引用格式: WANG Yuchang, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Research on Radiation Suppression Method in Indoor Detection System of Photoelectric Sunshine Recorder[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):0612006 王雨畅,张国玉,孙高飞,等.光电式日照计室内检测系统中辐射抑制方法研究[J].光子学报,2022,51(6):0612006

光电式日照计室内检测系统中辐射抑制方法 研究

王雨畅,张国玉,孙高飞,刘石,张健,明杉炽

(长春理工大学光电工程学院,长春130022)

摘 要:针对光电式日照计检测面临复现性差和误差大等困难,提出了一种可以减小校准误差的辐射 抑制方法,并设计了日照计室内检测系统。介绍了直接辐射模拟系统和辐射环境模拟系统,研究了系 统中使用的辐射抑制方法。根据辐射传输理论分析出口平面上的辐射分布,再依据光辐射在空间中传 输的基本规律,引入辐射换热角系数推导了一定距离平面上的辐射通量公式。通过分析各个分系统的 误差,检测辐射抑制方法的可行性。实验结果表明,使用本文的辐射抑制方法后,系统的直接辐射模拟 精度提高了80%以上,绝对误差小于2W/m²;散射辐射模拟精度提高了95%以上,绝对误差小于1W/m², 满足日照计检测要求。

关键词:光电式日照计;室内检测;积分球;辐射抑制;日照时数

中图分类号:TH765.22 文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225106.0612006

0 引言

日照时数是地面气象观测的基本观测项目。世界气象组织将其定义为太阳直接辐照度达到或超过120 W/m²的各段时间的总和。测量日照时数的仪器是日照计,日照计的主流是光电式日照计。为了保证测量 数据的准确性,对出厂后的日照计进行阈值校准是十分重要的。日照计的室外检测法是将日照计和直接辐 射表放在同一实验地点,直接辐射表安装在太阳跟踪装置上,以直射表的测量值为阈值参考值校准日照计。 但是这种方法存在很大的不足,由于云层条件不同时天空散射辐射值并不为一恒定值,导致检测结果精度 低,误差大,实验结果显示室外检测的日照计阈值误差范围为9.3~10.3 W/m²,并且计量结果难以重复实 现^[1-2],所以研究不受环境条件制约的室内检测系统迫在眉睫。

国外对日照计室内检测的研究开展比较早,1993年 PHILIPONA R等^[2]使用商用太阳模拟器、激光对准 系统、平移机构和投影镜设计了一套气象仪器的室内检测设备,当它应用于日照计检测时,其精度平均保持 在 0.8% 以内。近年来,国内一些研究机构也开始了相关的研究,崇伟、吕文华等^[1]设计了用于旋转热释电日 照计的室内检测系统,与直接辐射表测量的日照时数参考值相比,该室内检测系统的相对误差小于1%,绝 对误差小于 0.26 h;王凌云等^[3]研究了日照计检测系统中的散射辐射模拟方法,通过分析日照百分率、日平 均气温、日均水汽压和 PM2.5浓度四项基本气象参数和辐射之间的相关性分析,建立散射辐射拟合方程,拟 合系数大于 0.8,较好地解决了室内模拟散射辐射的问题;杨俊杰等^[4]研究了日照计检测系统的装调方法,建 立了检测系统的校准链,装调后的系统在4小时中的模拟误差是 3.75%,并保证了测试结果的可追溯性。以 上研究均有明确的研究重点,但是,目前针对日照计检测系统中存在的直接辐射与散射辐射相互干扰的问 题及其相对应的辐射抑制方法尚缺乏足够的分析。这直接导致室内检测系统经常出现室内校准值要大于

基金项目:吉林省科技发展计划(No.20200602055ZP)

第一作者:王雨畅(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为气象仪器标定。Email: 1936732373@qq.com

导师(通讯作者):张国玉(1962—),男,教授,博士,主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器与检测技术等。Email: zh_guoyu@163.com 收稿日期:2021-11-07;录用日期:2022-03-02

