

线阵 CDD 光电参量测试系统的研究

奕 中 杰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 讨论了线阵 CCD 光电参量测试系统的标定、调试以及 CCD 光电量的测量方法。重点进行了以下几个方面的讨论: 积分球光源色温标定原理、方法及结果验证; 线阵 CCD 光电参量测试系统的调试与标定 (用标准探测器标定辐照度, 用标准探测器标定参考探测器, 用参考探测器标定辐照度, 积分球出射光均匀性校正); 线阵 CCD 各光电参量测量方法及计算程序。

关键词: 线阵 CCD; 光电参量; 色温; 积分球; 探测器

1 引 言

CCD 是一种新型的固态成像器件, 它是大规模硅集成电路工艺基础上研制而成的模拟集成电路芯片。CCD 既可作一种微型图像传感器, 而且, 它还可以用模拟信号处理, 数字信号储存技术领域。

CCD 器件作为一种重要的光电探测元件, 生产厂及使用部门都对它的性能测试给予很大关注。目前, 国内还没有一个单位建立了一套完整的测试系统来评价 CCD 器件的性能参量。

航空航天部 504 所根据工作需要, 委托中科院长春光机所研制一套线阵 CCD 性能参量测试系统。本文对其中光电参量测试系统进行探讨。

2 CCD 光电参量的定义

2.1 测量条件

CCD 器件的大多数光电参量是在特定光谱类型辐射下测定的, 其含义是指色温为 2854K 的溴钨灯加特定滤光片。一种是 2mm 厚的 Schott BG-38 滤光片, 用颜色滤光玻璃制成, 在光谱区域中具有光谱选择性吸收特性。另一种是光学度膜实验公司生产的宽波段热反射镜。

此外, 为了考察资源卫星各通道上 CCD 器件的光电参量, 需要在加有相应各种滤光片的光源下对其测量。因此, 为资源卫星各通道也配置了滤光片, 包括: 红外滤光片、红滤光片、绿滤光片、蓝滤光片、全色滤光片。

CCD 数据采集频率为 1MHz—5MHz 可变；
 CCD 积分时间为 0.2ms~20ms 可变；
 CCD 测量环境温度为 25℃。

2.2 CCD 光电参量的定义

目前，生产 CCD 的厂家之间对 CCD 器件的各种光电参量的定义有些差异。根据 504 所建议，参考仙童公司 1987 年版 CCD 数据手册，定义了如下各光电参量。

动态范围 (Dynamic Range)；
 饱和曝光量 (Saturate Exposure)；
 响应度 (Responsivity)；
 光谱响应度 (Spectral Responsivity)；
 响应度不均匀性 PRNL (Photo Response Non-Uniformity)；
 饱和输出电压 (Saturation Output Voltage)；
 线性度 NL (Non-Linearity)；
 电荷转移效率 CIE (Charge Transfer Efficiency)；
 暗电流 (Dark Current)；
 奇偶两路信号幅度的变化
 噪声等效曝光量 NEE (Noise Equivalent Exposure)；
 功耗 P。

3 线阵 CCD 光电参量测试系统

线阵 CCD 光电参量测试系统主要包括光谱响应测试系统和除光谱响应度之外其它光电参量的测试系统。此外，还有辅助的色温计，各种探测器，六路恒流源及微机控制部分等。

3.1 线阵 CCD 光谱响应度测试系统

如图 1 所示。用卤素灯作光源，用传统的三透镜照明单色仪的入射狭缝，在单色仪的出射狭缝放置一个小型积分球，使单色仪出射的单色均匀照射到 CCD 表面，由硅光电二极管测量 CCD 处的绝对辐射量。硅光电二极管已经中国测试技术研究院分谱段标定过。单色仪是 $F=155\text{mm}$ 的小型单色仪，其聚光本领较强。单色仪出射狭缝上的输出光谱可在 $0.40\sim 1.00\mu\text{m}$ 之间的波长范围内由计算机控制步进电机加以改变。根据使用要求，单色仪分辨率高于 40nm，测量波长间隔设备为 40nm。

