



中华人民共和国工业和信息化部
电子计量技术规范

JJF(电子) XXXX—XXXX

光源频闪测试仪校准规范

Calibration Specification for Light Flicker Meters

(报批稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

光源频闪测试仪 校准规范

Calibration Specification for Light Flicker
Meters

JJF (电子) XXXX—XXXX

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：广电计量检测集团股份有限公司
中国电子技术标准化研究院

参加起草单位：广东省半导体照明产业技术研究院

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

李文兴（广电计量检测集团股份有限公司）

张 辉（广电计量检测集团股份有限公司）

黄雪吟（中国电子技术标准化研究院）

潘 乔（广电计量检测集团股份有限公司）

参加起草人：

吴华龙（广东省半导体照明产业技术研究院）

刘 冲（广电计量检测集团股份有限公司）

王卓念（广电计量检测集团股份有限公司）

目录

引言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
3.1 闪烁指数	1
3.2 闪烁百分比	2
3.3 频闪可视性测量	2
3.4 短期闪烁指示值	2
4 概述	3
5 计量特性	3
5.1 闪烁频率	3
5.2 闪烁指数	3
5.3 闪烁百分比	3
5.4 频闪可视性测量	3
5.5 短期闪烁指示值	3
5.6 光照度	4
6 校准条件	4
6.1 环境条件	4
6.2 测量标准及其他设备	4
7 校准项目和校准方法	5
7.1 外观及工作正常性检查	5
7.2 闪烁频率	5
7.3 闪烁指数	6
7.4 闪烁百分比	7
7.5 频闪可视性测量	8
7.6 短期闪烁指示值	8
7.7 光照度	9
8 校准结果表达	10
9 复校时间间隔	11
附录 A 原始记录格式	12
附录 B 校准证书内页格式	15
附录 C 主要项目校准结果不确定度评定示例	18
附录 D 闪烁指数参考值的修正	37
附录 E 闪烁百分比波形编制方案	39
附录 F 频闪可视性测量 SVM 特征值	41
附录 G 短期闪烁指示值 P_{st} 特征值	43

引言

本规范依据 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

光源频闪测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于波长范围 380nm~780nm 光源频闪测试仪的校准, 其他具有光源频闪参数测量功能的仪器校准可参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

JJG 245 光照度计检定规程

JJF 1989 光谱照度计校准规范

GB/T 17626.15 电磁兼容 试验和测量技术 闪烁仪 功能和设计规范

GB/T 42064 普通照明用设备 闪烁特性 光闪烁计测试法

IEEE 1789 在高亮度发光二极管中调节电流以减轻对观众健康风险的推荐性操作规范 (IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers)

NEMA 77 时间光伪影: 验收标准的测试方法和指南 (Temporal Light Artifacts: Test Methods and Guidance for Acceptance Criteria)

CIE TN 006 时间调制的照明系统的视觉方面——定义及测量模型 (Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems-Definitions and Measurement Models)

IEC TR 61547-1 一般照明设备电磁兼容性抗扰度要求第 1 部分: 目标光闪烁计和电压波动抗扰度试验方法 (Equipment for General Lighting Purposes - EMC Immunity Requirements - Part 1: Objective Light Flickermeter and Voltage Fluctuation Immunity Test Method)

凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用于本规范; 凡是不注日期的引用文件, 其最新版本 (包括所有的修改单) 适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 闪烁指数 flicker index

在一个周期内, 光信号波形高于平均光输出水平的面积与该周期范围内光输出曲线下总面积的比值。

$$\text{闪烁指数} = \frac{S_1}{S_1 + S_2}$$

其中, S_1 为平均光输出水平以上的波形面积, S_2 为平均光输出水平以下的波形面积。

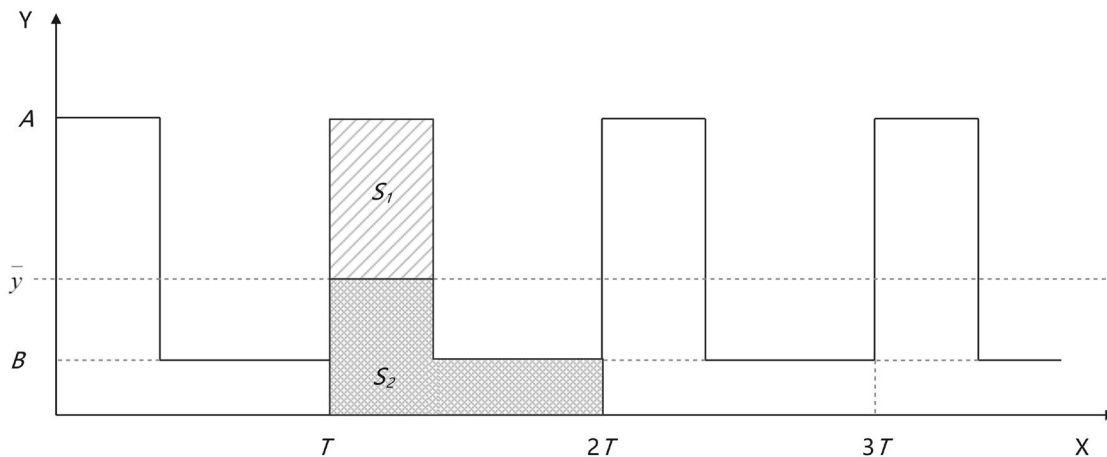


图 1 闪烁指数定义图

3.2 闪烁百分比 flicker percentage

光源输出周期变化的相对度量。它由以下表达式给出:

$$\text{闪烁百分比} = \frac{A - B}{A + B} \times 100\%$$

其中 A 是一个周期内光信号的最大值, B 为最小值。

3.3 频闪可视性测量 stroboscopic visibility measure

出自 CIE TN 006, 通过对光波形进行计算, 用于表示频闪效应可见性阈值的度量, 简称 SVM 。频闪可视性测量 SVM 通过下式进行计算:

$$SVM = \sqrt[n]{\sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{C_m}{T_m}\right)^n}$$

其中, C_m 为光信号 m 阶傅里叶分量的幅值; T_m 为第 m 阶傅里叶分量频率的频闪可视性阈值, 采用下式进行计算:

$$T_m(f) = \frac{1}{1 + e^{-a(f-b)}} + 20e^{-\frac{f}{10}}$$

式中, $a=0.00518s$, $b=306.6Hz$, $n=3.7$, f 取值不超过 2000Hz。

3.4 短期闪烁指示值 (闪变指数) short-term flicker indicator

出自 IEC TR 61547, 在规定的相对较短的时间间隔内持续测量光源闪烁, 用于评价光源产品由于电压波动所引起可见闪烁影响, 简称 P_{st} 。使用闪烁测量仪 5 电平等级分

类器的时间-电平统计得到，测量时间为 $T_{st}=10\text{min}$ ， P_{st} 使用以下公式计算：

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}}$$

其中，百分数 $P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 、 P_{50} 是测量周期内，在 0.1%、1%、3%、10%、50%时间点上超出的闪烁电平。公式的后缀 s 表示应使用平滑值，使用下式进行计算：

$$P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3$$

$$P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5$$

$$P_{3s} = (P_{2.2} + P_3 + P_4)/3$$

$$P_{1s} = (P_{0.7} + P_1 + P_{1.5})/3$$

4 概述

光源频闪测试仪用于对各类灯具的频闪效应进行测量和分析，在灯具的生产、出口认证、检验检测、产品监督、环境评价等领域均有广泛的应用。光源频闪测试仪一般由光学探头、采样及分析单元、显示单元三部分组成。光学探头将频闪光信号转换为电信号并发送到采样及分析单元，采样及分析单元对电信号进行时域及频域波形分析，计算各频闪光参量，再由显示单元对结果进行显示，其原理如图 2 所示。

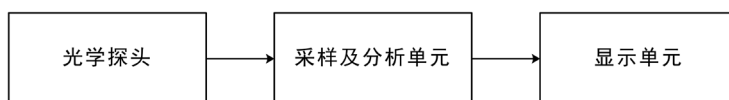


图 2 光源频闪测试仪原理图

5 计量特性

5.1 闪烁频率

范围：1Hz~120kHz，最大允许误差：±(1%~5%);

