



中华人民共和国国家标准

GB/T 41310—2022

视觉模组光电性能的图像式检测方法

Image-based test method for vision module photoelectric performance

2022-03-09 发布

2023-01-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本原理	2
5 检测条件	3
6 仪器设备	3
7 检测样品	3
8 检测步骤	4
8.1 建立检测环境	4
8.2 基础光电参数的检测	5
8.3 空间非均匀性的检测	5
8.4 暗电流特性的检测	5
8.5 光谱灵敏度的检测	6
9 数据处理	6
9.1 基础光电参数的数据处理	6
9.2 空间非均匀性的数据处理	12
9.3 暗电流的数据处理	14
9.4 光谱灵敏度的数据处理	15
10 检测报告	16
参考文献	17

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国光电测量标准化技术委员会(SAC/TC 487)归口。

本文件起草单位：凌云光技术股份有限公司、中国计量科学研究院、西安远望图像技术有限公司、杭州海康机器人技术有限公司、中国科学院空天信息创新研究院、中国科学院微电子研究所、中关村泛亚机器视觉技术产业联盟、深圳市凌云视讯科技有限责任公司、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国计量大学。

本文件主要起草人：张勇、冯兵、徐英莹、李琳骁、洪福星、朱勇、宣建楠、王颖、卢永红、霍云、李俊霖、戚涛、朱晶、李鹏飞、潘芸、张淑琴。

视觉模组光电性能的图像式检测方法

1 范围

本文件描述了视觉模组光电性能的图像式检测方法的基本原理、检测条件、仪器设备、检测样品、检测步骤、数据处理和检测报告。

本文件适用于具有线性光电响应特性的数字视觉模组、配有数字图像采集卡的模拟视觉模组以及作为视觉模组一部分的图像传感器。

注：视觉模组包括单色、彩色、面扫描与线扫描等类型。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.56—2008 电工术语 控制技术

GB/T 29298—2012 数字(码)照相机通用规范

3 术语和定义

GB/T 2900.56—2008、GB/T 29298—2012 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

视觉模组 vision module

将以光为载体的视觉图像进行光电转换并最终输出数字化图像数据的设备。

注：视觉模组一般由互补金属氧化物半导体(CMOS)或电荷耦合器件(CCD)图像传感器和辅助电子器件组成，具有线性光电响应特征，即该模组输出的数字信号随着曝光量的增加而线性增加。整个光电转换过程符合光子转移法(Photon Transfer Method)原理。

3.2

线性度偏差 linearity error; LE

在均匀光照条件下，当辐射量变化时，图像传感器输出信号和理想信号(直线)间的偏差。

3.3

灰度 gray level

将图像中不同像素的明暗程度或颜色深浅进行量化表示，所对应的量化值。

注：也称灰阶，或灰度等级。

3.4

量子效率 quantum efficiency; QE

在规定波长光照下，入射光子在图像传感器产生并被收集的电子数与入射光子数的比值。

3.5

系统总增益 overall system gain

视觉模组的像素工作在线性状态时，所输出的灰度值与其所收集的电子数的比值。

3.6

暗电流 dark current

在无光照条件和规定环境温度下,图像传感器正常工作时自发产生的电流。

注 1:也称无照电流。

注 2:与环境温度和曝光时间呈正相关。

3.7

暗噪声 dark noise

在无光照条件下,曝光时间为零或接近零时,图像传感器输出的固有噪声。

3.8

量化噪声 quantization noise

模拟信号转化为数字信号受像素位深限制而出现随机且均匀分布的量化误差。

注:也称量化误差。

3.9

动态范围 dynamic range; DR

图像传感器可输出的最大可用信号与最小可用信号的比值。

3.10

绝对灵敏度阈值 absolute sensitivity threshold

在规定照射条件下,当输出图像信噪比为 1 : 1 时,图像传感器单个像素或单位面积成像面在一个曝光周期内的等效信号。

注:简称灵敏度。

3.11

饱和容量 saturation capacity

单个像素中线性可容纳的最大电荷量。

3.12

暗信号非均匀性 dark signal non-uniformity; DSNU

在无光照条件下,图像传感器各像素产生的输出信号与输出信号平均值的偏差。

3.13

光响应非均匀性 photo response non-uniformity; PRNU

在均匀光照条件下,图像传感器输出信号半饱和时,不同有效像素之间光电响应特性的偏差。

3.14

空间非均匀性 spatial non-uniformity

图像传感器不同像素间光电响应特性的偏差。

4 基本原理

视觉模组成像单元是由一系列相互独立的像素组成的一维或二维阵列。视觉模组的每个像素在工作时将曝光时间内入射到感光面上的光子转换为电子,然后通过存贮这些电子的电容转换为一定幅值的电压信号,信号经放大与量化变成数字图像中对应像素的灰度值。视觉模组像素工作原理示意图见图 1。



图 1 视觉模组像素工作原理示意图

入射到像素上的一定数量的光子(μ_p, σ_p^2),经光电转换为一定数量的电子(μ_e, σ_e^2),与曝光时间内的暗电流(μ_d, σ_d^2)叠加后,被转换成电压再进行线性模数转换,模数转换中叠加了固定的量化噪声(σ_q^2),最终形成数字灰度值(μ_y, σ_y^2)输出。其中,图像传感器像素曝光产生的光电子(e^-)与其最终输出的数字灰度值(y)之间的转换关系定义为系统总增益(K)。视觉模组像素工作数学模型见图 2。

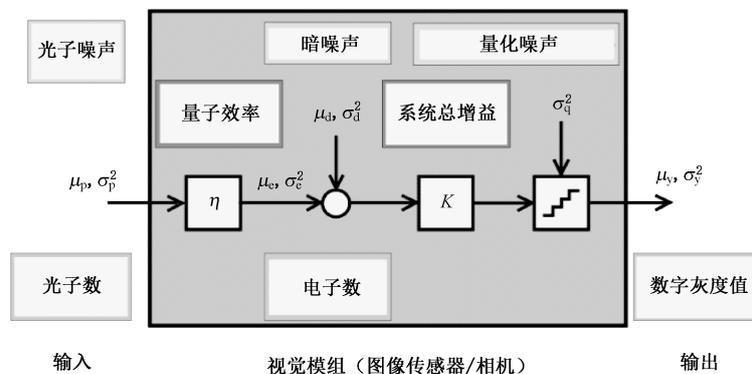


图 2 视觉模组像素工作数学模型示意图

基于视觉模组工作的基本原理,在规定的检测条件下,采用均匀单色光照射被测视觉模组,采集一系列不同曝光条件下的数字图像数据,进行相应的数学计算,即可得到被测样品的响应度、系统总增益、量子效率、时域暗噪声、绝对灵敏度阈值、饱和容量、动态范围、信噪比、线性度、空间非均匀性、暗电流以及光谱灵敏度等光电参数。

