

利用积分球实现可调照度漫射定标检测光源

岳钦崧, 杨伟锋, 洪津, 张运杰, 龚平

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对像增强器老化特性检测所需要的色温稳定、低照度照明、照度在几个数量级内可调、均匀性好、稳定性高的漫射光源, 进行了方案设计。主要包括光源和控制两部分: 光源部分采用了积分球, 在对积分球相关理论分析的基础上, 自主设计了积分球, 通过光度学的正反推算, 从理论上充分证明了该部分的设计能够满足用户要求, 完成光路设计。以 51 单片机为核心的控制部分, 采用本地控制和远程串口控制两种方式, 实现对光源的通电、断电、预冷和预热的控制等, 远程控制采用 RS232 串口实现与 PC 机通信。且设计实现了对像增强器处检测照度的监控, 保证检测照度稳定。

关键词: 积分球; 可调照度; 低照度

中图分类号: TP702

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)02-0156-05

Adjustable Illuminance Diffusion Calibration Light Source Produced with Integrating Sphere

YUE Qin-yin, YANG Wei-feng, HONG Jing, ZHANG Yun-jie, GONG Ping

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The light source used for image intensifier aging characteristic examination must be good color stability, low and adjustable luminous flux, good homogeneity and high creditability diffuse light. A project design is made, mainly including light source and control part. Integrating sphere is adopted in light source design. A special integrating sphere was designed based on theoretical analysis. It's proved that the design can satisfy the technical requirement in theory. A slice machine is the core of control part. The design of control part adopts native control and telecontrol to control the power and temperature of light source. RS232 serial-port is used to realize communication with PC machine. The supervision of the luminous is realized for measurement where image intensifier is placed.

Key words: integrating sphere; adjustable illuminance; low illuminance

1 引言

像增强器是一种微光夜视器件, 利用光电子图像信息间的相互转换, 增强、处理、显示等技术, 将微弱的光像(如 X 光像、紫外光像)变成人眼可观

察的可见光图像。这一技术的应用, 为公共安全、天文、航天、航海、生物医学、核物理、卫星观测、高速摄影等众多领域提供了现代探测手段, 已经成为世界各国广泛重视与应用的军民两用技术。对其

各种特性的检测就尤为重要, 老化特性是其中的一种, 即先对像增强器进行老化处理, 然后再对其信噪比、光谱响应特性等特性进行检测, 以检测像管是否合格。其中老化特性检测中用到的老化光源和检测光源, 常规光源所能达到的均匀性、可靠性等不能满足要求。本课题就是针对这一需要为像增强器老化特性检测提供均匀漫射光源, 由于每个像管价格都在几万元, 误检一个都会给企业带来很大的损失, 所以本设计具有很大的经济效益和现实意义。研究的目的是为此类高精度检测提供色温稳定、照度可调、低照度照明、均匀性好、可靠性高的漫射光源。

我们可以使用光学扩散片来降低光源不均匀分布或光束偏移所带来的误差, 提高测量的准确度; 但是在更精密的测量时, 就必须使用积分球作为光学扩散器以使得上述误差最小。但是透射型的扩散器的综合性能并不十分理想, 所以在更精密的场合可以使用积分球来作为光扩散器。积分球的功用是收集光源入射光通量, 并将此光源均匀地散布于球壳中。目前在一些高精度测量中已经较为广泛地采用积分球来获得均匀性好的光源, 这些光源输出动态范围的调节一般是通过灯功率调节、出口光阑调节、灯的数量控制等办法来实现的。单纯通过光阑进行调节不能带来很大的动态范围, 而且出光孔径受到限制; 通过电流控制调节灯的功率会引起色温变化, 并且给光源的工作稳定性带来影响; 通过增加灯的数量解决动态范围的问题增大了光源结构的复杂性, 在体积、效率上也会带来很多矛盾。本文给出了一种积分球漫射光源的设计, 能够实现高达 120dB 的大动态范围且色温稳定的照度输出。

