

文章编号 1004-924X(2009)07-1542-06

用于太阳能电池测试的太阳模拟技术

王志明, 龚振邦, 魏光谱, 刘李明
(上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

摘要: 为了提高太阳模拟器的性能, 更准确地测试太阳能电池的特性参数, 对模拟器的光源辐照利用率、辐照均匀度、辐照度与辐照稳定性的控制进行了研究。选取同轴光学系统结构作为模拟器光学系统, 通过改进光学系统的结构排布, 增加光积分器等方法, 改善光源辐照利用率与辐照均匀度; 在分析现役模拟器控制线路的基础上, 采用光反馈技术对控制线路进行重新设计, 提升系统对辐照度与辐照稳定性的可控性。实验结果表明: 新型的太阳模拟器能有效地控制辐照度与辐照稳定性, 在直径 250 mm 范围内, 标准光强为 1000 W/m^2 的条件下, 辐照均匀度为 2.5%, 辐照稳定性 $< 1\%$, 较大地改进了太阳模拟器的性能。

关键词: 太阳模拟器; 太阳能电池; 光积分器; 光反馈

中图分类号: TM914.4 **文献标识码:** A

Solar simulation technique for solar cell measurement

WANG Zhi-ming, GONG Zhen-bang, WEI Guang-pu, LIU Li-ming

(Department of Fine Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to improve the performance of a solar simulator to measure the characteristic parameters of solar cells more accurately, how to control the radiation parameters for the simulator lamp was studied, such as the radiation utility rate, radiation uniformity, radiation intension, radiation stability, and so on. A coaxial optical system was selected as the optical system of the solar simulator. Then, the utility rate the lamp radiation and radiation uniformity were improved by ameliorating the optical system structure layout and increasing an optical integrator. On the basis of analyzing the existing control circuit of the simulator, an optical feedback technology was adopted to redesign the control circuit and to improve the control ability on radiation intension and radiation stability. The experimental results indicate that the new solar simulator can effectively control radiation intension and stability. When the standard light intension is 1000 W/m^2 , the radiation uniformity is 2.5% and the radiation stability is less than 1% in a diameter of 250 mm, which has greatly improved the performance of the solar simulator.

Key words: solar simulator; solar cell; optical integrator; optical feedback

收稿日期: 2008-10-14; 修订日期: 2008-12-05.

基金项目: 上海市重大科技攻关项目 (No. 03DZ12033)

1 引言

太阳模拟技术是研究模拟太阳光辐照特性的一门专业技术,该项技术主要包括不同大气质量条件下的太阳光谱,太阳光总辐照度,辐照不均匀度,辐照不稳定度的研究等。

太阳模拟器是模拟太阳光谱和光强的一种光源设备,是太阳能电池测试系统中不可或缺的一部分,是对太阳能电池进行检测与标定的关键。使用太阳模拟器能够克服由于太阳辐射不可预测的变化和局限性所造成的不便,可以任意改变测试条件,在实验室内反复对被测电池进行测试。近年来,随着太阳能电池这种新能源的崛起,对太阳能电池的质量控制已成为研究热点,如太阳能电池的特性参数表征^[1]、太阳模拟器等,特别是太阳模拟器,欧洲空间研究与技术中心、美国科罗拉多州太阳能研究所、国际 Renewable 能源实验室等研究机构分别采用不同的方法研究太阳模拟器,取得了较大的进展^[2-3]。而我国在这方面起步较晚,对太阳模拟器关键技术的突破性研究成果较少。

本文引入了一种新颖的太阳模拟器的光学设计思想,将新型的光学系统结构与光学积分器技术相结合,同时,将二次光反馈的控制思路运用于模拟器的控制器中,大大地改善了辐照均匀度,模拟器的辐照度与辐照不稳定度等指标的可控性,使得太阳能电池的实验室精确测量成为可能。

2 新型太阳模拟器的关键技术

太阳模拟器既要模拟太阳光的特性,又能较好地满足模拟器测试的评判指标,涉及到很多技术内容,如光路设计、机械设计、控制模式选择、计算机处理、信号采集与抗干扰处理、通信等,其中关键环节为光路均匀化设计与控制模式设计。本文就这两方面的技术进行阐述。

