

“太阳紫外光谱监视器” 性能评价及功能扩展

马 海 涛

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 主要讨论了围绕“太阳紫外监视器”所作的三部分工作: 利用“太阳监视器”地面样机对太阳/大气紫外辐射进行长期观测研究, 并分析考验仪器的性能; 根据测量中提出的新问题, 开发出一套太阳自动跟踪系统; “太阳监视器”气球样机微机控制软件的开发。

关键词: 太阳紫外辐射; 光谱响应; 光谱辐射度; 太阳轨迹; 面向对象程序设计

1 引 言

波长短于 320nm 的太阳紫外辐射, 通过地球大气层后, 绝大部分被臭氧层吸收, 只有 290~320nm 波段少量紫外辐射能达到地面。这部分辐射被称为 UV-B 辐射。虽然 UV-B 辐射只占全部太阳辐射的 1% 左右, 但它具有强烈的光化效应, 对地球生物系统有重大作用。大气污染等原因导致臭氧层破坏及 UV-B 辐射的增强, 进而对地球生命活动造成破坏性影响。因此, 随着大气污染的日益加剧, 对太阳/大气紫外光谱辐照度及其变化规律的研究就显得十分重要。

关于太阳紫外光谱辐射的研究, 国外很多科研机构都十分重视, 并纷纷展开工作, 并取得了引人注目的成果, 如美国海军实验室等。

我国对太阳紫外辐射的研究也十分重视, “太阳紫外光谱监视器”这一课题已被列入国家 863 计划, 从 1987 年开始论证至今已完成地面样机和气球样机。

2 太阳紫外光谱测量和地面样机的性能评价

2.1 “太阳紫外光谱监视器”地面样机的结构

图 1 为“太阳监视器”地面样机的结构框图, 从图中可见, 地面样机由标准光源, 双光栅单色仪、探测器、电子学放大器、计算机、标准接口和步进电机驱动器组成。

2.2 太阳/大气紫外光谱辐射的测量方法

通过长期的太阳紫外辐射测量工作,摸索出了一套能够进行准确测量的方法。每一组光谱数据要连续进行三次测量,第一次测量太阳直射光加大气散射光,第二次测量大气散射光,第三次测量太阳直射光加大气散射光。这三次测量都是在尽可能短的时间间隔内完成的,所以第一、三次测量结果的平均值减去第二次测量结果,就近似为第二次测量时刻太阳直射光的辐照强度。

由于地面上太阳辐射强度是不断变化的,所以上述测量方法有一定的近似性,它给测量结果所带来的误差可由大气质量的变化分析出来。大气质量是影响地面上太阳辐射度的决定性因素。表1表明一天中从早8点到下午4点大气质量在5分钟内的线性误差小于0.2%。实验也证明了这一点,我们在相同大气条件下、相同时间间隔内连续进行三次光谱测量,两次测量时间间隔为3分钟。把第一、三次测量的平均值与第二次的测量值相比较,二者相差小于0.5%。表2为在长春净月潭的实测结果。

理论和实践都表明,这种测量方法的精度是很高的。

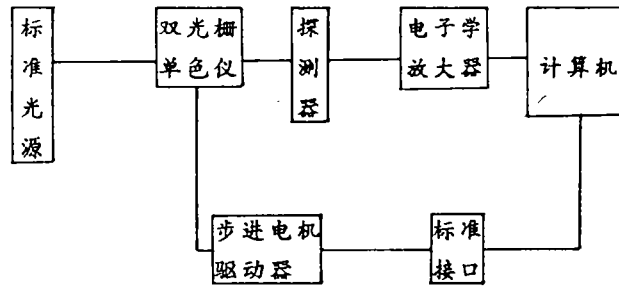


图1 “太阳紫外光谱监视器”地面样机原理框图

表1 大气质量日变化线性误差(理论值)

时间	误差	时间	误差
8:00	0.00166	13:00	0.00027
9:00	0.00071	14:00	0.00040
10:00	0.00040	15:00	0.00071
11:00	0.00027	16:00	0.00166
12:00	0.00024		

表2 大气质量日变化线性误差(实验值)