5 检测条件

环境温度: $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度: $30\% \sim 80\%$ 。

也可在被测样品允许的工作温度范围内,在其他受控的环境温度及样品工作温度下进行测试,检测过程中环境温度与样品工作温度的变化不得超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (具有温度控制功能的视觉模组除外)。

6 仪器设备

光源光谱的半峰全宽(FWHM)小于 50 nm 。

光源的中心波长满足以下条件:

- 当被测样品为黑白视觉模组时,应选光源的中心波长作为被测样品的最大响应波长;
- 当被测样品为彩色视觉模组时,应选用具有不同波长的光源,其中每个波长接近被测样品不同色彩通道的最大响应波长。

应定期对光源、辐照度计、温度计、温箱等仪器设备进行检定或校准,确保数据的准确度。

7 检测样品

检测过程中,被测视觉模组的参数设置符合下列要求:

- 温度:被测视觉模组的温度在检测过程中应维持稳定;
- 数字分辨率:被测视觉模组的像素位深设置应为最大值,减小测试中量化噪声的影响;
- 增益:设置被测视觉模组的增益,应使每个像素的饱和值达到满阱且信号不溢出;
- 偏置:设置被测视觉模组的偏置,应使被测视觉模组输出的暗信号中出现截止(灰度为零值)的

像素数小于 0.5%；

- e) 采集行数:线阵传感器视觉模组单幅图像应不小于 100 行,并采用面阵传感器的计算公式评估参数;
- f) 辐射曝光量:通过以下三种方法控制被测样品的辐射曝光量:
 - 1) 恒定光照下曝光时间变化:光源亮度固定,应通过调节被测样品曝光时间改变辐射曝光量;
 - 2) 恒定曝光时间下光照变化:被测样品曝光时间固定,应通过调节光源亮度改变辐射曝光量;
 - 3) 恒定曝光时间下使用脉冲照明:被测样品曝光时间固定,应通过调节 LED 光源的脉冲宽度改变辐射曝光量,所选择的曝光时间应大于 LED 最大脉冲宽度的固定值。

检测过程中,除本文件中要求的曝光时间变更外,检测样品的所有设置应保持一致。

8 检测步骤

8.1 建立检测环境

8.1.1 搭建检测装置

根据图 3 搭建检测装置,步骤如下:

- a) 固定均匀单色光源位置;
- b) 根据光源位置固定被测视觉模组,确保光源出光口能够覆盖视觉模组;
- c) 在单色光源均匀照射范围内,且与视觉模组感光面同一平面处放置辐照度计;
- d) 连接视觉模组与数据平台,平台应能够控制视觉模组工作与图像传输;
- e) 检测暗电流时将视觉模组置于温箱内,将温箱温度设置为检测温度;
- f) 温度可控型视觉模组不需使用温箱,通过模组本身设置检测温度;
- g) 检测暗电流时,温度计应当接触视觉模组壳体进行测温。

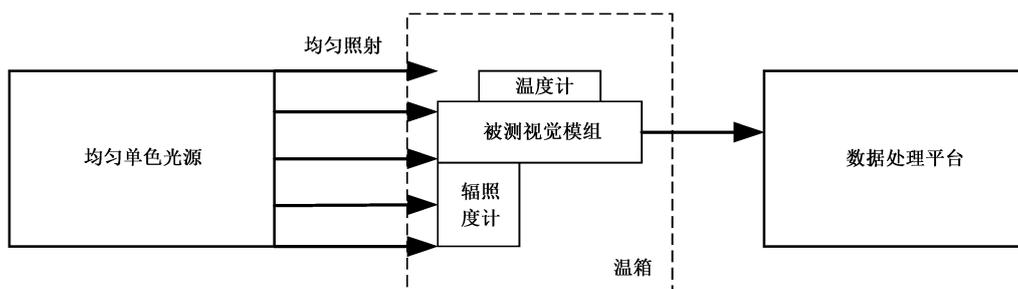


图 3 检测装置示意图

8.1.2 调节检测光路

根据图 4 调节检测光路,步骤如下:

- a) 调节光源与视觉模组之间的位置,使 $f_{\#} = 8$;
- 注 1: $f_{\#}$ 由视觉模组感光面至光源出光口距离(d)与光源出光口直径(D)之比表示, $f_{\#} = d/D$ 。
- b) 调节视觉模组感光面,使感光面与光轴垂直,感光面中心与光轴重合,光源出光口与感光面之间光路应密闭,确保无杂散光干扰测试,视觉模组感光面的直径不能大于面光源的开口直径;
 - c) 光照非均匀性不大于 3%。

注 2:光照非均匀性由视觉模组图像传感器感光面上光辐照度的最大值(E_{\max})与最小值(E_{\min})之差与平均照度(μ_E)

比值的百分比表示, $\Delta E = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{\mu_E} \cdot 100\%$ 。