2.1 新型均匀照明光学系统

按光学系统结构特点,照明系统可分为两大类,即同轴系统和离轴系统。虽然在 20 世纪 70 年代,美国先进的太阳模拟器多采用离轴准直光学系统,德国在 80 年代也采用离轴准直光学系统研制出了技术先进的太阳模拟器^[4],但是资料分析表明,离轴准直光学系统比较适合于大型的太

阳模拟器,对于单体或小组件太阳能电池测试系统来说,采用离轴准直光学系统虽然能达到较好的辐照均匀度,但是却加大了系统的机械结构,使设备变得沉重复杂,因此本模拟器采用同轴光学系统,其特点是均匀辐照体积或均匀辐照面积的对称轴与光学系统光轴重合,并能够在达到辐照均匀度的前提下,减少设计体积。模拟器的光学系统的理论模型如图 1 所示。

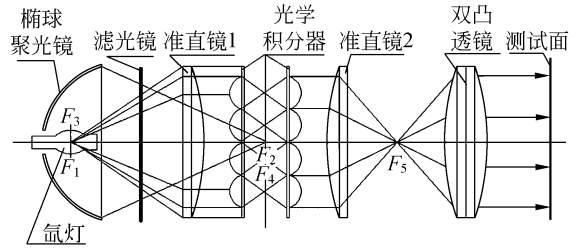


图 1 新型光学系统理论模型图

Fig. 1 Theoretic model of new optical system

图 1 所示为新型太阳模拟器的光学系统,由光源(近似为点光源)、椭球聚光系统、光学积分器、准直系统、太阳光谱匹配滤光片组成^[5]。光源发出的辐射通量由聚光系统会聚并反射,在光学积分器场镜组阵列通光口径内形成一个所要求的辐照分布。这个分布经光学积分器各元素透镜对称分割,在叠加透镜的焦面上形成一个辐照度均匀分布的辐照面,滤光片使输出的光谱辐照分布与 AM1.5 标准太阳辐照分布在规定的精度级别内相匹配。与常规的太阳模拟器的光学系统相比,这个同轴光学系统在 3 个方面做了改进:(1)采用的同轴光学系统,结构紧凑,光路短,氙灯光源的辐照利用率高。(2)采用二次光积分均化设计。用两个平凸透镜网格阵列,背对背安装,使得氙灯的点光源在平凸透镜网格透镜阵列板的后焦面上形成多点光源像,即平凸透镜的网格阵列使得光线积分均化,这是一次光线积分均化。这些点光源像,在后面一个平凸透镜网格阵列的焦面上,通过后面一个网格透镜阵列,又一次实现了均化,即光线在整个过程中实现了两次积分均化^[6-8]。(3)充分利用光源辐照的结构排布。将氙灯光源置于椭球聚光镜的焦点 F_1 处,而椭球焦点 F_1 也是准直镜 1 的焦面位置,氙灯光源抽象为一个点光源,该点光源发出的光通过准直镜 1 产生平行光入射网格透镜阵列,在网格透镜阵列的后

焦面处形成点光源的像面。同时,氙灯光源通过椭球聚光镜产生的反射光在椭球聚光镜第二焦点 F_2 处,而 F_2 的位置正好在于网格透镜像面(后焦点)的位置,这样使得两路光在网格阵列的后焦点面处重叠合成,然后再通过后面的网格阵列进行积分匀化,最终在测试面产生一定辐照度的均匀光。

