

引用格式: WANG Lingyun, MA Yue, LI Haoyang, et al. Study on Simulation Method of Diffuse Radiation for Indoor Verification of Photoelectric Insolation Meter[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0501001

王凌云,麻跃,李昊洋,等. 光电式日照计室内检定中散射辐射模拟方法研究[J]. 光子学报, 2021, 50(5):0501001

光电式日照计室内检定中散射辐射 模拟方法研究

王凌云¹, 麻跃¹, 李昊洋¹, 李光茜¹, 郑茹¹, 杜雨欣²

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

摘要: 由于光电式日照计中散射辐射光电传感器的测量精度会严重影响日照计测量太阳辐照度的准确性, 为降低散射误差, 在室内检定时需进行较为准确的散射辐射模拟。通过对逐日时间尺度下辐射衰减率与各气象因子间的线性相关性分析, 进行多元线性回归拟合后得出长春地区逐日水平面太阳散射辐射模型, 并在室内检定系统中对水汽、尘埃等散射作用造成的辐射衰减进行了模拟, 设计了室内散射环境模拟室。实验结果表明, 水平面太阳日散射辐射量的拟合值与实测值匹配较好, 实测值与拟合值均匀分布在拟合线两侧, 相关系数(R^2)在 0.8 以上, 表明散射辐射模型效果较好。

关键词: 散射辐射模拟; 室内检定; 多元回归模型; 光电式日照计; 日照时数

中图分类号: TH765.22

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215005.0501001

Study on Simulation Method of Diffuse Radiation for Indoor Verification of Photoelectric Insolation Meter

WANG Lingyun¹, MA Yue¹, LI Haoyang¹, LI Guangxi¹, ZHENG Ru¹, DU Yuxin²

(1 School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

(2 Changchun Railway Vehicles Co., LTD. Changchun 130062, China)

Abstract: Because the measurement accuracy of the diffuse radiation photoelectric sensor in the photoelectric insolation meter seriously affects the accuracy of the solar irradiance measurement, in order to reduce the scattering error, more accurate simulation of the diffuse radiation is needed for indoor calibration. Through the linear correlation analysis between the radiation attenuation rate and each meteorological factor in the day-by-day time scale, the daily horizontal solar scattering radiation model in Changchun area is obtained after multivariate linear regression fitting. The radiation attenuation caused by the scattering of water vapor and dust is simulated in the indoor verification system, and the indoor scattering environment simulation chamber is designed. The results show that the fitted values of the daily scattered radiation in the horizontal plane are well matched with the measured values. The measured values and fitted values are evenly distributed on both sides of the fitted line, and the correlation coefficient (R^2) is above 0.8, indicating that the scattered radiation model has a good effect.

Key words: Scattered radiation simulation; Indoor verification; Multiple regression model; Photoelectric insolation meter; Sunshine hours

OCIS Codes: 010.1310; 010.5620; 120.1880

基金项目: 吉林省科技发展计划(No.20180201018GX), 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究(No.JJKH20181133KJ)

第一作者(通讯作者): 王凌云(1977—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光电检测技术、航天器模拟试验与标定技术。Email: 15004318783@126.com

收稿日期: 2020-11-04; 录用日期: 2021-02-07

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

太阳辐射作为地球的主要能源,与地球生态环境的发展变化及人类的生产生活紧密相关^[1]。气象上定义日照时数为太阳直接辐照度达到或超过 120 W/m^2 时间的总和,它是表征太阳辐射情况的气象要素之一,其记录结果的准确性对监测及预报天气情况、农业与畜牧业生产、建筑规划与设计及太阳能开发等领域均有着重要意义。

光电式数字日照计是一种用来记录某区域地面接收日照时数的太阳辐射仪器,自动化、数字化、高精度的特点使其近年来得到广泛应用^[2]。它是通过对太阳总辐射和散射辐射的辐照度测量,计算得出太阳直接辐照度值,从而实现对日照时数的测定,但根据日照计性能测试数据,部分日照计存在雾霾、阴天、雨天等极端天气下数据记录偏差大的问题^[3],这主要是由于散射辐射测量误差导致的响应不确定性。

