0 的太阳光度计软件界面设计

阿尔泰科技发展有限公司为 RTU6100 编写了 VC 动态连接库 RTU6100.DLL,该连接库封装了大

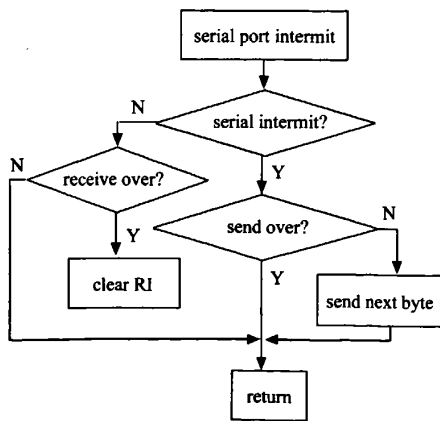


图 4 串口中断程序

Fig.4 Serial port intermit program

处理数据、存储数据、屏幕显示等功能。

图 5 给出了太阳光度计 DTF-5 软件界面图, 软件的主菜单及其子菜单作用如下:

1) “文件”, 包括一些文件新建、打开、保存和界面退出的基本操作;

2) “运行 / 停止”, 点击运行打开数据存储路径, 并默认文件名为当天日期, 确定后仪器开始测量, 并在图形界面实时显示和作图, 便于观测各波段测量的太阳辐射值变化趋势, 同时菜单项变为“停止”, 点击停止, 测量终止;

3) “设置”, 用于设置探测器的加热温度在 20 °C、25 °C、30 °C、35 °C、40 °C、45 °C、50 °C, 默认为 40 °C。还可以设置每测量一组数据的间隔时间 1 min、2 min、3 min、5 min、10 min, 默认为 1 min;

4) “检修”, 含有大量的在线检修功能, 如三路电机的运转、探测器的加热温度、环境温度和湿度检测、四象限跟踪对准太阳、信号的检测等等, 也可实时显示和观察信号变化;

5) “帮助”, 一些关于软件的版本、开发及使

用说明。

今后还可以根据测量的需要添加菜单项和功能项, 如大气光学参数的实时计算并显示等。

### 3 仪器指标

新型太阳光度计 DTF-5 如图 6 所示。仪器所能达到的指标如下:

1) 仪器采用四象限元件自动跟踪到太阳的中心, 步进电机减速比为 90, 每步引起的转角为 1', 设计跟踪精度为 ±1';

2) 分光系统采用八块干涉滤光片 (可根据测量目的来选择滤光片): 1050 nm、940 nm、860 nm、780 nm、670 nm、610 nm、520 nm、400 nm, 滤光片安装在转盘上, 可在步进电机的带动下旋转。接收视场角为 1°, 接收系统光谱范围为 0.35~1.1 μm。分光测量的周期约 10 s, 此时太阳将移动约 2', 相对太阳直径来说将移动约 7%。根据设计在探测元件上的太阳光斑直径约为 1.5 mm, 探测元件直径为 2.5 mm, 故不会因为太阳移动到元件外面造成很大的误差;

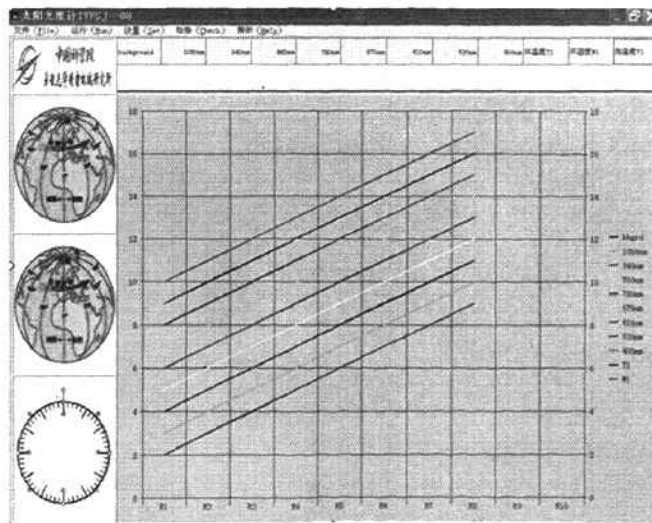


图 5 太阳光度计软件界面

Fig.5 Software interface of sun-photometer



图 6 新型太阳光度计 DTF-5

Fig.6 DTF-5 sun-photometer

3) 辐射探测单元采用加热式温度控制, 温控误差为  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于探测元件的输出信号温漂较大 ( $5\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ), 故保持温度固定对提高数据的可靠性很重要;