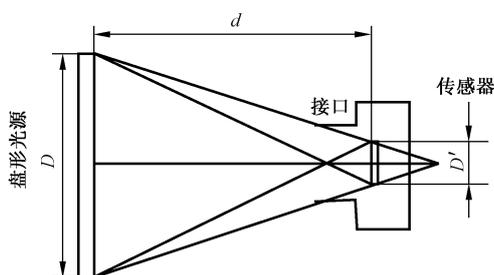


图4 盘形面光源照射图像传感器的示意图

8.2 基础光电参数的检测

基础光电参数包括:响应度、系统总增益、量子效率、时域暗噪声、绝对灵敏度阈值、饱和容量、动态范围、信噪比与线性度。按下列步骤进行检测。

- a) 检测环境中的所有仪器设备通电。
- b) 按照第7章的要求设置好被测样品,记录环境温度,记录辐射曝光条件。
- c) 按照以下步骤进行图像采集:
 - 1) 被测视觉模组开始采集图像,打开光源,从0开始等间隔增加辐射曝光量,直到被测样品饱和输出为止,此时采得图像的平均灰度值不再增加。应至少采集10组不同辐射曝光量的图像;
 - 2) 每种辐射曝光量条件下采集两幅明场图像,并记录辐照度计测得辐照度 E ;
 - 3) 关闭光源,对应每种辐射曝光量的曝光时间采集两幅无光照的暗场图像;
 - 4) 关闭光源,在被测样品可设置的最短曝光时间下采集两幅无光照的暗场图像。
- d) 按照9.1中基础光电参数的计算方法计算响应度、系统总增益、量子效率、时域暗噪声、绝对灵敏度阈值、饱和容量、动态范围、信噪比与线性度。

8.3 空间非均匀性的检测

按下列步骤进行检测。

- a) 检测环境中的所有仪器设备通电。
- b) 按照第7章的要求设置好被测样品,记录环境温度。
- c) 按照下列步骤进行图像采集:
 - 1) 被测视觉模组开始采集图像,打开光源,通过调整辐射曝光量,使被测样品输出图像达到50%饱和灰度值,此时采得图像的平均灰度值为饱和输出时平均灰度值的一半,采集 L ($L \geq 16$)幅明场图像,并记录辐照度计测得辐照度 E ;
 - 2) 关闭光源,保持步骤1)中被测样品的曝光时间不变,关闭光源,采集 L 幅无光照的暗场图像。
- d) 按照9.2中计算方法计算空间非均匀性。

8.4 暗电流特性的检测

8.4.1 暗电流检测

按下列步骤进行检测:

- a) 检测环境中的所有仪器设备通电,关闭光源,将被测样品置于暗场环境中;

- b) 被测样品应先预热到温度不变的稳定状态,即被测样品应达到热平衡状态;
- c) 被测视觉模组开始采集图像,在被测样品的最小曝光至最大曝光的区间内,等间隔选择至少 6 个曝光时间,在每个曝光时间下采集 2 幅图像;
- d) 按照 9.3.1 中计算方法计算暗电流。

8.4.2 暗电流温度依赖性检测

按下列步骤进行检测:

- a) 在被测样品的工作温度范围内,间隔均匀地选择至少 6 个温度点;
- b) 每个温度点按照 8.4.1 中步骤采集图像,并计算每个温度点的暗电流。

8.5 光谱灵敏度的检测

按下列步骤进行检测:

- a) 检测环境中的所有仪器设备通电;
- b) 按照第 7 章的要求设置好被测样品,记录环境温度;
- c) 按第 6 章的要求选择波长可调光源,在被测样品可响应的全波长范围内选择多个测试点,相邻两个测试点的波长间隔应小于或等于光源在对应波长处两倍的半峰全宽值;
- d) 设定光源的波长,打开光源,不要求覆盖被测样品的整个感光面,可选取部分感光区域进行检测。并记录辐照度计测得辐照度 E ;
- e) 被测视觉模组开始采集图像,调整被测样品的辐射曝光量,使所选定的检测区域内输出的图像灰度均值在饱和输出时平均灰度值的 20%~80% 范围内,采集并保存 2 幅明场图像,记录其辐射曝光量以及曝光时间;
- f) 关闭光源,保持步骤 d) 中被测样品的曝光时间不变,采集并保存 2 幅无光照的暗场图像;
- g) 根据 9.1.4 中方法计算对应波长下的量子效率;
- h) 调整单色光源波长到下一个设定值,重复 c)~f) 步骤,直至完成全部所选定波长光照条件下的明场与暗场图像的采集并记录其曝光时间。

9 数据处理

9.1 基础光电参数的数据处理

9.1.1 基础运算

9.1.1.1 概述

按 8.2a)~8.2d) 的步骤采集图像,在每种辐射曝光量条件下,利用采集的图像,分别计算对应不同辐射曝光量时的平均灰度值 μ_y ,暗场的平均灰度值 $\mu_{y,\text{dark}}$,时域方差 σ_y^2 ,暗场时域方差 $\sigma_{y,\text{dark}}^2$,饱和灰度值 $\mu_{y,\text{sat}}$ 、饱和灰度值 $\mu_{y,\text{sat}}$ 和平均光子数 μ_p 。

9.1.1.2 平均灰度值 μ_y

针对每种辐射曝光量条件的两幅明场图像(图像 A 与图像 B),按照公式(1)计算平均灰度值:

$$\mu_y = \frac{1}{2NM} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (y^A[m][n] + y^B[m][n]) \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- μ_y ——平均灰度值;
- N ——图像的列数;
- M ——图像的行数;
- m ——图像的第 m 行;

- n —— 图像的第 n 列；
- $y^A[m][n]$ —— 图像 A 的 m 行 n 列的灰度；
- $y^B[m][n]$ —— 图像 B 的 m 行 n 列的灰度。

9.1.1.3 暗场平均灰度值 $\mu_{y,\text{dark}}$

针对每种辐射曝光量下对应曝光时间的两幅暗场图像(图像 A 与图像 B),按照公式(1)计算暗场平均灰度值。

9.1.1.4 时域方差 σ_y^2

针对每种辐射曝光量条件的两幅明场图像(图像 A 与图像 B),按照公式(2)计算时域方差:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2NM} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (y^A[m][n] - y^B[m][n])^2 - \frac{1}{2} (\mu_y^A - \mu_y^B)^2 \dots\dots\dots (2)$$

式中:

