

# 基于 BP 神经网络的数字式光照度计设计

孙来军, 刘明亮, 乔常明, 钱海波, 叶光忠

(黑龙江大学 黑龙江省电子工程高校重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**设计了一种基于 BP 神经网络和硅光电池的宽量程、高精度数字式光照度计,并详细介绍了这种光照度计的工作原理、软硬件设计以及数据拟合的过程。实验数据表明,该光照度计量程宽、精度高,完全能够满足农作物生长环境检测的应用要求。

**关键词:**光照度计;BP 神经网络;硅光电池

中图分类号: TH74

文献标识码: B

## Design of digital light-intensity indicator based on BP neural network

SUN Lai Jun, LIU Ming Liang, QIAO Chang Ming, QIAN Hai Bo, YE Guang Zhong

(Key Laboratory of Electronics Engineering College of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** This paper introduces a kind of digital light-intensity based on BP neural network and silicon photoelectric generator, describes the fundamental principle, software and hardware design, data fitting and so on. The experiment indicates that this kind of digital light-intensity can satisfy the requirement of wide measurement range and high precision.

**Key words:** light-intensity indicator; BP neural network; silicon photoelectric generator

光照度,即通常所说的勒克司度(Lux),表示被摄主体表面单位面积上受到的光通量。在农业生产中,光照度是影响农作物生长的重要参数之一,因此,现在光照度的检测越来越受到农业科技工作者的重视。农作物在生长过程中主要吸收利用的是可见光,其光照度范围很广,黑夜最低时只有几十 lux,而白天最高时可达几十万 lux。目前市场上成品数字光照度计大多量程范围有限,不适合这样大范围光照度的测量。因此本文提出一种基于 BP 神经网络和硅光电池的光照度计的设计<sup>[1]</sup>。

### 1 硅光电池的光电转换原理

光电池是一种自发式光电转换元件,它不需要外加电源直接把光能转换为电能。光电池的种类很多,常见的有硒、锗、硅、砷化镓、氧化铜等,其中硅光电池因具有性能稳定、光谱响应范围宽、转换效率高、线性响应好、使用寿命长、耐高温辐射、光谱灵敏度和人眼灵敏度相近等优点而得到广泛应用。

硅光电池的工作原理是基于光生伏特效应。硅光电池其实就是在一片 N 型硅片上用扩散的方法掺入一些 P 型杂质而形成的一个大面积 PN 结。当光照射到 P 区表面时,如果光子能量大于硅的禁带宽度,则在 P 型区内每吸收一个

光子便产生一个“电子-空穴”对。P 区表面吸收的光子越多,激发的“电子-空穴”对越多,而流向内部的光子越少,这种浓度差便形成从表面向内部扩散的自然趋势。由于 PN 结内电场的方向是由 N 区指向 P 区,所以扩散到 PN 结附近的“电子-空穴”对会分离。光生电子被推向 N 区,光生空穴被留在 P 区,从而使 N 区带负电,P 区带正电,形成光生电动势。如果用导线将 P 区和 N 区连接在一起,电路中就会有光电流通过<sup>[2-3]</sup>。

### 2 光照度计硬件电路设计

本文所描述的光照度计在设计硬件电路时充分考虑到其高精度、宽量程和实用性,设计硬件电路由 7 大模块组成,分别为核心处理器模块、前向数据采集模块、液晶显示模块、按键控制模块、通信模块、存储模块和电源模块。其电路结构框图如图 1 所示<sup>[4]</sup>。其中,前向数据采集模块的设计是重中之重,它关系到能否实现光照度计高精度和宽量程的实用效果,因此对该模块加以重点介绍,其他模块均属常规硬件电路,在这里不予说明。

在设计前向数据采集模块时需要注意 3 个问题:

(1)光谱灵敏度

严格地讲,光照度计被直接用于农业气象观测是不合

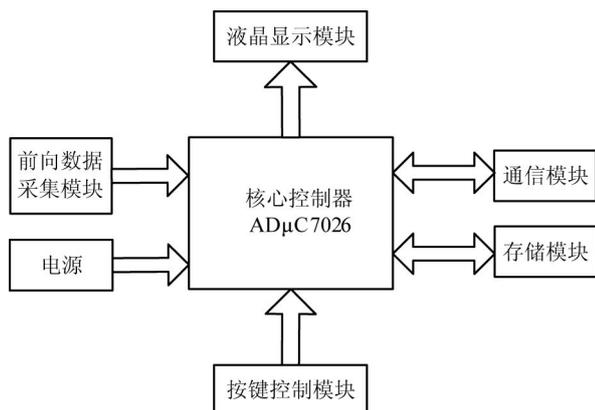


图1 光照度计硬件结构框图

适的,这是因为植物光合作用强度的光谱曲线与人眼视觉函数曲线并不相同。为获得正确的测量结果,必须修正硅光电池的光谱灵敏度,使之尽可能精确地逼近国际照明委员会(CIE)给出的标准人眼视觉灵敏度函数 $V(\lambda)$ (在通常的照度范围内使用明视觉函数,测量微弱光照度时应使用暗视觉函数)。这可通过在硅光电池前端按加法(并联)或减法(串联)安装选择性滤光器来实现。但要注意所使用的滤光器必须能把可见光波长以外的光谱响应滤除干净,而且不允许有次峰的存在,特别是在近红外区域,硅光电池在这个区域有最高的灵敏度,次峰的存在可能导致显著的误差产生。对于那些未经任何修正直接采用硅光电池作为光接收元件的简易照度计,则只能用于那些类型与色温已知且已经预先校准并给出了修正系数的光源的光照度测量,否则可能产生相当大的测量误差<sup>[5]</sup>。

### (2) 余弦响应的角特性

根据光照度定律,任一被照平面的光照度和入射光线与该被照平面法线方向夹角的余弦成正比。因此,为了正确地测量光照度,要求光照度计应该具有余弦响应的角特性。许多研究表明,在光电器件的光敏表面加装漫散射器件(如乳白玻璃),可以获得期望的这种特性,它将减少光电池在斜射光照时由于探头盒壁阴影效应以及表面光反射损失的增加而造成的角响应降低<sup>[6-7]</sup>。

### (3) 信号的转换与放大

经灵敏度函数 $V(\lambda)$ 和余弦校正器修正过的硅光电池由于受到滤光器的切割以及乳白玻璃的漫射作用,信号已经有了很大程度的衰减,其有效光电流输出即便在使用了较大面积的光电池后仍然很低。此外,AD $\mu$ C7026的ADC通道要求的输入信号为电压信号,并且由于线性退化的原因要求电压信号必须在线性区域内才能保证精度。因此,需先将硅光电池转换的有效电流信号经过一个串联电阻变为电压信号并适当放大后才可使用。

基于以上3点,在设计电路时应首先在硅光电池的前

端安装滤光器和余弦校正器。滤光器采用有色光学玻璃材料制作,并且将2种或2种以上的滤光器用串联的方法加以适当地组合使滤光效果更好<sup>[8]</sup>。余弦校正器采用环球型乳白玻璃,其稳定性好、表面硬度高而耐磨,适用于在恶劣环境条件下工作的仪器及标准仪器。在硅光电池后串联1个可调电阻,并且安装一级运放电路,最后再经过一阶有源低通滤波电路滤去信号中的高频噪声,便可将最终的电压信号输入到AD $\mu$ C7026的ADC通道。该模块的电路连接图如图2所示。

在该硬件电路中,前级运放采用双电源供电,这是因为双电源供电时输入信号可以在正负电源之间的双极性信号,动态范围大、稳定且精度高。后面的滤波电路中也有一级运放,但它只起到1:1的电压跟随作用。

