

太阳模拟器在辐射仪器检测中的应用*

吕文华 莫月琴 杨云

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

该文主要介绍了由 TM-500F 太阳模拟器和旋转工作台组成的具有多功能辐射仪器室内检测设备的结构、原理及应用。利用该设备可对太阳辐射测量仪器进行灵敏度的校准,由实验可知,总辐射表室内外灵敏度检定结果非常一致,其误差在 $\pm 0.6\%$ 之内。也可进行余弦、方位响应误差、倾斜误差、非线性误差及响应时间等性能的测定。

关键词:太阳模拟器 辐射仪器 检测 应用

引 言

我国的太阳辐射观测、检定从 20 世纪 50~90 年代初一直沿用仿前苏联仪器及设备。室内检定设备主要由卤钨灯、透镜、仪器支架和光台导轨等组成,光谱与太阳光谱差别较大;被检定的仪器垂直放置,与仪器的使用状况(水平放置)完全不同。90 年代后气象台站辐射观测仪器换型,在该设备上进行新型辐射仪器的余弦响应误差的重复性测量,其测量误差最大达 30%,仪器灵敏度与室外检定相差为 13%。而且新旧仪器结构差异较大,使得新型仪器在原有检定设备上安装困难。美国、英国、日本等国家分别使用光台、积分球进行室内辐射仪器检定,而辐射表的性能测定,则需要用相应的不同装置^[1-13]。

太阳辐射仪器,特别是总辐射表在使用时水平放置。由于一年四季太阳和地球相对运动轨迹的变化,太阳光照射到总辐射表上的轨迹也在变化。为评价辐射仪器测量的准确度,除准确测定其灵敏度外,还必须测定仪器的余弦、方位响应误差、倾斜误差、非线性误差及响应时间等性能。为此我们研制了一种具有多种功能的辐射仪器室内检测设备。该设备的光谱辐照分布按国标 AM1.5 太阳光谱匹配。辐照度范围为 $250 \sim 1250 \text{ W/m}^2$,有效辐照面积为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,辐照不均匀度小于 $\pm 1\%$ ($\Phi 80 \text{ mm}$ 内),辐照不稳定性小于 $\pm 0.1\%$,工作台的角度转动误差小于 $\pm 0.05^\circ$ 。由微机控制工作台转动以改变入射光线与辐射仪器感应面的夹角及仪器状态,并进行自动测量和数据处理。

1 室内检测设备的结构和原理

1.1 光学系统

检测设备的光学系统(图 1)是以 TM-500F 太阳模拟器光学系统为基础,主要由短

* 石恒志、王炳忠、吕淑芳也参加了该项目的部分工作。

1999-08-30 收到,2000-03-16 收到修改稿。

弧氙灯、椭球面聚光反射镜、平面反射镜、光谱滤光片、光学积分器组、负透镜、准直透镜和转向平面反射镜等组成。由氙灯发出的辐射通量,经椭球面聚光镜汇聚并反射,在光学积分器入射端形成一个对称的辐射分布,这个分布被积分器各光通道对称分割叠加成像,再经准直透镜后成像在其后焦面上,经平面反射镜,在工作面上得到一个均匀的辐照面。

1.2 机械结构

检测设备机械结构(图 2)主要有 TM500F 太阳模拟器的机械结构和旋转工作台的机械结构两大部分。模拟器的机械结构由底座、氙灯调节机构、平面反射镜座、光学积分器镜筒、准直透镜筒和壳体等组成。

检测旋转工作台主要由平面反射镜、工作台、平衡砣、转臂、减速箱、离合机构和框架组成。转臂的中心轴前端为平面反射镜,将太阳模拟器发射出的平行光反射到工作台上。工作台由转盘和升降机构组成,转盘周边上刻有以 1° 为单位的 360° 分度线。升降机构可对工作台的高度进行调整,调整范围为 $1 \sim 40 \text{ mm}$,可使不同高度的仪器感应面都能被调整到同一高度平面上。根据工作台上仪器重量的不同,可与转臂另一端不同重量的平衡砣相平衡。平衡砣上配有纵向调节机构,通过旋转手轮来实现。转臂中心轴后端与减速箱输出轴连接,并装有以 1° 为单位的