4) 为了在足够大的动态范围上得到较高的测量精度, 放大器增益自动调节分 6 级, 增益变化范围为 1~1024, 换挡误差小于 2%;

5) 采用采集控制器 14 位的 A/D 转换将模拟信号量化, 最小转换时间为  $34\text{ }\mu\text{s}$ , 12 位的 D/A 输出控制电压用于探测器的恒温调控;

6) 仪器可以自动完成太阳直接辐射和大气光学参数的测量工作, 并可实时显示于窗口;

7) 软件开发。利用 Visual C++ 6.0 MFC 开发了太阳光度计软件界面, 具有友好的用户操作界面, 适合非专业人员操作;

8) 主机与控制器数据传递波特率可设置为标准值, 最高可达  $57600\text{ bit/s}$ 。

## 4 仪器标定

仪器的标定同样采用常用且精度较高的 Langley 法, 对于平行平面大气, 根据比尔 - 布格 - 朗伯定律, 在地面上所观测到的波长为  $\lambda$  的直接太阳辐射的辐照度  $F(\lambda)$  可表示为

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \exp[-m\tau(\lambda)], \quad (1)$$

其中,  $F_0(\lambda)$  为日地平均距离处大气顶的太阳直射辐照度,  $\tau(\lambda)$  是波长为  $\lambda$  的总大气光学厚度,  $m$  是大气质量,  $(d_0/d)^2$  是日 - 地距离修正因子, 用来修正大气上界太阳直射辐照度。太阳光度计测得的信号电压值  $V(\lambda)$  正比于探测器在仪器视场角内接收的太阳辐照度, (1) 式可改写为

$$\ln \left[ V(\lambda) / \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \right] = \ln V_0(\lambda) - m\tau(\lambda). \quad (2)$$

以大气质量  $m$  为自变量,  $\ln[V(\lambda)/(d_0/d)^2]$  为变量在直角坐标系中作图, 若  $\tau(\lambda)$  不变的话, 可以得到一条直线。这条直线的截距  $\ln V_0(\lambda)$  就是仪器标定常数<sup>[7]</sup>, 斜率是大气总光学厚度  $\tau(\lambda)$ 。

实际上, 大气状况的日变化或多或少地总是在波动之中, 不同大气质量 (即不同时刻) 测得的  $\ln[V(\lambda)/(d_0/d)^2]$  与  $m$  往往并不是很好的线性关系, 故太阳光度计标定的精度主要取决于天气状况、大气气溶胶的稳定性和标定试验的地理位置。这就要求选择在天气晴朗无云、大气稳定且气溶胶较小的地方进行标定测量, 然后将拟合直线外推到  $Y$  轴, 得到这台仪器的  $\ln V_0(\lambda)$ 。此外, 大气质量应有较大的变化范围,  $m$  要达到 7 以上。

Langley 法对于非水汽吸收波段的标定有较高的精度, 而对于  $940\text{ nm}$  水汽强吸收波段, Reagan 提出了一个改进的 Langley 法<sup>[8]</sup>。吸收波段水汽的透过率  $T_w$  可以写为

$$T_w = \exp(-am^bW^b), \quad (3)$$

式中  $W$  是整层大气垂直柱水汽吸收,  $m$  是大气质量,  $a$ 、 $b$  是常数, 依赖于波长、滤光片带宽, 用 MODTRAN 模式的水汽含量对 940 nm、波段带宽 10 nm 采用拟合的方法, 得出  $a$ 、 $b$  值 [3]。

在 940 nm 水汽吸收带, 太阳光度计的测量值可以写成

$$\ln \left[ V(\lambda, t) / \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \right] + m\tau(\lambda) = \ln V_0(\lambda, t) - am^b W^b, \quad (4)$$

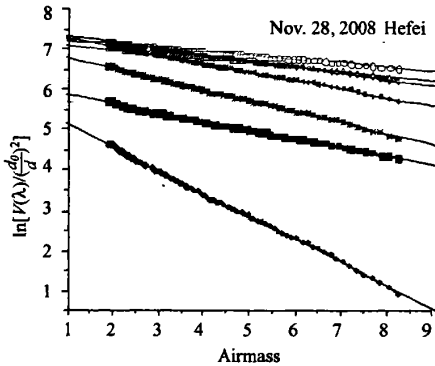


图 7 除水汽波段各波段标定曲线

Fig.7 Calibration curve except water vapor wave band

式中  $\tau(\lambda)$  是分子与气溶胶总光学厚度。

2008 年 11 月 28 日, 合肥出现少有的非常晴朗的天气, 能见度 25 km 以上, 无风, 适合标定, 标定时间选在 13:30~16:30, 除水汽波段以外其它七个波段的标定曲线如图 7 所示, 各波段的相关系数在  $-0.996 \sim -0.999$ , 水汽波段标定采用改进的 Langley 法, 标定曲线如图 8 所示。最后得到八个波段标定值  $V_0$  及相关系数  $R$  和标准偏差  $SD$  如表 1 所示。