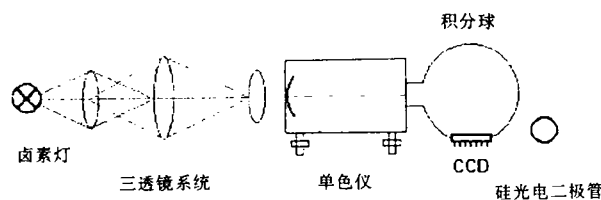


图 1 线阵 CCD 光谱响应测试系统

3.2 采用积分球光源的光电参量测试系统

图 2 是为测量线阵 CCD 响应变、不均匀性、线性度、饱和曝光量等光电参量提供均匀辐照度的积分球光源。积分球主体内壁直径为： $D=300\text{mm}$ 。积分球上装有 4 个结构相同的投光器，用 4 只 250W 溴钨灯作照明光源，溴钨灯由恒流源供电。如图 2 所示，四个投光器均用球

面反射镜提高光的利用率，用透镜组将光束准直为平行光。光路中设有快门，可变光栏和滤光片转换轮盘，以平行光的形式投射积分球内壁，4 个投光器和出射孔的几何位置应使光斑的直接反射光不能射入 CCD 器件。四路投光器的灯室采用吸热式散射措施，工作时风扇吹风，加速投光器外壳散热。四个投光孔直径为： $d=50\text{mm}$ ，出光孔为 $15\times 70\text{mm}$ 的方孔。积分球内壁涂有硫酸镁，形成均匀的漫射面。

积分球上装有色温计和参考探测器，其视场基本上位于被测 CCD 器件视场范围。色温计用来监视光源色温，参考探测器经过标准探测器标定，用来监视积分球出光口辐照度变化。

实际使用时，被测 CCD 装在 CCD 盒上，CCD 盒放置在小型工作台上，使 CCD 位于积分球出光口处。打开快门，手动滤光片轮盘，选择光源谱段，调节可变光栏，来改变 CCD 像元面上的辐照度。

3.3 色温计

色温计由一组窄带滤光片加硅光二极管探测器组成。探测器用滨松 S1336-5BQ 硅光二极管，光路中有三个可换的窄带滤光片，中心波长分别为 650nm 、 750nm 、 850nm 。用三个窄带滤光片和探测器分别在三种波长进行测量，与事先用光谱辐照度灯进行标定的比值进行比较，可计算出积分球光源的色温。

色温计除了监视光源色温的作用外，其中的探测器还可用作参考探测器，监视积分球出光口处的辐照度变化。参考探测器事先经标准探测器标定。用作参考探测器时，探测器前无滤光片，当探测器信号饱和时，探测器前可加中性滤光片。中性滤光片用于减少入射光的强度，并且均匀通过光谱的一个宽广区域。

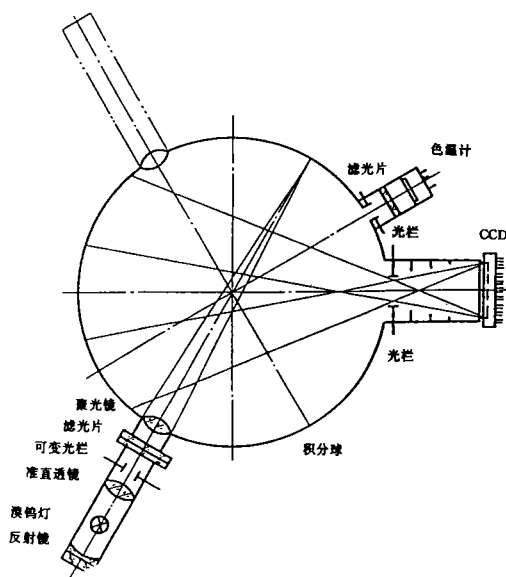


图 2. 积分球光源

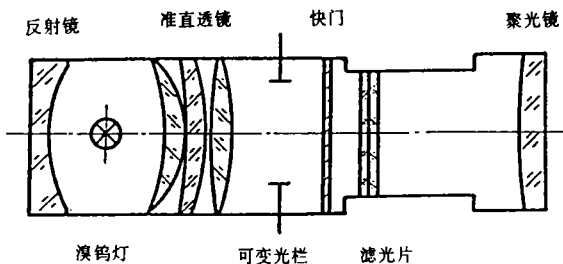


图 3 投光器光路结构

4 积分球光源色温的标定

在测定光谱响应之外其它光电参数时，所要求的条件是在“特定光谱类型辐射”下进行。也就是指用色温为 2854K 的溴钨灯加特定滤光片。因此，需要标定积分球光源色温。

4.1 简易色温计原理

4.1.1 色温的定义

传统的色温定义为: 辐射源在温度 T 时所呈现的颜色与在某一温度 T_c 时的黑体颜色相同时, 则称 T_c 为该辐射源的色温度。

在辐射度学和光度学中, 为了表示一个白炽光源所发出的光质, 常用色温这个量, 单位为 K。一般来讲, 色温高表示蓝、绿光的成分多些, 色温低则橙、红光的成分多些。应当指出, 由于色温是按规定的两波长来比较辐射源和黑体辐射功率, 所以色温相同的辐射体的连续谱也可能是不相似的; 另外, 若规定的波长不同, 则色温往往也不相同。