2.2 二次光反馈控制系统

图 2 所示是普通脉冲氙灯的工作原理框图。系统由脉冲氙灯、高压脉冲触发电路、触发脉冲输入端、储能电容、充电电路、交流电源组成^[6]。

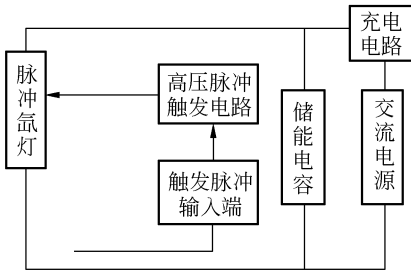


图 2 脉冲氙灯工作原理框图

Fig. 2 Work principle diagram of pulse Xeon lamp

电源通过充电电路对储能电容充电。通过触发端施加触发信号,高压脉冲发生电路发出一个 5~15 kV 的高压脉冲施加到灯管的触发两极,使灯管内氙气电离,发生火花放电。火花放电大大减小了灯管的内阻,使储能电容中存储的电能在极短的时间内通过的灯管放电,产生极强的闪光。

还增加了一套触发脉冲程控电路,电源改为程控电源。此外,还有两路辐照度传感器,一路辐照度传感器采集的信号直接经 A/D 模块进入 MCU1,另一路进入到 IC1。整个控制线路的工作原理如下:在 MCU1 中设定氙灯触发脉冲的幅值与触发时间,以及电路输出的电压与电流值。然后启动系统,程控电源给充电电容 C_1 充电,当 C_1 上的电压达到了工作电压 V_w ,由 MCU1 通过 D/A 模块输出预先设定的触发脉冲,包括脉冲的幅值与幅宽,触发脉冲接通氙灯的高压触发电路,放电电容上的电压经过升压变压器 T 升压后,通过氙灯,氙灯中的氙气被击穿,氙灯被点亮,放电电容 C_1 给氙灯放电,在该线路中,增设了稳压电路,调整 MOS 管 Q_1 的电压,可稳定氙灯灯管中的电流。在该系统中有两个辐照传感器,两个辐照传感器的目的都是不断定时地采集光强信号,一个传感器是通过 MCU1 的处理,根据光强的数值,来实时地控制发出脉冲的幅值大小,通过稳压线路,来控制光强。同时,该辐射传感器得到的光强数据与测试要求的标准数据进行比对后,通过 AVR 单片机的输出口,控制数据采集的时间即对数据采集的时间进行嵌位。另外一个辐照传感器,将信号经转换后传到 IC1 的一个输入端,控制氙灯中流过的电流与电压,从而控制辐照不稳定性。这就是二次光反馈控制。等到了设定好的测试时间后,触发脉冲由高电平转化为低电平,程控电源停止输出,氙灯熄灭,等待下次点亮。

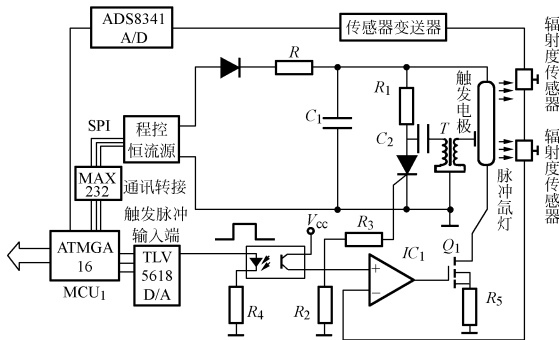


图 3 程控稳态脉冲氙灯控制线路原理图

Fig. 3 Control principle diagram of pulse Xeon lamp

通过对原线路的分析,采用二次反馈控制技术,得出一套全新的控制线路,线路原理图如图 3 所示。整个控制线路除了图 2 线路中具有的交流电路、脉冲氙灯、高压触发电路、放电电容等之外,

3 试验结果

3.1 程控稳定光强控制的实验验证

3.1.1 程控稳态脉冲氙灯控制线路放电规律

根据上述设计思想,制作了太阳模拟器及其控制线路,实验设备如图 4 所示。采用泰克 TDS3054C 示波器对关键节点进行监控测量,结果如下。

对于图 5 所示的波形,可以看出设计的电路有明显的程控作用。首先,触发脉冲从 0 上升到第一幅值时,产生的波形结果如图所示,储能电容的充放电规律的第一种情况,放电曲线符合 RC 电