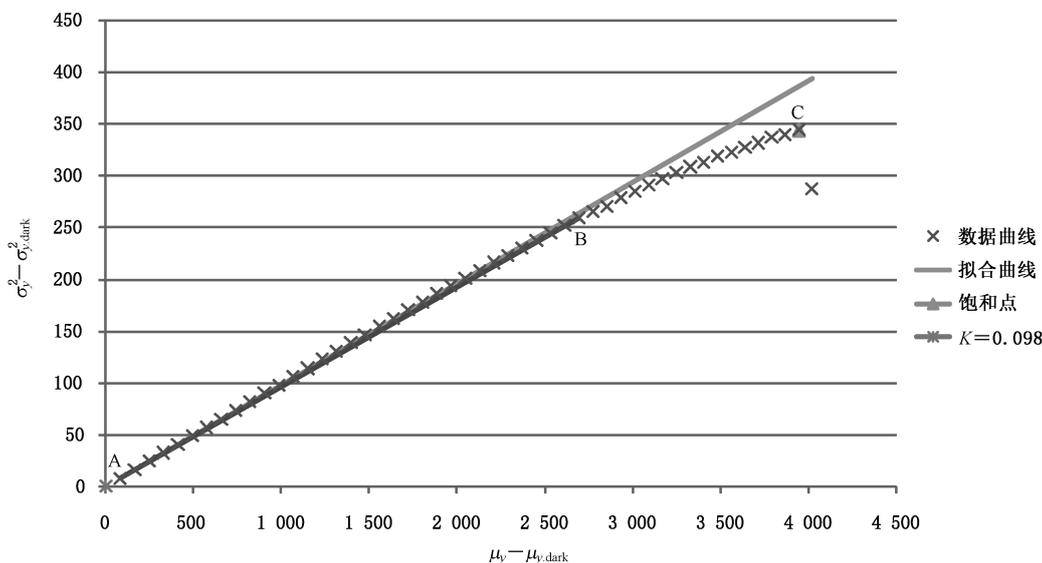
- σ_y^2 —— 时域方差；
- μ_y^A —— 图像 A 所有像素的均值；
- μ_y^B —— 图像 B 所有像素的均值。

9.1.1.5 暗场时域方差 $\sigma_{y,\text{dark}}^2$

针对每种辐射曝光量下对应曝光时间的两幅暗场图像(图像 A 与图像 B),按照公式(2)计算暗场时域方差。

9.1.1.6 绘制光子转移曲线(PTC 曲线)

根据 9.1.1.2~9.1.1.5 计算所得值绘制曲线,其中横轴为 $\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}$,纵轴为 $\sigma_y^2 - \sigma_{y,\text{dark}}^2$,连接每种辐射曝光量下计算得到的 $\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}$ 值与 $\sigma_y^2 - \sigma_{y,\text{dark}}^2$ 值绘得光子转移曲线,利用 A 与 B 间的数据进行线性拟合得到拟合曲线,示例见图 5。



标引序号说明:

- A —— 拟合范围起始点；
- B —— 拟合范围结束点；
- C —— 被测样品饱和点。

注: AB 段为拟合范围。

图 5 光子转移曲线示例

9.1.1.7 饱和灰度值 $\mu_{y,\text{sat}}$

饱和灰度值 $\mu_{y,\text{sat}}$ 是在一定的曝光量条件下,视觉模组输出的图像刚好达到饱和时的平均灰度值。

饱和点的选取,可采用两种方法:

- a) 取不同曝光量明场系列图像中时域标准差 σ_y 最大的工作点,为饱和点,如图 5 中 C 点。
- b) 调整曝光量,当全部像素中完全达到饱和的像素数量占比为 0.1~0.2%之间时,该工作点为饱和点。

9.1.1.8 平均光子数 μ_p

针对每种辐射曝光量条件,按照公式(3)计算平均光子数:

$$\mu_p = \frac{AEt_{\text{exp}}}{hc/\lambda} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- μ_p ——平均光子数;
- A ——被测样品像素面积;
- E ——被测样品成像面的辐照度;
- t_{exp} ——被测样品的曝光时间,当采用第 7 章中的 f)3) 脉冲照明的方式控制辐射曝光量时, t_{exp} 为曝光过程中光源所有脉冲的脉宽之和;
- h ——普朗克常量;
- c ——光的速度;
- λ ——光源的波长。

9.1.2 响应度 R

由公式(4)给出 $\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}$ 与 μ_p 的关系:

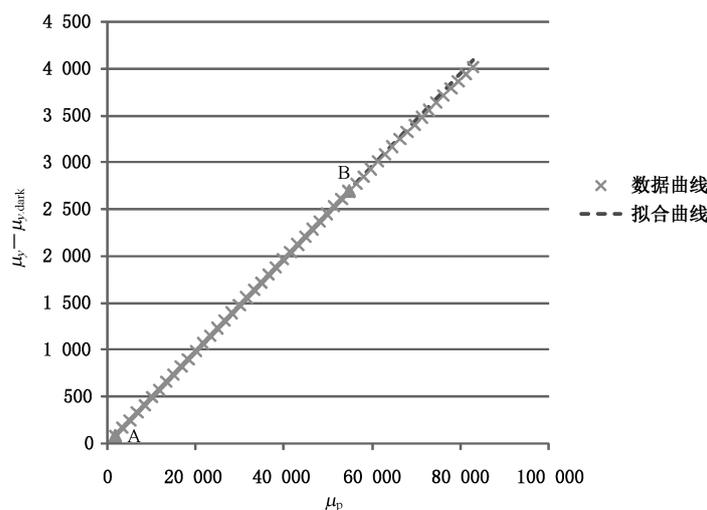
$$\mu_y - \mu_{y,\text{dark}} = R\mu_p \dots\dots\dots(4)$$

式中:

R ——响应度。

绘制响应度曲线,其中横轴为平均光子数 μ_p ,纵轴为 $\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}$,连接每种辐射曝光量下计算得到的 $\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}$ 值绘得响应度曲线,示例如图 6 所示。在最小灰度值(见图 6 中 A 点)与 70%饱和值(见图 6 中 B 点)范围内进行线性回归拟合,所得直线斜率即是响应度 R 。

对于彩色视觉模组,应计算每个色彩通道的响应度 R 。



标引序号说明：

A ——拟合范围起始点；

B ——拟合范围结束点。

注：AB段为拟合范围。

图 6 响应度曲线示例

9.1.3 系统总增益 K

由公式(5)给出 $\sigma_y^2 - \sigma_{y,dark}^2$ 与 $\mu_y - \mu_{y,dark}$ 的关系：

$$\sigma_y^2 - \sigma_{y,dark}^2 = K (\mu_y - \mu_{y,dark}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