目前,日照计性能测试多采用户外检测。然而太阳辐射会随着时间、地理位置和季节等因素的变化而变化,导致不同气象条件出现时间跨度较大。由于输入参数的改变,存在缺乏可重复性且测试精度较低的问题^[4-5]。日照计检定设备的落后制约了我国日照计的研制和生产,无法满足逐年增加的对光电式日照计的需求。为满足其生产和使用需求,急需在室内模拟不同气象条件下的太阳辐射变化规律。

苏华等^[6]根据日散射与日总散射的关系建立了五次多项式拟合模型,但此模型并未考虑散射的自相关结构;Liu&Jordan模型^[7]无法适用于晴天状况或者多云的天气;李峥嵘等^[8]根据上海地区1991~2011年的实测数据,基于日晴空指数,建立了5个适合当地的拟合模型,统计数据得到具有最优的平均绝对百分比误差、平均偏移误差以及均方根误差的模型;苏刚等^[9]采用遗传算法优化 Back Propagation(简称BP)神经网络,建立了基于日照百分率、平均晴空指数、相对湿度、最高气温、最低气温及平均气温等输入参数的太阳辐射散射辐射模型,对比于其他模型,精度有所提高,但是并未考虑空气中尘埃的含量值。基于此,根据长春地区的气象特征,选择日照百分率、日平均气温、日均水汽压和PM2.5浓度这四个气象因子,通过多元线性回归算法得出长春地区逐日水平面散射辐射模型。设计了室内散射辐射环境室,实现光电式日照计的室内检定。

1 室内检定系统总体方案

为实现在实验室环境下对光电日照计进行检测,需要模拟太阳直射、散射以及不同位置时对日照计的照射情况^[10-12],其结构如图1,总体布局如图2,通过太阳直接辐射模拟单元输出不同直接辐照度;利用环境模拟室中湿度温度空气质量的调节实现水汽、尘埃等的散射作用造成辐射衰减的模拟;利用日地相对运动模拟单元调整光电式日照计与平面反射镜的相对位置,以实现不同的太阳位置模拟,本文重点研究了散射辐射环境的模拟方法。