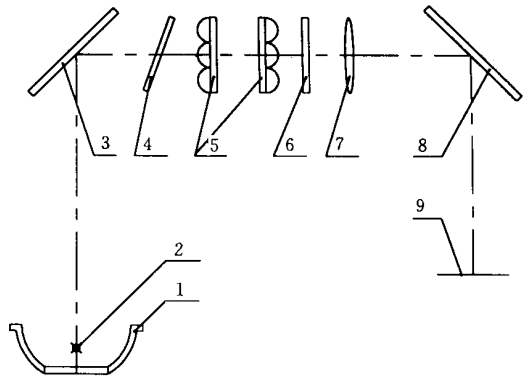


图 1 检测设备光学系统光路简图

- (1—椭球面聚光反射镜 2—短弧氙灯 3—平面反射镜
- 4—光谱滤光片 5—光学积分器组 6—负透镜
- 7—准直透镜 8—转向平面反射镜 9—工作面)

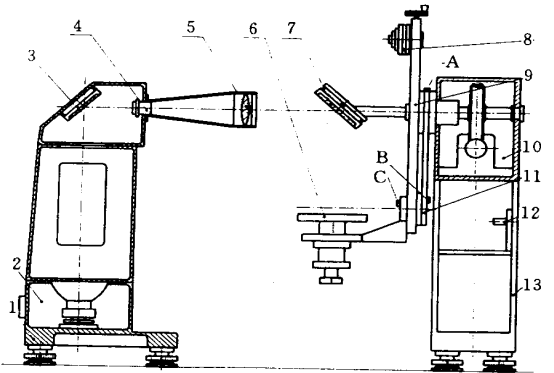


图 2 辐射仪器室内检测设备结构示意图

- (1—模拟器箱体 2—光源室 3—平面反射镜 4—光学积分器
- 5—准直透镜 6—平面反射镜 7—工作台
- 8—平衡砣 9—转臂 10—减速箱 11—离合结构
- 12—定位激光器 13—框架)

的 360° 度分度线的圆盘。分度圆盘的后端有离合机构。离合机构主要由上下两轮和钢带组成。当上轮的螺钉 A 和下轮的螺钉 B 锁紧,螺钉 C 松开时,转臂的转动范围为 $\pm 90^\circ$,当转臂转动时,工作台始终处于水平状态,可测量总辐射表的余弦、方位误差及在规定太阳高度下的灵敏度等。当上轮的螺钉 A 松开,下轮的螺钉 B、C 锁紧时,转臂的转动范围为 360° ,当转臂转动时,工作台与转臂的相对位置不变。这样辐射仪器的感应面始终与入射光线垂直,可测量总辐射表的倾斜响应误差。减速箱由步进电机和一对蜗轮蜗杆组成。步进电机由微机控制,进行全自动转动,也可手动旋转。

1.3 设备的性能测试

在使用过程中,当转臂转动时,通过反射镜反射到工作面上的光斑也在转动。由于加工与安装的误差,转动过程中不可能始终保持光斑的中心与工作台的中心完全重合,需用激光器对准调节。转臂转动一周,激光器的光斑中心与工作台中心的不重合范围在 $\Phi 5$ mm以内,这对辐射仪器的性能测试是很重要的。根据国标 GB/T 12637-90 太阳模拟器通用规范^[14]对辐照不均匀度进行了测定(使用 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 太阳能电池),在 $\Phi 80\text{ mm}$ 内的测量误差为 $\pm 0.4\%$ 。辐照不稳定性的测量时间为1 h。每30 s采集一个数据,误差为 $\pm 0.08\%$ 。整套设备在旋转 360° 范围内的系统误差,分别用总辐射表和硅光电池测定。在不同倾斜状态下,输出值的变化是由光斑的像变化、辐照不均匀度、不稳定性和整个旋转工作台的转动误差及杂散光的影响等所致。经过测试,本设备的系统误差为 $\pm 0.3\%$ 。

2 室内检测设备的应用

在编写总辐射表、净全辐射表检定规程^[15,16]和标准总辐射表的研制时,我们用该设备对仪器进行了性能测试。

2.1 总辐射表的灵敏度校准

室内用标准总辐射表的灵敏度是在室外阳光下校准的。室内灵敏度校准的步骤是,把辐照度调整到 1000 W/m^2 (入射光线与仪器感应面垂直时),稳定0.5 h后,将标准仪器放在工作台上,接线柱方向相当于室外的朝北,调整好水平,让转臂转到 70° (相当于太阳高度角 70°),照射5 min后,读取10个数据,每个数据间隔15 s。然后将工作台上的转盘转动 180° ,进行第二次标准仪器的读数。取下标准仪器,放上被检仪器同样进行两个方位的读数。我们将室内校准结果与室外在太阳高度角 70° (测量次数为60次)时的校准结果进行比较(见表1)。从表1中可以看出室内、外校准结果非常一致,误差在 $\pm 0.6\%$ 之内。由此证实了室内检测设备的可靠性。

