

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1150—2006

光电探测器相对光谱响应度校准规范

Calibration Specification for Relative Spectral
Responsivity for Photoelectric Detectors

2006-05-23 发布

2006-11-23 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

光电探测器相对光谱
响应度校准规范

Calibration Specification for Relative Spectral
Responsivity for Photoelectric Detectors

JJF 1150—2006
代替 JJG 685—1990

本规范经国家质量监督检验检疫总局于 2006 年 05 月 23 日批准，并自 2006 年 11 月 23 日起施行。

归口单位：全国光学计量技术委员会
主要起草单位：中国测试技术研究院
参加起草单位：中国计量科学研究院

本规范由全国光学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

曹远生（中国测试技术研究院）

参加起草人：

熊利民（中国计量科学研究院）



目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语和定义	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(1)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 校准用设备	(2)
7 校准项目	(2)
7.1 外观检查	(2)
7.2 光电探测器的相对光谱响应度	(2)
8 校准方法	(2)
8.1 外观检查	(2)
8.2 光电探测器相对光谱响应度校准	(2)
9 校准结果表达	(4)
10 复校时间间隔	(4)
附录 A 光电探测器相对光谱响应度测量不确定度分析	(5)
附录 B 另一种光电探测器相对光谱响应度校准方法	(8)
附录 C 光电探测器相对光谱响应度校准记录格式	(10)
附录 D 校准证书 (报告) 内容	(11)

光电探测器相对光谱响应度校准规范

1 范围

本规范适用于光电探测器、照度计探头、亮度计探头以及其他光学测试仪器所用光电探测器的相对光谱响应度的校准。波长范围为(300~2 500)nm,其他波长范围可参照本规范校准。

2 引用文献

GB/T 6495.8—2002《光伏器件 第8部分:光伏器件光谱响应的测量》

JJF 1001—1998《通用计量术语及定义》

使用本规范时,应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语和定义

光电探测器的光谱响应度 $R(\lambda)$ 定义为:作为波长 λ 的函数,光电探测器的输出 $dY(\lambda)$ 除以波长间隔 $d\lambda$ 内的光电探测器单色输入 $dX_e(\lambda) = X_e(\lambda)d\lambda$ 之商:

$$R(\lambda) = \frac{dY(\lambda)}{dX_e(\lambda)} \quad (1)$$

光电探测器在波长 λ 处的光谱响应度 $R(\lambda)$ 与给定参照值 S_m 之比:

$$R_r(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{S_m} \quad (2)$$

$R_r(\lambda)$ 即为探测器的相对光谱响应度。 S_m 可以是 $R(\lambda)$ 的平均值,最大值或任意选定的值。

4 概述

光电探测器是利用具有光电效应的材料制成的将光辐射信号转变成电信号的传感器。光电效应分内光电效应和外光电效应。利用外光电效应制造的光电探测器有光电管和光电倍增管。利用内光电效应制造的光电探测器有光导型和光伏型。光导型探测器有硫化铅、碲镉汞、光敏电阻等。光伏型光电探测器有硅光电二极管、硅光电池、硒光电池等。一般来说,不管是利用内光电效应还是外光电效应制成的光电探测器,它们的响应只能在一定的光谱区内,且具有较强的光谱选择性。也就是说光电探测器的光谱响应度在不同的波长是不同的。

5 计量特性

光电探测器的相对光谱响应度工作波长范围和校准的不确定度为:

波长(300~400)nm: 2.6% ($k=2.5$);

波长(400~1 100)nm: 1.7% ($k=2.5$);

波长 (1 100~2 500) nm: 2.6% ($k=2.5$)。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度为 (23±5)℃。

6.1.2 环境湿度小于 80%RH。

6.1.3 室内清洁, 无腐蚀性气体。周围无影响仪器正常工作的电磁场、机械振动, 无杂散光干扰。

6.1.4 电源电压 AC (220±10) V。

6.2 校准用设备

6.2.1 标准探测器

可采用光谱响应度平坦的热电探测器或已知光谱响应度的光电探测器。标准探测器应有足够高的绝对光谱响应度, 较低的暗噪声, 能探测到 1×10^{-10} W 的辐射功率。在 5 个数量级的范围内非线性应小于 0.2%, 温度系数小于 0.1%/℃。对于面积较大的标准探测器其面积响应度的不均匀性应小于 0.2%。