室外校准值的情况,同时直接辐射和散射辐射模拟装置同时工作时日照计实际接收的直接辐射和散射辐射 值与设计值有较大的出入。

针对现有检测系统的不足,提出一种辐射抑制方法并了设计一种带有辐射抑制功能的光电式日照计室 内检测系统。在借鉴传统的杂散光分析、抑制原理的基础上,使用空腔内的辐射传输理论,从积分球相关的 辐射度学基本量的角度出发,分析了积分球模型抑制辐射的过程和原理,论证了积分球模型用作吸光陷阱 的可行性及其应用形式;最后以检测系统中的误差分析,尤其是直接辐射模拟值和散射辐射模拟值的误差 为标准,评价辐射抑制方法的可行性。

1 光电式日照计检测系统整体结构

光电式日照计使用3个经过特殊设计的扩散器设计的光电传感器计算日照时数,其结构如图1所示。 其中,1号传感器测量太阳总辐射,2号和3号传感器与遮光罩相互配合,分别测量东西半空的散射辐射。在 计算时,将1号传感器的测量值减去2号和3号传感器中的较小的值为此时的太阳直接辐射,与日照阈值 120 W/m²比较判断是否有日照。



Fig. 1 Schematic of the photoelectric sunshine recorder

为了达到高精度模拟并且保证测试结果的可追溯性,需要分别模拟太阳直接辐射、太阳散射辐射及不同纬度时日照计与太阳的相对位置。整个检测系统如图2,包括:使用太阳模拟器模拟太阳直接辐射;考虑太阳散射辐射的性质,使用积分球模拟天空背景,卤素灯做散射辐射源;使用多维调整机构(转台)固定日照计,模拟现实中的纬度条件和日照计与太阳之间的相对角度;最后研究辐射抑制方法减小多余辐射对测试系统的负面影响。





Fig. 2 Composition of the photoelectric sunshine recorder indoor test system

2 直接辐射模拟系统与辐射环境模拟系统设计

考虑到日照时数阈值为120 W/m²,所以使用小型号同轴准直式太阳模拟器完成直接辐射的模拟。设计 过程中,根据气象标准^[5],配合滤光片调制光谱使其达到AM1.5G光谱分布A级要求,光谱分布如图3,控制 氙灯电源使太阳模拟器的理论工作范围为90~1326 W/m²,足够满足120 W/m²的日照阈值的模拟要求。



图 3 太阳模拟器光谱分布曲线 Fig. 3 Spectral distribution curve of solar simulator

辐射环境模拟系统包括散射辐射模拟装置和相对位置模拟装置。散射辐射模拟装置由积分球和卤素 灯组成。为保证模拟散射辐射在光电式日照计传感器上均匀分布,积分球球体直径为1m,球体与太阳模拟 器的接口直径为0.2m。球体内部选择喷涂国产聚四氟乙烯悬浮树脂(F4)涂层,与BaSO4、MgO涂层相比, F4涂层在0.2~2.5µm的波长范围内,光谱反射比均高于硫酸钡和氧化镁,而且反射比中性好。使用卤素灯 和挡板完成散射辐射的模拟,灯具的数量和种类可以根据需要的辐照值和光谱范围进行调整已适用于不同 天气条件下散射辐射的模拟,系统以积分球内壁上的背景辐照度180W/m²为标准,根据积分球基本性质推 算,使用欧司朗公司的12V/30W型号卤钨灯即可满足需求,通过控制点燃灯具的数量控制散射辐射模拟 值。使用俯仰调节机构(0~±45°)和方位调节机构(0~±180°)实现不同纬度时日照计与太阳的相对角度 模拟。