K ——系统总增益。

在最小灰度值(见图 5 中 A 点)与 70%饱和值 $[0.7 \times (\mu_{y,sat} - \mu_{y,dark})]$ (见图 5 中 B 点)范围内,对 $\sigma_y^2 - \sigma_{y,dark}^2$ 与 $\mu_y - \mu_{y,dark}$ 进行最小二乘法线性回归,回归曲线的斜率即为系统总增益 K ,示例见图 5。

9.1.4 量子效率 η

按照公式(6)计算该检测波长下的量子效率：

$$\eta = \frac{R}{K} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

η ——量子效率。

9.1.5 时域暗噪声 σ_d

根据 8.2 最短曝光时间采集的两幅暗场图像,按照 9.1.1.5 的方法计算被测样品最小曝光时间下的 $\sigma_{y,dark}$ 。当 $\sigma_{y,dark}^2 < 0.24$ 时, $\sigma_{y,dark}$ 取值为 0.49。

按照公式(7)计算去除量化噪声后的时域暗噪声 σ_d ,单位为电子个数, e^- 。

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_{y,dark}^2 - \sigma_q^2} / K \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

σ_d ——时域暗噪声；

σ_q^2 ——量化噪声,值为 1/12。

9.1.6 绝对灵敏度阈值

当 SNR=1 时, μ_p (SNR) 为绝对灵敏度阈值 $\mu_{p,\min}$, 按照公式(8)计算绝对灵敏度阈值:

$$\mu_{p,\min} = \mu_p(\text{SNR} = 1) = \frac{1}{2\eta} \left[1 + \sqrt{1 + 4(\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2)} \right] \dots\dots\dots(8)$$

式中:

SNR——信噪比。

9.1.7 饱和容量 $\mu_{e,\text{sat}}$

通过图 5 光子响应曲线找到饱和点 C, 并通过曲线得到点对应的 $\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}$ 值, 并在图 6 响应度曲线中根据到 $\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}$ 值确定对应的辐射曝光量 $\mu_{p,\text{sat}}$ 。

按照公式(9)计算饱和容量 $\mu_{e,\text{sat}}$:

$$\mu_{e,\text{sat}} = \eta\mu_{p,\text{sat}} \dots\dots\dots(9)$$

式中:

$\mu_{e,\text{sat}}$ ——饱和容量;

$\mu_{p,\text{sat}}$ ——辐射曝光量。

9.1.8 动态范围 DR

按照公式(10)计算动态范围 DR:

$$\text{DR} = \frac{\mu_{p,\text{sat}}}{\mu_{p,\min}} \dots\dots\dots(10)$$

式中:

DR——动态范围。

9.1.9 信噪比

按照公式(11)计算不同辐射曝光量下的信噪比:

$$\text{SNR} = \frac{\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}}{\sigma_y} \dots\dots\dots(11)$$

按照公式(12)计算理论信噪比:

$$\text{SNR}(\mu_p) = \frac{\eta\mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 + \eta\mu_p}} \dots\dots\dots(12)$$

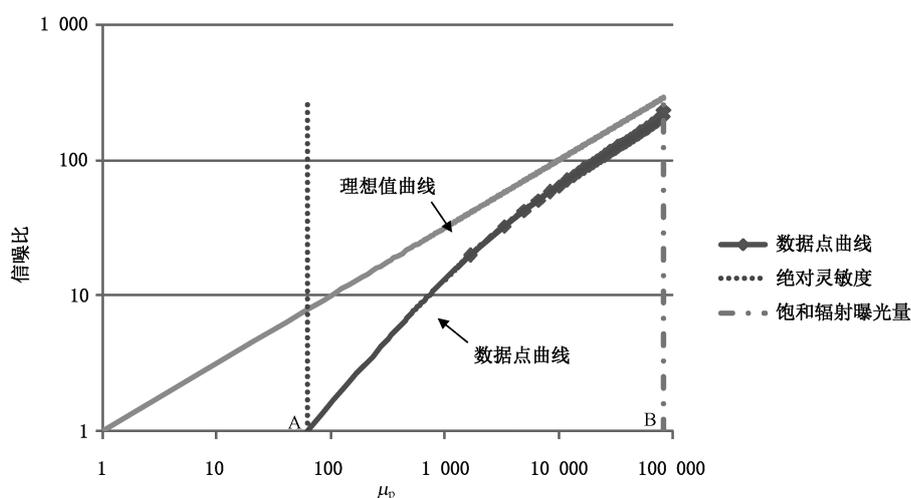
按照公式(13)计算理想信噪比:

$$\text{SNR}_{\text{ideal}} = \sqrt{\mu_p} \dots\dots\dots(13)$$

按照公式(14)计算最大信噪比:

$$\text{SNR}_{\text{max}} = \sqrt{\mu_{e,\text{sat}}} \dots\dots\dots(14)$$

通过 9.1.1 计算得到不同辐射曝光量情况下被测样品的 μ_y 、 $\mu_{y,\text{dark}}$ 、 σ_y , 并按照公式(11)计算对应的 SNR, 坐标轴取双对数后绘制 SNR 曲线, 其中横轴为平均光子数, 纵轴为信噪比 SNR, 信噪比的单位为 dB(20log₁₀ SNR) 和 bits(log₂ SNR)。连接所有辐射曝光量下计算得到的 SNR 绘出数据点曲线, 数据点曲线上标注 SNR=1 时对应的横坐标为绝对灵敏度阈值, 按照公式(12)计算得到的 SNR(μ_p) 绘制出理论信噪比曲线, 按照公式(13)计算得到的 SNR_{ideal} 绘制出理想信噪比曲线, 按照公式(14)计算得到 SNR_{max} 在理想信噪比曲线上标注, 对应横坐标为饱和辐射曝光量, 所有曲线示例见图 7。