6.2.2 光源

采用 300 W/30 V 或等量级功率的石英卤钨灯, 直流稳压或稳流电源供电, 连续可调, 发光光源的最大变化小于 0.3% (5 min 内), 并监测光源的不稳定性。

6.2.3 单色仪

为了减少杂散光的影响和保证光谱单色性, 单色仪应是双单色仪, 单色仪工作波长范围为 (300~2 500) nm, 波长重复性小于 0.2 nm, 波长示值误差小于 0.2 nm, 实测双单色仪的杂散辐射小于 1×10^{-6} 。

6.2.4 准确度等级为 0.01 级的直流数字电压表 (6 位半以上) 或锁相放大器。

6.2.5 精密 I/U 变换器两台或锁相放大器一台, I/U 变换器的分辨力小于 1×10^{-11} A。

6.2.6 调整光路用的红色半导体激光器或 He-Ne 激光器一台。

7 校准项目

7.1 外观检查

7.2 光电探测器的相对光谱响应度

8 校准方法

8.1 外观检查

8.1.1 光电探测器应标有名称、规格型号、制造厂名、出厂编号等。

8.1.2 光电探测器的光敏面和窗口应清洁、无斑点、气泡和划痕等影响测量的缺陷。

8.2 光电探测器相对光谱响应度校准

开始校准前, 被校光电探测器和校准用计量器具应在校准环境中放置 2 h 以上。

光电探测器相对光谱响应度校准原理框图如图 1 所示。

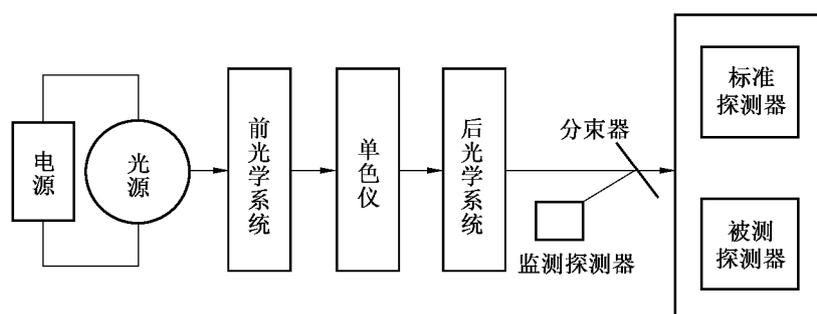


图 1 光谱响应度测量原理框图

经稳压稳流电源供电的光源发出的光辐射经前光学系统（可以由会聚透镜或凹面、平面反射镜组成）入射到单色仪的入射狭缝，从单色仪出射狭缝输出的单色光经后光学系统后，分别入射到被测光电探测器和标准探测器。可以用替代法或逐点比较法校准光电探测器的相对光谱响应度。

替代法的校准原理是在校准的波长范围内，从起始波长到结束波长按一定的波长间隔先测量标准探测器信号，再在相同的条件下从起始波长到结束波长测量被校光电探测器信号，由于标准探测器光谱响应度已知，因此通过比较即可得到被校光电探测器的光谱响应度；逐点比较法则是通过标准探测器和被校光电探测器位置的移动或其他方法使光束分别入射到标准探测器和被校光电探测器。从起始波长到结束波长按一定的波长间隔逐点对标准探测器和被校光电探测器信号进行测试比较，从而得出被校光电探测器各波长点的响应度。进行归一化处理后即得到被校准光电探测器的相对光谱响应度值。

典型的校准装置的具体布置如图 2 所示。

a) 将单色仪、光源、快门、会聚透镜安装在光轨上，并调整水平。

b) 用 He-Ne 激光器调整测量光路，使光源灯丝的中心、快门通光孔、会聚透镜、单色仪入射狭缝、出射狭缝、反射镜、标准探测器、被校光电探测器的中心在同一位置上。该光轴线为测量系统的主光轴线。用标准谱线灯校准单色仪波长鼓的分度。