2 积分球测量基本原理

设进入积分球内部的光通量为 ϕ_0 , 积分球的半径为 R , 积分球的面积为 S , 开口半径为 r , 面积为 S_1 , 积分球内壁涂层的反射率为 ρ 。则入射光通量 ϕ_0 照射到积分球内 S' 面积上反射后, 留在积分球内部的光通量为 ϕ' , 则

$$\phi' = \rho\phi_0. \quad (1)$$

因为积分球内壁涂层为均匀漫射涂层, 所以可以认为反射后光通量均匀分布, 则从积分球开口处露出的光通量

$$\Delta\phi_1 = \frac{S_1}{S}\phi' = \rho\phi_0\frac{S_1}{S}, \quad (2)$$

一次反射后积分球内部光通量为

$$\phi_1 = \phi' - \Delta\phi_1 = \rho\phi_0\left(1 - \frac{S_1}{S}\right). \quad (3)$$

同理可得

$$\phi_2 = \rho\phi_1, \quad (4)$$

$$\Delta\phi_2 = \frac{S_1}{S}\phi_2 = \frac{S_1}{S}\rho\phi_1 = \frac{S_1}{S}\rho^2\phi_0\left(1 - \frac{S_1}{S}\right). \quad (5)$$

依次得

$$\Delta\phi_n = \frac{S_1}{S}\rho^n\phi_0\left(1 - \frac{S_1}{S}\right)^{n-1}. \quad (6)$$

所以从积分球开口处露出的光通量

$$\begin{aligned} \Delta\phi_\Sigma &= \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \cdots + \Delta\phi_n = \\ &\rho\phi_0\frac{S_1}{S} + \frac{S_1}{S}\rho^2\phi_0\left(1 - \frac{S_1}{S}\right) + \cdots + \\ &\frac{S_1}{S}\rho^n\phi_0\left(1 - \frac{S_1}{S}\right)^{n-1} = \\ &\rho\phi_0\frac{S_1}{S}\left[1 + \rho\left(1 - \frac{S_1}{S}\right) + \cdots + \right. \\ &\left.\rho^{n-1}\left(1 - \frac{S_1}{S}\right)^{n-1}\right] = \\ &\rho\phi_0\frac{S_1}{S}\frac{1}{1 - \rho\left(1 - \frac{S_1}{S}\right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

则

$$\begin{aligned} E &= \frac{\Delta\phi_\Sigma}{S_1} = \frac{\rho\phi_0}{S}\frac{1}{1 - \rho\left(1 - \frac{S_1}{S}\right)} = \\ &\frac{\rho\phi_0}{4\pi R^2}\frac{1}{1 - \rho(1 - f)}. \end{aligned} \quad (8)$$

其中 f 为开口面积与积分球表面积之比即 $\frac{S_1}{S}$ 。

积分球具有接近 180° 的视场角, 一般情况下, 假定积分球内表面完全是朗伯体反射, 且入射光经一次反射后是完全非偏振的。积分球理论的基本要点是: 如果一个光源放在一内壁涂以完全漫射材料的空心球内, 则球表面任何部分的辐射照度均相同, 并正比于光源的辐射通量。设光源的辐射通量为 Φ , 积分球半径为 r , 球内壁漫反射率为 ρ , 则球表面任何一部分的辐射照度 E 可写成如下形式

$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (9)$$

此式是在一些理想的假设条件下完成的,即球是完全封闭的没有光逃逸的均匀漫射的空球,实际的积分球总有一些测量孔径以及光源挡板,因此考虑这些影响,(9)式可改写成如下形式

$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \frac{\rho}{1 - \varepsilon\rho}, \quad (10)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{4\pi r^2} \sum_{i=1}^n a_i. \quad (11)$$