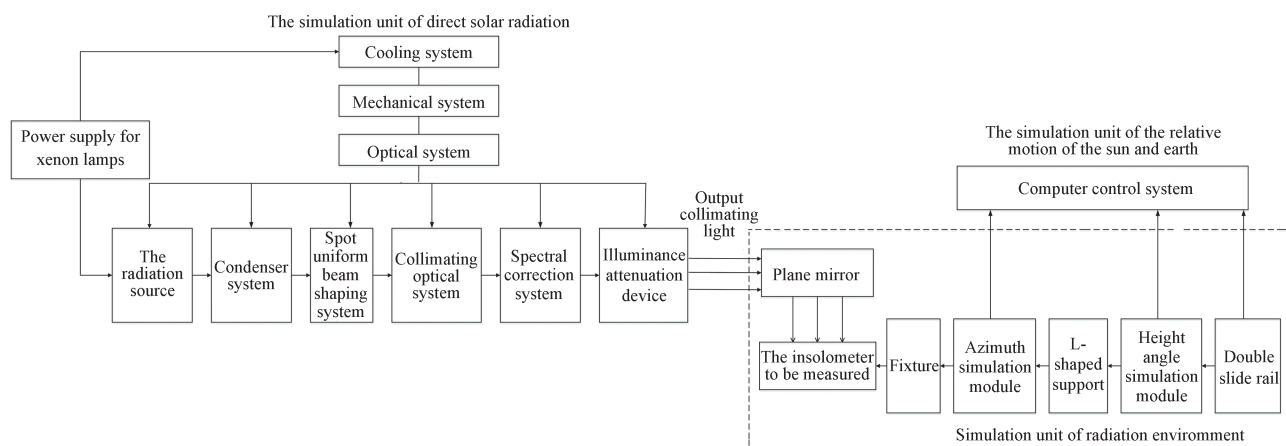


图1 室内太阳模拟检定系统组成

Fig.1 Composition of indoor solar simulation verification system

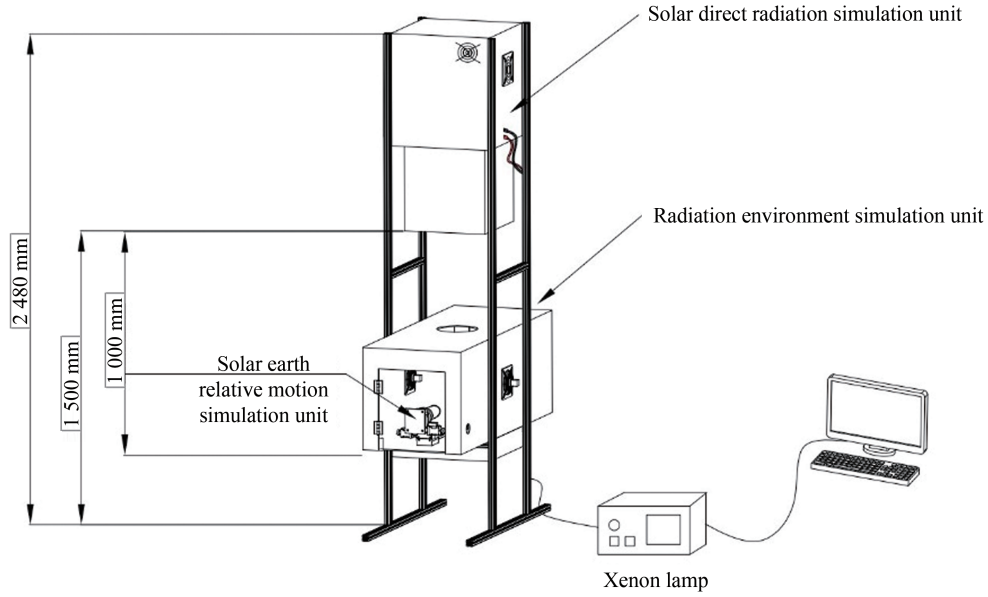


图2 室内太阳模拟检定系统总体结构布局
Fig.2 Overall structure layout of indoor solar simulation verification system

2 散射辐射模型构建原理

气候系统中的各气象要素相互联系,其中太阳辐射是气候的主动因素,对其他气象参数产生影响,而这些参数也反映了太阳辐射的特征^[13]。因此,可以通过选择与太阳辐射关联密切且易于测试的气象要素并构建它们之间的函数关系来计算出太阳辐射值,这就是气象参数辐射模型的计算原理。

以 G_0 表示水平面天文日曝辐量,单位为 MJ/m^2 , G_d 表示水平面散射辐射日曝辐量(MJ/m^2),则散射率 G_d/G_0 依赖于各气象参数的影响。构建散射辐射模型的主要气象参数是日照时数、温差和水汽压。此外,绝对湿度、干球温度、空气质量等也可以用于建立模型,但这类气象参数与太阳辐射的关系较弱,不能单独完成辐射计算,必须与前三个参数中的一个或多个共同构建。

根据朱志辉^[6]所提出的气象参数影响可以表示成为多个因子的线性叠加,即

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^l a_i x_i \quad (1)$$

式中, y 即 G_d/G_0 代表散射率 K_{dc} ,量纲为1; x_i 为第 i 个具有显著影响的因子, a_0, a_i 为待定系数,共有 $i+1$ 个。