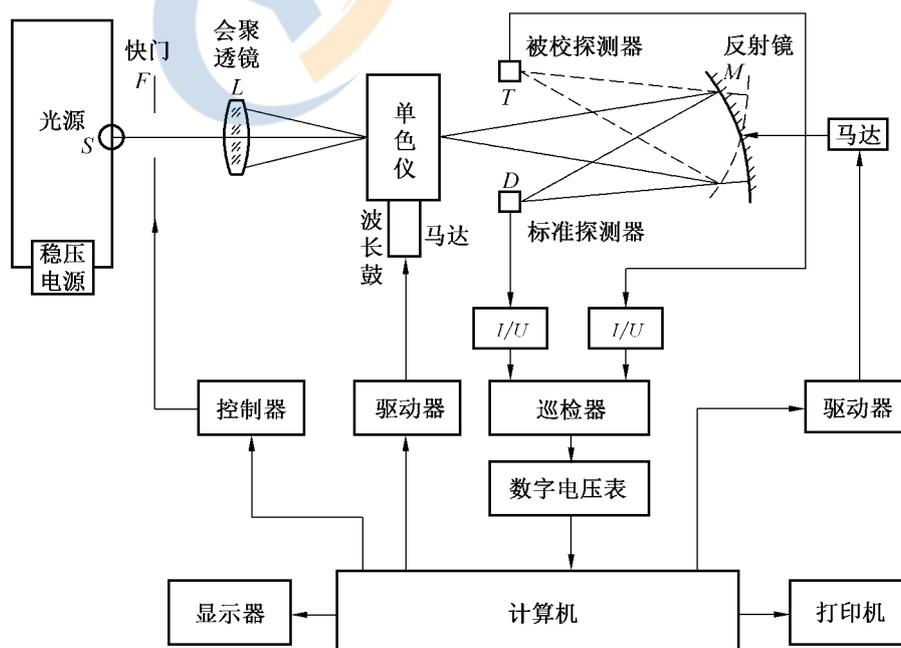


图 2 相对光谱响应度校准装置图

c) 点燃光源，在光轨上前后调节会聚透镜位置，使光源灯丝清晰地成像于单色仪入射狭缝上。把单色仪的波长鼓调到 550 nm 附近。把标准探测器和被校光电探测器分别放置在出射光束的两边，其表面中心与反射镜中心的连线与出射光束约成 10° 左右。转动反射镜 M ，使单色仪输出的光斑分别入射到标准探测器和被校光电探测器的中心。确定好旋转台旋转的角度，整个测量过程包括波长鼓扫描、反射镜的转动、快门的开与关、光信号的测量、暗信号的测量等都由计算机按编好的程序自动完成。整套装置除光源外都在暗室里。特别注意杂散辐射的屏蔽。

d) 将标准探测器、被校光电探测器输出线与 I/U 变换器、巡检器、数字电压表、计算机连好。电测仪表按各自的要求进行预热。将灯按规定的电流/电压点燃，预热 15 min，灯的供电电流或电压用数字电压表监控，保证光强稳定在测量条件所要求的范围内。单色仪波长鼓调到测量的起始波长 λ_1 ，按测量程序，键盘输入起始波长 λ_1 ，结束波长 λ_2 ，测量波长间隔 $\Delta\lambda$ (5 nm 或 10 nm)。程序将自动在起始波长处将光先对准被校光电探测器。然后快门打开测量光信号 $I_{b\lambda}$ ，快门关闭测量暗信号 $I_{bo\lambda}$ ；转动 M 使光斑入射到标准探测器，快门打开测量光信号 $I_{p\lambda}$ ，快门关闭测量暗信号 $I_{po\lambda}$ 。波长鼓自动转到下一波长，重复将光斑入射到被校光电探测器、标准探测器测量光信号和暗信号，直至最终的波长。标准探测器的光谱响应度 R_λ 已存储在计算机里，计算机将按下式计算出被校光电探测器的光谱响应度：

$$R_{b\lambda} = \frac{I_{b\lambda} - I_{bo\lambda}}{I_{p\lambda} - I_{po\lambda}} R_\lambda \quad (3)$$