5.2 闪烁指数

范围：0.01~0.99，最大允许误差：±(1%~5%);

5.3 闪烁百分比

范围：(1~100)%，最大允许误差：±(1%~5%);

5.4 频闪可视性测量

范围：0.1~20，最大允许误差：±(1%~5%);

5.5 短期闪烁指示值

范围：0.1~30，最大允许误差：±(1%~5%);

5.6 光照度

范围: $(0.1\sim 3000)\text{lx}$, 最大允许误差: $\pm(2\%\sim 6\%)$ 。

注: 以上技术指标不作合格性判定, 仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度: $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$;

6.1.2 相对湿度: $\leq 75\%$;

6.1.3 电源要求: $(110\pm 11)\text{V}$ 或 $(220\pm 22)\text{V}$ 、 $(50\pm 1)\text{Hz}$;

6.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动, 建议在光学暗室中校准, 或采用遮光筒等有效的环境光遮蔽措施。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 频率计

频率范围: $1\text{Hz}\sim 120\text{kHz}$, 最大允许误差 $\pm 1\times 10^{-5}$;

6.2.2 光电探测器

波长范围: $380\text{nm}\sim 780\text{nm}$;

频带宽度: $\geq 100\text{MHz}$;

上升时间: $\leq 3.5\text{ns}$;

增益: $\geq 30\text{dB}$

6.2.3 示波器

频带宽度: $\geq 100\text{MHz}$;

上升时间: $\leq 3.5\text{ns}$;

6.2.4 任意波形发生器

频率范围: $1\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$, 最大允许误差 $\pm 1\times 10^{-5}$;

幅度范围: $1\text{V}\sim 10\text{V}$, 最大允许误差 $\pm(1\%\sim 2\%)$;

6.2.5 光照度校准装置

6.2.5.1 光度测量装置

由光轨及滑车、灯架、灯丝平面调整仪、光阑等组成。光轨长度 $\geq 6\text{m}$ 。光轨平直性误差应 $\leq \pm 1\text{mm}$, 测距米尺 1m 内的总误差 $\leq 0.2\text{mm}$ 。

6.2.5.2 电源与电测仪表

电源：直流稳压电源，输出电压连续可调，(0~120)V/(0~10)A，10min 内输出电压变化应 $\leq 0.02\%$ 。

电测仪表：数字电压表、标准电阻，最大允许误差 $\pm 0.02\%$ 。

6.2.5.3 发光强度标准灯组

2856K 的一级或二级标准灯组。

6.2.6 准直发光二极管

发光功率： $\geq 1\text{W}$ ；

驱动电压：3V~6V；

调制带宽/截止频率： $\geq 120\text{kHz}$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 外观及工作正常性检查

被校光源频闪测试仪的仪器名称、型号、制造厂名或商标、出厂编号、额定输入电压和频率、端钮标志等信息应齐全；端钮、开关、按键和调节旋钮应无松动、损伤、脱落；各种功能标志应齐全正确。通电后开关、按键、调节旋钮、显示屏、测量仪表和各种状态指示灯（标志）应工作正常。

7.2 闪烁频率

7.2.1 按图 3 连接设备，准直发光二极管、被校光源频闪测试仪的接收面应保持在同一直线上，或使用光具座。被校光源频闪测试仪的光接收面放置在距离准直发光二极管光输出 5cm~10cm 处。

7.2.2 设置任意波形发生器的输出频率至待测频率，适当设置任意波形发生器的输出电压使其大于发光二极管的工作电压，且发光二极管的输出光功率应在被校光源频闪测试仪的额定测量范围内，任意波形发生器信号类型选择方波。

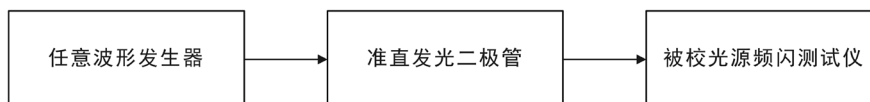


图 3 闪烁频率校准示意图

7.2.3 读取被校光源频闪测试仪的闪烁频率示值 f_x ，记录到原始记录 A.2 中，并按下式计算闪烁频率示值误差。

$$\Delta f = f_x - f_0$$

式中：

Δf ——闪烁频率示值误差, Hz;

f_x ——被校光源频闪测试仪闪烁频率示值, Hz;

f_0 ——任意波形发生器输出标准频率值, Hz。

7.2.4 在被校光源频闪测试仪的测量范围内, 以一定步进 (建议 1、2、5 步进) 选取其他校准点, 重复步骤 7.2.2、7.2.3。

7.3 闪烁指数

7.3.1 按图 4 实线连接设备, 准直发光二极管、被校光源频闪测试仪的接收面应保持在同一直线上, 或使用光具座。光电探测器放置在距离准直发光二极管光输出 5cm~10cm 处。

7.3.2 设置任意波形发生器的输出频率为某一值, 适当设置任意波形发生器的输出电压使其大于发光二极管的工作电压, 且发光二极管的输出光功率应在被校光源频闪测试仪的额定测量范围内。任意波形发生器信号类型选择矩形波, 矩形波占空比设置为待校准点, 从示波器中读取占空比测量值 d , 取 $(1-d)$ 作为闪烁指数参考值 FI_{ref} , 记录到原始记录 A.3 中。闪烁指数参考值也可以使用频率计进行测量。

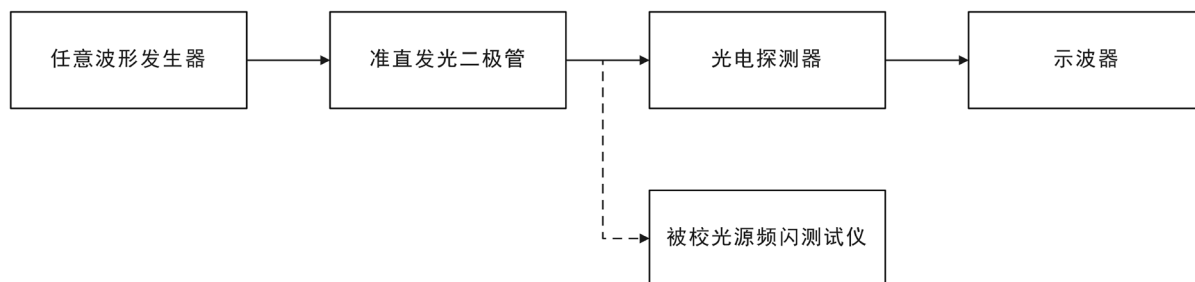


图 4 闪烁指数校准示意图

7.3.3 按图 4 虚线连接设备, 用被校光源频闪测试仪替换标准光电探测器和示波器。从被校光源频闪测试仪中读取闪烁指数示值 FI_x , 记录到原始记录 A.3 中, 并按下式计算闪烁指数示值误差。

$$\Delta FI = FI_x - FI_{\text{ref}}$$

式中:

ΔFI ——闪烁指数示值误差;

FI_x ——被校光源频闪测试仪闪烁指数示值;

FI_{ref} ——闪烁指数的参考值。

7.3.4 在被校光源频闪测试仪的测量范围内, 选取其他校准点, 重复步骤 7.3.2、7.3.3。

7.4 闪烁百分比

7.4.1 按图 5 实线连接设备, 准直发光二极管、被校光源频闪测试仪的接收面应保持在同一直线上, 或使用光具座。光电探测器放置在距离准直发光二极管光输出 5cm~10cm 处。

7.4.2 设置任意波形发生器的输出频率为某一值, 信号类型选择矩形波, 调节输出信号的高低电平, 保证高电平输出电压大于发光二极管的工作电压并且使示波器显示的矩形波高低电平值符合附录 E 表 E.1 要求, 发光二极管的输出光功率应在被校光源频闪测试仪的额定测量范围内。校准过程中, 打开示波器的高电平 U_H 、低电平 U_L 测量功能, 再使用示波器的 Math 数学运算功能, 新建一个数学运算算子使得 $\text{Math}=U_L/U_H$ 并进行实时监测, 分别调节任意波形发生器矩形波信号的高低电平, 直至示波器上显示的矩形波信号高低电平比值 U_L/U_H 与附录 E 表 E.1 要求一致为止, 得到对应的闪烁百分比的参考值 FP_{ref} , 记录到原始记录 A.4 中。

