

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.032

日光温室光照强度测量系统研究^{*}

王俊衡¹ 李莉¹ 穆永航² 王海华¹ 付强²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 光照是影响作物生长与蒸腾的重要因素之一,实时监测并根据光照强度来指导灌溉不仅能促进作物生长还能起到节水节能的作用。设计了一种低成本、简单、实用的光照监测系统,使用硅光电池作为光敏测量元件,PIC16F876A 单片机作为中央处理器,采用最小二乘法建立硅光电池输出电压和光照强度之间的模型,并通过试验进行系统性能验证。试验结果表明,系统在晴天、雨天、阴天和天气变化时的相对误差分别为:1.19%、7.19%、1.57%和6.15%,平均相对误差均低于10%。系统准确度随光照强度的增大而增大,在光照强度高于15 000 lx时系统测量值更准确,平均相对误差仅为1.41%,测量分辨率为0.1 lx。系统重复性误差小于0.63%,具有较好稳定性。

关键词: 日光温室 光照强度 测量系统 硅光电池

中图分类号: S626.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0194-07

Measurement System of Light Intensity in Solar Greenhouse

Wang Junheng¹ Li Li¹ Mu Yonghang² Wang Haihua¹ Fu Qiang²

(1. Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: Light intensity is one of the indispensable factors for plant growth and transpiration. Real-time monitoring light intensity and guiding irrigation by it can stimulate plant growth, simultaneously, and play a role in saving water and energy. In this paper, a practical light intensity detection system was designed in a simple way with low-cost. The silicon solar panel was used as the solar radiation sensor, which could directly transfer the sun's radiant energy into electric signals. The PIC16F876A MCU was used as the processor. The least square procedure was used to establish the model between the output voltage of silicon solar panel and the light intensity, then experiment was carried out to verify the performance of this system. The result showed that the average relative errors were around 1.19% in sunny days, around 1.57% in cloudy days, around 7.19% in rainy days, around 6.15% in changing weather, respectively. The average relative error was always below 10% in different weathers. The system accuracy was increasing while the light intensity increased. The system worked more precise when the light intensity was above 15 000 lx with the average error of 1.41%. The resolution was 0.1 lx. The system repeatability error was very low (<0.63%), which means the system was running in high stability. In summary, this system could work stably in the solar greenhouse in different weathers.

Key words: Solar greenhouse Light intensity Measurement system Silicon solar panel

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-09
^{*} 国家自然科学基金(青年)资助项目(31301240)、土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放课题基金资助项目(2014SKL03)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XD001)
作者简介: 王俊衡,硕士生,主要从事物联网技术在设施园艺中的应用研究,E-mail: wangjhleo@163.com
通讯作者: 李莉,副教授,博士,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: lily@cau.edu.cn

引言

光环境是植物生长发育不可缺少的重要物理环境因素之一,光通过影响光合作用、光形态建成和光周期来调节植物的生长发育^[1]。光照时间及光照强度对大多数植物生长周期有着重要影响^[2-3]。所以,监测温室中光照强度对作物生长、灾害防护以及指导灌溉等都有着重要意义^[4-6]。

目前,光照强度传感器普遍使用光敏二极管,张荣标等^[7]开发的温室环境监测系统使用的光照强度传感器为光敏二极管,但其存在受光面积较小、易被遮挡、对温度响应较为敏感等问题。Khalidun等^[8]、Tatsuo^[9]的研究表明硅光电池具有性能稳定、寿命长、光谱响应范围宽、耐高温并且工作时不产生热量等优点。Shah等^[10]、Strumpela等^[11]、Priyanka等^[12]的研究表明硅光电池可广泛应用于太阳能转换等领域。郑荣进等^[13]将硅光电池用于日光温室加热的研究中。但是将硅光电池作为光照度传感器的研究未见报道。