本文所用的 G_0 是根据水平面天文辐射日总量计算得出的,如式(2)~(6)所示。

$$G_0 = \frac{TI_0}{\pi} \times f \times \left(\frac{2\pi}{360} t \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin t \right) \quad (2)$$

$$f = 1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \quad (3)$$

$$\delta = 0.006918 - 0.399912\cos k + 0.07257\sin k - 0.006758\cos 2k + 0.000907\sin 2k - 0.002697\cos 3k + 0.00148\sin 3k \quad (4)$$

$$k = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (5)$$

$$t = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (6)$$

式中, T 为周期,取值为 $24 \times 60 \times 60$ s; I_0 为太阳常数,取世界气象组织(WMO)1981年的推荐值: $13.67 \times 10^{-4} \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$; n 为年积日,即自每年1月1日起,距离计算日的天数。如1月1日, $n=1$; 1月2日, $n=2$,以此类推; f 为因日地距离造成的大气层外太阳辐射度偏离系数; φ 为长春气象观测站所处纬度 $43^\circ 54'$; δ 为太阳赤纬,单位 rad; t 为日出时角,单位 rad。

这样就可以利用逐步回归法筛选出显著气象因子,以散射率作为因变量,基于多气象参数构建起日散

射辐射的经验模型。

2.1 散射辐射模型构建

2.1.1 多元回归模型求解算法

在建立散射辐射模型时,需要用到多元回归模型最小二乘法的求解算法,假设有样本集 $\{(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1}, y_1), (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{n2}, y_2), \dots, (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{nn}, y_n)\}$,可设回归方程为

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_i X_i \tag{7}$$

则多元回归模型最小二乘法就变成求式(8)中y值最小的时候。

$$Q(b_0, b_1, \dots, b_i) = \sum_{j=1}^n [y_j - (b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + \dots + b_i x_{ij})]^2 \tag{8}$$

根据最小二乘法原理,将式(8)分别对 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_i$ 求偏导数,并让其等于零,即

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - (b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + \dots + b_i x_{ij})) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_1} = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - (b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + \dots + b_i x_{ij})) x_{1j} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_2} = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - (b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + \dots + b_i x_{ij})) x_{2j} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial b_i} = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - (b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + \dots + b_i x_{ij})) x_{ij} = 0 \end{cases} \tag{9}$$

展开并整理得到的多元回归方程正规方程组

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_{11} & x_{21} & x_{31} & \dots & x_{n1} \\ x_{12} & x_{22} & x_{32} & \dots & x_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{1j} & x_{2j} & x_{3j} & \dots & x_{nj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_j \\ \sum x_{j1} y_j \\ \sum x_{j2} y_j \\ \vdots \\ \sum x_{jn} y_j \end{bmatrix} = B \tag{10}$$

设 $b=(b_0, b_1, b_2, \dots, b_i)$, A为系数矩阵,式(10)可用矩阵形式表示为

$$Ab=B \tag{11}$$

则 $b=A^{-1}B$,以上就是正规方程组解的矩阵表示,该式通过借助软件SPSS或EXECL都可求解。

2.1.2 散射率与各气象因素间的相关性分析

根据参考文献[14],所选气象因子分别为代表天空遮蔽特征的日照百分率SD/SD₀、日平均气温T_a,代表水分子含量的日均水汽压ρ和代表尘埃粒子含量的PM2.5浓度A_q。

多元线性回归方程各个因子是否入选则须逐步回归法对各个因子进行筛选,各个气象因子不一定全部入选。收集了长春气象观测站(气象站代码:54161,纬度43°54',经度125°13',高度236.8m)2001~2018年的逐日气象数据,具体包括日最高气温、日最低气温、日平均气温、日照时数、日散射辐射量、日平均水汽压及PM2.5浓度值,剔除日照百分率大于1与散射辐射观测值大于天文辐射值的数据。对逐日时间尺度下散射率与各气象因子间的线性相关性进行判断,结果如表1所示。

表1 G_d/G₀与SD/SD₀、T_a、ρ、A_q之间的相关性分析
Table 1 Correlation analysis between G_d/G₀ and SD/SD₀、T_a、ρ、A_q