标引序号说明：
 A —— 绝对灵敏度阈值；
 B —— 饱和辐射曝光量。

图 7 SNR 曲线图示例

9.1.10 线性度

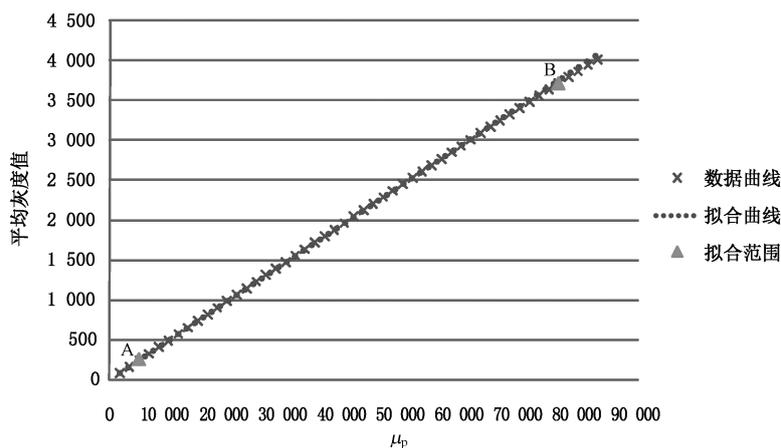
线性度评估应至少要使用 9 组平均灰度值 $\mu_y[i]$ (i : 曝光时间) 和辐射曝光量 $H[i]$ (这里用平均光子数 μ_p 表示), 采用最小二乘线性回归来确定其线性关系见公式(15):

$$y = a_0 + a_1 H \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

- a_0 —— 拟合直线的截距;
- a_1 —— 拟合直线的斜率。

绘制线性度评估曲线, 其中横轴为平均光子数 μ_p , 纵轴为平均灰度值 $\mu_y[i]$, 连接不同辐射曝光量下线性度值并进行拟合得到拟合曲线, 示例见图 8。



标引序号说明：
 A —— 拟合范围起始点；
 B —— 拟合范围结束点。
 注：AB 段为拟合范围。

图 8 线性度评估示例

由线性回归曲线的偏离量来确定线性度偏差。最小二乘的代价函数为公式(16):

$$\sum_i \frac{1}{y[i]^2} [y[i] - (a_0 + a_1 H[i])]^2 \dots\dots\dots (16)$$

式中：

$$y[i] = \mu_y[i] - \mu_{y,\text{dark}}[i]$$

只选用 $(\mu_{y,\text{sat}} - \mu_{y,\text{dark}})$ 在5%(图8中A点)到95%(图7中B点)饱和范围内的 $y[i]$ 与 $H[i]$ 值进行计算。 $\mu_{y,\text{dark}}$ 和 $\mu_{y,\text{sat}}$ 分别是暗场灰度值和饱和灰度值。

按照公式(17)计算相对偏差：

$$\delta_y[i] = \frac{100(y[i] - (a_0 + a_1 H[i]))}{a_0 + a_1 H[i]} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

$\delta_y[i]$ ——相对偏差，%。

按照公式(18)计算所有相对偏差绝对值的算术平均值得到线性度偏差：

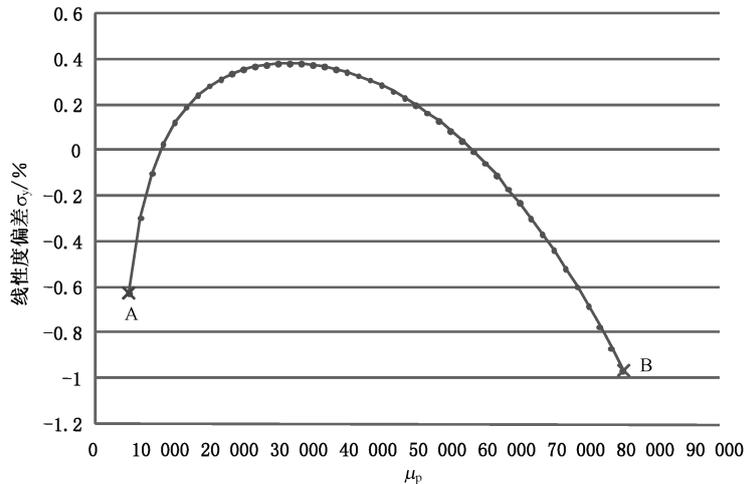
$$LE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_y[i]| \dots\dots\dots (18)$$

式中：

LE——线性度偏差，%；

n ——5%~95%范围内，被统计计算的测量点总数。

绘制线性度偏差曲线，其中横轴为平均光子数 μ_p ，纵轴为线性度偏差 $\delta_y[i]$ ，连接不同辐射曝光量下线性度偏差值得到曲线，示例见图9。图9中AB标示出了饱和的5%~95%范围，在此范围内按公式(18)来计算线性度偏差曲线。



标引序号说明：

A——线性度偏差计算范围起始点；

B——线性度偏差计算范围结束点。

图9 线性度偏差评估示例

9.2 空间非均匀性的数据处理

根据8.3中采集的L幅明场图像和L幅暗场图像计算得到 $\langle y \rangle$ ，按公式(19)~公式(20)计算半饱和的明场均值图像与暗场均值图像 $\mu_{\langle y \rangle}$ ：

$$\langle y \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} y[l] \dots\dots\dots (19)$$

$$\mu_{\langle y \rangle} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \langle y \rangle[m][n] \dots\dots\dots (20)$$

式中：

$\langle y \rangle$ —— L 幅明场或暗场图像按像素平均后的均值图像；

$\mu_{\langle y \rangle}$ ——明场或暗场均值图像的平均灰度值。

对半饱和明场均值图像进行高通滤波,使用以下三个滤波器依次进行滤波:1 个 7×7 盒式滤波器,1 个 11×11 盒式滤波器以及 1 个 3×3 二项式滤波器,得到一幅低频均值图像。原始的半饱和明场均值图像减掉此低频均值图像,即得到高通滤波后的半饱和均值图像 $\langle y \rangle_{50}$ 。