其中 ε 表示积分球测量孔径等面积单元 a_i 相对于总球表面积所占的比例,它在公式中的作用可看成是对这些影响的一种修正。

离积分球出光口一定距离处的照度计算示意图如图 1 所示,设积分球出口面积为

$$S = \pi r_1^2, \quad (12)$$

则出口处的辐亮度

$$B = \frac{\Phi}{\pi S}. \quad (13)$$

A 点对出孔的立体角 Ω 为

$$\Omega = \frac{S \cos \alpha}{l^2}, \quad (14)$$

则 A 点的照度为

$$E_A = B\Omega = \frac{\Phi}{\pi S} \frac{S \cos \alpha}{l^2} = \frac{\Phi \cos \alpha}{\pi l^2}. \quad (15)$$

其中 r_1 为积分球出光口半径, l, b, c, α 如图 1 所示。

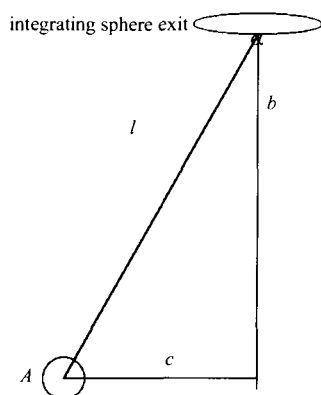


图 1 积分球出口示意图

Fig.1 Sketch map of integrating sphere exit

3 系统构成

利用积分球实现的可调照度漫射光源由高亮度卤钨灯、低亮度卤钨灯、积分球、光栏、滤光片、

光闸、照度探头、稳流电源、控制箱构成。如图 2 所示。积分球系统是利用漫射积分球的漫射性能好、能量叠加和衰减容易等特点,构成高亮度和低亮度的 2 套光源。

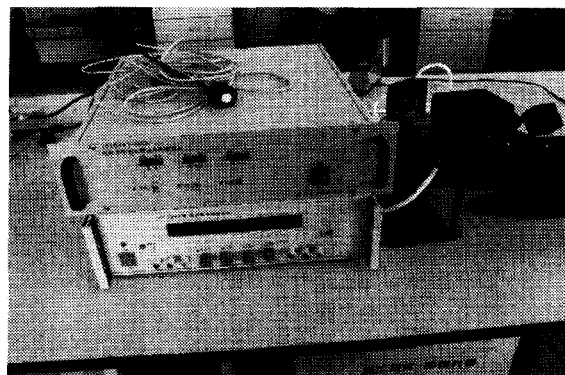


图 2 漫射光源及控制装置实物图

Fig.2 Diffused light source and control device

系统的技术指标为:

- 1) 高亮度灯工作额定电流 (3.95 ± 0.05) A, 电压 24V;
- 2) 低亮度灯工作额定电流 (0.75 ± 0.05) A, 电压 24V;
- 3) 积分球直径: 100 mm;
- 4) 高亮度灯: 1 盏 50W 卤钨灯;
- 5) 低亮度灯: 1 盏 10W 卤钨灯;
- 6) 老化照明照度 1×10^{-4} LUX, 检测照度 30LUX;
- 7) 光源色温 2856K;
- 8) 照度探头检测照度范围 $0 \sim 50$ LUX (对应电压信号 $0 \sim 5$ V)。

3.1 积分球光路

光源的光路结构如图 3,由灯 1(提供高照度)发出的光经过光闸 2,再经过光栏 3 进入积分球 4,出射光由出光孔经过光栏 8 和光闸 9 出射,通过调节光栏 3(最大孔径 10 mm)和光栏 8(最大孔径 30 mm)能得到所需的照度;由灯 7(提供低照度)经过滤光片 7(衰减倍数为 10),在经过光栏 5(最大孔径 10 mm)进入积分球 4,出射光由出光孔经过光栏 8 和光闸 9 出射,通过调节光栏 5 和光栏 8 能得到所需的照度。光闸 2 的作用是在低亮度工作状态下阻止高亮度的光进入积分球,光闸 9 的作用是保证准确测得系统的杂散光从而消除相关的误差,光闸