表1 室内、外灵敏度测定结果比较

表号	型号	室外	室内	相对差(%)
002	DFY4	8.18	8.14	0.5
0060	DFY4	7.97	7.94	0.4
0058	DFY4	8.35	8.40	0.6
9313	TBQ-2	8.56	8.54	0.3
9303	TBQ-2	8.21	8.21	0.0
9317	TBQ-2	8.59	8.62	0.4

2.2 总辐射表方向特性的测定

由于太阳与地球的相对运动使得照射到总辐射表上的光线的方向在变化,这就引起了仪器的测量误差,即余弦响应和方位响应误差的合成。余弦响应误差的测定是由步进电机带动旋转工作台转动,使光线与仪器感应面夹角分别为 90° 、 80° 、 70° 、 60° 、 50° 、 40° 、 30° 、 20° 、 10° 、 90° 。以两次 90° 测量的平均值为准,计算各角度的余弦响应误差。我们用该设备对几种不同类型的总辐射表进行了余弦响应误差的测定,结果列于表2。

方位响应误差的测定,使入射光线与仪器感应面夹角为 10° ,在 $0\sim 360^\circ$ 方位内,每隔 30° 测量一点,测定结果列于表3。

表 2 余弦响应误差的测定结果(相对差)

%

表号	型号	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
9201	TBQ-2-B	2.4	1.5	0.8	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1
9202	TBQ-2-B	2.5	0.8	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.4
9203	TBQ-2-B	3.1	1.9	1.0	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3
002	DFY4	13.5	8.7	5.6	3.7	2.6	1.7	1.0	1.6
0060	DFY4	-16.3	-4.8	2.7	1.6	-1.3	-2.3	-2.4	-1.0
0058	DFY4	-3.8	1.3	0.6	0.7	0.7	0.5	0.4	0.2
0053	DFY4	-0.5	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1
011	DFY4	10.7	5.5	3.7	2.6	1.4	0.7	0.3	-0.1
9313	TBQ-2	-13.4	-6.2	-4.0	-3.1	-2.4	-1.6	-0.9	-0.4
9303	TBQ-2	-2.4	-0.6	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	-4.8
9317	TBQ-2	-1.9	0.2	1.0	0.2	-0.5	-0.7	-0.4	-0.3
9311	TBQ-2	-0.9	1.4	1.7	0.7	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3
9312	TBQ-2	1.3	2.1	1.7	0.9	0.0	-0.3	-0.3	-0.3

表 3 方位响应误差的测定结果(相对差)

%

表号	型号	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
002	DFY4	0.1	-0.8	-0.3	2.5	4.0	3.3	2.7	0.3	-3.4	-3.7	-3.1	-1.3
0060	DFY4	-3.4	-3.8	1.1	4.1	5.3	1.1	-2.9	-0.8	0.3	-1.4	0.8	-0.4
0058	DFY4	0.2	0.3	0.3	-2.1	0.7	4.0	3.7	1.5	-2.7	-1.7	-3.0	-1.2
0053	DFY4	-4.6	-3.7	-2.3	-0.7	1.8	2.2	0.8	4.2	5.3	3.9	-1.3	-5.5
011	DFY4	-3.8	-4.6	-7.1	-8.6	-4.7	0.0	2.6	8.3	7.0	4.8	4.5	1.5
9313	TBQ-2	-6.7	-5.0	-4.3	0.3	4.4	6.5	7.3	6.4	2.6	-0.3	-4.6	-6.8
9303	TBQ-2	0.5	0.0	-0.2	-0.7	-0.2	-0.5	-0.1	-0.7	1.0	0.5	0.2	0.1
9317	TBQ-2	-6.2	-6.7	-5.0	-4.4	0.3	4.4	6.5	7.2	6.3	2.6	-0.3	4.6
9311	TBQ-2	3.0	4.2	3.9	2.3	0.0	-2.2	-4.4	-4.0	-2.6	-2.3	-0.3	2.3
9312	TBQ-2	0.3	0.3	0.7	0.5	-0.3	0.0	0.7	0.3	0.1	-1.0	-1.0	-0.8

