

一种新型的用于医疗保健的模拟太阳光装置

刘宏波 陈兰峰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 对一种新型的适用于医疗保健方面的模拟地球表面太阳光装置的研制工作进行了详细的论述。文章中首先对模拟器的设计准则及技术指标进行了论述。讨论了作为模拟器核心部件——辐射源的选择。从光谱透过率及辐照均匀性的角度分析对比了几种可行的光学系统的结构形式, 并给出了实验结果, 最后给出了研制成功的两种型号模拟器的主要性能指标实测结果。

关键词: 模拟器; 太阳光; 地球表面

1 引言

太阳光是人类乃至万物赖以生存的重要因素之一。对人类来说太阳光是仅次于食物, 空气和水的一种重要营养物质。人类对维生素D的需求, 大部分是通过太阳辐射得到的。适当的太阳光照射, 能促进小儿骨骼发育, 预防佝偻病。阳光照射也可以活跃人体的新陈代谢, 健全神经系统功能, 提高抗病能力。

人类的活动区域, 一部分是在缺少阳光照射的场合。特别是对长期从事不见天日工作的人员, 无论从改善工作环境的角度看, 还是从提高人体防病机能上讲, 都需要我们研制一种模拟地球表面太阳光的装置, 用来改善工作环境, 补充人体对阳光的需求。本文对我们研制成功的模拟地球表面太阳光装置进行了论述。该装置经过三年多时间的试用, 反映效果良好。并经有关权威部门对太阳光装置进行了医学效应研究, 通过了专家鉴定。评语中充分肯定了太阳光装置的医学效应。该项研究成果已通过了专家鉴定。

2 设计准则及技术指标

模拟地球表面太阳光装置有别于其它种类太阳模拟器。对其各项技术指标都有其特殊要求。理论上, 模拟器的辐照度, 光谱辐照度分布, 辐照稳定度等指标应与太阳辐射的光学性能一致。但由于辐射源, 光学系统及加工工艺的限制, 做到完全一致是很困难的, 甚至是不可能的。

因此,从研制的角度讲,应尽量做到模拟器的光学性能与太阳在特定情况下的辐射光学性能的主要参数的偏差在所规定的允差内。

研制中,我们采用了国际电工委员会的 IEC—94 中的标准太阳光谱辐照度中的数据。其制定的条件是:空气质量 AM1.5,地面反射率 0.2,在面向太阳成 37 角倾斜的太阳光直射和漫射辐射的总分布,总光谱辐射能流密度 1000 W/m^2 。其气象条件:大气水蒸气 1.42 cm,臭氧含量 0.24,在悬浮微粒 $0.5 \mu\text{m}$ 条件下的大气浊度 0.27。此标准与我国的实际自然状况相符。

对光谱辐照度分布的模拟,因为变成入射能量的问题,所以可以不考虑各个谱线的精细结构。这样以上述的 AM1.5 标准太阳光谱辐照度分布为标准与实际“模拟太阳光装置”的光谱辐照度分布进行比较即为光谱匹配偏差。

辐照不均匀度是辐照度随位置变化的最大相对偏差,用下式计算:

$$\pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$$

式中: E_{\max} 指有效辐照面内测得的最大辐照度, W/m^2 ; E_{\min} 指有效辐照面内测得的最小辐照度, W/m^2 。

辐照不稳定性是指在有效辐照面内任一给定点上,在规定的时间内,辐照度随时间变化的最大相对偏差。用下式计算:

$$\pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$$

式中: E_{\max} 指有效辐照面上给定点,在规定的时间内测得的最大辐照度, W/m^2 ; E_{\min} 指有效辐照面上给定点,在规定的时间内测得的最小辐照度, W/m^2 。

上述三项是设计地球表面太阳光模拟器最重要的技术指标。按技术要求,太阳光模拟器设计指标为:光谱失配误差为 B 级, $\pm 35\%$ 。辐照不均匀度 $\pm 5\%$ 。辐照不稳定性 $\pm 2\%$ 。

3 模拟器辐射源的选择

辐射源是太阳光模拟器的核心。辐射源发出的辐射能的光谱分布应近似于自然阳光,同时又不产生对人体有害的辐射。MIL—STO—810E 中推荐了四种带有适当反光镜的能满足全光谱分布要求又接近太阳的光源。经过充分的分析和论证,认为石英镝灯能够基本上满足要求。做为模拟地球表面太阳光的光源,石英镝灯的光谱分布和太阳的光谱分布相近。如图 1 所示。