数据名	测量时间	大气质量 (相对值)	结果	方均根	线性误差
A1	10:21:21	22	A13	1.000693	0.000693
A2	10:24:20	22	A24	1.997696	0.002304
A3	10:27:20	23			
A4	10:30:20				
B1	12:37:20	26	B13	1.000143	0.000143
B2	10:40:16	26	B24	1.997690	0.002310
B3	12:43:16	25	B35	1.002895	0.002895
B4	12:46:15	25	B15	0.996118	0.003882
B5	12:49:16	24			

2.3 数据处理

我们采用下式进行数据处理，得出地面上太阳紫外光谱的绝对辐照度。

$$E'_s(\lambda) = \frac{E'_b(\lambda)}{E_b(\lambda)} \cdot E_s(\lambda) \quad (1)$$

上式中 $E_s(\lambda)$ 为太阳辐照的测量值， $E_b(\lambda)$ 为标准光源辐照测量值， $E'_b(\lambda)$ 为标准光源绝对辐照度。通过上式计算，消除了仪器自身传递函数。

为保证测量数据的可靠性，在测量过程中坚持按时定标。标准光源采用由中国计量院提供的绝对辐射标准卤钨灯。它的光谱辐照度绝对误差在 300nm 处为 2%。

经过一年多的测量实验，得到了大量太阳/大气紫外光谱辐照数据，通过这些数据，总结出了长春地区太阳/大气紫外辐照的日变化和年变化规律，并对影响这种变化的原因进行了分析。

2.4 误差分析

分析测试过程和测试过程中所用的仪器，影响测试精度的主要因素有：

- (1) 单色仪波长重复性优于 0.02nm，波长精度优于 0.05nm；
- (2) 单色仪杂光优于 10^{-7} ；
- (3) 探测器线性优于 0.02%；
- (4) 放大器线性优于 0.1%；
- (5) 标准灯相对光谱分布不确定度为 1~2%，绝对光谱不确定度为 3~5%；
- (6) 单色仪光谱响应长期变化小于 1%；
- (7) 采用分时的三次测量方法引入误差在 0.5% 以内。

综上所述，太阳/大气紫外光谱辐照测量结果的相对光谱分布不确定度在 2% 左右，绝对光谱不确定度在 5% 左右。

2.5 性能评价

在一年多的太阳紫外光谱测量中，除获得了大量数据外，同时也考验了仪器并对仪器的性能进行了评价。

2.5.1 波长重复性

在所测得的太阳光谱中的一些特征谱线的变化可反应出单色仪的波长重复性的状况。表 3 是 335.8nm 和 336.8nm 两条特征光谱线在半年内的变化情况。

上述两波长变化的算术平均误差优于 0.02nm，这说明，单色仪在半年内的波长重复性优于 0.02nm。

表 3 太阳光谱特征谱线的变化

日期 月日	波长 1 (nm)	波长 2 (nm)	日期 (月日)	波长 1 (nm)	波长 2 (nm)
3. 2	335. 8	336. 8	6. 10	335. 8	336. 8
3. 4	335. 8	336. 8	6. 16	335. 8	336. 8
3. 18	335. 7	336. 8	6. 22	335. 8	336. 8
3. 22	335. 8	336. 7	6. 24	335. 8	336. 8
3. 24	335. 7	336. 8	6. 28	335. 9	336. 8
3. 26	335. 8	336. 8	7. 02	335. 8	336. 8
5. 12	335. 8	336. 8	7. 10	335. 8	336. 8
5. 19	335. 8	336. 8	7. 12	335. 8	336. 7
5. 21	335. 8	336. 9	8. 05	335. 8	336. 7
			8. 10	335. 8	336. 8

2. 5. 2 波长精度

单色仪的波长定标是汞灯的发射谱线进行校对的, 表 4 是波长标定的实验结果, 它表明, 单色仪的波长精度优于 0. 05nm。

表 4 单色仪波长精度 (单位: 埃)

标准波长	实测波长	标准波长	实测波长
2536. 52	2536. 20	3663. 28	3663. 00
2967. 28	2967. 05	4046. 56	4046. 60
3650. 15	3650. 55	4358. 33	4358. 80

2. 5. 3 光谱响应变化

影响仪器光谱响应变化的因素有很多, 其中有光学方面的原因也有电子学方面的原因。在一年多的太阳紫外光谱测试中, 每隔一段时间就用标准灯对仪器进行标定。对这些标定数据的分析, 可以看出仪器光谱响应度的变化情况。在大量标定数据中, 选出一对相隔半年的测试结果, 进行对比发现, 在谱图的长波波段, 两图之比近似为 1, 变化小于 1%, 这说明仪器的紫外光谱响应变化半年内小于 1%。