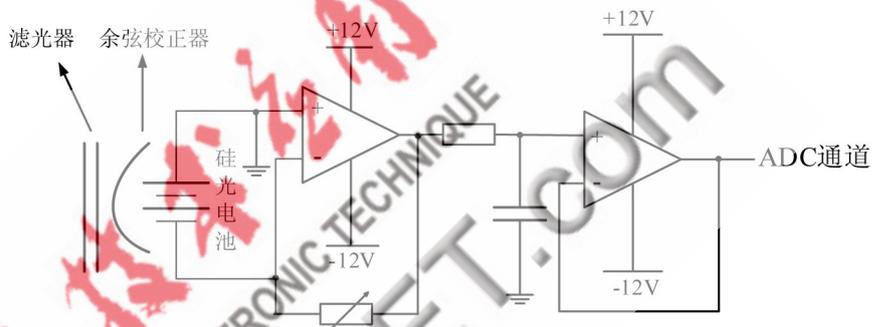


图2 前向数据采集模块电路连接图

## 3 光照度计软件设计

该光照度计有手动和自动2种功能可供选择。当选择手动功能时,光照度计显示一次当前地区的光照度值;当选择自动功能时,该光照度计会每隔30s显示一次当前地区的光照度值,使用定时器Timer1来实现精确定时。在计数器递减为0后先扫描键盘,判断是否有键按下。如果没有,直接将光照度值显示在液晶上;如果有,根据不同的键值执行相应的功能。整个软件流程如图3所示。

## 4 数据拟合

通过AD $\mu$ C7026的ADC通道采集到的数据只是光电池转换的电信号,要想把这些毫无意义的的数据转变成光照度值,就需要找出同一时刻、同一地点标准光照度计所检测的光照度值与AD转换数据之间的关系<sup>[9]</sup>。这就需要进行数据拟合,通过大量实验发现,常规的数据拟合方法如线性拟合、多项式拟合等都存在适用范围小的缺陷,因此采用BP神经网络的方法进行数据拟合。BP神经网络算法即误差反向传播算法,是一种基于梯度下降原理的学习算法,在输入第 $p$ 组学习样本 $F_p$ 时,已知其对应的输出 $D_p = \{d_{1p}, d_{2p}, \dots, d_{ip}\}$ ,网络学习的目的就是根据实际输出 $Y_p = \{y_{1p}, y_{2p}, \dots, y_{ip}\}$ 与期望输出 $D_p$ 的误差,修改连接权值和阈值,使 $Y_p$ 与 $D_p$ 尽可能地接近<sup>[10]</sup>。其权值调整公式为:

$$\Delta \omega_{ij,k}(t+1) = \eta \delta_{jk} y_{i,(k-1)} + \alpha \Delta \omega_{ij,k}(t) \quad (1)$$