	G _d /G ₀	
	Linear equation	Correlation coefficient
SD/SD ₀	y = -0.0156x + 0.732	0.736**
T _a	y = 0.892x - 0.9061	-0.720**
ρ	y = 0.5679x - 1.5221	-0.565**
A _q	y = -2.4441x + 49.303	0.572**

注:右上标**表示相关系数通过α=0.05的显著性水平检验,临界值R_{0.05}=0.3494。

由表1可知,散射率与日照百分率、平均气温、水汽压及PM2.5指数之间的线性相关系数均高于0.5,线性相关显著,因此这4个因子的变化可以较好地诠释长春地区水平面散射辐射量变化,以此建立如下模型

$$\frac{G_d}{G_0} = a + b \frac{SD}{SD_0} + cT_a + d\rho + eA_q \quad (12)$$

基于式(12)给出的多元回归模型及最小二乘法求解算法,利用SPSS软件,通过多元线性回归拟合后得出长春地区逐日水平面散射辐射模型

$$G_d = G_0 \left(0.4047 + 0.18453 \frac{SD}{SD_0} - 2.35 \times 10^{-3} T_a - 0.892 \times 10^{-3} \rho - 1.79 \times 10^{-3} A_q \right) \quad (13)$$

2.2 模型验证及精度评价

以长春气象站2018年逐日气象数据为数据源,选取均方根误差(RMSE)、平均绝对误差百分比(MAPE)、相关系数(R^2)3个指标对模型进行评价,其指标计算公式及验证结果如表2与图3所示。

表2 拟合性能评价指标
Table 2 Fitting performance evaluation index

	Formula	Meaning	Numerical
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_{dp} - G_d)^2}$	Represents the degree of dispersion between the fitted value and the measured value of the horizontal plane solar scattering radiation	0.353 7
MAPE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{G_{dp} - G_d}{G_d} \right \times 100\%$	Represents the average ratio of the error between the fitted value and the measured value to the measured value of the daily scattered radiation amount of each horizontal plane	4.88
R^2	$\frac{\sum_{i=1}^n (G_{dp} - G_{dpm})(G_d - G_{dm})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (G_{dp} - G_{dpm})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (G_d - G_{dm})^2 \right]}}$	Represents the degree of linear correlation between the fitted value and the measured value of the daily scattered radiation in the horizontal plane	0.810 9

注:表中 G_{dp} 为水平面太阳日散射辐射量的拟合值(MJ/m^2); G_d 为水平面太阳日散射辐射量的实测值(MJ/m^2); G_{dpm} 是拟合值的平均值(MJ/m^2)。

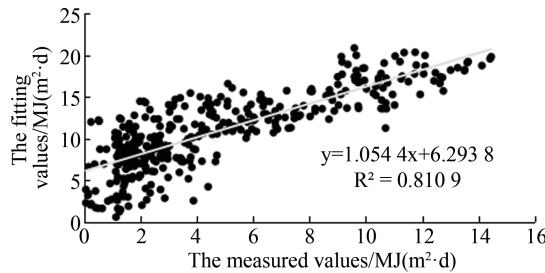


图3 水平面太阳日散射辐射量的拟合值与实测值对比

Fig.3 Comparison of fitting value and measured value of solar daily scattered radiation on horizontal plane

根据表2, RMSE为0.353 7 MJ/m^2 表明水平面太阳日散射辐射量的拟合值与实测值非常接近, MAPE为4.88%表示拟合值和实测值之间误差相对较小。由图3可以看出,水平面太阳日散射辐射量的拟合值与实测值匹配较好,实测值与拟合值均匀分布在拟合线两侧, R^2 在0.8以上,表明模型模拟效果较好。