根据线阵 CCD 使用的目的, 我们选择 650nm、750nm、850nm 波长处的光, 并根据分布温度的定义来确定色温。分布温度定义为发热型辐射源在温度 T 时的相对光谱辐射功率分布 (辐射功率随波长分布的相对值) 与黑体在某一温度 T_d 时的相对光谱辐射功率分布相似时, 则以该黑体温度 T_d 表征为辐射源的分布温度。

4.1.2 色温测量的方法

色温是表示白炽光源光谱特性的一个指标。色温测量的方法很多, 常见的有: 光谱功率分布法和双色法。

实际使用中, 我们根据分布温度的定义, 用窄带滤光片选取三个波段上的信号, 用最小二乘法原理求得光源色温。实际使用, 效果很好。

4.1.3 简易色温计原理

色温计由一组三片窄带滤光片和 S1336-5BQ 硅光二极管组成, 三片窄带滤光片的中心波长分别为 650nm、750nm、850nm。

首先用光谱辐照度灯标定温计, 求出三个波长上探测器的响应度分别为 R_{c1} 、 R_{c2} 、 R_{c3} 、($V/W/cm^2$), 存入计算机。测量光源色温时, 在波长 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 探测器的输出信号分别为 V_1 、 V_2 、 V_3 。则此时三个波段上的辐照度分别为 V_1/R_{c1} 、 V_2/R_{c2} 、 V_3/R_{c3} 。根据分布温度的定义, 用此三个量所求的色温应满足关系式 (1)。

$$A = \sum_{i=1}^3 [1 - a \cdot \frac{V_i/R_{ci}}{E_b(\lambda_i, T)}]^2 \rightarrow \min \dots \dots \quad (1)$$

式中, $E_b(\lambda, T)$ 是绝对黑体的光谱辐射出射度, a 是一个比例因子。使 A 为最小值的温度 T 即是待测光源的分布温度, 当发射体为灰体时即是其色度。在式 (1) 中, A 取最小值的必要条件是其偏导数等于零。对 a 求偏导, 并令其为零得:

$$\sum_{i=1}^3 [1 - a \cdot \frac{V_i/R_{ci}}{E_b(\lambda_i, T)}] \times [\frac{V_i/R_{ci}}{E_b(\lambda_i, T)}] = 0$$

对上式归纳整理可得:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^3 [\frac{V_i/R_{ci}}{E_b(\lambda_i, T)}]}{\sum_{i=1}^3 [(\frac{V_i/R_{ci}}{E_b(\lambda_i, T)})^2]} \quad (2)$$

令

$$a_1 = \frac{V_1/R_{c1}}{E_b(\lambda_1, T)}$$

$$a_2 = \frac{V_2/R_{c2}}{E_b(\lambda_2, T)}$$

$$a_3 = \frac{V_3/R_{c3}}{E_b(\lambda_3, T)}$$

则 (2) 式可简化为

$$a = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}$$

把 a_1, a_2, a_3, a 代入 (1) 式中得:

$$A = (1 - a \times a_1)^2 + (1 - a \times a_2)^2 + (1 - a \times a_3)^2 \dots \dots \quad (3)$$

由色温计测量光源色温时, 由探测器读出的 V_1, V_2, V_3 代入 A 中, 这时使 A 为最小值的 T 就是光源的色温。

4.1.4 求 A 最小值的算法

在数据处理中, 寻找某个目标函数的极值点, 这一类问题数学上叫做最优化问题。

由于我们遇到的目标函数 $A(T)$ 只有一个未知数 T , 则可用一维优选法和黄金分割法。根据 $A(T)$ 曲线的实际形状, 我们选择了抛物线算法。

4.2 简易色温计的标定

4.2.1 简易色温计标定方法

点亮光谱辐照度灯, 在适当距离处照射色温计。调整灯电流, 使其达到规定电流值, 然后转动色温计滤光片转轮, 分别测出三个波段上的电压值 V_1, V_2, V_3 。

4.2.2 标定数据及结果

实标测量时, 光谱辐照度灯工作电流为 8.497A, 灯丝距色温计距离约为 2.30m。三个波段 ($\lambda_1=750\text{nm}$, $\lambda_2=650\text{nm}$, $\lambda_3=850\text{nm}$) 上的信值如表 (1)。