对暗场均值图像 $\langle y \rangle_{\text{dark}}$ 与高通滤波后的半饱和均值图像 $\langle y \rangle_{50}$,按照公式(21)~公式(24)计算得到 s_y^2 ：

$$s_{\langle y \rangle}^2 = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\langle y \rangle[m][n] - \mu_{\langle y \rangle})^2 \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$\sigma_{S[m][n]}^2 = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} (y[l][m][n] - \langle y \rangle[m][n])^2 \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$\sigma_{y,\text{stack}}^2 = \frac{1}{NM} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{S[m][n]}^2 \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$s_y^2 = s_{\langle y \rangle}^2 - \frac{\sigma_{y,\text{stack}}^2}{L} \quad \dots\dots\dots(24)$$

式中：

$s_{\langle y \rangle}^2$ ——测量方差；

$\sigma_{y,\text{stack}}^2$ —— $\langle y \rangle$ 图像的时域噪声残留方差；

s_y^2 ——空域方差；

利用 9.1.3 中的得到的 K 值,按照公式(25)计算 DSNU,按照公式(26)计算 PRNU：

$$\text{DSNU} = \frac{S_{y,\text{dark}}}{K} \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$\text{PRNU} = \frac{\sqrt{S_{y,50}^2 - S_{y,\text{dark}}^2}}{\mu_{y,50} - \mu_{y,\text{dark}}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(26)$$

式中：

$S_{y,\text{dark}}$ —— L 幅暗场平均图像的空域标准差；

$S_{y,50}$ —— L 幅 50% 饱和平均图像的空域标准差；

$\mu_{y,50}$ —— L 幅 50% 饱和平均图像的平均灰度值；

$\mu_{y,\text{dark}}$ —— L 幅暗场平均图像的平均灰度值。

视觉模组的空间非均匀性可以进一步细分为行、列及像素非均匀性,以更好的定量评估其非均匀性特征,见公式(27)：

$$s_y^2 = s_{y,\text{row}}^2 + s_{y,\text{col}}^2 + s_{y,\text{pixel}}^2 \quad \dots\dots\dots(27)$$

式中：

$s_{y,\text{row}}^2$ —— L 幅平均图像的行空域标准差；

$s_{y,\text{col}}^2$ —— L 幅平均图像的列空域标准差；

$s_{y,\text{pixel}}^2$ —— L 幅平均图像的像素空域标准差。

对 L 幅图像按像素平均后的图像分别对行、列取平均,得到公式(28)与公式(29)：

$$\mu_y[n] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \langle y \rangle[m][n] \quad \dots\dots\dots(28)$$

$$\mu_y[m] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \langle y \rangle[m][n] \quad \dots\dots\dots(29)$$

式中：

$\mu_y[n]$ —— L 幅图像的行平均灰度；

$\mu_y[m]$ —— L 幅图像的列平均灰度。

按照公式(30)和公式(31)计算 $s_{y,cav}^2$ 与 $s_{y,rav}^2$ ：

$$s_{y,cav}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\mu_y[n] - \mu_{(y)})^2 - \frac{\sigma_y^2}{LN} \dots\dots\dots (30)$$

$$s_{y,rav}^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-1} (\mu_y[m] - \mu_{(y)})^2 - \frac{\sigma_y^2}{LM} \dots\dots\dots (31)$$

式中：

$s_{y,cav}^2$ ——中间变量；

$s_{y,rav}^2$ ——中间变量；

按照公式(32)~公式(34)计算 $s_{y,row}^2$ 、 $s_{y,col}^2$ 和 $s_{y,pixel}^2$ ：

$$s_{y,row}^2 = \frac{N}{N-1} s_{y,cav}^2 - \frac{1}{N-1} s_y^2 \dots\dots\dots (32)$$

$$s_{y,col}^2 = \frac{M}{M-1} s_{y,rav}^2 - \frac{1}{M-1} s_y^2 \dots\dots\dots (33)$$

$$s_{y,pixel}^2 = \frac{MN-1}{(M-1)(N-1)} s_y^2 - \frac{N}{N-1} s_{y,cav}^2 - \frac{M}{M-1} s_{y,rav}^2 \dots\dots\dots (34)$$

9.3 暗电流的数据处理

9.3.1 暗电流

被测样品的暗噪声信号与曝光时间的关系见公式(35)：

$$\mu_d = \mu_{d,0} + \mu_1 t_{exp} \dots\dots\dots (35)$$

式中：

μ_d ——暗噪声信号的数值,单位为电子个数(e^-)；

$\mu_{d,0}$ ——暗噪声信号(曝光时间为0)的数值；

μ_1 ——暗电流的数值,单位为电子个数每秒(e^-/s)；

t_{exp} ——曝光时间的数值,单位为秒(s)。

利用 8.4.1 采集的不同曝光时间暗场图像,按照 9.1.1.3 计算对应的暗场平均灰度值,绘制暗场平均值与曝光时间线性关系曲线,横轴为曝光时间 t_{exp} ,纵轴为各曝光时间下暗场图像平均值 μ_y ,示例见图 10。通过最小二乘法得到曲线斜率 a_μ ,使用 9.1.3 中得到的 K ,通过公式(36)计算暗电流 μ_1 ：

$$\mu_1 = \frac{a_\mu}{K} \dots\dots\dots (36)$$

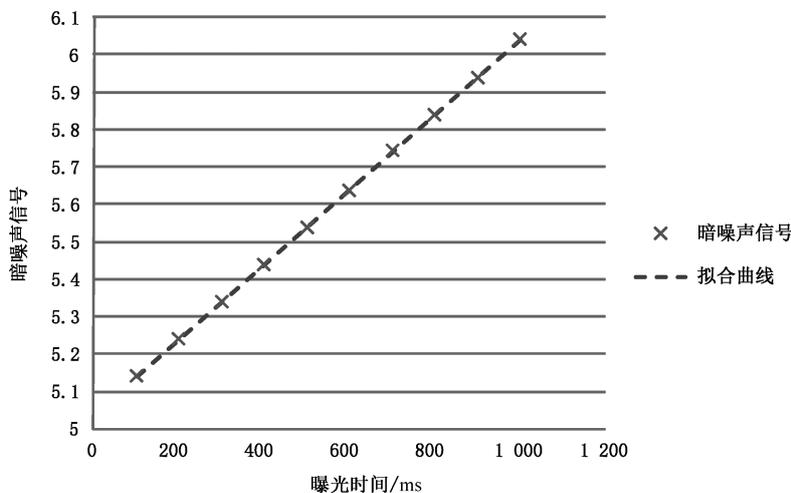


图 10 暗噪声信号与曝光时间线性关系示例

当被测样品具有暗电流补偿时,按照公式(37)描述暗噪声方差与暗电流的关系:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y,0}^2 + a_\sigma t_{\text{exp}} \quad \dots\dots\dots(37)$$