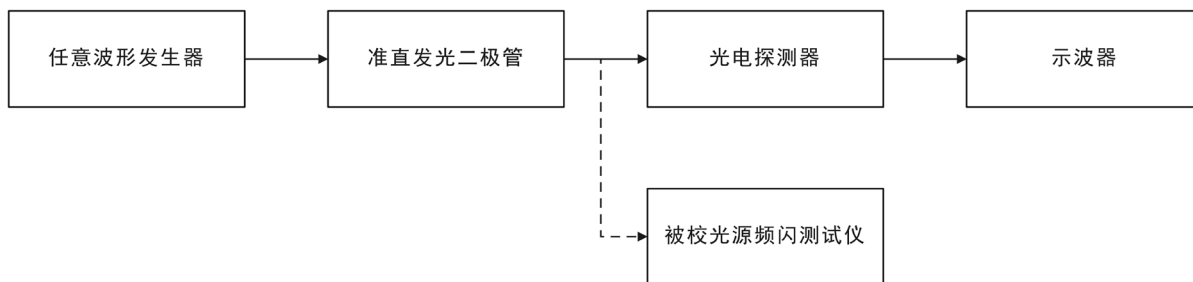


图 5 闪烁百分比校准示意图

7.4.3 按图 5 虚线连接设备, 用被校光源频闪测试仪替换标准光电探测器和示波器。从被校光源频闪测试仪中读取闪烁百分比示值 FP_x , 记录到原始记录 A.4 中, 并按下式计算闪烁百分比示值误差。

$$\Delta FP = FP_x - FP_{\text{ref}}$$

式中:

ΔFP ——闪烁百分比示值误差, %;

FP_x ——被校光源频闪测试仪闪烁百分比示值, %;

FP_{ref} ——闪烁百分比的参考值, %。

7.4.4 在被校光源频闪测试仪的测量范围内, 选取其他校准点, 重复步骤 7.4.2、7.4.3。

7.5 频闪可视性测量

7.5.1 按图 3 连接设备, 准直发光二极管、被校光源频闪测试仪的接收面应保持在同一直线上, 或使用光具座。被校光源频闪测试仪的光接收面放置在距离准直发光二极管光输出 5cm~10cm 处。

7.5.2 按附录 F 表 F.1 选取测量点, 设置任意波形发生器的波形、频率、占空比参数, 适当设置任意波形发生器的输出电压使其大于发光二极管的工作电压, 且发光二极管的输出光功率应在被校光源频闪测试仪的额定测量范围内。被校光源频闪测试仪的采样频率设置为 100kHz、统计频率范围设置为 1Hz~2000Hz。

7.5.3 读取被校光源频闪测试仪的频闪可视性测量示值 SVM_x , 记录到原始记录 A.5 中, 并按下式计算频闪可视性测量示值误差。

$$\Delta SVM = SVM_x - SVM_0$$

式中:

ΔSVM ——频闪可视性测量示值误差;

SVM_x ——被校光源频闪测试仪频闪可视性测量示值;

SVM_0 ——频闪可视性测量参考值。

7.5.4 重复步骤 7.5.2、7.5.3, 对其他测量点进行校准。

7.6 短期闪烁指示值

7.6.1 按图 3 连接设备, 准直发光二极管、被校光源频闪测试仪的接收面应保持在同一直线上, 或使用光具座。被校光源频闪测试仪的光接收面放置在距离准直发光二极管光输出 5cm~10cm 处。

7.6.2 按附录 G 表 G.1 选取测量点, 设置任意波形发生器的波形、频率、占空比参数, 适当设置任意波形发生器的输出电压使其大于发光二极管的工作电压, 且发光二极管的输出光功率应在被校光源频闪测试仪的额定测量范围内。被校光源频闪测试仪的采样频率设置为 10kHz。

7.6.3 读取被校光源频闪测试仪的短期闪烁指示值示值 Pst_x , 记录到原始记录 A.6 中, 并按下式计算短期闪烁指示值示值误差。

$$\Delta Pst = Pst_x - Pst_0$$

式中:

ΔPst ——短期闪烁指示值示值误差;

Pst_x ——被校光源频闪测试仪短期闪烁指示值示值;

Pst_0 ——短期闪烁指示值参考值。

7.6.4 重复步骤 7.6.2、7.6.3, 对其他测量点进行校准。

7.7 光照度

对光源频闪测试仪的光照度校准，参照 JJG 245《光照度计检定规程》的 6.3.2 执行，校准装置如下图所示。

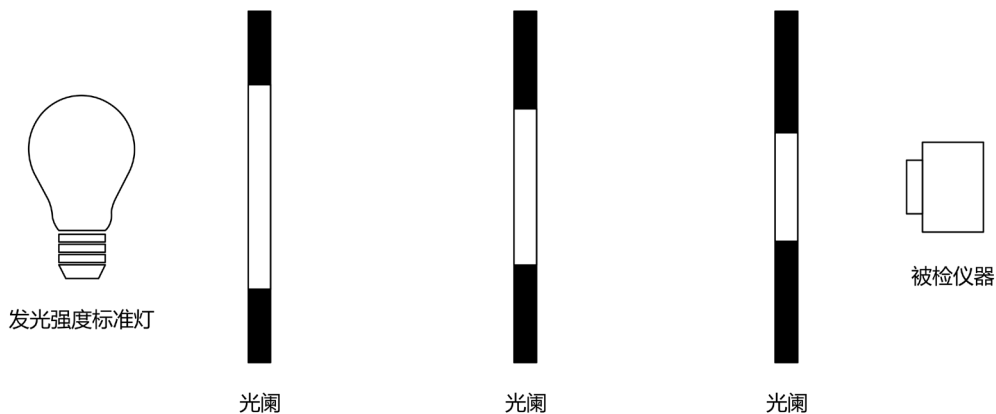


图 6a 光照度校准装置示意图

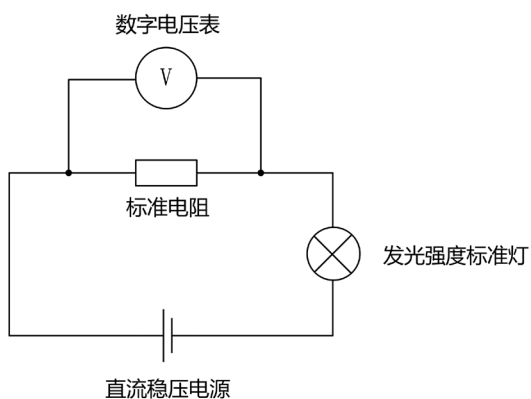


图 6b 光照度校准电路示意图

8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息：

- 标题：“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 客户的名称和地址；
- 被校对象的描述和明确标识；

- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

原始记录格式

A.1 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

A.2 闪烁频率

表 A.2 闪烁频率

量程	参考值/Hz	显示值/Hz	示值误差/Hz	不确定度($k=2$)

A.3 闪烁指数

表 A.3 闪烁指数

参考值	显示值	示值误差	不确定度($k=2$)

A.4 闪烁百分比

表 A.4 闪烁百分比

高电平 U_H	低电平 U_L	参考值/%	显示值/%	示值误差/%	不确定度($k=2$)

A.5 频闪可视性测量 SVM

表 A.5 频闪可视性测量 SVM

参考值	显示值	示值误差	不确定度($k=2$)

A.6 短期闪烁指示值 P_{st} 表 A.6 短期闪烁指示值 P_{st}

参考值	显示值	示值误差	不确定度($k=2$)

A.7 光照度

表 A.7 光照度

量程	参考值/ lx	显示值/ lx	示值误差/ lx	不确定度($k=2$)

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查

表 B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

B.2 闪烁频率

表 B.2 闪烁频率

量程	参考值/Hz	显示值/Hz	示值误差/Hz	不确定度($k=2$)