3 辐射抑制方法原理分析

经过分析,直接辐射和散射辐射模拟相互干扰的产生原因是由于系统中多余的直接辐射和散射辐射没 有被吸收抑制,反过来影响系统中的辐射分布情况。因此需要就系统采用的辐射抑制方法进行研究。设计 时,选择积分球模型作辐射抑制方法的初始模型。因为积分球的出射辐射分布是比较均匀的,所以即使有 相当数量的辐射返回到日照计,对系统检测结果的影响也是可以相互抵消的。本节首先研究积分球开口平 面上辐射通量的计算方法,然后,研究距离积分球开口一定距离平面上的辐射通量的计算方法。最后,根据 公式分析如何改进、最终确定辐射抑制方法。

假定积分球的开口比f、球体半径R和内壁涂层反射率ρ已知,在入射辐射通量Φ_m确定的情况下,首先 计算积分球在出口平面上的辐射通量,然后再计算距离从积分球出射到离积分球一定距离的平面上的辐射 通量。

设入射的辐射通量为 Φ_0 ,在积分球出口平面距离为 Δl 某平面上的辐射通量为 $\Phi_{\Delta l}$,如图4所示。图中, 积分球内表面积为 A_{tot} ,辐亮度为 L_{exit} ,积分球开口面积大小为 A_{exit} 。根据辐亮度传输守恒定律,当辐射能在 介质传输的过程中没有吸收等能量损失时,辐亮度保持不变。那么在积分球内部的辐亮度传输过程中,后 半球内壁的相同面元区域辐亮度保持不变,与传输距离无关^[6,7]。

此时,积分球开口处的辐亮度表示为

$$L_{\text{exit}} = \frac{\Phi_0}{\pi A_{\text{tot}}(1-f)} \times \frac{\rho(1-f)}{1-\rho(1-f)} = \frac{\Phi_0}{\pi A_{\text{tot}}} \frac{\rho}{1-\rho(1-f)}$$
(1)

式中, $\Phi_{\Delta l}$ 可以表示为 $\Phi_{\Delta l} = L_{exit}A_{exit}\Omega_{\circ}$ 其中, $\Omega = \iint \sin\theta d\theta d\varphi = \int_{0}^{2\pi} d\varphi \int_{0}^{\infty} \sin\theta d\theta$,根据泰勒级数化简为 $\Omega = \pi \sin^{2}\theta^{[8]}_{\circ}$ 。根据图4的数学关系可以得到 $\sin^{2}\theta = \frac{r^{2}}{r^{2} + (\Delta l)^{2}}$ 。同时,注意到出口面上的辐射通量 $\Phi_{\Delta l}$ 实际为 $\Delta l \rightarrow 0$ 时的极限值,



图 4 出口面上辐射通量的计算 Fig. 4 Calculation of flux in the exit of integrating sphere

$$\Phi_{1} = \lim_{l \to 0} \Phi_{l} = \Phi_{0} \cdot \frac{A_{\text{exit}}}{A_{\text{tot}}} \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} = \Phi_{0} \cdot \frac{r^{2}}{R^{2}} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)}$$
(2)

式(2)即出口处辐射通量的估算式。其中r为开口半径,R为积分球球体半径(常数),f为开口因子。可见,开口比f、积分球球体半径R和开口半径r对于积分球出口面上的辐射通量大小影响很大,相比之下其厚度h可以忽略不计。

在推导计算积分球出射的辐射通量之前,有必要分析积分球开口壁厚在辐射传输过程中的作用^[9]。在 理想状态下,球体是没有厚度的,积分球开口的立体角为2π。但是由于开口具有一定的厚度,实际上出射辐 射的立体角小于2π,将会有部分辐射返回积分球。同时,辐射在开口上也会发生漫反射,产生次级反射辐 射,如果开口内壁上的涂料与积分球内壁相同,那么次级反射辐射符合朗伯分布。综上所述,从传输方向上 看,积分球出射的辐射包括三部分:直接出射到积分球外部的辐射,被开口反射到外部的辐射,以及回到积 分球内部的辐射。