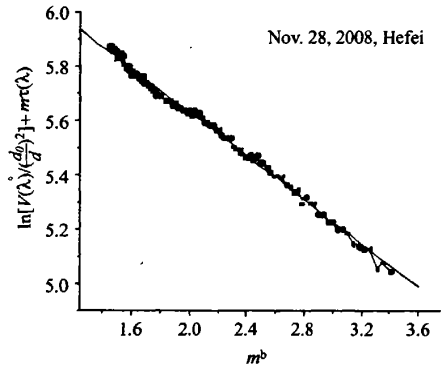


图 8 水汽波段标定曲线

Fig.8 Calibration curve of water vapor wave band

表 1 八波段标定值、相关系数、标准偏差

Table 1 Calibration value, correlation coefficient, standard deviation of eight wave bands

Wavelength (nm)	1050	940	860	780	670	610	520	400
$V_0$ (mV)	702.2	622.9	1529.2	1529.2	1800.7	1786.3	1172.7	296.9
$R$	-0.9967	-0.9972	-0.9962	-0.9973	-0.9981	-0.9984	-0.9988	-0.9993
$SD$	0.0097	0.0255	0.0128	0.0128	0.0149	0.0189	0.0211	0.0341

计算得到各波段整层大气气溶胶光学厚度 [9] 和可降水量 [10] 变化如图 9、图 10 所示, 图 9 中由上至下八个波段依次是 1050 nm、940 nm、860 nm、780 nm、670 nm、610 nm、520 nm、400 nm。

## 5 实验测量结果比较

选择晴朗日对仪器进行了初步测量实验, 并与日本的光栅太阳光度计进行比较, 两台仪器同时同地测量, 由于 pgs100 没有 1050 nm 波段故未进行比较, 其它七个波段比较结果如图 11、图 12