石英镝灯是一种金属卤化物灯,是一种具有生物效应光源。其光效可达 80 Lm/W 以上,显色指数大于 90,标称色温为 $6000 \sim 6500 \text{ K}$,同太阳表面色温一致。具有

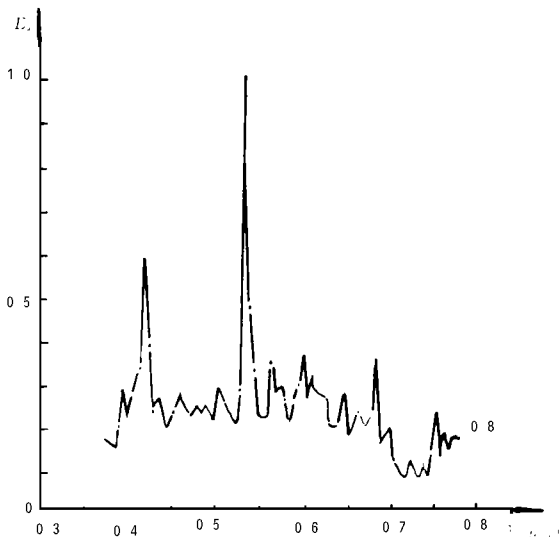


Fig. 1 400 W double-silica Dy lamp spectral distribution

良好的辐照不均匀性和不稳定性。可见光部分比例接近于自然光。平均寿命大于 1000 小时。为使石英镝灯不产生臭氧,在灯的泡皮外表面镀有防臭氧膜。在镝灯下和在太阳光下分别对几种试样所做的光谱选择性、吸收性能测量,其测量结果比较一致。这说明金属卤化物镝灯的光谱品质很好。

4 模拟器光学系统设计

在太阳模拟器中,总体结构和大部分技术指标基本上取决于它的光学系统。由于使用要求不同,对每一种类的太阳模拟器的光学系统的设计指标,都有其侧重。因此在对太阳模拟器的研制中对光学系统总是首先给予足够的重视。

太阳模拟器的种类很多,其光学系统的结构形式也不尽相同。通常的光学系统是由光源、聚光镜,光学积分器,前组透镜,光谱匹配滤光片等组成。如图 2 所示。其光学原理是由光源发出的辐射通量经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辐照分布。这个分布经光学积分器各元素透镜对称分割,叠加再成像,在 L_2 透镜的焦面上形成一个辐照度均匀分布的有效辐照面。这种典型的带光学积分器的太阳模拟器光学系统,其优点是具有理想的辐照不均匀度。

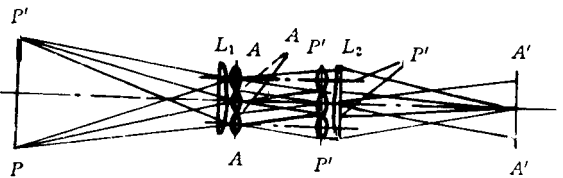
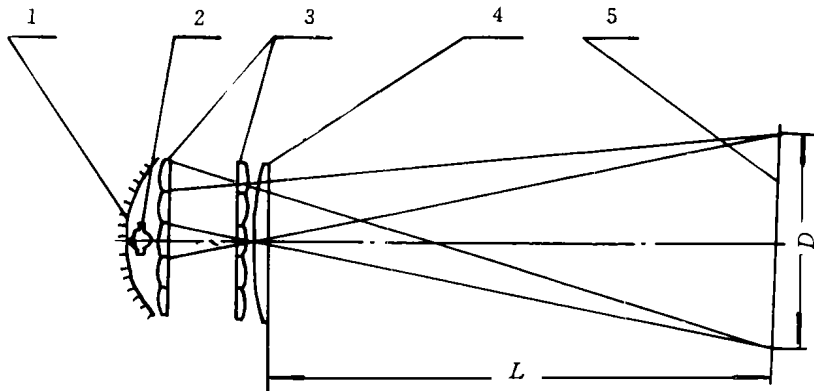


Fig. 2 Symmetrical optical integrator



1. paraboloid mirror 2. light source 3. optical integrator 4. front lens 5. irradiation plane