设距离积分球出口h处的某平面 A_3 ,分析从积分球出射到 A_3 上的辐射通量,建立计算模型如图 5所示。 图中 A_1 面为积分球出口面, A_2 面代表出口的内壁部分, Φ_0 为初始辐射通量, Φ_1 为出口面上的辐射通量, Φ_3 为平面 A_3 上的辐射通量。结合前文对开口壁厚上辐射的分析,面 A_3 上的辐射通量 Φ_3 包括两部分:一部分 是直接从出口面 A_1 到达测试面上的 Φ_{13} ,另一部分则是经过内壁 A_2 反射到 A_3 上的 Φ_{230}



图 5 抽別通星的日昇侯空 Fig. 5 Calculation model of radiation flux

下面引入辐射换热角系数,引入该系数的目的是将求解出射辐射通量的问题转化为分析辐射如何在两个面之间传输,最终计算在出口一定距离处积分球模型出射的辐射通量。传输原理如图6所示,若面S₁是朗伯面,从面元dS₁传输到面元dS₂上的辐射通量为d $\Phi_{12} = L_1 dA_1 d\Omega_1 \cos \theta_1 = L_1 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r_{12}^2} dA_1 dA_2$,那么面S₁传输到面S₂的辐射通量表示为

$$\Phi_{12} = \Phi_1 \times \frac{1}{\pi S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r_{12}^2} \, \mathrm{d}S_1 \, \mathrm{d}S_2 \tag{3}$$

式中,
$$F_{12} = \frac{1}{\pi S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r_{12}^2} dS_1 dS_2$$
为辐射换热角系数。



图 6 辐射能在面与面之间的传输 Fig. 6 Transfer of radiant energy between surfaces

在理想积分球中,各个角度的辐亮度相等,即 $L = \text{constant},辐亮度角度非均匀度为0,出口平面的朗伯 性很好^[10,11]。所以在使用式(2)计算<math>\Phi_1$ 后,可以得到面 A_3 上辐射通量 Φ_3 ,即

$$\Phi_{3} = \Phi_{13} + \Phi_{23} = \Phi_{1} \times F_{13} + (\Phi_{1} \times F_{12} + \Phi_{1} \times F_{12} \times F_{22}) \times F_{23}$$
(4)

依据图5中面与面之间的位置关系分别计算式(3)中的二重积分

1) 面 A_1 对面 A_3 的角系数

$$F_{13} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2} - \sqrt{\left(1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}\right)^2 - 4\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2} \right]$$
(5)

式中, $R_1 = \frac{r_1}{h}, R_2 = \frac{r_2}{h}$ 。

2) 积分球开口内壁面A₂对自身的角系数

$$F_{22} = 1 + \frac{h}{2r} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{2r}\right)^2}$$
(6)

3) 积分球出口面A₁对A₂的角系数

$$F_{12} = F_{32} = \frac{1}{2} \left(\frac{h}{r} \sqrt{4 + \frac{h^2}{r^2}} - \frac{h^2}{r^2} \right)$$
(7)

4) 面A₂对A₃的角系数

$$F_{23} = \frac{1}{4r_1h} \left[\sqrt{h^4 + 2h^2(r_1^2 + r_2^2) + (r_1^2 - r_2^2)^2} - (r_1^2 - r_2^2) - h^2 \right]$$
(8)

然后,将式(5)~(8)代入式(4),即得到面A₃上的辐射通量,

$$\Phi_{3} = \Phi_{1} \times \frac{1}{2} \left[1 + \frac{h^{2} + r_{2}^{2}}{r_{1}^{2}} - \sqrt{\left(1 + \frac{h^{2} + r_{2}^{2}}{r_{1}^{2}}\right)^{2} - 4} \right] + \left[\Phi_{1} \times \frac{1}{2} \left(\frac{h}{r} \sqrt{4 + \frac{h^{2}}{r^{2}}} - \frac{h^{2}}{r^{2}} \right) \times \left(2 + \frac{h}{2r} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{2r}\right)^{2}} \right) \right] \times \frac{1}{4r_{1}h} \left(\sqrt{h^{4} + 4h^{2}r^{2}} - h^{2} \right)$$

$$(9)$$

式(9)就是入射辐射通量已知时,在出口一定距离处积分球出射的辐射通量计算式。由式(9)不难看出,在积分球开口大小、开口壁厚和与开口的距离确定的情况下,积分球半径越大出射的辐射通量值越小,辐射抑制效果越好,对检测带来的误差也就越小。