本文以 PIC16F876A 单片机为核心,以硅光电池为光照强度检测器件搭建温室光照强度测量系统,并对其性能及稳定性进行分析。

1 系统设计

1.1 系统总体设计

系统总体包括数据采集、数据处理和数据传输。系统总体框图如图 1 所示。

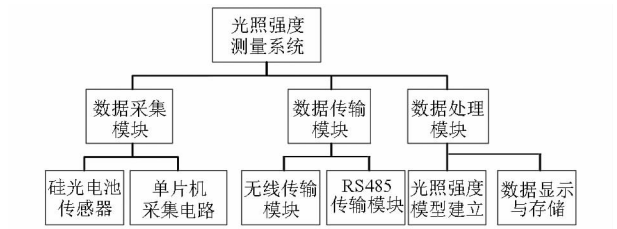


图 1 系统总体框图
Fig. 1 Overall system diagram

数据采集模块使用硅光电池为光照强度传感器,传感器输出为短路电流。控制芯片部分使用单片机 PIC16F876A,完成传感器数据接收、处理并发送到上位机。数据传输模块使用 HM-TRP-RS485 无线收发模块与计算机进行通信。

1.2 数据采集模块

1.2.1 传感器设计

硅光电池的理论模型是由理想电流源(光照产生光电流的电流源)、理想二极管、并联电阻 R_{sh} 和串联电阻 R_s 所组成^[15-16],如图 2 所示。

实际情况中,可假定 $R_{sh} = \infty$ 和 $R_s = 0$,所以,可

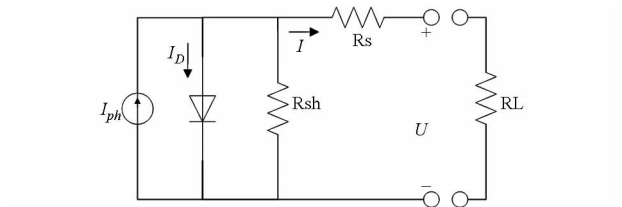


图 2 硅光电池理想等效电路
Fig. 2 Ideal equivalent circuit of silicon solar cells

以得到其伏安特性为

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s [\exp(eV_D / (kT)) - 1] \quad (1)$$

- 式中 I ——输出电流, A
 I_{ph} ——PN 结电流, A
 I_D ——等效二极管电流, A
 V_D ——输出电压, V
 I_s ——短路电流, A e ——电子电荷, C
 k ——玻尔兹曼常量
 T ——工作绝对温度, K

硅光电池短路电流与光照强度的响应具有良好的线性关系,可以使用短路电流来表征光照强度。在 5~60℃ 温度范围内,硅光电池短路电流对光照强度的响应线性度比较高,可以通过测量短路电流表征当前光照强度^[17]。

单片机的输入量为电压,需要将传感器输出的电流信号转换为电压信号,所以在硅光电池输出端串联一个 1 Ω 电阻,该阻值远远小于硅光电池内阻,可将其近似为短路。测量电阻两端电压,近似等于短路电流。探测传感器设计如图 3 所示。

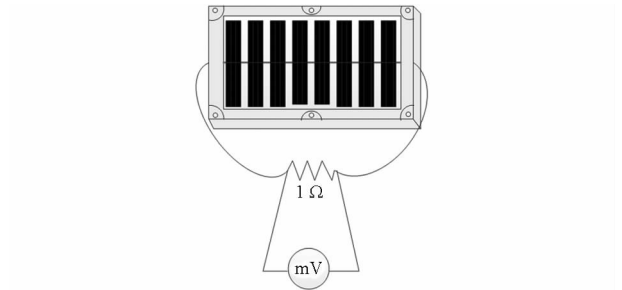


图 3 探测传感器设计
Fig. 3 Probe sensor design

1.2.2 单片机选型与设计

系统选用 MICROCHIP 公司的 PIC16F876A 单片机为核心芯片,它是一款具有 RISC 结构的高性能单片机,具有 8 k × 14 位的程序存储器 (Flash 内存), 368 × 8 位的数据存储器, 256 × 8 位的 EEPROM,用于存储设定的数据和测试数据。其自带 8 路 10 位 A/D 转换器,节省成本并增加电路稳定性。PIC16F876A 单片机参考电压为 3.3 V,分辨率为 3.222 7 × 10⁻³ V,精度为千分之一,能满足系统设计的需求。