光谱辐照度灯在 750nm、650nm、850nm 波长处的辐照度值分别为: $E_1 = 4.36E - 5$, $E_2 = 3.44E - 5$, $E_3 = 4.76E - 5$

单位是 $W \cdot \text{cm}^2 \cdot (10\text{nm})^{-1}$ 。

由此可确定探测器在三个波段上的响应度为:

$$R_{c1} = V_1/E_1 = 57.90/4.36$$

$$R_{c2} = V_2/E_2 = 50.09/3.44$$

$$R_{c3} = V_3/E_3 = 118.94/4.76$$

表 1 色温计标定数据

	V_1 (mV)	V_2 (mV)	V_3 (mV)
第一次	57.76	50.00	118.92
第二次	57.96	50.10	118.91
第三次	57.97	50.17	119.00
平均值	57.90	50.09	118.94

4.2.3 色温的确定

把已经标定出的探测器响应度和普朗克公式代入 (3) 式中。实际测量色温时, 再把色温计三个波段上的信号输出电压 V_1, V_2, V_3 代入, 通过计算机计算, 以确定色温。

4.3 色温计标定结果的验证

点亮标准施照体 A 光源，在适当距离照射色温计。调整 A 光源的灯电流，使其达到规定电流值。这时 A 光源的色温为 856K，用标定好的色温计测量 A 光源色温，并进行比较。由测得的数据，经计算得出色温 T 为 3000K。由给证结果看，2856K 色温与 3000K 色温的结果有 100 多开尔文的差异。而在色温测量中，若规定的波长不同，则色温往往不同。A 光源是 CIE 推荐的标准施照体，比较关心短波及可见部分的相对光谱功率分布 (300~830nm)。而我们选择的波长为 650nm、750nm、850nm，因此有一定差别是正常的。

用简易色温计对积分球光源四路投光器分别进行了色温标定。

5 线阵 CCD 光电参量测试系统的调试与标定

测试线阵 CCD 光电参量前，需要对测试系统进行调试和标定。这部分工作包括：用标准探测器标定参考探测器，积分球出光口均匀性修正以及单色仪波长定标。

5.1 用标准探测器标定积分球出光口辐照度

把标准探测器 S1336-5BQ 型硅光二极管置于积分球出光口处的工作平台上，使探测器光敏元面处于出光口中心。选择电流电压放大器开关，并调解调零旋钮，使无光照时探测器输出为零。

点亮积分球光源，调解灯电流，使其色温为 2854K，并选择光谱波段。改变可变光栏来调整测量位置的辐照度。设探测器输出信号为 I_d (A)，则

$$\begin{aligned} I_d &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a \cdot R_{Ph(\lambda)} K \cdot B_{(\lambda, T)} \cdot T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda \\ &= K \cdot a \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{Ph(\lambda)} \cdot B_{(\lambda, T)} \cdot T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

式中： I_d —— 探测器光电流输出 (A)。

a —— 标准探测器光敏元面积 (cm^2)

$R_{ph(\lambda)}$ —— 标准探测器绝对光谱响应 (A/W)

$T_{f(\lambda)}$ —— 投光器中滤光片的谱透过率

$B_{(\lambda, T)}$ —— 普朗克黑体函数 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)

K —— 比例因子

由 (4) 式可得

$$K = \frac{I_d}{a \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{Ph}(\lambda) \cdot B_{(\lambda, T)} \cdot T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda} \quad (5)$$

因此当探测器光电流输出为 I_d 时，相应的辐照度为：

$$\begin{aligned} E_1 &= k \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda, T} \cdot T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda \\ &= \frac{I_d \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{(\lambda, T)} \cdot T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda}{I_d \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{ph(\lambda, T)} \cdot T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda} \end{aligned} \quad (6)$$

单位是 mW/cm^2 。

把 $T_{f(\lambda)}$ 和 $R_{ph(\lambda)}$ 数据存入计算机，再把相关的数据代入 (6) 式中，那么对应每一个探测器信号输出 I_d ，就可确定相应的辐照值。

5.2 用参考探测器标定积分球出光口辐照度

在线阵 CCD 光电参量测试过程中, CCD 放置在积分球出光口处, 通过变换滤光片来选择照射 CCD 的光谱, 通过改变可变光阑来改变照射 CCD 的辐照度。实际测量中, 辐照度的变化是由色温计中的参考探测器来监测的。