B.3 闪烁指数

表 B.3 闪烁指数

参考值	显示值	示值误差	不确定度($k=2$)

B.4 闪烁百分比

表 B.4 闪烁百分比

参考值/%	显示值/%	示值误差/%	不确定度($k=2$)

B.5 频闪可视性测量 SVM

表 B.5 频闪可视性测量 SVM

参考值	显示值	示值误差	不确定度($k=2$)

B.6 短期闪烁指示值 P_{st} 表 B.6 短期闪烁指示值 P_{st}

参考值	显示值	示值误差	不确定度($k=2$)

B.7 光照度

表 B.7 光照度

量程	参考值/ lx	显示值/ lx	示值误差/ lx	不确定度($k=2$)

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 闪烁频率测量结果不确定度的评定

C.1.1 测量方法

依据本规范7.2的规定, 使用任意波形发生器对型号为LFA-3000的光源频闪测试仪进行闪烁频率的校准。

C.1.2 测量模型

测量模型可用式 (C.1) 表示:

$$\Delta f = f_x - f_0 \quad (\text{C.1})$$

式中:

Δf ——闪烁频率示值误差, Hz;

f_x ——被校光源频闪测试仪闪烁频率示值, Hz;

f_0 ——任意波形发生器输出标准频率值, Hz。

C.1.3 不确定度来源

- a) 任意波形发生器频率误差引入的标准不确定度 u_1 ;
- b) 测量重复性引入的标准不确定度 u_2 ;
- c) 光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_3 ;

C.1.4 标准不确定度评定

C.1.4.1 任意波形发生器频率误差引入的标准不确定度 u_1

按B类进行评定。根据任意波形发生器的技术指标, 其频率最大允许误差为 $\pm 1 \times 10^{-5}$, 则区间的半宽度为 $a_1 = 1 \times 10^{-5}$, 为均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 任意波形发生器频率误差引入的相对标准不确定度为:

$$u_1 = a_1 / k = 5.8 \times 10^{-6}$$

C.1.4.2 测量重复性引入的标准不确定度 u_2

测量重复性引入的标准不确定度, 通过多次重复测量进行A类评定。在重复性条件下, 对被校光源频闪测试仪的100Hz闪烁频率点进行多次重复测量, 结果如表C.1所示, 用贝塞尔公式计 (C.2) 算实验标准差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (f_i - \bar{f})^2}{n-1}} \quad (\text{C.2})$$

式中:

\bar{f} ——被校光源频闪测试仪闪烁频率多次测量值的平均值, Hz;

f_i ——被校光源频闪测试仪闪烁频率的第 i 次测量值, Hz;

n ——重复测量次数

表 C.1 闪烁频率重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/Hz	100.001	100.000	100.001	100.001	100.001	100.000	100.002	100.001	100.001	100.001

根据 C.1 表中的数据, 可由公式 (C.2) 计算出闪烁频率重复测量的实验标准差:

$$s=0.00057\text{Hz}$$

校准时取单次测量结果, 故测量重复性引入的标准不确定度为:

$$u_2=s=0.00057\text{Hz}$$

则有相对标准不确定度为:

$$u_2=0.00057\text{Hz}/100\text{Hz}=5.7\times 10^{-6}$$

C.1.4.3 被校光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_3

根据说明书可知, 被校光源频闪测试仪分辨力为 0.001Hz, 按 B 类进行评定, 其区间半宽度为 $a_3=0.0005\text{Hz}$, 为均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$, 则被校光源频闪测试仪在 100Hz 校准点由分辨力引入的相对标准不确定度为:

$$u_3=a_3/k=2.9\times 10^{-6}$$

由于测量重复性引入的不确定度分量包含分辨力引入的不确定度分量, 为避免重复计算, 取两者中的最大值, 舍去较小者。

C.1.5 不确定度分量一览表

表 C.2 闪烁频率校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	分布类型	k 值	标准不确定度
u_1	任意波形发生器频率误差	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-6}
u_2	测量重复性	正态	1	5.7×10^{-6}
u_3	被校光源频闪测试仪分辨力	均匀	$\sqrt{3}$	2.9×10^{-6}

C.1.6 合成标准不确定度的计算

合成标准不确定度按下式计算:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 8.1\times 10^{-6}$$

C.1.7 相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}}=k \times u_c=1.6 \times 10^{-5}$$

C.2 闪烁指数测量结果不确定度的评定

C.2.1 测量方法

依据本规范7.3的规定，使用任意波形发生器、示波器对型号为LFA-3000的光源频闪测试仪进行闪烁指数的校准。

C.2.2 测量模型

校准闪烁指数的测量模型可用式（C.3）表示：

$$\Delta FI = FI_x - FI_{\text{ref}} \quad (\text{C.3})$$

式中：

ΔFI ——闪烁指数示值误差；

FI_x ——被校光源频闪测试仪闪烁指数示值；

FI_{ref} ——闪烁指数的参考值。

C.2.3 不确定度来源

- a) 示波器测量准确度引入的标准不确定度 u_1 ；
- b) 任意波形发生器准确度引入的标准不确定度 u_2 ；
- c) 上升时间引入的标准不确定度 u_3 ；
- d) 噪声引入的标准不确定度 u_4 ；
- e) 被校光源频闪测试仪测量分辨力引入的标准不确定度 u_5 ；
- f) 测量重复性引入的标准不确定度 u_6 ；

C.2.4 标准不确定度评定

C.2.4.1 示波器测量准确度引入的标准不确定度 u_1

按B类进行评定。根据示波器的技术指标，其最大允许误差为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ ，则区间的半宽度为 $a_1 = 1 \times 10^{-5}$ ，为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，示波器测量准确度引入的相对标准不确定度为：

$$u_1 = a_1 / k = 5.8 \times 10^{-6}$$

C.2.4.2 任意波形发生器准确度引入的标准不确定度 u_2

按B类进行评定。根据任意波形发生器的技术指标，其最大允许误差为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ ，则区间的半宽度为 $a_2 = 1 \times 10^{-5}$ ，为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，任意波形发生器准确度引入的相对标准不确定度为：

$$u_2 = a_2 / k = 5.8 \times 10^{-6}$$

C.2.4.3 上升时间引入的标准不确定度 u_3

按B类进行评定。根据示波器及光电探测器的技术指标，其上升时间均为3.5ns，则示波器、光电探测器引入总的上升时间 tr 为：

$$tr = \sqrt{t_s^2 + t_{oe}^2} = 4.95 \text{ ns}$$

式中：

tr ——示波器、光电探测器引入总的上升时间；

t_s ——示波器的上升时间；

t_{oe} ——光电探测器的上升时间。

则区间半宽度为 $a_3 = 2.475 \text{ ns}$ ，为按均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，上升时间引入的标准不确定度为：

$$u_3 = a_3 / k = 1.43 \text{ ns}$$

以1000Hz的信号为例，其周期为1ms，则相对标准不确定度为：

$$u_3 = 1.43 \text{ ns} / 1 \text{ ms} = 1.43 \times 10^{-6}$$

C.2.4.4 噪声引入的标准不确定度 u_4

环境光噪声、示波器、光电探测器等系统噪声会对闪烁指数测量带来影响，根据经验，环境光噪声引入的影响为 $N_h = 0.02\%$ ，示波器、光电探测器噪声引入的影响为 $N_o = 0.19\%$ 。因此系统噪声引入的总体影响为：

$$N = \sqrt{N_h^2 + N_o^2} = 0.19\% = 1.9 \times 10^{-3}$$

其区间半宽度为 $a_4 = 9.5 \times 10^{-4}$ ，为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则噪声引入的标准不确定度为：

$$u_4 = a_4 / k = 5.5 \times 10^{-4}$$

C.2.4.5 被校光源频闪测试仪测量分辨力引入的标准不确定度 u_5

根据说明书可知，被校光源频闪测试仪的分辨力为0.001，按B类进行评定，其区间半宽度为 $a_5 = 0.0005$ ，为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则被校光源频闪测试仪测量分