将传感器输出的两条线分别接到单片机的 RA0 和 V_{ss},通过 PIC16F876A 内部的 A/D 转换器,将其转换为 0~1 024 之间的 10 位数字信号。采用 LM7805 电源稳压器产生 PIC16F876A 的 5 V 工作电压,用 7.5 V 的电源适配器给 LM7805 提供工作输入电压。经采样将数据通过无线传输到计算机。单片机系统设计如图 4 所示。

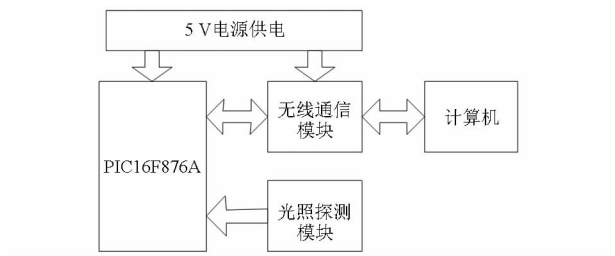


图 4 PIC16F876A 硬件系统结构图

Fig. 4 PIC16F876A hardware system design

1.2.3 软件设计

传感器数据的采集通过程序中设定 PIC16F876A 的定时器每隔 30 s 采集并发送 1 次。首先对 PIC16F876A 单片机端口进行初始化,使用查询方式,将计数初值赋给 TMR1,到 30 s 之后,将传感器经过 A/D 转换之后的数据赋给 PORTD,再将数据发送到 SN75176。PIC16F876A 内部自带 A/D 转换程序,只需将 ADON 赋 1,再对 GO/DONE 进行查询即可完成 A/D 转换。完成 A/D 转换后进行数据发送。系统软件流程及 A/D 转换流程如图 5 所示。

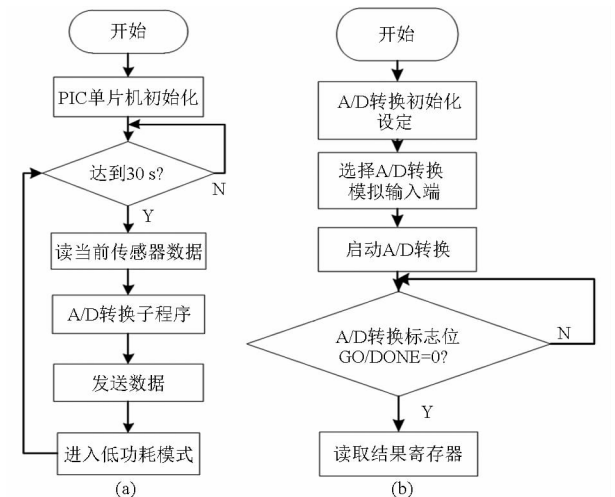


图 5 系统软件流程图与 A/D 转换流程图

Fig. 5 System software flow chart and A/D conversion chart

(a) 软件流程图 (b) A/D 转换流程图

计算机端使用 Macqu 262 上位机软件^[17]直接读取串口收到的数据。

1.3 数据传输模块

采用 SN75176 芯片作为数据发送与接收芯片,该芯片广泛用于 RS485 总线间的通信,工作电压与 PIC16F876A 相同,无需再进行电压转换便能稳定工

作。发送端将单片机的 RXD、TXD 分别与 SN75176 对应的 RXD、TXD 相连,发送数据时将 DE 端置为 1。使用 HM-TRP-RS485 无线收发模块作为无线传输模块,将 SN75176 输出端与 HM-TRP-RS485 的输入对应相连。该模块传输距离在空旷地带可达到 1 000 m,在有阻挡物时依然可以达到 300 m,读写功耗 10~40 mA,休眠功耗为 1 μA。采用 433 MHz 传输频段。该频段具有高传输距离、高穿透性,在多温室地带运用相对合适。