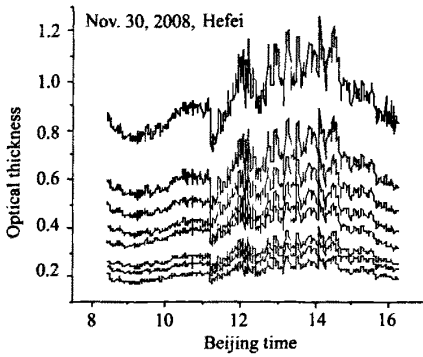


图 9 气溶胶光学厚度日变化

Fig.9 Daily variation of atmospheric aerosol optical thickness

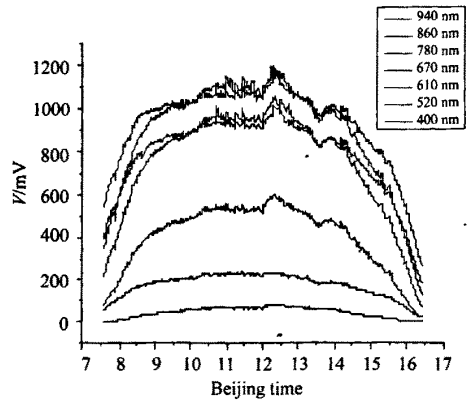


图 12 DTF-5 测量电压值

Fig.12 Measure voltage value of DTF-5

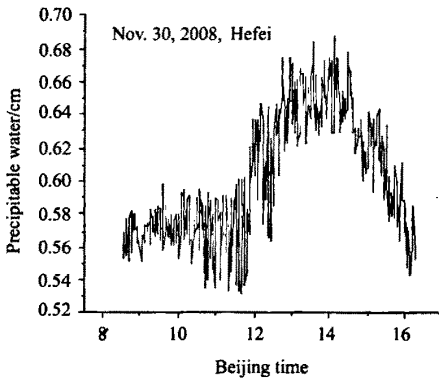


图 10 可降水量日变化

Fig.10 Daily variation of atmospheric precipitable water

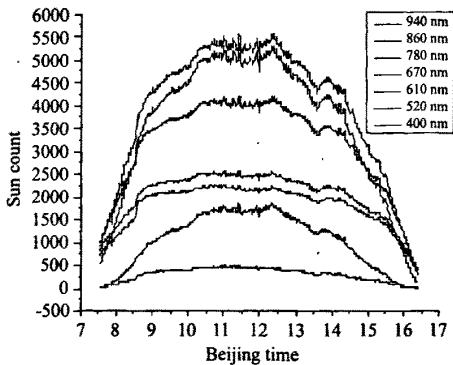


图 11 pgs100 太阳辐射指数

Fig.11 Sun radiation count of pgs100

所示。

由图中可以看出，由于两者采用的单位量不同，且所用探测器响应不同，使得各波段大小不一致，但新型太阳光度计测量的各波段太阳直接辐射值与 pgs100 有相同的变化趋势，很好的反映了大气辐射传输中太阳直接辐射值的变化。统计分析两者的相关性在 0.92~0.98 之间，相关性很好。

### 6 小 结

该仪器的研制主要用来自动跟踪太阳，同时探测 1050 nm、940 nm、860 nm、780 nm、670 nm、610 nm、520 nm、400 nm 波段的太阳直接辐射强度，从直接辐射测量可反演得到大气气溶胶光学厚度，由它可计算出大气浑浊度，利用水汽波段 940 nm 计算整层大气可降水量，同时也可反演得到气溶胶粒子谱和光学特性参数，并能够通过太阳光度计软件界面实时显示于桌面。太阳直接辐射通过准直透镜聚光到光电倍增管探测截面，光电倍增管将光信号转换为电压信号并进行不同档次的放大，然后通过控制器采集部分进行数据采集，转换为数字信号，通过 RS-232 串口传到计算机进行实时处理显示。在合肥地区选择晴朗无云的天气条件下利用 Langley-plot 法对仪器各波段进行了标定，并用改进的 Langley 法对



水汽波段 940 nm 进行了标定, 同时得到了整层大气气溶胶光学厚度和水汽的变化, 通过与日本的太阳光度计测量值的比较, 仪器具有很高的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] Tan Kun, Wang Jie, Tu Ruifang, et al. Multifunctional solar photometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(5): 448-452 (in Chinese).  
谭 锬, 王 洁, 屠瑞芳, 等. 多功能太阳辐射计 [J]. *光学学报*, 1991, 11(5): 448-452.
- [2] Zhan Jie, Tan Kun, Shao Shisheng, et al. Portable autocontrol solar photometer [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(6): 551-555 (in Chinese).  
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.
- [3] Xu Qinshan, Li Xuebin, Li Chen, et al. Retrieval of atmospheric aerosol optical depths and precipitable water from ground-based extinction measurements in Beijing area [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, 6(Supplement 2): 20-24 (in Chinese).  
徐青山, 李学彬, 李 琛, 等. 消光测量反演北京地区整层大气气溶胶光学厚度与可降水量 [J]. *过程工程学报*, 2006, 6(Supplement 2): 20-24.
- [4] Zhou Mingyang. *Visual C++ Interface Programme Technique* [M]. Beijing: Beijing Hope Electronics Publishing House, 2003. (in Chinese).  
周鸣扬. *Visual C++ 界面编程技术* [M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2003.
- [5] Sun Xin, Yu Anping. *VC++ Embedded and Exhaustive Explanation* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese).  
孙 鑫, 余安萍. *VC++ 深入详解* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [6] Beijing Art Technology Development Co.,Ltd. *RTU6100 Hardware Explanatory Memorandum (V1.22)* [Z]. Beijing: Art Technology Development Co.,Ltd, 2007. (in Chinese).  
北京阿尔泰科技发展有限公司. *RTU6100 硬件说明书 (V1.22)* [Z]. 北京: 阿尔泰科技发展有限公司, 2007.
- [7] Zhou J, Cao C Y, Xu J. Sun-photometer calibration and its application [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 8(2): 229-237.
- [8] Reagan J A, Thome K, Herman B, et al. Water vapor measurements in the 0.94 micron absorption band: calibration, measurements and data applications [C]. *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* Piscataway NJ:IEEE Press, 1987: 63-67.
- [9] Zhou J, Wang Z E, Han J C. Variability of aerosol optical properties over Hefei during September 1993 to September 1994 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, 10(1): 81-95.
- [10] Han J C, Zhou J, Wang Z E. Precipitable water measurements with sun-photometer [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11(1): 95-104.

作者简介: 李建玉 (1983 - ), 女, 中科院安徽光机所在读硕士, 主要从事大气探测技术的研究。