利用 8.4.1 采集的不同曝光时间暗场图像,按照 9.1.1.4 计算对应的 σ_y^2 ,绘制暗噪声方差与曝光时间线性关系曲线,横轴为曝光时间 t_{exp} ,纵轴为各曝光时间下暗噪声方差 σ_y^2 ,示例见图 11。通过最小二乘法得到曲线斜率 a_σ ,使用 9.1.3 得到的 K ,按照公式(38)计算暗电流 μ_1 :

$$\mu_1 = \frac{a_\sigma}{K^2} \quad \dots\dots\dots(38)$$

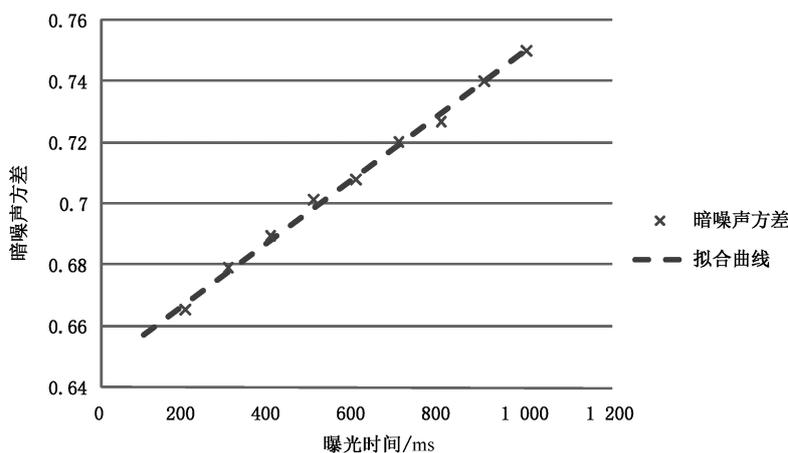


图 11 暗噪声方差对曝光时间的线性关系示例

9.3.2 暗电流加倍温差

按 8.4.2 采集的图像,按 9.3.1 计算出不同温度下的暗电流 μ_1 ,选择最小温度点为起点 T_{ref} ,其对应的暗电流值为 $\mu_{1,\text{ref}}$ 。

按照公式(39),绘制 $\log_{10} \mu_1 T$ 变化的对数曲线:

$$\log_{10} \mu_1 = \log_{10} \mu_{1,\text{ref}} + \log_{10} 2 \cdot \frac{T - T_{\text{ref}}}{T_d} \quad \dots\dots\dots(39)$$

式中:

- T_{ref} ——参考温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
- $\mu_{1,\text{ref}}$ ——参考温度下的暗电流,单位为电子个数每秒(e^-/s);
- T ——被测样品壳体测量到的温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
- T_d ——暗电流加倍温差。

公式(39)中线性回归曲线的斜率定义为 s ,按照公式(40)计算 T_d :

$$T_d = \frac{\log_{10} 2}{s} \quad \dots\dots\dots(40)$$

式中:

s ——公式(39)线性回归曲线的斜率。

注:很多最新的图像传感器已不符合“暗电流加倍温差”的对数线性规律,因此无法得到有意义的“线性回归曲线的斜率”。对此类图像传感器,暗电流加倍温差已无意义,只需要测量所需要的不同温度条件下的暗电流并绘制暗电流随温度变化的曲线即可。

9.4 光谱灵敏度的数据处理

利用 8.5 获取的图像,按照 9.1.4 计算各波长下的量子效率,绘制光谱灵敏度曲线,横轴为检测用光

源的波长,纵轴为使用各波长时计算得到的量子效率,连接数据曲线,示例见图 12。

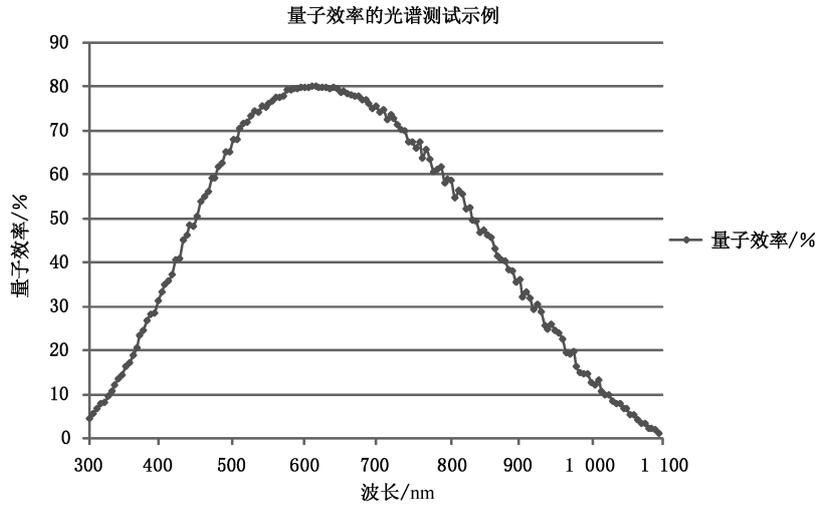


图 12 量子效率的光谱测试示例

10 检测报告

检测报告至少应给出以下内容:

- 试验对象;
- 所使用的标准(包括发布或出版年号);
- 所使用的方法(如果标准中包括几个方法);
- 结果;
- 观察到的异常现象;
- 试验日期;
- 所选光源的峰值波长 λ_p 、质心波长 λ_c 、半峰全宽 FWHM;
- 检测时的环境温度与样品工作温度,以及温度的控制方式;
- 检测时选取饱和点的方法;
- 影响样品性能的参数如增益。

参 考 文 献

[1] EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras Release 4.0 Linear. https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288Linear_4.0Release.pdf

[2] EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras Release 3.1. <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.1a.pdf>