$$\omega_{ij,k}(t+1) = \omega_{ij,k}(t) + \Delta \omega_{ij,k}(t+1) \quad (2)$$

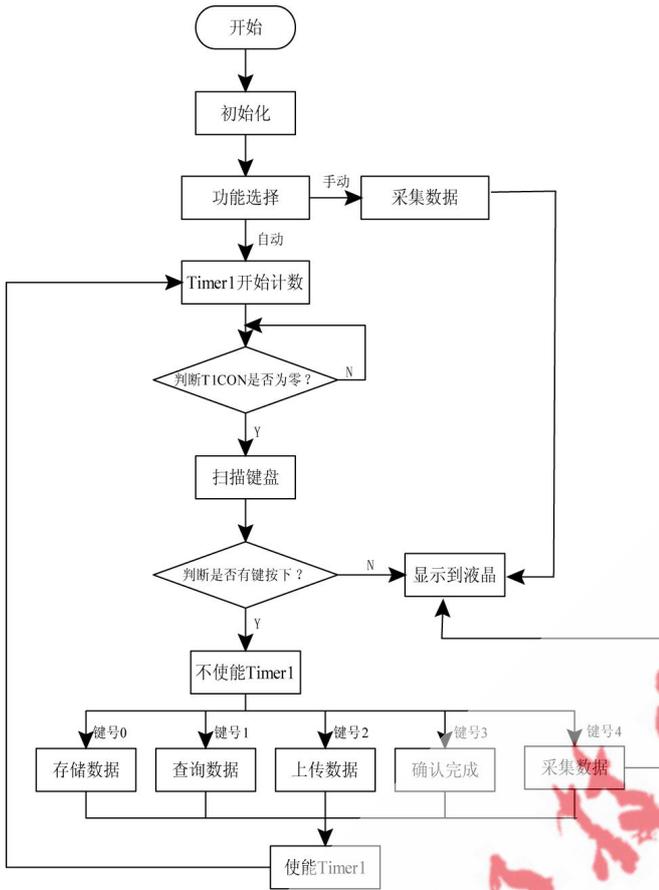


图3 软件流程图

式中,  $\omega_{ij,k}(t)$  表示第  $t$  次调整时, 第  $k-1$  层神经元  $i$  到第  $k$  层神经元  $j$  的权重;  $\omega_{ij,k}(t+1)$  为第  $t+1$  次调整时, 第  $k-1$  层神经元  $i$  到第  $k$  层神经元  $j$  的权重;  $\Delta\omega_{ij,k}(t+1)$  为权重调整值;  $y_{i,(k-1)}$  为第  $k-1$  层神经元  $i$  的输出;  $\eta$  为学习率;  $\alpha$  为泛化系数;  $\delta_{j,k}$  为误差梯度因数。

对于输出层神经元 (第  $k$  层为输出层):

$$\delta_{j,k} = y_{j,k}(1 - y_{j,k})(d_{j,k} - y_{j,k}) \quad (3)$$

式中,  $d_{j,k}$  为第  $j$  个目标输出。

对于隐层神经元 (第  $k$  层为隐层):

$$\delta_{j,k} = y_{j,k}(1 - y_{j,k}) \sum_r \delta_{r,(k+1)} \omega_{jr,(k+1)} \quad (4)$$

当学习误差  $J = \frac{1}{2} \sum_p ||D_p - Y_p||_2^2 < \varepsilon$  时, 学习停止, 网络训练完毕。其中  $\varepsilon$  为任意给定的正数, 它的大小决定了网络的训练精度。

另外, 当输入分界模糊时网络的输出值比较接近, 这给精确的诊断带来影响, 可采用下式进行调整:

$$\beta_i = 10[y_i - \sum_{j \neq i}^k y_{j-1} / (k-1)] \quad (5)$$

式中,  $k$  为输出层节点数。

本文所设计的 BP 神经网络由输入层、隐层和输出层 3 层构成, 结构如图 4 所示。输入层为有效硅光电池电压的

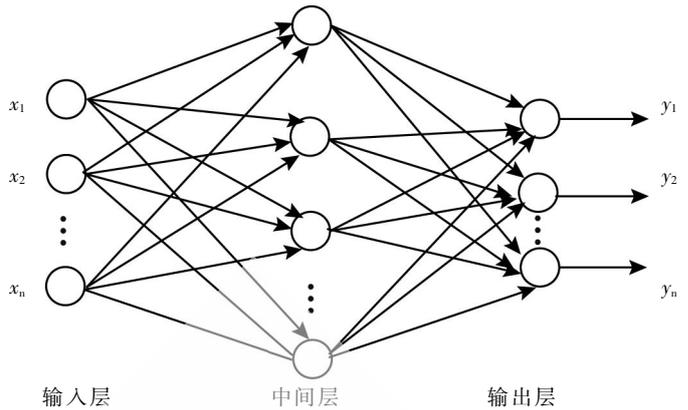


图4 BP神经网络结构

AD 采样数值, 则输入层节点数即为有效波点数  $n$ , 输入层节点  $i$  的输出为  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。隐层和输出层神经元的作用函数采用 S 函数  $f(x) = 1/(1+e^{-x})$ , 则隐层输入、输出分别为:

$$h_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_i - \theta_j = \sum_{i=1}^{n+1} \omega_{ij} x_i \quad (6)$$

$$o_j = f(h_j) = 1/(1+e^{-h_j}) \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