5.2.1 用标准探测器标定参考探测器

把标准探测器置于积分球出光口处工作平台上, 光敏元面置于出光口中心。旋转色温计滤光片转轮, 使色温计处于参考探测器工作状态。

旋转投光器上的滤光片轮盘, 选定一种光谱波段。改变投光器组合及光阑以改变光强等级, 用标准探测器测出的的辐照度等级标定参考探测器, 以后用参考探测器的输出代表辐照度等级。

设参考探测器的输出光电流为 $I_{ref}(A)$, 参考探测器的响应度为 $R_{ref}(A/W/cm^2)$, 辐照度为 $E_1(W/cm^2)$, 根据定义:

$$I_{ref} = R_{ref} \cdot E_1$$

由 (7) 式得出:

$$R_{ref} = I_{ref}/E_1$$

把 (9) 式代入 (8) 式中, 可得:

$$R_{ref} = \frac{I_{ref} \cdot a \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{ph(\lambda,T)} \cdot B_{\lambda T} T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda}{I_d \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda T} T_{f(\lambda)} \cdot d\lambda} \quad (9)$$

根据 (9) 式, 由参考探测器和标准探测器的输出 I_{ref} 和 I_d , 可标定出参考探测器的响应度 R_{ref} 。以后就可以根据 R_{ref} 和 I_{ref} 确定积分球出光口处辐照度。

对白光、红外、红光、绿光、蓝光、全色、BG-38 波段, 分谱段标定参考探测器的响应度, 存入计算机中。

表 (2) 至表 (8) 给出了各通道响应度标定结果。

5.2.2 由参考探测器确定辐照度

由已测得的参考探测器各通道的响应度, 根据式 (10) 可求出相应光谱波段的辐照度。

$$E_{(i)} = \frac{I_{ref}}{R_{ref(i)}} \quad (W/cm^2) \quad (10)$$

式中:

E_i —— 某一光谱波段的辐照度

I_{ref} —— 参考探测器输出光电流

$R_{ref(i)}$ —— 某一光波段参考探测器响应度

表 2 白光波段参考探测器标定结果

次数	1	2	3	4
V_1	4. 05	1. 841V	0. 828V	0. 471V
V_2	0. 363	0. 165V	0. 073V	0. 042V
V_3	0. 004090	0. 004090	0. 004023	0. 004069

表 3 红外波段参考探测器标定结果

次数	1	2	3	4
V ₁	6.97V	3.043V	1.223V	0.543V
V ₂	0.630	0.276V	0.111V	0.049V
V ₃	0.004710	0.004727	0.004730	0.004712

表 4 红光波段参考探测器标定结果

次数	1	2	3	4
V ₁	0.904V	0.467V	0.230V	0.101V
V ₂	74.4mV	38.6mV	18.9mV	8.16mV
V ₃	0.003424	0.003393	0.003373	0.003316

表 5 绿光波段参考探测器标定结果

次数	1	2	3	4
V ₁	1.656V	1.159V	0.681V	0.246V
V ₂	131.0mV	92.27mV	53.75mV	19.30mV
V ₃	0.002891	0.002909	0.002884	0.002867

表 6 蓝光波段参考探测器标定结果

次数	1	2	3	4
V ₁	80.36mV	0.165V	0.326V	0.536V
V ₂	5.807mV	12.27mV	24.45mV	40.51mV
V ₃	0.002317	0.002392	0.002420	0.002431

表 7 PNA 波段参考探测器标定结果

次数	1	2	3	4
V ₁	5.132V	3.00V	1.44V	0.091V
V ₂	0.418V	0.246V	0.118V	0.0074V
V ₃	0.003412	0.003435	0.003433	0.003407

5.3 积分球光源出射光均匀性的修正

测量线阵 CCD 光电参量，要求照射 CCD 的光均匀，因此我们选用了积分球光源。此外，还应对出射光的均匀性加以检验，并在实际计算中加以修正。

5.3.1 积分球光源出射光均匀性检验

点亮积分球光源，把一带狭缝的探测器固定在精密平动台上，置于积分球出光口放 CCD 位置处，使精密平动台能带动探测器，从积分球出光口一端按刻度沿水平方向精密扫描到另

一端。

精密平动台的最小单位是 24mil，积分球出光口长度约为 60mm，折合为 2.4 英寸。每次移次两个单位，可测出 50 个数据。

表 8 BG38 波段参考探测器标定结果

次数	1	2	3	4
V ₁	0.824V	0.269V	0.109V	0.054V
V ₂	63.4mV	20.5mV	8.14mV	3.94mV
V ₃	0.002684	0.002658	0.002605	0.002545