3 辐射环境模拟室搭建

为尽量消除杂散光的影响,辐射环境模拟室材料采用双层黑色不透光亚克力板,长为1 m,高为0.5 m,体积为0.25 m^3 ,两侧分别开两扇尺寸为340 mm×400 mm的门,使用合页进行安装,便于放置设备,顶面开直径为200 mm的通光圆孔,侧面留有电线孔。其结构如图4所示,其中换气扇嵌入式安装于箱体正面,电机朝箱体外,排风扇嵌入式安装于箱体背面,电机朝箱体内。使用排风扇与加热管协同工作调节环境室内温度,使用加热管与加湿器调节室内湿度,通过雾霾发生器增加室内PM2.5浓度,利用换气扇增大室内空气流通来改善空气质量,搭建的辐射环境模拟室如图5所示。

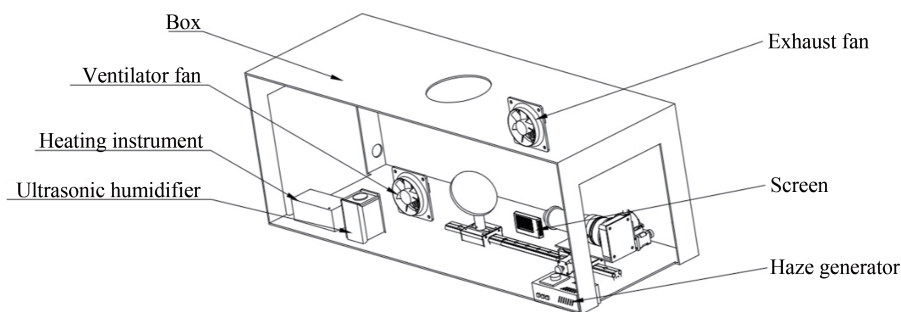


图4 辐射环境模拟室组成

Fig.4 Composition of radiation environment simulation room

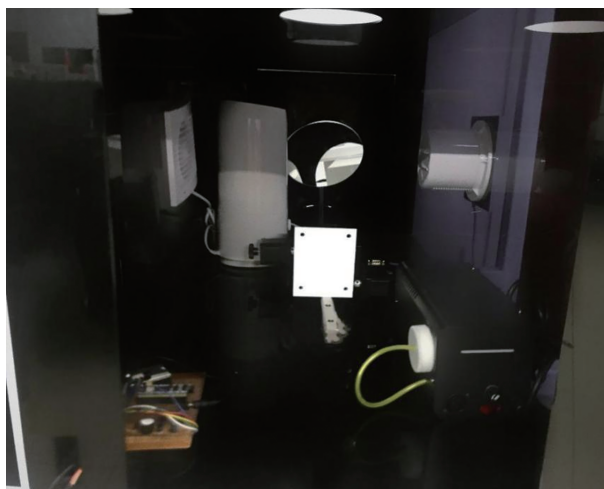


图5 辐射环境模拟室内部图

Fig.5 Indoor drawing of radiation environment simulation

为了能够快速提高环境模拟室内空气温度,使用品质优良的不锈钢与不锈钢散热片等材料制作的加热管加热空气。为调节辐射环境模拟室内的温度,在选择了合适的加热仪器后,还需选择正确的降温冷却方式,采用风机的换风扇来加快单位时间内流经冷却体表面的空气速率。辐射环境模拟需能够将空气湿度在10~98%RH之间进行调节,经计算得 $H=0.34$ kg/h,选用加湿量为3 kg/h的超声加湿器。为调节环境模拟室内PM2.5浓度,采用雾霾发生器生成平均粒径在1~2.5 μm 内的颗粒。雾霾发生器将雾霾配置液雾化后由内置风机通过排气口吹出,形成雾霾。配合环境模拟室内的排风扇,排掉箱体内的废气,完成环境模拟室内的PM2.5浓度的调节。