以光谱响应度的最大值或任意选定的值进行归一化处理即可得到相对光谱响应度。本规范给出两种典型的校准方法，另一种方法见附录 B。

9 校准结果表达

标准探测器和被校准光电探测器的暗信号、光信号、光谱响应度数据应记入校准原始记录，其记录格式见附录 C，并至少保存 1 年。

校准结果应以校准证书或校准报告的形式给出，其内容见附录 D。

10 复校时间间隔

探测器复校时间间隔建议为 1 年。具体由送校单位根据使用情况自主决定。

附录 A

光电探测器相对光谱响应度测量不确定度分析

A.1 光电探测器光谱响应度不确定度的 A 类评定

A.1.1 绝对定标引入的附加不确定度

附标准探测器具有 0.1% 的不确定度，还有标准探测器过渡到被校探测器重复性不确定度，二项合成对绝对光谱响应度引进的附加不确定度：

$$(300\sim 400)\text{ nm: } u_1=0.5\%;$$

$$(400\sim 1\ 100)\text{ nm: } u_1=0.3\%;$$

$$(1\ 100\sim 2\ 500)\text{ nm: } u_1=0.5\%。$$

A.1.2 探测器光电流测量及二次仪表的测量平均值不确定度，在所有波长范围内：

$$(300\sim 400)\text{ nm: } u_2=0.5\%;$$

$$(400\sim 1\ 100)\text{ nm: } u_2=0.2\%;$$

$$(1\ 100\sim 2\ 500)\text{ nm: } u_2=0.5\%。$$

A.2 光电探测器光谱响应度不确定度的 B 类评定

A.2.1 腔型热释电探测器光谱选择性（忽略）。

A.2.2 单色仪带宽误差

当标准探测器和被标定标准探测器的光谱响应的斜率不同时，单色仪带宽会引进误差。该误差可通过反卷积的数学方法进行很好的修正。但处理繁琐，常出现病态方程。在很窄的带宽内对探测器的光谱响应、单色仪的狭缝函数、光源的辐射分布都作线性化处理，得到修正系数如下：

$$K(\lambda)=1-K_S(\lambda)B(\lambda)\Delta^2/6 \quad (\text{A.1})$$

式中： $K_S(\lambda)$ ——探测器的相对光谱响应的斜率；

$B(\lambda)$ ——光源光谱辐射功率分布的斜率；

Δ ——单色仪带宽的半宽度，实际应用 6 nm。

此项不确定度为：

$$u_3=4\times 10^{-6}$$

A.2.3 光电测量部分的非线性

当测量装置通过对辐射源进行调制，并用锁相放大器进行测量，可以减小杂散光的影响，提高测量准确度。但锁相放大器有可能引进非线性误差。用双孔径法对带光电二极管的锁相放大器进行非线性测量，其非线性 $<0.1\%$ 。

$$u_4=0.1\%$$

A.2.4 光电探测器温度系数的影响

大部分波长，探测器温度系数为 $\pm 0.1\%/^{\circ}\text{C}$ ，在 1 600 nm 处为 $0.3\%/^{\circ}\text{C}$ 。国际比对中一般仅要求测量探测器的工作温度即可，我们保存的光电探测器则进行了恒温控制，温度不稳定性为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，并测量温度系数。此项不确定度为：

$$u_5=0.03\%$$

A. 2.5 波长引起的误差和修正

虽然单色仪出厂标称示值精度为 0.07 nm，也要经过定标：

在 Kr（氪）灯以下的特征谱线 587.09，811.29，877.07，975.18，1 363.42，1 678.51 nm 对单色仪标定结果，最大偏差 0.2 nm。此项不确定度为：

$$u_6 = 0.2\%$$

A. 2.6 时间常数不确定度

热释电功率计，在慢速挡位，时间常数为 10 s。光电二极管时间常数虽很小，但是锁相放大器一般用 1 s 的时间常数。在测量中，均在 7~8 倍的时间常数后测量，此项不确定度为：

$$u_7 = 0.05\%$$

A. 2.7 杂散辐射带来的误差

双单色仪的杂数辐射为 10^{-10} ，用截止滤光片法测量双单色仪的杂数辐射，在 460 nm 测量，大于此波长的杂数辐射应该更小，该项误差可忽略。

通带外的杂散辐射，因采用了调制锁相方法测量，影响也很小，用移动快门的方法检查，误差可忽略。

A. 2.8 偏振影响

由于光电二极管的窗口为蓝宝石，又由于光路中有分光系统和分束器，可能会造成偏振误差，为减少这种误差，分束器使用蒸铝金属膜、让其保持和光轴的夹角尽量小、用替代法消除偏振带来的影响。经在 0° ， 45° 和 90° 放置不同角度的同一探测器实验，误差忽略。

A. 2.9 辐射源和光电探测器表面均匀性影响

理论上该项误差应该测量光电探测器响应 $S(x, y, \lambda)$ 的面均匀性和辐射源辐照度分布 $E(x, y, \lambda)$ 。然后用下式修正：

$$S(\lambda) = \frac{\iint S(x, y, \lambda) E(x, y, \lambda) dx dy}{\iint E(x, y, \lambda) dx dy} \quad (\text{A. 2})$$