实际检测中，我们从左至右，再从右至左往复扫描。如此往复测了三次共六组数据。表 (9) 和图 4 给出了其中一组数据的均匀性归一化曲线。由图可知，在近 30mm 长度范围内，积分球的均匀性好于 2%。

图 5 为六组数据叠加曲线。由图可知重复性很好。

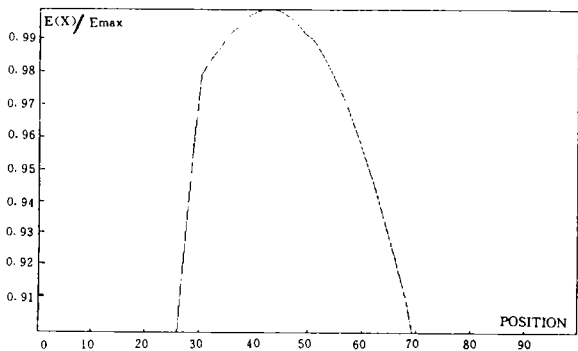


图 4 积分球出射光均匀性曲线

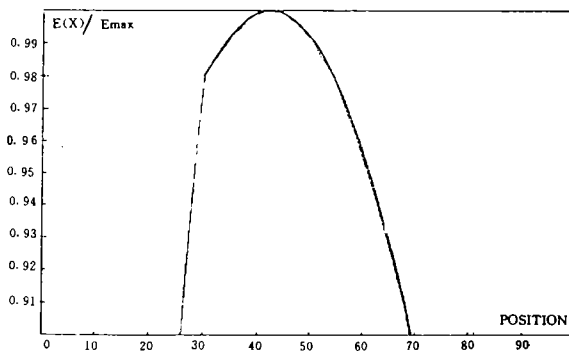


图 5 积分球出射光均匀性曲线 (6 组数据叠加)

表 9 积分球出射光均匀性校正数据

位置	1	2	3	4	5
1	39.881	41.456	43.011	44.522	45.974
6	47.391	48.791	50.171	51.184	51.371
11	51.529	51.674	51.825	51.923	52.053
16	52.141	52.191	52.224	52.231	52.213
21	52.163	52.082	51.193	50.960	50.706
31	50.412	50.110	49.782	49.432	49.069
36	48.473	48.287	47.882	44.468	46.893
41	45.354	43.704	42.008	40.279	38.493
46	36.663	34.825	33.010	31.241	19.319

5.3.2 积分球出光口辐照度的修正

把测得的 6 组数据相加取平均，并对中心位置归一化，则得：

$$U_{(x)} = V_{(x)} / V_{\text{中心}}$$

所以经过修正的辐照度为：

$$E_x = E_1/U_x$$

其中 E_1 是出光口中心处的辐照度。

5.4 单色仪的波长定标

从提高能量的角度考虑,单色仪前后狭缝的宽度选为 2mm。但是,此时光谱分辨率低,不适宜做波长定标。单色仪进行波长标时,我们选用的狭缝宽度 0.1mm,用汞灯的几条发射谱线作为标准。标定后,调整机械结构,使波长鼓读数与波长一致。

表 10 为 1701 型汞光谱灯主要谱线表

表 10 汞光谱灯主要谱线

颜色	Purple	Blue	Green	Yellow1	Yellow2
波长 (nm)	404. 6	435. 8	546. 7	576. 96	579. 07

6 线阵 CCD 光电参量的测量方法

根据 CCD 光电参量的定义,详细讨论了 CCD 光电参数的测量方法与计算。

Study on a Test System of Linear CCD Photoelectronic Parameters

Luan Zhongjie

*(Changchun Institute of Optics and Fien Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130021)*

Abstract

The thesis discusses the calibration and adjustment of linear CCD photoelectronic test system, as well as measure method of CCD photoelectronic parameters. The discussion lays stress on the calibration principles, methods and result verification of integrating sphere light source's color temperature; The calibration and adjustment of linear CCD photoelectronic parameters test system. Inculuding calibrating the irradiance with standard detector, the reference detector with standard detector, then calibrating the irradiance with reference detector, and adjusting the uniformity of integrating sphere exit-light finally and the measure methods and programs of linear CCD photoelectronic parameters.

Key Word: Linear CCD, Photoelectronic parameters, Color temperature, Integrating sphere, Detector