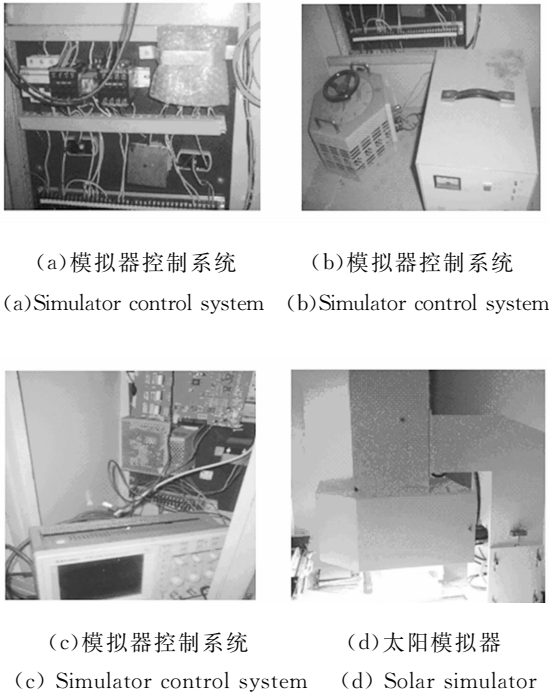


图 4 太阳模拟器与控制系统

Fig. 4 Solar simulator and control systems

路充放电规律图线的第一种情况,当辐值从第一幅值上升到第二幅值时,即产生阶跃,此时储能电容、氙灯等组成的回路放电规律 RC 充放电规律的第三种情况,放电曲线符合 RC 电路充放电规律图线的第三种情况。过渡过程的状态取决于电路的电参数^[9]。

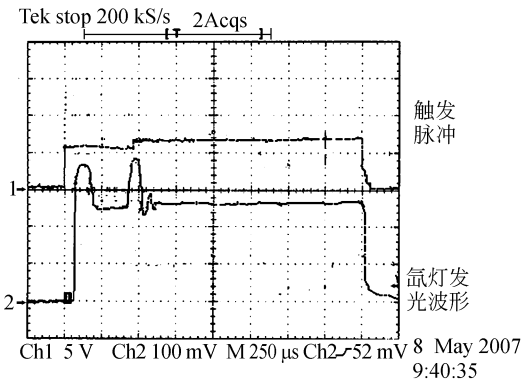


图 5 程控光强脉冲氙灯闪光波形图

Fig. 5 Flashlight curves of stabilized and programmed pulse xeon lamp

3.1.2 二次光反馈太阳模拟器辐照强度与辐照稳定度可控性试验

对于可控太阳模拟器,可利用 MCU1 动态地

改变触发脉冲的幅值与宽度,脉冲的幅值决定了辐照强度的大小,脉冲宽度决定了脉冲氙灯发光时间的长短。在系统运行过程中,充分利用了二次光反馈的控制优势,即两个辐射度光传感器中的稳压传感器用于闭环控制回路实时调控光强的稳定性;光强传感器应用于光强闭环控制回路中实现辐照强度的实时反馈。这两个传感器在系统的运行中,实施双闭环控制,实现了辐照强度全自动的调整。图 6、图 7 为触发脉冲与脉冲氙灯闪光脉冲可控性波形图。

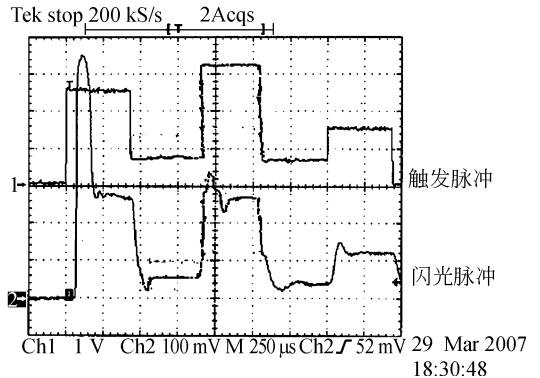


图 6 程控光强脉冲氙灯工作波形图(1)

Fig. 6 Work curves of programmed xeon lamp(1)