定义
$$\Phi_v = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} = \frac{\Phi_3}{\Phi_0}$$
,用来衡量积分球抑制辐射的效果。利用Light Tools软件建立模型,积分球球体

半径分别取1m、2m、3m,设置初始入射辐射通量为1000W,开口半径为变量,开口内壁上使用和积分球一样的涂层,测试开口半径一定时,不同距离上的辐射抑制效果,结果如图7。结果表明,积分球可以发挥抑制 辐射通量的作用。辐射抑制接口设置为0.1m,同时根据仿真结果球体半径与抑制效果成正比,理论上接入 半径无限大空间时辐射被完全吸收(实际中以实验室所处空间发挥辐射抑制作用)。



图 7 开口半径为 0.1m 时不同距离测试面上的辐射通量仿真实验结果 Fig. 7 Simulation results of radiation flux on the test surface at different distances when r=0.1m

4 实验与分析

经检测,太阳模拟器在半径为0.1m的工作面上辐照均匀性达到98.1%,稳定性为0.965%/h,足够满足 气象仪器测试要求。下面将通过对比实验验证本文提出的辐射抑制方法的可行性。

4.1 直接辐射模拟系统测试

考虑到日照计记录的时间为大于等于120 W/m²的时间总和,所以大于120 W/m²的辐照度值并不构成 误差,最终选择3个小于120 W/m²的辐照度值进行实验。首先使用辐射计对工作面上的直接辐照度值进行 测量,检测是否与理论值一致;然后将积分球的开口与太阳模拟器对准,测量此时工作面上的直接辐射模拟 值;最后接入辐射抑制方法后,使用辐射计在相同位置测量此时的模拟值,如图8所示,实验数据如表1。



Fig. 8 Direct solar radiation simulation device test

表1的实验数据表明使用辐射抑制方法后,115~120 W/m²各个模拟值的误差分别下降了86%、85%、81%,误差明显减小。但是误差依然存在,并随着直接辐射模拟值的增加而增加,说明这部分误差可能与太阳模拟器有关,该误差将在4.3节中详细说明。

王雨畅,等:光电式日照	贸计室内检测系统中	辐射抑制方法研究
-------------	-----------	----------

表1 直接辐射模拟测试						
Table 1Solar scattered radiation simulation test						
Type Theoretical value		Disconnected to radiation suppression system /(W•m ⁻²)		Connected to radiation suppression system $/(W \cdot m^{-2})$		
	/(w•m)	Measured values	Absolute error	Measured values	Absolute error	
1	115	121.5	6.5	115.9	0.9	
2	117	124.5	7.5	118.1	1.1	
3	120	128.1	8.1	121.5	1.5	

4.2 散射辐射模拟系统测试

散射辐射模拟装置使用3个卤素灯模拟散射辐射。本文研究的辐射抑制方法是通过吸收辐射达到模拟 直接辐射和模拟散射辐射相对独立,解决直接辐射和散射辐射模拟相互干扰的问题,从而减小散射辐射模 拟系统的误差。下面将测试应用辐射抑制方法后散射辐射模拟系统的误差,原理如图9所示。首先,在不加 入太阳模拟器时,测量积分球中a,b,c三个位置的散射辐射模拟值,将这个值作为散射辐射模拟参考值(标准 值)。然后,接入太阳模拟器,在没有使用辐射抑制方法时,分别测量115 W/m²、117 W/m²、120 W/m²时,a、b位 置处的辐射值,a和b分别对应此时光电式日照计测量散射辐射的两个窗口;使用辐射抑制方法后,继续a、b 测量位置。位置 c 是为了测试从积分球内壁上返回的辐射通量是否会对测量造成影响。对比两种条件下, 不同直接辐照度时3个位置测量结果,如果测量结果与参考值约接近说明由于使用了本文的辐射抑制方法, 即便增大太阳模拟器的输出值,依然保证散射辐射模拟不受干扰。实验数据如表2。