将接收端的 SN75176 设为接收状态,将其输出端 A 与 B 分别接到 RS485 转 USB 数据线的 TR0+ 与 TR0- 两端,通过 USB 接口与计算机相连。

2 试验与结果分析

2.1 试验材料

光照强度探测器采用 1.5 W 硅光电池板,受光面积为 158 mm×90 mm,使用 1 Ω、5 W 的电阻将硅光电池输出端短路,从输出端引出两条线接到单片机 RA0 和 V_{ss} 口上。

标定光照强度的仪器采用台湾泰仕公司 TES-1332A 型数字照度计。测量范围为 0~2.0×10⁵ lx,最低分辨率为 0.1 lx,取样率为 2 次/s。照度计显示读数时,显示屏最高只显示 4 位数字,光照强度大于 9 999 lx 时,读数等于显示数字乘以 10,大于等于 99 999 lx 时,需将显示数字乘以 100,测量精度有所降低。

稳定性试验使用光照强度传感器 ISL29010,其工作电流为 0.25 mA。待机电流为 0.1 μA,测量精度为 ±50 lx。

试验在中国农业大学的小型日光温室进行,日光温室长、宽、高分别为 450 cm×330 cm×290 cm。所朝方向为正南偏西 8°。前屋面前角为 70°,腰角为 30°,顶角为 15°。

2.2 试验方法

在实际条件下,太阳高度、大气能见度、云量、海拔高度等对光照强度都存在较大影响,所以光照强度在不同环境下都不相同。系统需标定在不同天气环境下、同一位置、同一仰角下的光照强度与采集到的数据,得到该光照强度检测系统与光照强度之间的关系。平行于温室腰角,在前屋面塑料膜下方 50 cm 处放置该光照强度探测器。将单片机系统固定在墙上,使用 5 V 电源适配器为其供电。在计算机上接收并记录测得的数据。

晴空下太阳照度高,天空中没有云朵等其他遮挡物,太阳能电池受光情况最佳。试验使用晴空下 TES-1332A 采集到的数据与单片机系统采集到的电压进行标定;得到光照强度与测量电压之间的模

型;再分别在晴天、雨天、阴天和其他复杂天气情况下进行验证。

试验在5月25日—6月25日期间,选取晴天数据进行模型建立。为了减少天空中遮挡物的影响获得更高照度,每天10:00—16:00使用TES-1332A每隔1h采集一次光照强度。使用其中100组数据用于模型建立,得到TES-1332A采集到的光照强度与硅光电池电压之间的关系。剩余75组数据进行验证。

在6月25日—7月25日,选取除去晴天以外的其他天气情况,从08:00—18:00在同一位置,每隔20min,记录TES-1332A照度计采集到的光照强度,通过模型计算得到的光照强度与照度计采集到的光照强度之间对比来进行系统模型验证。

使用探照灯模拟光源,在无外加光源的黑暗情况下,保持其他外界条件不变,通过调节硅光电池与光源的距离,调节到以下3种光照强度:10000lx、15000lx和30000lx,在这3种光照强度下,在30min内每隔2min记录一次系统测量得到的数据,对系统进行重复性测试。