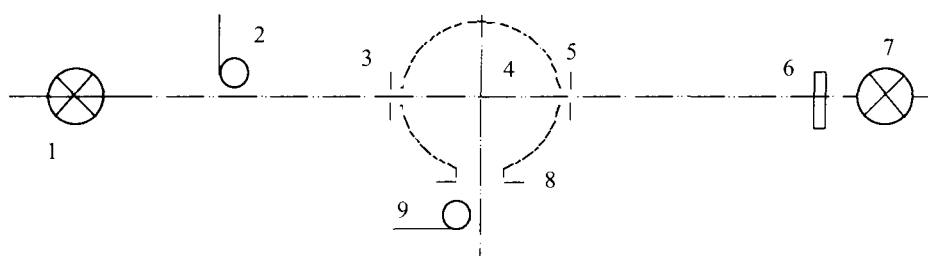


图 3 漫射光源光路图

Fig.3 Optical configuration of the diffused light source

的安置实现了光输出控制,使光源在高照度和低照度工作状态下能实现自动控制。在高照度工作状态下,光阑 3 和光阑 8 的配合使用能使照度值变化 300 倍,光阑 5 和光阑 8 的作用亦同。

3.2 稳流电源

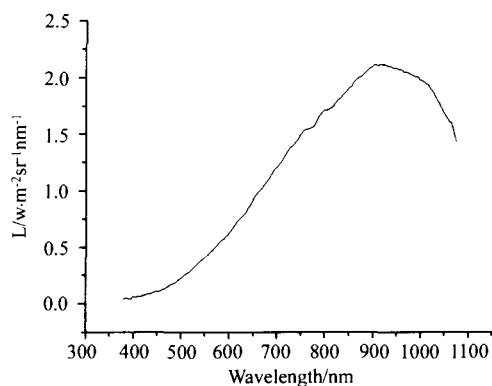


图 4 卤钨灯的功率谱

Fig.4 Power spectrum of the tungsten halide lamp

稳流电源是提供给卤钨灯 1 和 7 的电源,它是一个非常稳定的直流恒流源,能使灯的稳定性和准确度处于最佳状态。通过电流控制实现色温控制,实际要求的色温可以通过测量积分球输出光源的功率谱,从而确定限定色温条件下卤钨灯的额定工作电流。图 4 为卤钨灯工作电流为 2.9A 时积分球输出的功率谱曲线,由颜色温度计算可知

$$T = \frac{2897.6}{\lambda_{\max}} = \frac{2897.8}{1.01} = 2869k \quad (16)$$

由此可以通过控制卤钨灯的电流值来实现色温控制,光源要求工作色温为 2856K,这样通过将稳流电源的输出电流控制在 2.9A,可以得到工作要求的色温。

并且电源具有控制卤钨灯开启时预加小电流,消除由于大的启动电流冲击引起的对灯的电击。该特点能使灯在适用期内的校准数据保持不变,并且进一步保护灯。

3.3 控制系统

本光源系统是提供生产厂家进行探测器检测之用的,检测系统是一个自动工作的系统,各个照度照明光源的开机次序、时间都有严格的要求。因此,光源系统采用了一个单片机控制系统来进行卤钨灯电源的控制,实现系统的这些控制目标。控制系统的框图如图 5 所示。其中 J1、J3 为 10 W 灯开关继电器, J2、J4 为 100 W 灯预热继电器, L1 为 10 W 灯, L2 为 100 W 灯。控制的对象实际就是两只卤钨灯。为保证使用寿命和稳定性,卤钨灯的开关过程分别需要一定的预热和预冷,即让灯在半负荷的情况下工作一段时间。本系统在灯控上采用继电器来进行控制,共有 4 只继电器,对于一只卤钨灯,用其中一只继电器控制其开关,另一只继电器控制电源提供不同的工作电流,这样卤钨灯的开关即可有预热和预冷的工作过程。