图 9 散射辐照度测试位置示意图 Fig. 9 Schematic diagram of scattered irradiance test location

从实验效果看,在使用辐射抑制方法之前,散射辐射模拟值与参考值相比,散射辐照度的误差可达20W/ m²,相对误差分别约为100%、50%、30%,并且误差值随着直接辐射模拟值的增加呈现上升趋势。在使用辐 射抑制方法后,散射辐照度与参考值相比,误差均控制在1W/m²左右,相比之前分别下降了约96%、96%、 95%;并且无论直接辐射模拟量是否增加,散射辐射测量值均保持稳定,证明本文设计的辐射抑制方法很好 的解决了直接辐射和散射辐射相互干扰的问题,实现了直接辐射和散射辐射的独立模拟,为后期整体系统 的装调和误差溯源奠定了良好的基础。同时,从实验数据中发现个方向上测量值非常接近,证明积分球各 个方向上辐射均匀性良好,散射辐射模拟效果良好。

Table 2 Solar scattered radiation simulation test								
Solar direct irradiance/ (W•m ⁻²)	Gears of solar	Reference value $/(W \cdot m^{-2})$	Reference valueDisconnected to radiation/(W•m^-2)suppression system /(W•m^-2)			Connected to radiation suppression system/(W•m ⁻²)		
	scattered irradiance		а	b	С	а	b	С
	1	19.8	39.4	38.7	38.4	20.8	20.4	20.6
115	2	38.4	60.9	60.3	60.9	39.9	39.2	39.5
	3	64.6	82	81.3	80.1	65.8	66	65.1
1 117 2 3	1	19.8	40.8	41.4	39.6	20.4	20.1	21.8
	2	38.4	62.7	61.1	59.5	39.5	39.4	39.9
	3	64.6	83.3	82.5	81.2	66.5	65.7	65.0
1 120 2 3	1	19.8	41.7	42	35.7	20.2	20.1	21.1
	2	38.4	63.1	62.9	58.5	39.6	39.1	40.1
	3	64.6	84.3	83.8	82.8	66.9	65.9	65.2

表 2 散射辐射模拟测试

4.3 太阳模拟器杂散光对系统的影响分析

理想状态下,太阳模拟器的出射光束应为一个规则的"光柱"。但是实际情况下,为了工作面的辐照均 匀性在后期装调的过程中会对各个光学元件的位置进行微调,导致光学元件偏离设计位置从而使部分光线 变为大角度的散射光。一般情况下,这部分散射光不会对工作面产生影响,但在加入积分球后,这部分散射 光经过内壁反射到达工作面上,成为分布均匀、但对系统模拟过有负面作用的杂散光,导致直接辐射测量值 大于理论值,如图11所示。下面通过实验考察太阳模拟器杂散光对整体系统的影响:关闭散射辐射模拟灯 具,打开太阳模拟器,根据图10的分析,如果太阳模拟器的出射光束为理想状态,辐照计在图中a、b、c三个 位置的测量值应该为0。但是如果有杂散光存在,那么辐照计则会在a、b、c位置接收到微量辐射。按照图 10所示位置进行测量,结果如表3。



图 10 太阳模拟器杂散光测试位置示意图 Fig. 10 Stray schematic of stray light test position of solar simulator

表	3	太阳模拟器杂散光测试	
Table 3	Sti	ray light of solar simulator te	est

Solar direct irradiance $/(W \cdot m^{-2})$ —		Stray irradiation/($W \cdot m^{-2}$)	
	а	b	С
115	1.06	1.08	1.37
117	1.11	1.12	1.49
120	1.22	1.28	1.50