式中,  $m$  为隐层节点数;  $\theta_j = \omega_{(n+1)j} x_{n+1}, x_{n+1} = -1$ 。

输出层输入、输出为:

$$h_k = \sum_{i=1}^m \omega_{ik} O_i - \theta_k = \sum_{i=1}^{m+1} \omega_{ik} O_i \quad (7)$$

$$y_k = f(h_k) = 1/(1+e^{-h_k}) \quad (k=1, 2, \dots, l) \quad (8)$$

式中,  $l$  为输出层节点数;  $\theta_k = \omega_{(m+1)k} o_{m+1}, o_{m+1} = -1$ 。

以上所设计的 BP 神经网络在用于硅光电池照度检测建模中的应用步骤如下:

- (1) 对硅光电池电压的 AD 采样数值做归一化处理;
- (2) 利用工具包对归一化后的电压的 AD 采样数值做主成分分析 (PCA), 找出比较相关的几个有效波点;
- (3) 设计神经网络, 确定网络的层数、中间层节点数和各传递函数, 网络的输入为有效波点的电压值, 输出对应照度值;

- (4) 提取训练样本集和测试样本集, 用训练样本集对神经网络训练, 调整各层之间连接权值和节点阈值, 使实际输出误差与期望输出误差相比, 在允许范围之内;
- (5) 用测试样本集测试训练好的神经网络。

### 5 比较分析

将 BP 神经网络拟合后得到的光照度值与标准光照度计测量的数值进行比较, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 通过 BP 神经网络拟合后得到的光照度值与标准光照度计测量的数值几乎相同, 误差很小, 而且光照度的范围很宽。这些都充分证明了上述拟合方法的正确性和实用性。

与目前市场上的数字式光照度计相比, 本文所设计的光照度计具有量程范围大、检测精度高、简单易用等优点。

## 硬件纵横

Hardware Technique

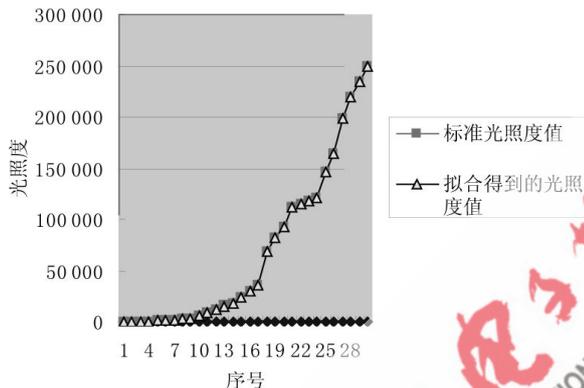


图5 光照度值对比

使用者不但可以把检测到的光照度数据存储在手持仪器中,而且可以上传到计算机中进行保存。非常适合于农业温室大棚、农作物实验室等场合。随着国家对于农业生产重视程度的不断提高,这种光照度计的市场前景将非常广阔。

## 参考文献

- [1] 白泽生,白崇文.一种简易光照度检测电路的设计[J].现代电子技术,2006(11):91-92.
- [2] 李昌厚.光电管和硅光电池的相对光谱响应特性测试方法的研究[J].光学仪器,1995,17(2):8-12

[3] 李永安.光电池光特性的电子测量[J].物理实验,2005,8(6):9-11.

[4] 宋路,王小曼.单片机控制的数字式自校准光照度计[J].长春光学精密机械学院学报,1992,15(4):53-57.

[5] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2002:64-70.

[6] 纪鹏,王毅,陈宗瑜,等. UV-B 滤减处理下烟草光合作用参数对光照度的影响[J].生态学杂志,2009,28(7):1218-1223.

[7] 姜晓梅.光度计响应度国际比对方法和结果[J].现代计量测试,2000,8(6):37-39.

[8] 魏茂金.硅光电池实验输出光强不稳定现象的研究[J].三明学院学报,2007,12(4):383-385.

[9] 刘丹.光照度计全自动检定系统的误差分析研究[D].合肥工业大学,2007.

[10] 李丽,刘明军.基于BP神经网络诊断桥梁结构故障[J].济南大学学报(自然科学版),2009,23(4):334-337.

(收稿日期:2009-06-23)