应该说测量很简单，但是做怎样修正和估计误差，却是很难的，因为每次装调探测器的位置不同，上式的 S ， E 函数则不同，因此很难得到准确修正。实际中使用重复装调的方法验证该误差。

实际测量，Si 光电探测器和 InGaAs 光电探测器均匀性影响为 0.1%，热释电探测器影响为 0.2%。

此项不确定度取：

$$u_8 = 0.2\%$$

A. 2.10 参考标准探测器（热释电功率计）吸收系数引起的误差：

(300~400) nm: $u_9 = 0.5\%$ ；

(400~1 100) nm: $u_9 = 0.4\%$ ；

(1 100~2 500) nm: $u_9 = 0.5\%$ 。

A. 2.11 实测反射镜转动定位重复性误差：

$$u_{10} = 0.05\%$$

A.3 光电探测器光谱响应度的合成标准不确定度：

$$u_c(R) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2} \quad (\text{A.3})$$

A.4 扩展不确定度： $U = k u_c(R)$

波长（300~400）nm：

$$U = \sqrt{0.005^2 + 0.005^2 + 0.000\ 006^2 + 0.001^2 + 0.003^2 + 0.002^2 + 0.000\ 5^2 + 0.002^2 + 0.006^2 + 0.000\ 5^2}$$

$$= 2.6\% \quad (k = 2.5)$$

波长（400~1 100）nm：

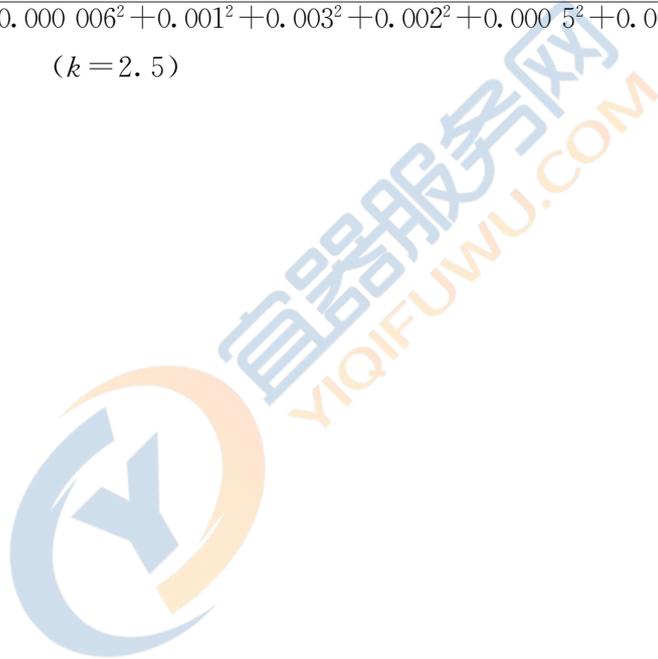
$$U = \sqrt{0.003^2 + 0.002^2 + 0.000\ 006^2 + 0.001^2 + 0.003^2 + 0.002^2 + 0.000\ 5^2 + 0.002^2 + 0.004^2 + 0.000\ 5^2}$$

$$= 1.7\% \quad (k = 2.5)$$

波长（1 100~2 500）nm：

$$U = \sqrt{0.005^2 + 0.005^2 + 0.000\ 006^2 + 0.001^2 + 0.003^2 + 0.002^2 + 0.000\ 5^2 + 0.002^2 + 0.006^2 + 0.000\ 5^2}$$

$$= 2.6\% \quad (k = 2.5)$$



附录 B

另一种光电探测器相对光谱响应度校准方法

B.1 标定热释电探测器响应度

首先在波长 632.8 nm，用超低温辐射计标定无窗标准探测器的光谱响应度 R_c (632.8 nm)。然后，在该装置上，用该无窗标准探测器，在 632.8 nm 波长标定具有同样光阑的腔型热释电探测器，交替读得标准探测器的光电流 I_s ，暗电流 I_{so} ，监测探测器光电流 I_{sm} ，暗电流 I_{smo} ，热释电探测器的光电流 I_p ，暗电流 I_{po} ，监测探测器的光电流 I_{pm} ，暗电流 I_{pmo} ，得到热释电的响应度 R_p ：

$$R_p = R_c(632.8 \text{ nm}) \times \frac{I_p - I_{po}}{I_{pm} - I_{pmo}} \times \frac{I_{sm} - I_{smo}}{I_s - I_{so}} \quad (\text{B.1})$$