测试数据验证了上文的分析,但是这个误差本质上属于太阳模拟器制造过程中产生的系统误差,加上 不同积分球的参数各异,因而目前无法精确计算,仅能通过实际测量的方式确定。

因而,对于直接模拟系统来说,建议将测量后的数值作为当前系统的阈值修正值使用。对于散射辐射 模拟系统来说,从表2中测量数据看来,散射辐射测量值为均匀分布。考虑到日照计的工作原理为总辐射减 去散射辐射,所以,模拟的散射值均匀分布的情况下,此时误差对检测结果的影响可以忽略。

5 结论

本文对于日照计室外检测效率低下及现有日照计检测系统中存在的检测误差大的问题,设计了适用于 光电式日照计的室内检测系统,研究了系统中的辐射抑制方法。根据光电式日照计的工作原理,介绍了检 测系统的组成。研究了应用于该系统的辐射抑制方法,分析了抑制辐射的原理并推导了计算式。实验结果 表明采用本文的辐射抑制方法后,直接辐射模拟的精度提高了80%以上,散射辐射模拟的精度提高了95% 以上,并且实现了直接辐射和散射辐射分别模拟、独立测量,并进一步分析了系统的误差,结果表明应用辐 射抑制方法后的系统满足目前光电式日照计的检测要求。下一步将从分析散射辐射来源的角度优化散射 辐射源设计,使系统更加接近真实条件下太阳辐射。

参考文献

- [1] CHONG Wei, LV Wenhua, ZHANG Jian, et al. Study on calibration system of sunshine duration recorder based on Bi-xe-non lamp source integrating sphere[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 42(1): 0112004.
 崇伟,吕文华,张健,等.双氙灯光源积分球日照计校准系统研究[J].光学学报, 2021, 42(1): 0112004.
- [2] PHILIPONA R, HEIMO A, HOEGGER B. Investigations of solar radiation detectors using a laboratory test facility for

solar radiation meteorological instruments[J]. Solar Energy, 1993, 51(2): 159-163.

- [3] 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.
- [4] YANG Junjie, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Research on the calibration system and calibration method of photoelectric sunshine duration recorder[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2805-2812.
 杨俊杰,张国玉,孙高飞,等. 光电式日照计定标系统与校准方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2805-2812.
- [5] GB/T 33707-2017,气象太阳模拟器[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [6] YUAN Yinlin, ZHENG Xiaobing, WU Haoyu, et al. Uniformity research of integrating spheres reference light source with large exit aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 0422003.
 - 袁银麟,郑小兵,吴浩宇,等.大口径积分球参考光源的均匀性研究[J].光子学报,2015,44(4):0422003.
- [7] 金伟其,胡威捷.辐射度,光度与色度及其测量[M].北京:北京理工大学出版社,2003.
- [8] IncLabsphere. A guide to integrating sphere theory and applications [EB/OL]. (2012-12-06). [2015-03-24]. http:// www.labsphere.com/technical-guides.aspx.
- [9] WANG Yu, ZHENG Chundi, LI Pingzhang, et al. The thickness influence of auxiliary integrating sphere port to reflectance results with auxiliary integrating sphere method and its modification[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2003, (3): 39-44.

王煜,郑春弟,李平张,等.辅助积分球开口壁厚对双球法测量漫反射比的影响及修正[J].照明工程学报,2003,(3): 39-44.

- [10] LIU Hongxing, REN Jianwei, LI Xiansheng, et al. Radiometric characteristics simulation of large aperture integrating sphere based on light tools[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 960-965.
 刘洪兴,任建伟,李宪圣,等.基于LightTools的大口径积分球辐射特性仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 960-965.
- [11] HE Yingwei, LI Ping, WU Houping, et al. Output irradiance uniformity of integrating sphere source [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 548-553.
 赫英威,李平,吴厚平,等. 积分球辐射光源照度均匀性研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 548-553.