辨力引入的标准不确定度为:

$$u_5 = a_5/k = 0.00029$$

以 0.5 闪烁指数点为例, 相对标准不确定度为:

$$u_5 = 0.00029/0.5 = 5.8 \times 10^{-4}$$

C.2.4.6 测量重复性引入的标准不确定度 u_6

在重复性条件下, 对被校光源频闪测试仪的 0.5 闪烁指数点进行多次重复测量, 结果如表 C.3 所示

表 C.3 闪烁指数重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.499	0.500	0.499	0.498	0.499	0.500	0.497	0.499	0.498	0.498

根据 C.3 表中的数据, 可由公式 (C.2) 计算出闪烁指数重复测量的实验标准差:

$$s = 0.00095$$

校准时取单次测量结果, 故测量重复性引入的标准不确定度为:

$$u_6 = s = 0.00095$$

则有相对标准不确定度为:

$$u_6 = 0.00095/0.5 = 1.9 \times 10^{-3}$$

由于测量重复性引入的不确定度分量包含分辨力引入的不确定度分量, 为避免重复计算, 取两者中的最大值, 舍去较小者。

C.2.5 不确定度分量一览表

表 C.4 闪烁指数校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	分布类型	k 值	标准不确定度
u_1	示波器测量准确度	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-6}
u_2	任意波形发生器准确度	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-6}
u_3	上升时间	均匀	$\sqrt{3}$	1.43×10^{-6}
u_4	噪声	均匀	$\sqrt{3}$	5.5×10^{-4}
u_5	被校光源频闪测试仪测量分辨力	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-4}
u_6	测量重复性	正态	1	1.9×10^{-3}

C.2.6 合成标准不确定度的计算

合成标准不确定度按下式计算：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_6^2} = 2 \times 10^{-3}$$

C.2.7 相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k \times u_c = 4 \times 10^{-3}$$

C.3 闪烁百分比测量结果不确定度的评定

C.3.1 测量方法

依据本规范7.4条款的规定，使用任意波形发生器、示波器对型号为LFA-3000的光源频闪测试仪进行闪烁百分比的校准。

C.3.2 测量模型

测量模型可用式 (C.4) 表示：

$$\Delta FP = FP_x - FP_{\text{ref}} \quad (\text{C.4})$$

式中：

ΔFP ——闪烁百分比示值误差，%；

FP_x ——被校光源频闪测试仪闪烁百分比示值，%；

FP_{ref} ——闪烁百分比的参考值，%。

另外，依据附录 E，闪烁百分比的参考值 FP_{ref} 由闪烁波形的最大值 A 、最小值确定 B ，被校光源频闪测试仪的闪烁百分比示值 FP_x 从被校仪器进行直接读取，因此式 (C.4) 可以表示为：

$$\Delta FP = FP_x - \frac{A - B}{A + B} \quad (\text{C.5})$$

则灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta FP)}{\partial(FP_x)} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial(\Delta FP)}{\partial A} = -\frac{2B}{(A+B)^2}, \quad c_3 = \frac{\partial(\Delta FP)}{\partial B} = \frac{2A}{(A+B)^2} \quad (\text{C.6})$$

$$u_c^2(x) = c_1^2 u^2(FP_x) + c_2^2 u^2(A) + c_3^2 u^2(B) + 2c_2 c_3 r(A, B) u(A) u(B) \quad (\text{C.7})$$

C.3.3 不确定度来源

- 示波器幅度测量准确度引入的标准不确定度 u_1 ；
- 信号失真引入的标准不确定度 u_2 ；
- 光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_3 ；

d) 测量重复性引入的标准不确定度 u_4 ;

C.3.4 标准不确定度评定

C.3.4.1 示波器幅度测量准确度引入的标准不确定度 u_1

按B类进行评定。根据示波器的技术指标，其幅度测量最大允许误差为 $\pm 1.5\%$ ，则区间的半宽度为 $a_1=1.5\%$ ，为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，示波器幅度测量准确度引入的标准不确定度为：

$$u_1=a_1/k=0.87\%$$

C.3.4.2 信号失真引入的标准不确定度 u_2

按B类进行评定。根据技术指标，输出信号失真度为 0.04% ，则区间的半宽度为 $a_2=0.02\%$ ，为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，信号失真引入的标准不确定度为：

$$u_2=a_2/k=0.012\%$$

C.3.4.3 被校光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_3

根据说明书可知，被校光源频闪测试仪分辨力为 0.001% ，按B类进行评定，其区间半宽度为 $a_3=0.0005\%$ ，为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则被校光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_3=a_3/k=0.00029\%$$

C.3.4.4 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

在重复性条件下，对被校光源频闪测试仪的50%闪烁百分比点进行多次重复测量，结果如表C.5所示：

表 C.5 闪烁百分比重复性测量数据

第 <i>i</i> 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/%	50.08	50.07	50.03	50.07	50.11	50.08	50.04	50.09	50.07	50.12

根据C.5表中的数据，可由公式(C.2)计算出闪烁百分比重复测量的实验标准差：

$$s=0.027\%$$

校准时取单次测量结果，故测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_4=s=0.027\%$$

则有相对标准不确定度为：

$$u_4=(0.027/50)\times 100\%=0.054\%$$

由于测量重复性引入的不确定度分量包含分辨力引入的不确定度分量, 为避免重复计算, 取两者中的最大值, 舍去较小者。

C.3.5 不确定度分量一览表

表 C.6 闪烁百分比校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	分布类型	k 值	标准不确定度
u_1	示波器幅度测量准确度	均匀	$\sqrt{3}$	0.87%
u_2	信号失真	均匀	$\sqrt{3}$	0.012%
u_3	光源频闪测试仪分辨力	均匀	$\sqrt{3}$	0.00029%
u_4	测量重复性	正态	1	0.054%

C.3.6 合成标准不确定度的计算

以闪烁百分比 50% 测量点为例, 根据附录 E, $A=3B$, 且闪烁百分比参考值 FP_{ref} 中的参数 A 、 B 均采用同一示波器进行测量所得, 示波器幅度测量准确度、任意波形发生器信号失真引入的标准相对不确定度对 $u(A)$ 、 $u(B)$ 的贡献相同, 则有:

$$u(A) = u(B) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.87\%$$

设 $A=600\text{mV}$, $B=200\text{mV}$, (C.6) 中灵敏系数计算如下:

$$c_2 = -0.625\text{V}^{-1}, \quad c_3 = 1.875\text{V}^{-1}$$

此时 $u(A)$ 、 $u(B)$ 为:

$$u(A) = 0.87\% \times 600\text{mV} = 0.00522\text{V}$$

$$u(B) = 0.87\% \times 200\text{mV} = 0.00174\text{V}$$

另一方面, 由于参数 A 、 B 采用同一示波器测量, 则相关系数 $r(A, B)=1$, 则 (C.7) 可以表示为:

$$u_c^2(x) = c_1^2 u^2(FP_x) + c_2^2 u^2(A) + c_3^2 u^2(B) + 2c_2 c_3 u(A)u(B) \quad (\text{C.8})$$

由于测量重复性引入的不确定度分量包含分辨力引入的不确定度分量, 取两者中的较大者, 舍去较小者, 且测量重复性主要对闪烁百分比示值 FP_x 造成影响, 将上述各数据代入式 (C.8) 可得, 合成标准不确定度:

$$u_c(x) = \sqrt{u_4^2 + c_2^2 u^2(A) + c_3^2 u^2(B) + 2c_2 c_3 u(A)u(B)} = 0.055\%$$

C.3.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}}=k \times u_c=0.11\%$$

C.4 光照度测量结果不确定度的评定

本节仅就用二级标准灯的光照度校准装置校准光源频闪测试仪一处示值（标准照度值为100lx）的示值误差的测量结果不确定度做评定实例分析。实际工作中，可按示例方法逐点评定不确定度。