B.2 测量过程

用调制光代替原来的直流光，使光信号转变成交流信号，以减少杂散光、噪声等对测量精度的影响，测量仪器则用锁相放大器代替原来的直流测量仪器进行测量。测量原理如图 B.1。

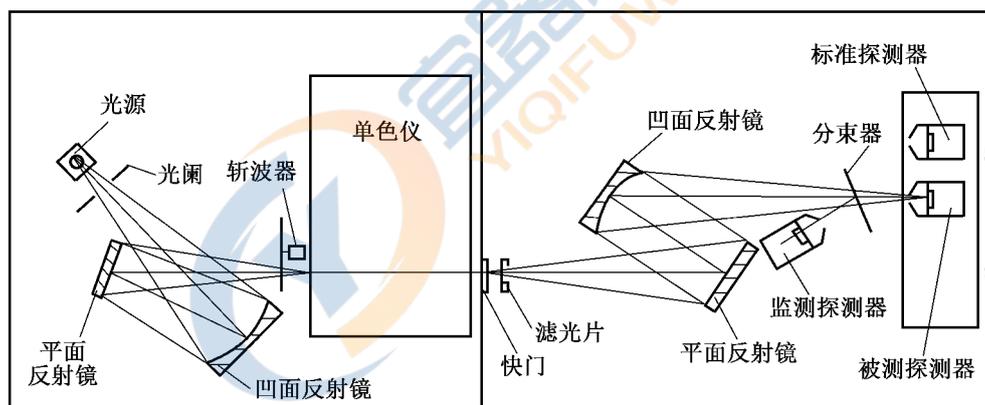


图 B.1 调制信号校准相对光谱响应度装置图

通过光阑、凹面反射镜、平面反射镜、消二级光谱滤光片、斩波器把 250 W 石英卤钨灯灯丝成像在双光栅单色仪的入射狭缝上。斩波调制由稳定速度控制，输出信号送锁相放大器做参考信号，光源由高稳定稳流稳压电源供电。单色仪出射狭缝的辐射通过光学快门，平面反射镜、凹面反射镜、分束器可以分别成像在标准探测器上或被校光电探测器上。标准探测器和被校光电探测器在同一个平台上互换位置，由微机控制定位。分束器反射大约 1/3 辐射到监测探测器上。标准、被测、监测探测信号由 I/U 转换器和锁相放大器得到数字读数，送计算机处理。单色仪、XY 平台、滤光片轮驱动器、光学快门、数据采集、处理、打印、绘图等均由 PC 机自动控制。

在同一装置上，用腔型热释电探测器作标准探测器，对被校光电探测器进行光谱响应度校准，通过计算机控制交替测量热释电标准探测器的光电流 $I_p(\lambda)$ ，暗电流

$I_{po}(\lambda)$ ；监测探测器的光电流 $I_{pm}(\lambda)$ ，暗电流 $I_{pmo}(\lambda)$ ；被校光电探测器的光电流 $I_t(\lambda)$ ，暗电流 $I_{to}(\lambda)$ ；监测探测器的光电流 $I_{tm}(\lambda)$ ，暗电流 $I_{tmo}(\lambda)$ 。计算机将按公式 (B.2) 计算出被校光电探测器的光谱响应度 $R_t(\lambda)$ 。

$$R_t(\lambda) = R_p \times \frac{I_t - I_{to}}{I_{tm} - I_{tmo}} \times \frac{I_{pm} - I_{pmo}}{I_p - I_{po}} \quad (\text{B.2})$$



附录 D

校准证书（报告）内容

校准证书或校准报告内容应排列有序，格式清楚，至少应包括以下信息：

1. 标题：“校准证书”或“校准报告”；
2. 实验室名称和地址；
3. 进行校准的地点；
4. 证书编号、页码及总页数；
5. 校准单位校准专用章；
6. 送校单位的名称和地址；
7. 被校探测器的名称；
8. 被校探测器的制造厂、型号、规格及编号；
9. 被校探测器的接收日期及进行校准的日期；
10. 校准所依据的技术规范名称及代号；
11. 本次校准所用的计量标准的名称及有效期；
12. 校准环境温度、湿度；
13. 校准项目结果及测量不确定度的说明；
14. 复校时间间隔的建议；
15. 校准证书或校准报告校准人签名、核验人签名、批准人签名；
16. 校准证书或校准报告签发日期；
17. 校准结果仅对被校探测器的有效性声明；
18. 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。