Research on Radiation Suppression Method in Indoor Detection System of Photoelectric Sunshine Recorder

WANG Yuchang, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, LIU Shi, ZHANG Jian, MING Shanchi (School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Sunshine duration is an important observation for ground-based meteorological observations. The World Meteorological Organization defines it as "the sum of the periods of direct solar irradiance at or above 120 W/m2". The instrument for measuring sunshine duration is the sunshine recorder, and nowadays, the mainstream sunshine recorder in the world is the photoelectric sunshine recorder. The primary calibration method is the outdoor calibration method. This method has significant shortcomings, such as being affected by different cloud conditions and sky scattered radiation value is not constant, which results in low calibration test accuracy and significant errors. The experimental results show that the threshold error range of outdoor calibration of the sunshine recorders is $9.3 \sim 10.3 \text{ W/m}^2$, and the measurement results are difficult to achieve repeatedly^[1]. Hence, the study of indoor calibration systems that are not subject to environmental conditions is imminent. According to the measurement principle of the photoelectric sunshine recorder, the test system consists of 3 modules: direct radiation simulation system, radiation environment simulation system, and radiation suppression system. This paper focuses on the working principle of the radiation suppression system. The integrating sphere model was chosen as the initial model for the radiation suppression system. Because the distribution of radiation out of the integrating sphere is relatively uniform, even if a considerable amount of radiation returns to the radiation environment simulation system, the impact on the calibration test can be offset from each other. In this section, the calculation method of the radiation flux out of the integrating sphere is studied. Then the configuration of the radiation suppression system is analyzed according to the formula. According to the law of conservation of radiance and Taylors Series, the estimation formula for the flux at the exit port of the integrating sphere can be obtained. Before deriving the output radiation flux calculation, the effect of the thickness of the integrating sphere port in the radiation transmission is analyzed. From the direction of transmission, the radiation emitted from the integrating sphere consists of three parts: the radiation directly emitted to the outside of the integrating sphere, the radiation reflected by the port to the outside, and the radiation back to the inside of the integrating sphere. On the basis of the analyzed the direction of transmission in the integrating sphere, the radiation flux calculation model is established. Then the radiative heat transfer coefficient is introduced to transform the problem of solving the incident radiation flux into an analysis of how the radiation is transmitted between the two surfaces. By substituting the radiative heat transfer coefficients between each surface into the calculation model, the equation for estimating the radiation flux in a plane at a certain distance from the exit of the integrating sphere is obtained. Based on the formula, under the condition that the radius of the exit port, the thickness of the port, and distance from the exit is known, the larger the radius of the integrating sphere, the smaller flux back into the radiation environment simulation system, which means the smaller the error brought to the calibration. Using Light Tools software to build models, the radius of the integrating sphere was taken 1 m, 2 m, 3 m. The results show that the integrating sphere can suppress the radiation, and the sphere's radius is proportional to the suppression effect. The experimental results show that the accuracy of direct radiation simulation of the improved system has improved by more than 80%, and the absolute error is less than 2 W/m²; the accuracy of scattered radiation simulation has improved by more than 95%, and the absolute error is less than 1 W/m^2 . The error of the system consists of two parts: 1) Stray light of solar simulator. But this error is essentially a systematic error generated during the alignment process of the solar simulator and coupled with the fact that the specific parameters of the integrating sphere vary. It can not be calculated precisely at present and can only be determined through actual measurements. It is recommended that the measured value of stray light be used as the threshold correction value for the current system. 2) The radiation suppression device. It appears from the measured data that the scattered radiation measurements are uniform. The principle of the photoelectric sunshine recorder is the total radiation minus the scattered radiation. Therefore, in the case of a uniform distribution of simulated scattered radiation, even if some radiation returns, the effect on the calibration results is negligible.

Key words: Photoelectric sunshine recorder; Indoor verification; Integrating spheres; Radiation suppression; Sunshine duration

OCIS Codes: 120.3150; 010.5620; 010.5630

Foundation item: The Science and Technology Development Plan of Jilin Province (No. 20200602055ZP)