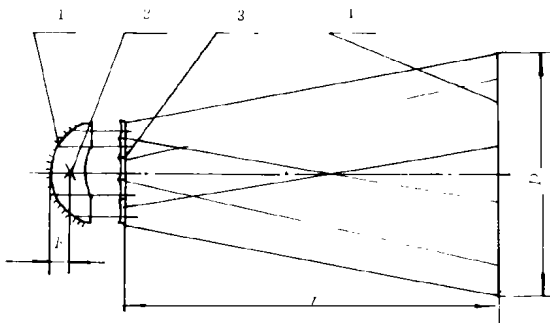
Fig. 3 Optical system with integrator

地球表面太阳光模拟器光学系统设计之一,就是设计并制做了一种带光学积分器的光学系统,如图 3 所示。比较图 2 和图 3,可知图 3 所示的光学系统是图 2 所示光学系统的简化形式。通过实际光线追迹和分析,图 3 中省略了场镜组各元素透镜的共用透镜 L_1 ,从而提高了系统辐射通量的透过率。光学积分器场镜组和投影镜组分别由 19 个元素透镜组成,构成 19 个光通道。聚光系统采用抛物面聚光镜,为充分会聚光源发出的辐射通量,聚光镜的包容角应尽

可能大。这种结构形式的特点是,利用光学积分器原理,将光学系统的光瞳作为物面,通过光学积分器进行分割,叠加成像,从而缩短了光路长度,不仅满足结构尺寸要求,而且提高了辐照不均匀度。但系统的效率仍旧较低,实测值 13% 左右,与要求相差较大。提高系统效率唯一途径是选择较大功率的光源。但这在某些对耗电功率严格控制的场合是不允许的。

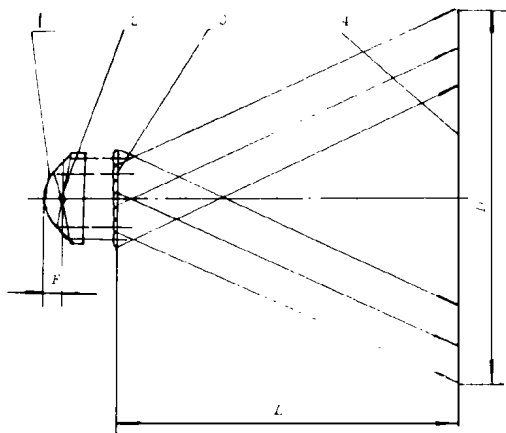
从上述可以看到,复杂的光学系统可以提高辐照不均匀度。但同时光源功率不改变的情况下,系统效率大大降低。这是一对矛盾的问题。在尽量提高系统效率的基础上,适当放宽辐照不均匀度,其偏差不超过所规定的偏差。

出于对上述问题的考虑,我们设计并制做了凹柱面镜光学系统和凸柱面镜光学系统,如图 4、图 5 所示。光学系统又进一步得到简化。它们是由光源和多条柱面透镜组成的前透镜系统。其原理是从光源发出的辐射通量,经抛物聚光镜反射,由多条柱面透镜组成的前透镜组将这一辐射通量分割,部分叠加投射到要求的辐照面上。这种形式的光学系统,减少了透镜组数,提高了系统效率。尽管单个模拟器辐照面内不均匀度有所下降,但如果多台并列使用,辐照面重叠区域辐射能量的迭加。实际上整个辐照面上的辐照不均匀度仍在规定的误差精度内。表 1 是六台装置同时使用时,在辐照面上沿 x 和 y 方向测量的辐照度分布。



1. paraboloid mirror 2. light source
3. concave lens 4. irradiation plane

Fig. 4 Optical system with cylinder concave lens



1. paraboloid mirror 2. light source
3. convex lens 4. irradiation

Fig. 5 Optical system with cylinder convex lens

Table 1

mV	0.3	0.5	0.8	1.4	1.9	2.2	1.9	1.4	1.0	1.2	1.2	0.8	1.4	1.9	2.2	1.9	1.4	1.0	0.6	0.4
x	light source center						superimposing center						light source center							
mV	1.1	1.5	1.9	2.1	2.2	2.1	1.8	1.2	2	1.5	1.9	2.1	2.2	2.1	1.8	1.2	1.0			
y	light source center						superimposing center						light source center							