将系统置于日光温室中不间断工作,同时用普遍使用的光照强度传感器ISL29010监测当前光照强度,与系统测量值进行对比,测试系统稳定性。

2.3 模型建立

试验测量一个月之内的光照强度,其中晴天25d,共采集到175组数据。取其中100组数据用于建模。

根据硅光电池特征,测量得到的电压与光照强度之间应为线性关系,表达式为

$$E = a_0 + aU \tag{2}$$

式中 E ——光照强度, lx

U ——电压, V

使用最小二乘法对其进行一元线性回归。可求得: $a_0 = 2196.5$, $a = 94397$ 。

其 $U-E$ 特性曲线如图6所示。

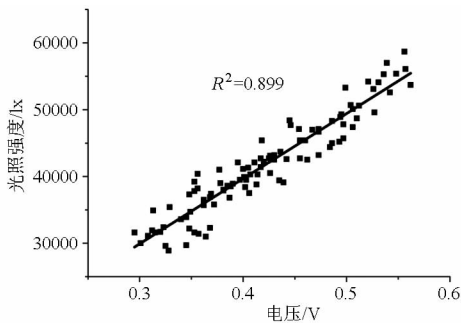


图6 $U-E$ 特性曲线

Fig. 6 $U-E$ characteristic curve

因为建模使用TES-1332A进行标定,其分辨率为0.1lx,所以该系统测量精度应与TES-1332A分辨率相同。

2.4 系统测试

2.4.1 晴天环境下的系统测试

首先对晴天情况进行模型验证。对剩余75组晴天的TES-1332A测量值与模型计算值进行对比,如图7所示。

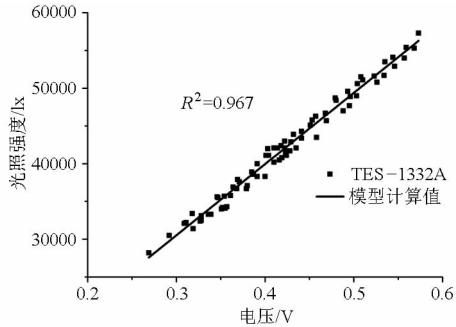


图7 晴天光照强度测量对比

Fig. 7 Comparison of light intensity in sunny days

图中直线表示模型计算值,散点表示照度计TES-1332A读数,从图中可以看出,TES-1332A读数相对于模型计算值离散情况较好, $R^2 = 0.967$ 。

综合所有数据,取出其中处于高照度下(大于25000lx)的数据进行分析,数据平均相对误差为1.19%,远低于高照度平均相对误差标准(10%),表明测量值与标准光照强度之间的相对误差较小,系统在晴天的测量准确度较高。

2.4.2 阴天环境下的系统测试

在阴天情况下,取出其中2d的数据进行对比分析,08:00—18:00的模型计算值与TES-1332A测量值对比如图8所示。

从图中可以看出,数值集中在20000lx左右。TES-1332A读数与模型计算值变化趋势相同,但模型计算值大多低于标准光照强度,原因为硅光电池比TES-1332A的受光元件光敏二极管对光的敏感程度略低。

在中照度的情况下(15000~25000lx),2d数据平均相对误差分别为1.37%与2.05%,远低于照度平均相对误差标准(10%)。

综合阴天所有试验得到的数据,阴天情况下平均相对误差为1.57%,表明系统在阴天的测量准确度依然较高。

2.4.3 雨天环境下的系统测试

在雨天情况下,取出其中1d的数据进行分析,08:00—18:00的模型计算值与TES-1332A测量值对比如图9所示。

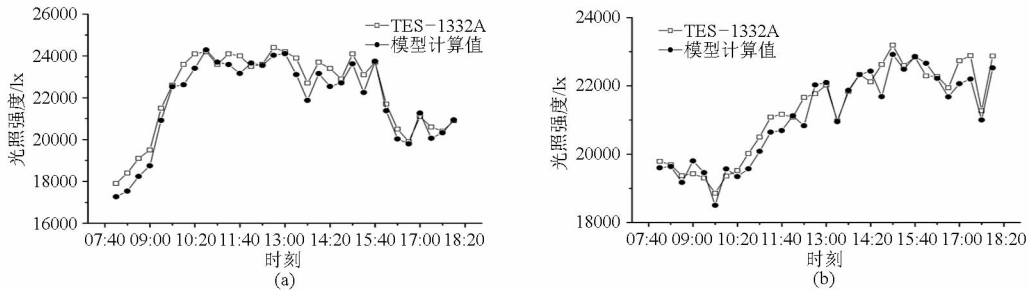


图 8 阴天光照强度测量对比
Fig. 8 Comparison of light intensity in cloudy days
(a) 6 月 15 日 (b) 7 月 9 日