C.4.1 测量方法

依据本规范7.7条款的规定，使用光照度校准装置对型号为LFA-3000的光源频闪测试仪进行光照度的校准。

C.4.2 测量模型

测量模型可用式（C.9）表示：

$$\Delta E = E_x - E_{\text{ref}} = E_x - \frac{I(i)}{l^2} \quad (\text{C.9})$$

式中：

ΔE ——光照度示值误差，lx；

E_x ——被校光源频闪测试仪光照度示值，lx；

E_{ref} ——光照度的参考值，lx；

$I(i)$ ——标准灯的发光强度， $I(i)=1180\text{cd}$ ；

i ——供给标准灯的电流， $i=6.7024\text{A}$ ；

l ——标准灯的灯丝平面到光度头测试面的距离， $l=3.435\text{m}$ 。

则灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta E)}{\partial(E_x)} = 1, c_2 = \frac{\partial(\Delta E)}{\partial I(i)} = -\frac{1}{l^2} = -0.085\text{m}^{-2}, c_3 = \frac{\partial(\Delta E)}{\partial l} = \frac{2I(i)}{l^3} = 58.23\text{cd}/\text{m}^3 \quad (\text{C.10})$$

C.4.3 不确定度来源

- 发光强度标准灯引入的标准不确定度 u_1 ；
- 电测系统引入的标准不确定度 u_2 ；
- 测量距离引入的标准不确定度 u_3 ；
- 光度头与灯丝平面位置调整引入的标准不确定度 u_4 ；
- 测量重复性引入的标准不确定度 u_5 ；
- 杂散光引入的标准不确定度 u_6 ；

g) 被检仪器光度头和灯丝平面角度调整引入的标准不确定度 u_7 ;

C.4.4 标准不确定度评定

C.4.4.1 发光强度标准灯引入的标准不确定度 u_1

根据发光强度标准灯的溯源证书, $U_{\text{rel}}=0.8\%(k=2)$, 则发光强度标准灯引入的标准不确定度为:

$$u_1=0.8\%/2=0.4\%$$

$$u_1=0.4\%\times 1180\text{cd}=4.72\text{cd}$$

C.4.4.2 电测系统引入的标准不确定度 u_2

电流值 $i=U/R$, 电流 i 的不确定度由标准电阻 R 和电阻两端电压 U 测量的不确定度导出。

由证书得到, 5位半数字电压表的测量结果相对扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=8\times 10^{-5}(k=2)$, 则数字电压表引入的电压相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(V)=0.008\%/2=0.004\%$$

标准电阻为0.01级, 按 $k=3$ 计算, 则电阻的相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(R)=0.01\%/3\approx 0.003\%$$

电流的合成相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(i)=\sqrt{(0.004\%)^2+(0.003\%)^2}=0.005\%$$

由经验公式:

$$\frac{dI}{I}=6\frac{di}{i}$$

由于电流的不确定度带给光强的标准不确定度为:

$$u_2=6\times 0.005\%\times 1180\text{cd}=0.354\text{cd}$$

C.4.4.3 测量距离引入的标准不确定度 u_3

光轨测长最大误差不超过 $\pm 0.2\text{mm/m}$, 标准灯到光度头测试面的距离为 3.435m , 服从均匀分布, 则测量距离引入的标准不确定度为:

$$u_3=\frac{\sqrt{3.435\times 0.0002^2}}{\sqrt{3}}\approx 0.00021\text{m}$$

C.4.4.4 光度头与灯丝平面位置调整引入的标准不确定度 u_4

根据实验经验与相关资料判定, 光度头与灯丝平面的位置调整带来的对 I 值的影响不会超过 $\pm 1\text{mm}$, 且服从三角分布, 则:

$$u_4 = \frac{0.001}{\sqrt{6}} \approx 0.00041\text{m}$$

C.4.4.5 测量重复性引入的标准不确定度 u_5

在重复性条件下，对被校光源频闪测试仪的100lx光照度点进行多次重复测量，结果如表C.7所示：

表 C. 7 光照度重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/lx	100.2	100.2	100.2	100.1	100.0	100.1	100.2	100.2	100.3	100.2

则平均值为：

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 100.17\text{lx}$$

根据 C.7 表中的数据，可由公式 (C.2) 计算出光照度重复测量的实验标准差：

$$s = 0.0823\text{lx}$$

每个测量点测量 2 次，取平均值作为测量结果，则：

$$u_5 = \frac{s}{\sqrt{2}} = 0.058\text{lx}$$

C.4.4.6 杂散光引入的标准不确定度 u_6

通过光路杂散光屏蔽效果实验，得到杂散光引入的照度示值变化量不超过0.2%，服从均匀分布，当信号光照度为100.17lx时，杂散光引入的标准不确定度为：

$$u_6 = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} \times 100.17 = 0.12\text{lx}$$

C.4.4.7 被检仪器光度头和灯丝平面角度调整引入的标准不确定度 u_7

由于不能将探测器与灯丝平面调整到与测量轴线严格垂直，它们与测量轴线间的夹角 θ 不会超过 2° ，引入的投影误差的标准不确定度为：

$$u_7 = \frac{3}{10} \delta_{\max} \times E_x = \frac{3}{10} (1 - \cos \theta) \times E_x = 0.018\text{lx}$$

C.4.5 不确定度分量一览表

表 C. 8 光照度校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	输入量的标准不确定度 u_i	灵敏系数 c_i	标准不确定度分量 $ c_i \times u_i$
--------	--------	------------------	------------	-----------------------------

u_1	发光强度标准灯	4.72cd	-0.085m ⁻²	0.401lx
u_2	电测系统	0.354cd	-0.085m ⁻²	0.030lx
u_3	测量距离	0.00021m	58.23cd/m ³	0.012lx
u_4	光度头与灯丝平面位置调整	0.00041m	58.23cd/m ³	0.024lx
u_5	测量重复性	0.058lx	1	0.058lx
u_6	杂散光	0.12lx	1	0.12lx
u_7	光度头和灯丝平面角度调整	0.018lx	1	0.018lx

C.4.6 合成标准不确定度的计算

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i u_i)^2} = 0.431\text{lx}$$

换算为相对标准不确定度，则：

$$u_r = 0.43/100.17 = 0.43\%$$

C.4.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k \times u_r = 0.9\%$$

C.5 频闪可视性测量 SVM 测量结果不确定度的评定

C.5.1 测量方法

依据本规范7.5的规定，使用任意波形发生器对型号为LFA-3000的光源频闪测试仪进行频闪可视性测量的校准。

C.5.2 测量模型

测量模型可用式（C.11）表示：

$$\Delta SVM = SVM_x - SVM_0 = SVM_x - 3.7 \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{C_m}{T_m}\right)^{3.7}} \quad (\text{C.11})$$

式中：

ΔSVM ——频闪可视性测量示值误差；

SVM_x ——被校光源频闪测试仪频闪可视性测量示值；

SVM_0 ——频闪可视性测量参考值；

T_m ——频闪可视性阈值。

$$T_m = \frac{1}{1 + e^{-0.00518(f-306.6)}} + 20e^{-\frac{f}{10}} \quad (\text{C.12})$$

则灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial(SVM_x)} = 1,$$

$$c_2 = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial C_m} = -\frac{1}{3.7} \times \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{C_m}{T_m} \right)^{3.7} \right]^{\frac{1}{3.7}-1} \times 3.7 \times \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{C_m}{T_m} \right)^{2.7} \right] \times \frac{1}{T_m} = -SVM_0 \times \frac{\sum_{m=1}^{\infty} C_m^{2.7}}{\sum_{m=1}^{\infty} C_m^{3.7}},$$

$$c_3 = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial f} = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial T_m} \times \frac{\partial T_m}{\partial f},$$

其中：

$$\frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial T_m} = -\frac{1}{3.7} \times \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{C_m}{T_m} \right)^{3.7} \right]^{\frac{1}{3.7}-1} \times 3.7 \times \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{C_m}{T_m} \right)^{2.7} \right] \times \left(-\frac{\sum_{m=1}^{\infty} C_m}{T_m^2} \right) = \frac{SVM_0}{T_m^3}$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial f} = \frac{0.00518 \times e^{1.588188-0.00518f}}{(1 + e^{1.588188-0.00518f})^2} - 2 \times e^{-\frac{f}{10}}$$