2.3 总辐射表倾斜响应误差的测定

将太阳模拟器调整到 1000 W/m^2 , 被测仪器固定在工作台上, 稳定 0.5 h 后, 进行 0° 倾斜的测量, 然后将转臂分别转到 45° 、 90° 、 135° 、 180° 进行测量, 最后再进行 0° 的测量, 测定结果列于表 4。表 4 中的 PSP 型总辐射表(由美国 EPPLEY 实验室制造)的测量结果与文献[17]相同。

表 4 倾斜响应误差的测定结果(相对差)

%

表号	型号	45°	90°	135°	180°	表号	型号	45°	90°	135°	180°
20463	PSP	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5	011	DFY4	-0.2	-0.3	-0.1	0.3
20462	PSP	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	9313	TBQ-2	0.7	1.2	2.0	2.8
002	DFY4	0.0	0.0	-0.2	-0.1	9303	TBQ-2	1.1	1.8	2.7	3.1
0060	DFY4	0.3	-0.4	0.1	0.4	9317	TBQ-2	1.0	1.5	2.3	3.0
0058	DFY4	-0.2	-0.4	-0.1	-0.1	9311	TBQ-2	1.0	1.5	2.1	2.6
0053	DFY4	0.7	0.3	0.3	0.3	9312	TBQ-2	0.7	1.0	1.8	2.8

2.4 净全辐射表的性能测试

制订净全辐射表检定规程时, 在该设备上对其进行全面的性能测试^[16,18]。主要有

非线性误差,温度误差,方向性误差,罩形误差,零点漂移,响应时间,温度特性(与温度试验箱配合使用)等性能的测试。现以方向性误差测试为例进行说明。

分别在太阳高度角为 10° 30° 时,每间隔 30° 方位测试一个点。由于在北半球太阳光线只能在南面照射仪器,因此只测试了9个点,如图3所示。图3(a)的表号为9607,图3(b)的表号为007,其中最大误差为7.6%。

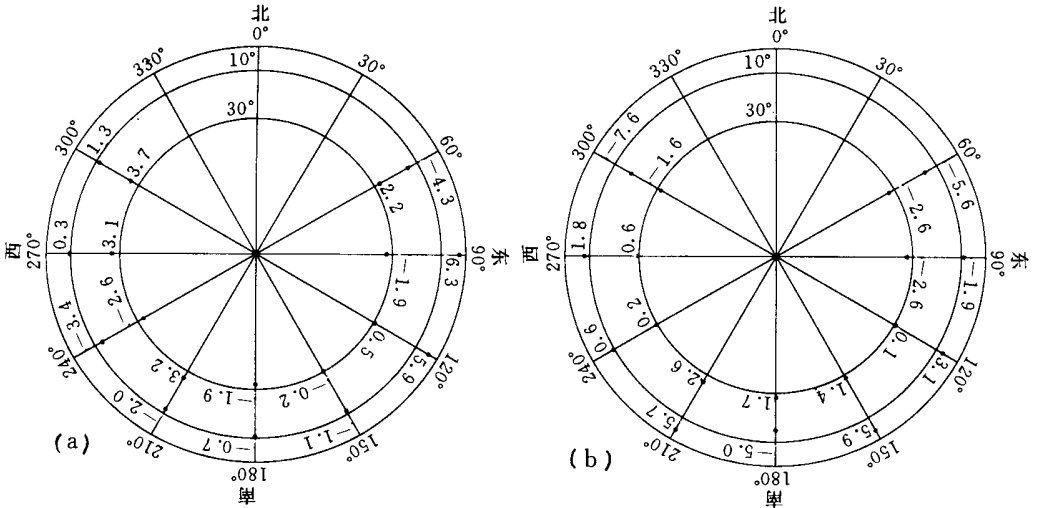


图3 TBB-1型(a)和DFY5型(b)净全辐射表方向性误差测试结果

3 结论

具有多功能的辐射仪器室内检测设备的研制成功^[19],使辐射仪器的灵敏度校准和余弦、方位、倾斜、非线性误差等的测定方便、准确。由于该设备自动化程度高,工作台转动角度准确,余弦、方位、倾斜误差的测量结果可靠。该设备光谱辐照分布按国标 AMI .5 太阳光谱匹配,加上测量时仪器的安装位置与使用位置相一致,使得室内外灵敏度校准误差在 $\pm 1.0\%$ 以内。这样辐射表的检定就不受天气条件的限制,可在室内进行。但该设备的工作台转动时,光斑中心与工作台中心不能完全重合,其误差在 $\Phi 5\text{ mm}$ 以内。