4 环境监测软件设计

为了实时监测并存储记录辐射环境模拟室内的温度、湿度、PM2.5浓度值,以STM32为主芯片研究了一个环境监测系统,利用各种传感器采集环境室中的气象参数,然后利用STM32F103VET6作为主控芯片进行各项参数数据的处理。硬件电路部分以STM32为核心,配合单片机最小系统、温湿度采集模块、PM2.5采集模块、数据显示模块,可以实时监测箱体内空气质量情况,并可以传输至上位机软件进行同步的数据存储与显示。温湿度测量传感器选用集温度和湿度测量于一体的DHT11数字温湿度传感器,其内部集成有自校准信号,占用的系统资源较少,测量范围从 $-5 \sim 125$ $^{\circ}\text{C}$ 。为简化电路设计,PM2.5采集模块使用由夏普公司生产的GP2Y1010AU0F型灰尘颗粒传感器,通过输出模拟电压值与PM2.5浓度的对应关系可直接计算输出当前空气中PM2.5的含量。

环境监测系统上位机软件部分使用图形化编程语言Labview进行编译,通过串口接收单片机输出温湿度值、PM2.5浓度值,并进行简单控制。环境监测系统软件工作时的界面如图6所示。

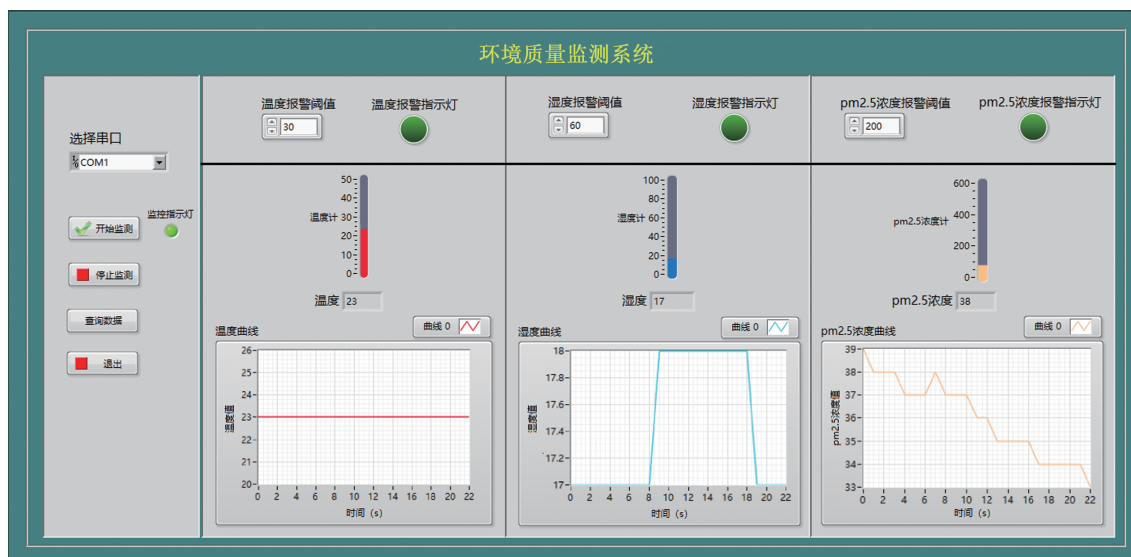


图6 环境监测系统软件工作界面

Fig.6 Software interface of environmental monitoring system

5 结论

本文利用2001~2018年长春气象观测站的观测资料及相应的日照百分率等气象因素数据,建立了长春地区逐日水平面太阳散射辐射模型。设计并搭建了能够模拟散射辐射的辐射环境模拟室,通过对各气象因子的调节与监控,可以在实验室环境条件下,针对光电式日照计在不同极端天气下(如雾霾、阴雨天、晴天)的日照时数记录精度进行测试。

为了进一步提高室内检定散射模拟精度,还需研究辐射环境模拟单元的控制方法,温度、湿度和空气质量调节本身会产生耦合关系,可以通过使用比例积分微分算法来提高仪器的精确度。可以增添制冷装备以实现大雪天气下的辐射环境模拟。针对于雾霾天气的模拟,考虑PM2.5、PM10、NO₂、SO₂、CO、O₃等因素的浓度对空气质量指数造成的影响。