当信号类型为矩形波，占空比为50%，频率 $f=100\text{Hz}$ 时， $SVM_0=4.9587$ ，有：

表C.9 快速傅里叶变换分量的幅值 C_m

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
6354	5.995	2086	5.93	1264	6.012	909.4	6.011	701.9	5.966
C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}
568.8	5.998	488.7	6.017	423.5	5.993	363.1	5.973	332.4	6.014

$$c_2 = -0.000821624,$$

$$T_m=0.256275332, \quad \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial T_m} = 294.609956491, \quad \frac{\partial T_m}{\partial f} = 0.000894202$$

$$c_3 = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial f} = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial T_m} \times \frac{\partial T_m}{\partial f} = 0.263440812。$$

灵敏系数汇总如下：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial(SVM_x)} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial C_m} = -0.000821624, \quad c_3 = \frac{\partial(\Delta SVM)}{\partial f} = 0.263440812。$$

C.5.3 不确定度来源

- a) 任意波形发生器频率误差引入的标准不确定度 u_1 ;
- b) 窗函数及栅栏效应引入的标准不确定度 u_2 ;
- c) 测量重复性引入的标准不确定度 u_3 ;
- d) 光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_4 ;

C.5.4 标准不确定度评定

C.5.4.1 任意波形发生器频率误差引入的标准不确定度 u_1

按B类进行评定。根据任意波形发生器的技术指标,其频率最大允许误差为 $\pm 1 \times 10^{-5}$,则区间的半宽度为 $a_1 = 1 \times 10^{-5}$,为均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$,任意波形发生器频率误差引入的相对标准不确定度为:

$$u_1 = a_1/k = 5.8 \times 10^{-6}$$

C.5.4.2 窗函数及栅栏效应引入的标准不确定度 u_2

由于计算机的处理速度和存储长度有限,因此在快速傅里叶变换前,需要将待处理数据截断成有限长度,窗函数及栅栏效应引入的最大误差可表示为:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{N \sin(\frac{\pi}{2N})}$$

其中:

N ——快速傅里叶变换长度;

窗函数傅里叶变换的主瓣接近于正弦分布,因此窗函数和栅栏效应引入的误差分布为反正弦分布, $k = \sqrt{2}$, 当 $N = 4096$ 时, 则有:

$$u_2 = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{2}} = 0.128$$

C.5.4.3 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

在重复性条件下,对被校光源频闪测试仪的 100Hz (矩形波占空比 50%) 频闪可视性测量点进行多次重复测量,结果如表 C.10 所示:

表 C.10 频闪可视性测量重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

测量值/Hz	4.969	4.968	4.967	4.968	4.966	4.969	4.970	4.968	4.968	4.969
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

根据 C.10 表中的数据, 可由公式 (C.2) 计算出频闪可视性测量 SVM 的重复测量实验标准差:

$$s=0.00113$$

校准时取单次测量结果, 故测量重复性引入的标准不确定度为:

$$u_3=s=0.00113$$

则有相对标准不确定度为:

$$u_3=0.00113/4.9682=2.3\times 10^{-4}$$

C.5.4.4 被校光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_4

根据说明书可知, 被校光源频闪测试仪分辨力为 0.001, 按 B 类进行评定, 其区间半宽度为 $a_4=0.0005$, 为均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$, 则被校光源频闪测试仪在 100Hz (矩形波占空比 50%) 校准点由分辨力引入的相对标准不确定度为:

$$u_4=a_4/k=5.9\times 10^{-5}$$

由于测量重复性引入的不确定度分量包含分辨力引入的不确定度分量, 为避免重复计算, 取两者中的最大值, 舍去较小者。

C.5.5 不确定度分量一览表

表 C.11 频闪可视性测量校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	分布类型	k 值	标准不确定度
u_1	任意波形发生器频率误差	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-6}
u_2	窗函数及栅栏效应	反正弦	$\sqrt{2}$	0.128
u_3	测量重复性	正态	1	2.3×10^{-4}
u_4	被校光源频闪测试仪分辨力	均匀	$\sqrt{3}$	5.9×10^{-5}

C.5.6 合成标准不确定度的计算

合成标准不确定度按下式计算:

$$u_c = \sqrt{c_3^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_1^2 u_3^2} = 2.5\times 10^{-4}$$

C.5.7 相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

$$U_{rel}=k\times u_c=5\times 10^{-4}$$

C.6 短期闪烁指示值 P_{st} 测量结果不确定度的评定

C.6.1 测量方法

依据本规范7.6的规定，使用任意波形发生器对型号为LFA-3000的光源频闪测试仪进行短期闪烁指示值的校准。

C.6.2 测量模型

测量模型可用式（C.13）表示：

$$\Delta P_{st} = P_{st_x} - P_{st_0} \quad (C.13)$$

式中：

ΔP_{st} ——短期闪烁指示值示值误差；

P_{st_x} ——被校光源频闪测试仪短期闪烁指示值的示值；

P_{st_0} ——短期闪烁指示值参考值。

根据本规范 3.4，式（C.13）可表示为：

$$\Delta P_{st} = P_{st_x} - \sqrt{0.0314 P_{0.1} + 0.0525 P_{1s} + 0.0657 P_{3s} + 0.28 P_{10s} + 0.08 P_{50s}}$$

则灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta P_{st})}{\partial(P_{st_x})} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial(\Delta P_{st})}{\partial(P_{st_0})} = -\frac{0.0157}{P_{st_0}}, \quad c_3 = \frac{\partial(\Delta P_{st})}{\partial P_{1s}} = -\frac{0.02625}{P_{st_0}},$$

$$c_4 = \frac{\partial(\Delta P_{st})}{\partial P_{3s}} = -\frac{0.03285}{P_{st_0}}, \quad c_5 = \frac{\partial(\Delta P_{st})}{\partial P_{10s}} = -\frac{0.14}{P_{st_0}}, \quad c_6 = \frac{\partial(\Delta P_{st})}{\partial P_{50s}} = -\frac{0.04}{P_{st_0}}$$

C.6.3 不确定度来源

- 任意波形发生器频率误差引入的标准不确定度 u_1 ；
- 任意波形发生器幅度波动引入的标准不确定度 u_2 ；
- 测量重复性引入的标准不确定度 u_3 ；
- 光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_4 ；

C.6.4 标准不确定度评定

C.6.4.1 任意波形发生器频率误差引入的标准不确定度 u_1

按B类进行评定。根据任意波形发生器的技术指标，其频率最大允许误差为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ ，则区间的半宽度为 $a_1 = 1 \times 10^{-5}$ ，为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，任意波形发生器频率误差引入的相对标准不确定度为：

$$u_1 = a_1 / k = 5.8 \times 10^{-6}$$

C.6.4.2 任意波形发生器幅度波动引入的标准不确定度 u_2

根据任意波形发生器的技术指标，其幅度波动在0.2%以内，则区间半宽度为 $a_2=0.1\%$ ，为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，任意波形发生器幅度波动引入的相对标准不确定度为：

$$u_1=a_1/k=5.8\times 10^{-4}$$

C.6.4.3 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

在重复性条件下，对被校光源频闪测试仪的短期闪烁指示值进行多次重复测量，结果如表 C.12 所示：

表 C.12 短期闪烁指示值重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/Hz	1.969	1.972	1.970	1.968	1.973	1.972	1.972	1.972	1.969	1.969

根据 C.12 表中的数据，可由公式 (C.2) 计算出短期闪烁指示值 P_{st} 的重复测量实验标准差：

$$s=0.00178$$

校准时取单次测量结果，故测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_3=s=0.00178$$

则有相对标准不确定度为：

$$u_3=0.00178/1.9706=9.1\times 10^{-4}$$

C.6.4.4 被校光源频闪测试仪分辨力引入的标准不确定度 u_4

根据说明书可知，被校光源频闪测试仪分辨力为 0.001，按 B 类进行评定，其区间半宽度为 $a_4=0.0005$ ，为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则被校光源频闪测试仪由分辨力引入的相对标准不确定度为：

$$u_4=a_4/k=5.9\times 10^{-5}$$

由于测量重复性引入的不确定度分量包含分辨力引入的不确定度分量，为避免重复计算，取两者中的最大值，舍去较小者。

C.6.5 不确定度分量一览表

表 C.13 短期闪烁指示值校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	分布类型	k 值	标准不确定度
--------	--------	------	-------	--------

u_1	任意波形发生器频率误差	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-6}
u_2	任意波形发生器幅度波动	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-4}
u_3	测量重复性	正态	1	9.1×10^{-4}
u_4	被校光源频闪测试仪分辨力	均匀	$\sqrt{3}$	5.9×10^{-5}