3 “太阳监视器”的功能扩展

从测量方法中可以看出, 测大气散射光时要把太阳直射光挡住, 这就要求有一遮光小球在需要挡光时转动积分球入口上方, 挡住太阳直射光, 在测太阳直射光加大气散射光时, 要移开小球到积分球入口平面以下。

在“太阳监视器”地面样机的最初设计中，由于所选择的引光系统不同，并没有这一功能，遮光小球的移动是靠手动完成的。给测量带来诸多不便，为了便于测量，同时也使仪器更具先进性，开发制作了一套太阳跟踪系统，它能根据测量时的日期的时间准确计算出太阳的位置，并转动小球，实现自动遮光。这个系统的方框图如下：

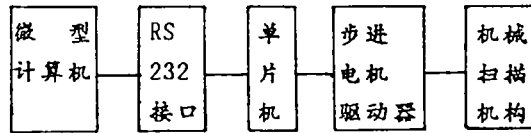


图2 太阳自动跟踪系统原理框图

在本系统中，以微型计算机为核心，在 8098 单片机的辅助下完成对太阳的跟踪任务。

3.1 太阳在天球中运行轨迹的推导

太阳在天球中的运行轨迹如图(3)所示。以天极 F、天顶 A 和太阳 M 为顶点的球面三角形在天文学中定义为视差三角形。它的三条边分别为天顶距 Z，赤纬角的余角(90-d)和观测者所在地的纬度的余角(90-f)。在视差三角形中，以天极为顶点的角等于时角 t，以天顶为顶点的角等于地平经度的补角(180°-A)。根据球面三角形知识有：

$$\begin{aligned} \cos z &= \cos(90^\circ - f) \times \cos(90^\circ - d) \\ &+ \sin(90^\circ - f) \sin(90^\circ - d) \times \cos t \\ &= \sin f \sin d + \cos f \cos d \cos t \end{aligned}$$

求出了天顶距 Z，可再次利用视差三角形求出 A 角：

$$\begin{aligned} \cos(90 - d) &= \cos(90 - f) \cos Z + \sin(90 - f) \sin(90 - d) \cos(180 - A) \\ \cos A &= \sin f \cos z - \sin d / \cos f \sin z \end{aligned}$$

在地平坐标系中，求出了地平经度 A 和天顶距 Z，就可确定太阳在天球上的坐标。

在实际设计的小球运动机构中，驱动小球移动的二维转动坐标系并不与地平坐标系相一致，因此，还应找出二者之间的坐标变换关系。

在图3中，这 L、K 和太阳作一大圆，交于午圈于 C' 点，连接 O'C 和 OM，则角 C'OD 和角 C'OM 分别对应于小球移动机构的二维转动角。为求出角 C'OD 和角 C'OM，过 M 作 MB ⊥ OK，B 为垂足，过 M 点作 ME ⊥ ON，连接 BE，显然 ∠C'OD = ∠MBM。设天球半径为 1，则 ΔMOE 中

$$\begin{aligned} MB &= \sin(90 - z) = \cos z \\ OE &= \cos(90 - z) = \sin z \end{aligned}$$

△OBE 中

$$\angle BOE = 90 - A$$

$$\text{故 } BE = \sin z \sin(90 - A) = \sin z \cos A$$

$$\text{tg} \angle MBE = ME / BE = \cos z / \cos A \sin z$$

$$\angle MBE = \text{arctg}(\cos z / \cos A \sin z)$$

$$\therefore \angle C'OD = \text{arctg}(\cos z / \cos A \sin z)$$

在球面三角形中，

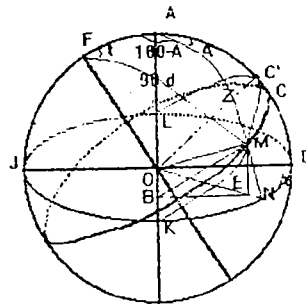


图3 太阳运动轨迹的公式推导

$$\begin{aligned} \angle MNK &= 90, MN = 90 - z, NK = 90 - A \\ \therefore \cos MK &= \cos MN \cos NK + \sin MN \sin NK \cos MNK \\ &= \cos(90 - z) \cos(90 - A) + \sin(90 - z) \sin(90 - A) \cos 90 \\ &= \sin Z \sin A \\ \therefore \angle MOK &= \arccos(\sin Z \sin A) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{又 } \because \angle C'OM + \angle MOK &= 90 \\ \therefore \angle C'OM &= \arctg \frac{\sin Z \sin A}{1 - \sin^2 Z \cdot \sin^2 A} \end{aligned}$$