5 模拟器的结构设计

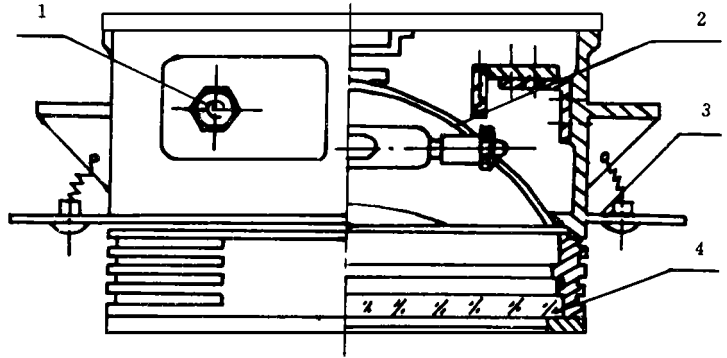
图 6, 是我们研制的两种型号模拟太阳光装置的光机总体结构示意图。

我们在设计中除考虑了外型尺寸及重量外, 还根据模拟器的特殊使用要求, 重点对下列问题做了考虑。

1. 模拟器自身受热辐射源的辐射, 将产生温升, 造成模拟器工作状态不稳定。要使模拟器稳定的工作, 就要使模拟器工作时与周围环境的热交换处于一种相对的平衡状态。这种平衡状态的建立, 就要求模拟器自身具有热交换调节系统。实际上这种调节系统是靠设置散热片实现的。

2. 模拟器应适合于湿度较大, 并可能有少量盐雾的场合使用。为此对所用电器件采用了密封装置, 机体用耐锈材料制做。

3. 设有防振动装置。



1. stuffing box 2. light source and condense mirror

3. active cover 3. front lens (concave, convex)

Fig. 6 MTG-A01(A02) optics and mechanics structure

6 模拟器主要性能指标实测结果

我们对两种型号的模拟太阳光装置的辐照面积、辐照度分布、辐照不稳定性进行了测试, 其结果见表 2。相对光谱分布曲线见图 7。表 3 是光谱能量匹配偏差。

Table 2

type	irradiation distance(mm)	irradiation area(m ²)	average irradiation(s)	irradiation unsta bility(%/h)
MTG-A01	1100	0.7	0.1 ± 2%	static state ± 3
				dynamic state ± 5
MTG-A02	1800	0.5	0.1 ± 2%	static state ± 3
				dynamic state 5

Tabl 3

wavelength (μm)	error (%)	B/A
0.40~0.50	- 24.8	0.75
0.50~0.60	+ 28.7	1.29
0.60~0.70	+ 42.1	1.42
0.70~0.80	+ 23.4	0.77
0.80~0.90	+ 3.2	1.03
0.90~1.10	- 37	0.63
0.90~1.1	120.704	80.68

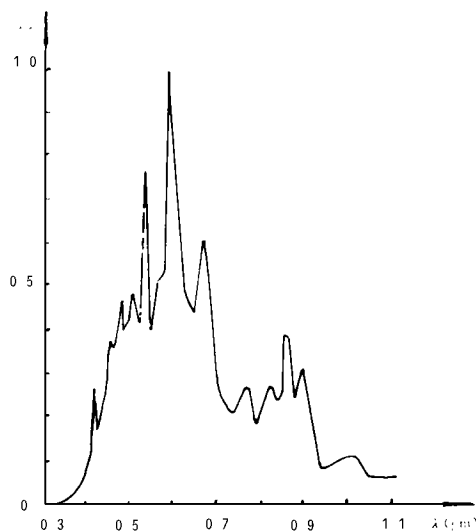


Fig. 7 Relative spectral distribution of MTG-A01 and MTG-A02 simulator

7 结 束 语

研制在医疗保健方面应用的“模拟太阳光装置”,在国内尚属首例。随着我们对问题的进一步深入理解,以及科学技术的进步,新型光源的研制成功,我们在这方面的研究工作一定能够做得更好。我们将要进一步研究用计算机控制“模拟太阳光装置”,模拟一年四季的太阳光照射以及一天内阳光的照射变化,使其在各种缺少阳光的工作环境中得到推广应用。

作者对在研制工作中做出卓越贡献的赵吉林、郎奎亨、郎永志、睦德成、周秀良等老师表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- [1] 仲跻功. 太阳模拟器光学系统. 庆祝王大珩从事科研活动五十五周年学术论文集. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992
- [2] 王之江. 光学设计理论基础. 北京: 科学出版社, 1965

A New Solar Simulator for the Application in Medical Health

Liu Hongbo, Chen Lanfeng

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

A new simulator for the sun light at the surface of the earth which is used for medical health is studied in detail in this paper. First, the design requirement and the main specifications are discussed. The radiation source as the core unit of the instrument is discussed. Several feasible concept of optical system are analyzed and compared on terms of spectral transmission and uniformity, and the experimental results are presented. Finally, the main performances are showed for two types of simulator.

Key words: Simulator, Sun light, Surface of the earth

刘宏波 男, 1956年1月生, 1989年毕业于长春光学精密机械学院光学工程系, 硕士, 副研究员, 现从事光学仪器设计。