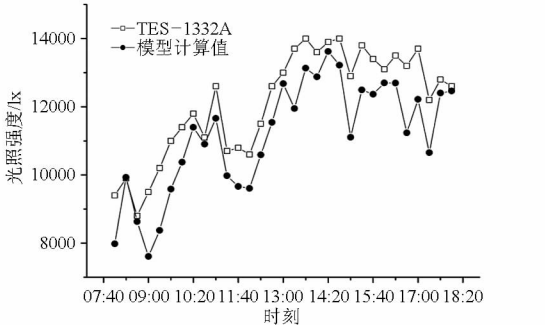
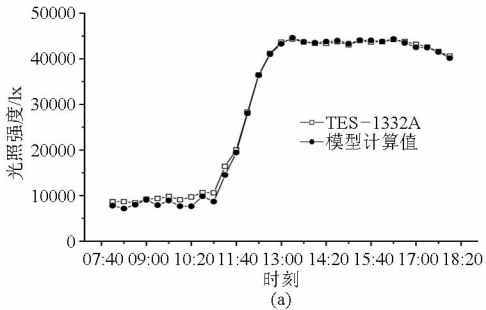


图 9 雨天光照强度测量对比
Fig. 9 Comparison of light intensity in rainy days

从图中可以看出,数值在 7 000 ~ 15 000 lx 之间波动。TES - 1332A 读数与模型计算值变化趋势基本相同,有 2 个数据点的变化趋势产生错误,误差率为 4%,在可接受范围内。模型计算值明显低于标准光照强度,其原因除去硅光电池对光的敏感程度



较低外,在雨天等极端天气下,温室塑料薄膜上会有雨水残留等,以及阴影或散射等外界因素对其影响较大。

雨天照度较低 (小于 15 000 lx),平均相对误差为 8.05%,在照度平均相对误差标准 10% 之内,与标准光照强度之间存在误差,但在可接受范围内。

综合雨天所有试验得到的数据,雨天情况下平均相对误差为 7.19%。所以在雨天的情况下,相较于其他天气情况,系统测量准确度明显降低。模型计算值能表征雨天光照强度,但是较其他高照度的天气下误差较大。

2.4.4 天气变化环境下的系统测试

在天气变化情况下的 08:00—18:00 的模型计算值与 TES - 1332A 测量值对比如图 10 所示。

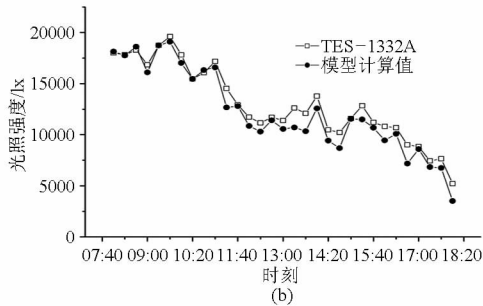


图 10 天气变化时光照强度测量对比
Fig. 10 Comparison of light intensity in weather changing days
(a) 雨转晴 (b) 阴转雨

从图中可以看出,TES - 1332A 读数与模型计算值变化趋势基本相同,在高于 15 000 lx 时模型计算值与标准光照强度之间浮动较小。在低于 15 000 lx 时模型计算值大多低于标准光照强度。在光照强度急剧升高时,系统响应时间短,精度较高。

在雨转晴的天气下,数据在 5 000 ~ 45 000 lx 之间变化。平均相对误差为 4.66%,低于照度平均相对误差标准 (10%),与标准光照强度之间的误差较低。在阴转雨的天气下,数据在 3 500 ~ 20 000 lx 之间变化,平均相对误差为 7.63%,低于照度平均相

对误差标准 (10%),与标准光照强度之间的误差在能接受的范围之内。因此在天气变化情况下,系统响应时间较短,能在光照度急剧升高或下降的时候与光照强度变化保持一致,能较好表征光照强度突变的情况。

2.4.5 系统指标评价

使用平均相对误差、平均绝对误差、均方根误差,在不同天气情况下以及不同照度情况下对系统的性能进行评价。结果如表 1、2 所示。

由表中数据可知,在晴天下,系统相对误差最小

表 1 不同天气情况下系统性能评价指标

Tab.1 Evaluation indexes of system in different weathers

天气情况	平均相对误差/%	平均绝对误差/lx	均方根误差/lx
晴天	1.19	478	581
阴天	1.57	371	466
雨天	7.19	885	1 061
天气变化	7.63	713	1 231