参考文献

- [1] LACERDA J, BERGH J. Effectiveness of an open innovation approach in renewable energy: Empirical evidence from a survey on solar and wind power[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 118:190505.
- [2] ZHAO Shijun, LIU Xichuan, GAO Taichang, et al. Current situation and prospect analysis for sunshine recorder[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2011, 6(2):96-99.
赵世军, 刘西川, 高太长, 等. 日照计发展现状及前景分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 2011, 6(2):96-99.
- [3] LU Zhongtao, ZHANG Yao, WANG Jimei, et al. Comparative analysis of manual and automatic sunshine observation data [J]. *Heilongjiang Meteorology*, 2019, 36(3): 31-32.
陆忠涛, 张瑶, 王继梅, 等. 人工与自动日照观测数据对比分析[J]. *黑龙江气象*, 2019, 36(3): 31-32.
- [4] O' DONNELL K, GARCES V. Absolute calibration of a spectrometer using terrestrial solar radiation[J]. *Applied Optics*, 2015. 54(9): 2391-2394.
- [5] LV Wenhua, CHONG Wei, DING Lei. Test and analysis on performance comparison of photoelectric automatic sunshine duration recorder[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2015, 29(6):928-933.
吕文华, 崇伟, 丁蕾. 光电式自动日照计性能对比实验与分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(6):928-933.
- [6] SU Hua, TIAN Shengyuan, SU Fenxian. Scattering separation model for energy consumption analysis of air conditioning system[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)*, 2002, 25(8):73-76.
苏华, 田胜元, 苏芬仙. 空调系统能耗分析用散射分离模型[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2002, 25(8):73-76.
- [7] LIU B, JORDAN R. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. *Pergamon*, 1960, 4(3):1-19.
- [8] LI Zhengrong, YAO Wanxiang, ZHAO Qun, et al. Comparative study on daily diffuse solar radiation model of horizontal plane [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(5):794-799.
李峥嵘, 姚万祥, 赵群, 等. 水平面日太阳散射辐射模型对比研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(5):794-799.

- [9] SU Gang, HAO Haodong, XI Yue, et al. Application of bp neural network optimized by genetic algorithm in diffuse solar radiation estimation[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2019, 25(2):120-124.
苏刚, 郝浩东, 席悦, 等. 遗传算法优化BP神经网络在太阳散射辐射估算领域的应用[J]. 天津城建大学学报, 2019, 25(2):120-124.
- [10] MARQUEZ J M A, ÁMBOHÓRQUEZ M, GARCIA J M, et al. A new automatic system for angular measurement and calibration in radiometric instruments[J]. Sensors, 2010, 10: 3703-3717.
- [11] ZUO Dakang, GONG Ran. The relationship among direct solar radiation, scattered solar radiation and total solar radiation in china[J]. Acta Geographica Sinica, 1962, 29(3): 175-186.
左大康, 弓冉. 中国太阳直接辐射、散射辐射和太阳总辐射间的关系[J]. 地理学报, 1962, 29(3): 175-186.
- [12] SHI Jingchuan, LIU Jun, WANG Jianjia. Analysis on the data of a new sunshine sensor[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2015, 3(1): 39-45.
石京川, 刘钧, 王建佳. 一种新型日照传感器的数据分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2015, 3(1): 39-45.
- [13] ZHU Zihui. Multi-factor calculation of spatial and temporal distribution of solar radiation[J]. Acta Geographica Sinica, 1982(1):27-34.
朱志辉. 太阳辐射时空分布的多因子计算[J]. 地理学报, 1982(1):27-34.
- [14] LI Xiaojun, XIN Xiaozhou, PENG Zhiqing. Temporal and spatial changes of surface solar radiation and its influencing factors in China from 2003 to 2012[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(11): 3057-3066.
李小军, 辛晓洲, 彭志晴. 2003—2012年中国地表太阳辐射时空变化及其影响因子[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 3057-3066.