这样, 只要给定了日期、时间, 就可计算出遮光小球的转动角度 $\angle C'OD$ 和 $\angle C'OM$ 实际计算中, 一年中第 n 天的赤纬有如下经验公式:

$$d = 23.45^\circ \times \sin(360 \times (284 + n)/365)$$

3.2 控制系统的设计

控制系统的设计包括三部分内容, 其中有单片机系统的电路设计, 单片机监控软件设计和微机高级语言程序设计。

单片机控制系统包括 RS232 接口, 程序存储器, 光电隔离等几部组成, 如图 4 所示。

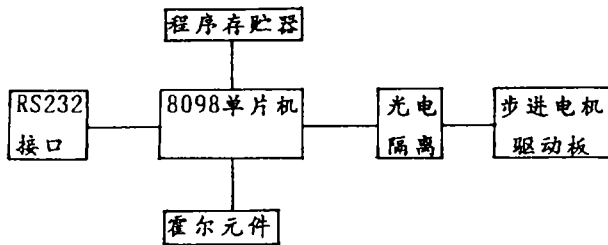


图 4 单片机系统方框图

单片机系统的功能有: 检查由霍尔元件产生的信号, 实现自动原点扫描; 控制步进电机转动; 按指定的速度进行太阳跟踪; 通过 RS232 接口与微机实现双向通信。

本电路的特点有: 采用光电隔离的办法使系统工作更安全、可靠; 在 RS232 接口中采用单一电源技术降低

了系统的成本和复杂度; 系统的通用性强, 采用不同的监控程序, 可完成不同的控制任务。

在本系统中, 根据实验需要, 先后开发出 GWBASIC 和 TrueBASIC 语言的控制程序与 8098 机接口, 控制整个系统的工作。在程序设计中, 包括以下几方面内容:

- a 太阳在天球上运动轨迹的计算;
- b 遮光小球跟踪步数和跟踪速度的确定;
- c 利用第 2 串行口与 8098 机通信;
- d 程序容错性设计。

4 气球样机的控制软件编程

4.1 控制软件的功能

(1) 通过 RS232 接口, 控制气球样机完成指定的任务, 其中包括波长扫描、前后狭缝选择、工作方式选择、放大器增益控制、倍增管高压控制和数据采集等。

(2) 完成对测量数据的二次处理,包括谱图与谱图之间和谱图与常数之间的四则运算、谱图积分、平滑处理、谱图打印输出等内容。

4.2 控制软件的特点:

(1) 采用流行的 Turbo C 语言编程。使程序具有代码简洁、速度快、可移植性好等优点;

(2) 采用先进的面向对象的程序设计技术。使程序具有良好的易读性和易维护性,为以后对软件的修改和扩容打下了坚实的基础;

(3) 采用动态数组技术,尽可能地减少程序所占内存。使程序所需内存降至最少,程序在内存拥有量很少的计算机上也能运行,提高了程序的适应性;

(4) 程序兼有本文和图形两种工作方式,可使程序在无图形方式的单色监视器上也能正常运行,进一步提高了程序的适应性。

本控制软件源文件约 70kb,运行在图形方式下要求显示器有单色 CGA 图形工作方式,否则软件将自动转入文本工作方式,在文本方式下不能进行谱图的二次处理。

软件编译环境为 Turbo C2.0 Small 方式。

软件的运行硬件环境为 IBM PC/XT 及其兼容机,软件环境 MS-DOS3.30。

Performance Evaluation and Functional Extension of Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor

Ma Haitao

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130021)

Abstract

As a part of the solar ultraviolet spectral irradiance monitor (SUSIM) experimental evaluation effort, three main topics are presented in this paper: The SUSIM is used on research of the regularity of the solar/atmosphere UV radiation; According to the new question during the measurement, a sun-trace system is successfully developed; A SUSIM control system software is edited and tested in Turbo C language.

Key words: Solar ultraviolet spectral irradiance, Spectral responsivity, Spectral irradiance, Sun trace, Object-oriented programming