表 2 不同照度情况下系统性能评价指标

Tab.2 Evaluation indexes of system in different light intensities

照度/lx	平均相对误差/%	平均绝对误差/lx	均方根误差/lx
0 ~ 15 000	9.43	616	754
> 15 000	1.41	496	572

为 1.19%，其平均绝对误差与均方根误差较大，因为晴天多为高光照强度，光照强度基数较大。雨天与天气变化情况下，所有指标均较高，表明系统在这样的天气情况下会有较大误差。通过指标分析可得，系统在晴天和阴天处于较高光照强度，较良好受光情况的天气误差要小。

由表中数据可知，当光照强度低于 15 000 lx 时，如雨天、阴天和天气变化时，系统测量准确度受到明显影响，平均相对误差明显增大，平均相对误差为 9.43%。当光照强度高于 15 000 lx 时，模型计算值与照度计测量值之间的平均相对误差为 1.41%。平均绝对误差与均方根误差随光照强度增大而减小，表明系统测量准确度随光照强度的增大而增大，在 15 000 lx 左右有大幅度提高。在雨天等影响硅光电池受光的天气下，系统测量准确度有明显降低。

2.4.6 系统其他性能测试

对系统进行重复性试验，得到 15 组数据，如表 3 所示。

通过表中数据分析可以得出，系统在 10 000 lx、15 000 lx 和 30 000 lx 下的重复性误差分别为 0.63%、0.37% 和 0.12%，表示系统能在短时间内精确、稳定重复工作。

根据系统在日光温室中连续工作 3 个月数据显示，测量系统未出现死机、故障等情况，截取其中 1 d 的数据，与市售通用产品 ISL29010 光照强度传感器测得的光照强度进行对比，如图 11 所示。表明系统能在温室中稳定长时间工作。

从图中可以看出，系统测量值与 ISL29010 的平均相对误差为 4.76%，平均绝对误差为 912 lx，均方

表 3 重复性测试数据

Tab.3 Repeatability test data

记录次序	10 000 lx	15 000 lx	30 000 lx
1	9 810	14 998	30 021
2	9 994	15 044	29 959
3	9 959	14 931	30 048
4	9 930	14 902	29 954
5	9 962	14 908	30 046
6	9 911	14 964	30 027
7	9 996	15 027	29 950
8	9 874	14 971	30 024
9	9 809	15 002	29 983
10	9 927	15 013	30 012
11	9 946	14 902	29 995
12	9 864	14 944	29 993
13	9 947	14 949	30 035
14	9 823	15 061	29 952
15	9 948	15 051	29 951

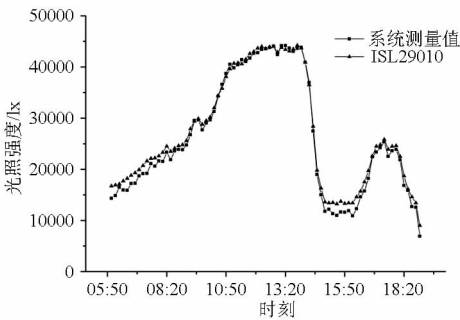


图 11 连续工作时系统测量光照强度结果

Fig. 11 Continuous measurement of light intensity

根误差为 1 003 lx，数值离散程度较好，并无太大差距，在光照强度低于 15 000 lx 时精确度降低。

3 结束语

根据温室中测量光照强度的需求，采用硅光电池作为传感元件、PIC16F876A 单片机为核心控制器搭建了日光温室光照强度采集系统。通过硬件和软件的设计实现光照强度的实时采集、数据无线传输和处理等功能。所开发的光照测量系统满足低功耗、低成本、可靠、稳定等要求。试验表明，系统准确度在一般条件下均满足温室中调控以及监测的需求。在低照度或极端天气情况下误差较大（<10%），测量准确度略有下降，在后续研究中将对其进行补偿研究。通过与市售光照强度传感器的长期测量对比试验，结果表明该系统能达到正常稳定使用的需求，而且具有低成本等优势。