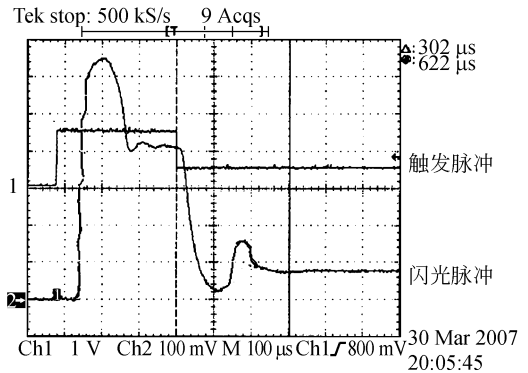


图 7 程控光强脉冲氙灯工作波形图(2)

Fig. 7 Work curves of programmed Xeon lamp(2)

3.2 辐照不均匀度与辐照稳定度监测

实验测试范围为 $\Phi 250$ mm 的圆形区域,用 5 个探测单元进行辐照度检测,一次实验测 4 次,共测有 20 个数据,测试结果如表 1 所示。测试仪器为 SUKD-II 型辐照度测试仪及自制太阳模拟器,标准室内光强为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 。

表 1 辐照度测量

Tab.1 Irradiance testing

序号	辐照度 W/m ²	序号	辐照度 W/m ²
1	1 000.10	11	976.25
2	986.23	12	999.86
3	998.00	13	1 000.23
4	996.20	14	999.45
5	952.35	15	972.45
6	1 000.23	16	996.34
7	983.25	17	1 000.35
8	1 000.11	18	973.35
9	998.86	19	997.56
10	999.20	20	996.87

表 2 辐照稳定性测量

Tab.2 Testing of irradiance stabilization

序号	辐照度 W/m ²	序号	辐照度 W/m ²
1	986.23	11	985.45
2	985.34	12	989.32
3	987.45	13	973.35
4	983.25	14	986.20
5	988.33	15	983.20
6	984.57	16	985.87
7	987.45	17	986.45
8	986.34	18	988.45
9	988.34	19	987.56
10	987.56	20	985.23

辐照不均匀度用式(1)计算:

$$\delta_1 = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (1)$$

计算结果如下:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% = \\ &\pm \frac{1\,000.35 - 952.35}{1\,000.35 + 952.35} \times 100\% = 2.5\% . \end{aligned}$$

辐照稳定性测量采取的方法是在一个固定的辐照点,用 SUKD-II 型辐照度测试仪测试该点的辐照度值,将触发脉冲脉宽调到 4 ms,设计的采样线路的采样速度为 5 个/1 ms,这样在 4 ms 内可以得到 20 个数据,测得的数据如表 2 所示。

辐照不稳定性用式(2)计算:

$$\delta'_1 = \pm \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} \times 100\%, \quad (2)$$

计算结果如下:

$$\begin{aligned} \delta'_1 &= \pm \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} \times 100\% = \\ &\pm \frac{973.35 - 985.23}{973.35 + 985.23} = \pm 0.8\% < \pm 1\% . \end{aligned}$$

4 结 论

本文根据太阳模拟器的技术要求,在分析各类光学系统的基础上,采用同轴光学系统结构,将光学积分器技术与新型光学结构排布相结合,构造了新型的太阳模拟器光学结构,同时建立了基于二次光反馈的模拟器控制器。实验结果表明:采用新型的光学结构,较大地提高了太阳模拟器的辐照均匀度,使得均匀度指标控制在 2.5% 之内。采用二次光反馈控制系统,能有效地控制辐照强度与辐照稳定度,使得辐照稳定度控制 1% 之内,较好地满足了太阳电池测试用太阳模拟器的技术指标。

这两项关键技术的研究,使得太阳模拟技术得到一定的突破,运用这两项技术制作的太阳模拟器,提高了模拟器对辐照不均匀度、辐照度与辐照度不稳定性等技术指标的可控性,为太阳电池的模拟测试提供了强有力的前提基础。

参考文献:

- [1] 周春兰,王文静,李海玲,等. 用电参数表征硅太阳能电池特性[J]. 光学精密工程,2008,16(7):1163-1170.
ZHOU CH H, WANG W J, LI H L, *et al.*. Characterization of crystalline silicon solar cells by electrical parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1163-1170. (in Chinese)

- [2] BHUSHAN L, SOPORI, CRAIG. Design of a fiber optic based solar simulator [J]. *IEEE*, 1991, CH2953-8/91/0000-0783:783-788.
[3] STURCHECHER J J, LAARUE J C. The mini-flasher: a solar array test system[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1994, 36:91-98.
[4] 庞贺伟,黄本诚,臧友竹,等. KM6 太阳模拟器设计概述[J]. 航天器环境工程,2006,23(3):125-133.
PANG H W, HUANG B C, ZANG Y ZH, *et al.*. Design of KM6 solar simulator[J]. *Spacecraft En-*

- vironment Engineering*, 2006, 23 (3): 125-133. (in Chinese)
- [5] 刘洪波. 太阳模拟技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9 (2): 177-181.
LIU H B. Solar simulator technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 177-181. (in Chinese)
- [6] 仲跻功. 太阳模拟器光学系统的几个问题[J]. 太阳能学报, 1983, 4(3): 187-193.
ZHONG J G. The several question of the solar simulator optic system [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1983, 4(3): 187-193. (in Chinese)
- [7] 陆洪明. 均匀照明系统的设计与应用[J]. 光学仪器, 1991, 12(4): 32-38.
LU H M. Design and application of uniformly illuminating system [J]. *Optic Instrument*, 1991, 12 (4): 32-38. (in Chinese)
- [8] 邱丽容. 太阳能电池测试系统[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
QIU L R. *The Testing System of Solar Cell* [M]. Xian: Xian Jiaotong University Press, 1999. (in Chinese)
- [9] 蔡建文, 李萍萍, 徐传明, 等. 太阳能电池测试系统及其参数匹配优化研究[J]. 光学精密工程, 1997, 15 (4): 517-521.
CAI J W, LI P P, XU CH M, et al.. Study on solar cell testing system and its parameter matching optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 15 (4): 517-521. (in Chinese)

作者简介:



王志明 (1967—), 男, 副教授, 1990年, 1998年分别于上海科技大学获学士, 硕士学位, 主要研究方向为光机电一体化检测技术。E-mail: suwangzm@sina.com

刘李明 (1983—), 男, 硕士研究生, 2006年于扬州大学获学士学位, 主要研究方向为光机电一体化检测技术。E-mail: mashal123@sina.com

导师简介:

龚振邦 (1941—), 男, 教授, 博士生导师, 1964年毕业于上海科技大学, 主要研究方向为先进机器人技术与精密工程。E-mail: zhbong@shu.edu.cn

魏光谱 (1937—), 男, 教授, 1961年毕业于南京大学物理系, 主要研究方向为半导体材料、太阳能电池及光电器件和相关分析测试技术。E-mail: gpwei@sh163a.sta.net

(本栏目编辑: 严寒)

●下期预告

带有补偿器的液晶相位可变延迟器

张颖, 赵海博, 赵慧洁

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室
仪器科学与光电工程学院光电工程系, 北京 100191)

为了能够测量带有补偿器的液晶相位可变延迟器(LCVR)在不同电压值下的相位延迟, 提出了一种基于斯托克斯矢量和穆勒矩阵的测量方法。该方法的优点是无需机械旋转、操作简单、测量精度较高。实验测量了可见光范围内6个波长下LCVR在2kHz方波、0~10V电压值下的相位延迟。实验结果表明, LCVR具有调谐电压低、控制简单、调节范围大、无需转动等优点, 相位延迟的测量误差小于0.6%。根据延迟器件的特性, 建立了相位延迟的拟合函数公式, 采用最小二乘曲线拟合的方法得到了延迟器件工作范围内全部波长、全部电压值下的相位延迟, 曲线拟合的标准差 $<0.02\lambda$ 。测量方法、测量结果和拟合函数的建立对偏光器件的研究有参考价值。