光源控制系统与主控系统通过 RS232 接口进行通讯,接受主机的开机、关机指令,同时将光源的状态上传给主机系统。由于光源系统采用紧凑型的设计,正常的测试工作是间歇式的,但提供高照度照明的 100 W 灯若长时间连续开灯可能会因散热问题给系统带来危害。所以光源控制系统还设置了自动关电程序,即卤钨灯加电超时后若仍然没有接收到主控系统的关电指令,即执行自动关电,以保证系统安全。另外,控制系统还设计了照度探头,提供照度信号以供主控系统对不同照度的工作状态时的照度监测。

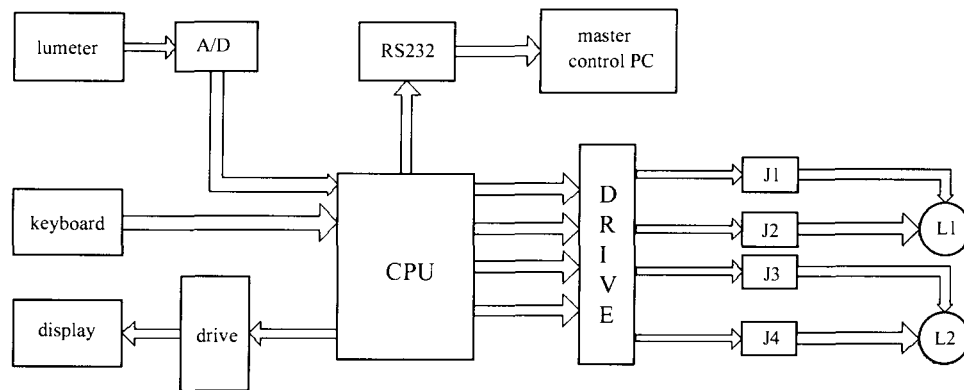


图 5 控制系统框图

Fig.5 Block diagram of the control system

4 标 定

光源的定标主要是指照度探头的定标。照度探头输出的信号为电压值，它的响应是非标值，所以要进行定标。光源用已经标定的积分球，该积分球工作在额定工作电流下，它的线性度、均匀性以及稳定性都非常好，定标方法是将标准照度计以及照度探头对准积分球，调整积分球里灯的输出功率，使得标准照度计输出值为 50 lx，将照度探头的增益 - 可变电位器调整，使照度探头输出信号为 5V，则照度探头的校正值为

$$\eta = \frac{50}{5} = 10\text{lx/V}, \quad (17)$$

即照度探头每伏读值代表 10 lx 照度。

5 结束语

利用积分球实现的可调照度漫射光源由卤钨灯、三开孔积分球、光栏、光闸、滤光片、照度探头、稳流电源、控制箱组成，光源操作简单，实现智能化。系统采用了积分球，从而使出射光源具有漫射特性，光源的均匀性好，通过光栏的调节能实

现不同检测条件下的照度要求。采用高精度稳流源和卤钨灯通过电流控制实现色温要求，光源色温保持在 2856K，光源工作稳定。可用于准确校准微光度计、影象倍增管、远距光度计和分光辐射仪。

参考文献:

- [1] Wang Zhijiang. *Manual of Optical Technology* [M]. China Machine Press, 1987: 555-576(in Chinese).
王之江. 光学技术手册 [M]. 中国机械出版社, 1987: 555-576.
- [2] Xun Yulong. *The Fundamental Experiment and Application on Remote Sensing* [M]. China Science and Technology Press, 1991: 45-60(in Chinese).
荀毓龙. 遥感基础试验与应用 [M]. 中国科学技术出版社, 1991: 45-60.
- [3] He Liming. *Design of Applications System of SCM Configuration of System and Technology of Interface* [M]. BUAA Press, 1990(in Chinese).
何立民. 单片机应用系统设计系统配置与接口技术 [M]. 北京航空航天大学出版社, 1990.

作者简介: 岳钦崧 (1979-), 硕士, 研究方向辐射定标。