参 考 文 献

1 朱静娴. 人工补光对植物生长发育的影响[J]. 作物研究, 2012, 26(1): 74 – 78.
Zhu Jingxian. Influence of artificial supplement of light on plant growth and development [J]. Crop Research, 2012, 26(1): 74 – 78. (in Chinese)

2 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 447 – 454.
Wang Lianxi, Chen Huailiang, Li Qi, et al. Research advances in plant phenology and climate [J]. Acta Ecologic Sinica, 2010, 30(2): 447 – 454. (in Chinese)

3 Setiyono T D, Weiss A, Specht J, et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions [J]. Field Crops Research, 2007, 100(2): 257 – 271.

4 耿长兴, 张俊雄, 曹峥勇, 等. 温室黄瓜病害对靶施药机器人设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 177 – 180.
Geng Changxing, Zhang Junxiong, Cao Zhengyong, et al. Cucumber disease toward-target agrochemical application robot in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 177 – 180. (in Chinese)

5 Li Yan, Xia Chunlei, Lee Jangmyung. Vision-based pest detection and automatic spray of greenhouse plant [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009: 920 – 925.

6 沈明霞, 丛静华, 张祥甫, 等. 基于 ARM 和 DSP 的农田信息实时采集终端设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 147 – 152.
Shen Mingxia, Cong Jinghua, Zhang Xiangfu, et al. Design and implementation of terminal for agricultural data real time acquisition based on ARM and DSP [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 147 – 152. (in Chinese)

7 张荣标, 谷国栋, 冯友兵, 等. 基于 IEEE802.15.4 的温室无线监控系统的通信实现[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 119 – 123.
Zhang Rongbiao, Gu Guodong, Feng Youbing, et al. Realization of communication in wireless monitoring system in greenhouse based on IEEE802.15.4 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 119 – 123. (in Chinese)

8 Khaldun A Salman, Khalid Omar, Hassan Z. Improved performance of a crystalline silicon solar cell based on ZnO/PS anti-reflection coating layers [J]. Superlattices and Microstructures, 2011, 50(5): 517 – 528.

9 Tatsuo Saga. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production [J]. NPG Asia Materials, 2010, 2(3): 96 – 102.

10 Shah A V, Schade H, Vanecek M, et al. Thin-film silicon solar cell technology [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2004, 12(2 – 3): 113 – 142.

11 Strumpela C, McCanna M, Beaucarne G, et al. Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency—an overview of available materials [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(4): 238 – 249.

12 Priyanka Singha, Singha S N, Lala M, et al. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92(12): 1611 – 1616.

13 郑荣进, 庄麟, 池清, 等. 温室太阳能与地源热泵联合供暖系统热力学分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 233 – 238.
Zheng Rongjin, Zhuang Lin, Chi Qing, et al. Thermodynamic analysis of solar-assisted ground source heat pump system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 233 – 238. (in Chinese)

14 张玮, 杨景发, 闫其庚. 硅光电池特性的实验研究[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(9): 42 – 46.
Zhang Wei, Yang Jingfa, Yan Qigeng. Experiment research on the property of silicon solar cell [J]. Experimental Technology and Management, 2009, 26(9): 42 – 46. (in Chinese)

15 周朕, 卢佃清, 史林兴. 硅光电池特性研究[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(11): 36 – 39.
Zhou Zhen, Lu Dianqing, Shi Linxing. Properties of silicon solar cell [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2011, 30(11): 36 – 39. (in Chinese)

16 Wen Cai, Fu Chao, Tang Jinlong, et al. The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance [J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2012, 55(2): 235 – 241.

17 Sigrimis N, Pasgianos K G A D, Ferentinis K P. Computer integrated management and intelligent control of greenhouses [J]. Environment Control in Biology, 2002, 40(1): 39 – 53.