通过对设备的性能测定可知,整套设备在 $0 \sim 360^{\circ}$ 转动时的系统误差为 $\pm 0.3\%$ 。该设备的研制成功,对于评价太阳辐射测量仪器的性能^[15,16]、制订检定方法^[15,16,20]、控制辐射仪器的制造质量和提高太阳辐射测量的准确度都具有重大意义。

参考文献

- 1 Philipona R, Heimo A, Hoegger B. Investigations of solar radiation detectors using a laboratory test facility for solar radiation meteorological instrument. *Solar energy*, 1993, **51**:159 ~ 163.
- 2 Budgen P, Price N M. Routine calibration of solar radiation instruments. *Met, mag.*, 1981, **110**:253 ~ 259.
- 3 Reid M S, Berdahl C M, Kendall J M. Calibration standards and field instruments for precision measurements of insolation. *Solar energy*, 1978, **20**:357 ~ 358.

- 4 关根正幸. 人工光源に する日射计检查装置(积分球法). 测候时报, 1972, **39**:113~187.
- 5 志村英洋, 铃木宣直. 全天日射计检查装置. 测候时报, 1973, **40**:146.
- 6 Drummond A J, Greer H W. An integrating hemisphere (artificial sky) for the calibration of meteorological pyranometers. *Solar energy*, 1966, **10**:190~194.
- 7 Hill A N. Calibration of solar radiation equipment at U.S. Weather Bureau, *Solar energy*, 1966, **10**:184~187.
- 8 Grum F. Artificial sources of simulating natural daylight and skylight. *Appl. Opt.*, 1968, **7**:183.
- 9 Latimer J R. An integrating sphere for pyranometers calibration. *J. Appl. Met.*, 1964, **3**:323~326.
- 10 WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Fifth edition. WMO, No.8, 1983.
- 11 王炳忠. 太阳辐射能的测量与标准. 北京:科学出版社, 1983.
- 12 Zerlant G A. Solar radiation measurements, calibration and standardization efforts, advances in solar energy. *American Solar Energy Society Inc.*, 1983.
- 13 Bahm R J, Nakos J C. The Calibration of Solar Radiation Measuring Instruments. U.S. Department of Commerce. NTIS, ALO-5336-T1, 1979.
- 14 中华人民共和国国家标准 GB/T 12637-90. 太阳模拟器通用规范. 北京:中国标准出版社, 1990.
- 15 中华人民共和国国家计量检定规程 JJG458-96 总辐射表. 北京:中国计量出版社, 1996.
- 16 中华人民共和国国家计量检定规程 JJG926-97 净全辐射表. 北京:中国计量出版社, 1997.
- 17 王炳忠. 总辐射表倾斜效应的研究(1)——试验装置与结果. 太阳能学报, 1991, **12**:215~224.
- 18 莫月琴, 杨云. 净全辐射表性能的测试研究. 太阳能学报, 1998, **19**:453~456.
- 19 Lu Wenhua, Mo Yueqin. A Laboratory Test Facility for Solar Radiation Instruments and Its Applications. WMO/ TD No.877, 1998. 361~364.
- 20 王炳忠, 吕文华. 再论分光总辐射表的校准. 太阳能学报, 1994, **15**:391~394.

APPLICATIONS OF SOLAR SIMULATOR IN THE CALIBRATION AND TEST OF RADIATION INSTRUMENTS

Lu Wenhua Mo Yueqin Yang Yun

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

To evaluate the solar radiation measurement data and instrument specifications, the new versatile laboratory test facility for solar radiation instruments has been developed. It consists of an available solar simulator and a rotating mechanism with an instrument mount. The spectral distribution is in accordance with Air Mass 1.5 global spectral conditions. Directionally, tilt and non-linearity errors of pyranometers can be tested by using this facility. Satisfactory results have been obtained according to calibration measurements of pyranometers. It is shown that the difference values of the sensitivity are within the range of $\pm 0.6\%$ measured in the outdoor exposure.

Key words: Solar simulator Radiation instrument Calibration and test