C.6.6 合成标准不确定度的计算

当 $P_{st0}=2$ 时, 有:

$$c_1=1, c_2=-0.00785, c_3=-0.013125, c_4=-0.016425, c_5=-0.07, c_6=-0.02$$

由于 $P_{0.1}$ 、 P_{1s} 、 P_{3s} 、 P_{10s} 、 P_{50s} 均由同一光源频闪测试仪 5 电平等级分类器统计获得, 因此其相关系数 $r=1$, 合成标准不确定度按下式计算:

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_3^2 + \left(\sum_{i=2}^6 c_i^2 + 2 \sum_{i=2}^6 \sum_{j=3}^6 c_i c_j \right) (u_2^2 + u_3^2)} = 9.2 \times 10^{-4} \quad (\text{式中, } i \neq j)$$

C.6.7 相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

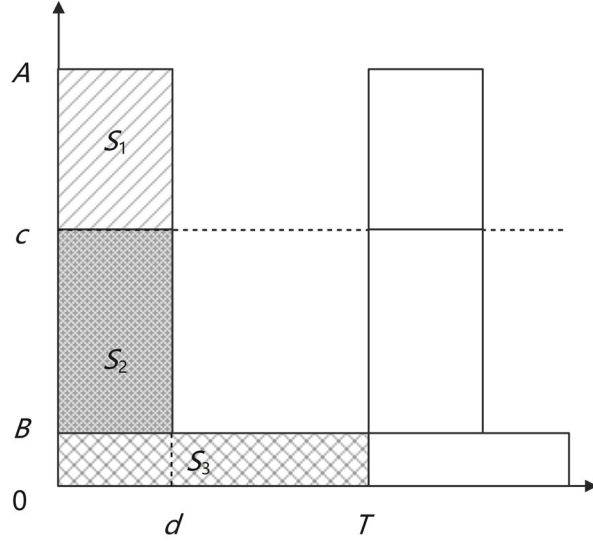
$$U_{rel} = k \times u_c = 2 \times 10^{-3}$$

附录 D

闪烁指数参考值的修正

当环境中存在杂散光影响而无法消除或准直发光二极管输出光功率较弱时, 可以对

闪烁指数参考值进行修正。此情况下光信号波形如下图所示，设波形最大值为 A ，最小值为 B ，采样率为 M ，平均值为 c ，占空比为 d ，周期为 T ， S_1 为平均光输出水平以上的波形面积， S_2+S_3 为平均光输出水平以下的波形面积。



则有：

$$c = \frac{MdA + M(1-d)B}{M}$$

$$S_1 = (A - c)dT, \quad S_2 = (c - B)dT, \quad S_3 = B \cdot T$$

$$FI = \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{(A - B)(1 - d)d}{(A - B)d + B}$$

闪烁指数参考值使用下式进行修正：

$$FI = \frac{(A - B)(1 - d)d}{(A - B)d + B}$$

例如：

当占空比 $d=0.05$ ， $A=1000B$ 时，闪烁指数参考值为 0.9313；

当占空比 $d=0.1$ ， $A=1000B$ 时，闪烁指数参考值为 0.8911；

当占空比 $d=0.5$ ， $A=1000B$ 时，闪烁指数参考值为 0.4990；

当占空比 $d=0.5$ ， $A=100B$ 时，闪烁指数参考值为 0.4901；

当占空比 $d=0.5$ ， $A=10B$ 时，闪烁指数参考值为 0.4091。

特别的，当 $B=0$ 时， $FI=1-d$ 。

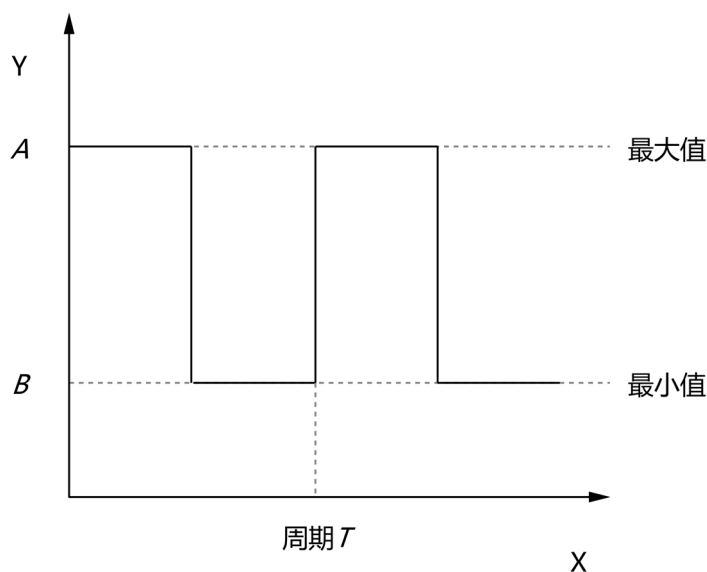
附录 E

闪烁百分比波形编制方案

闪烁百分比（Flicker Percentage）的定义如下：

$$FP = \frac{A - B}{A + B} \times 100\%$$

其中 A 是一个周期内光信号的最大值， B 为最小值。



以矩形波信号为例，设 $B = \alpha A$ ，则闪烁百分比可以表示为：

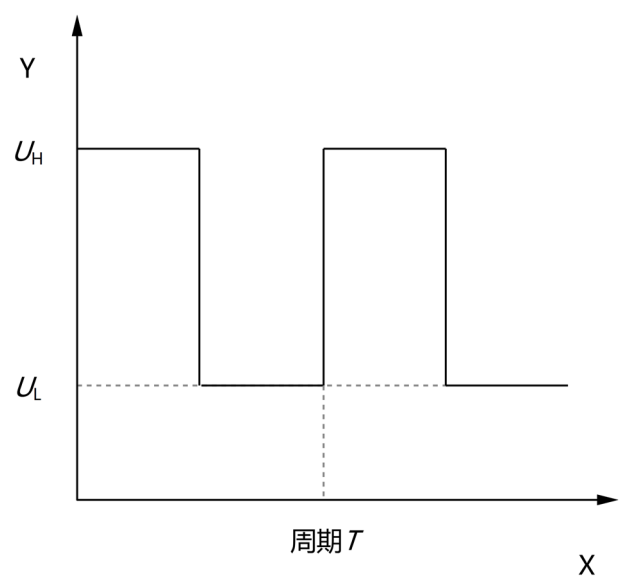
$$FP = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \times 100\%$$

当闪烁百分比分别取0%，1%，5%，10%，20%，30%，40%，50%，60%，70%，80%，90%，99%，100%时，可以得出相应的 α 值，如下表：

表E.1 闪烁百分比与 α 值关系表

闪烁百分比 FP (%)	α 值	闪烁百分比 FP (%)	α 值
0	1	50	1/3
1	99/101	60	1/5
5	19/21	70	3/17
10	9/11	80	1/9
20	2/3	90	1/19
30	7/13	99	1/199
40	3/7	100	0

以闪烁百分比50%为例， α 值为1/3，仪器连接如图5实线所示。在校准过程中，打开示波器的高电平 U_H 、低电平 U_L 测量功能，再使用示波器的Math数学运算功能，新建一个数学运算算子使得 $\text{Math} = U_L/U_H$ 并进行实时监测，分别调节任意波形发生器矩形波信号的高低电平，直至示波器上显示的矩形波信号高低电平比值 U_L/U_H 与 α 值一致为止，再按图5虚线连接，使用被校光源频闪测试仪替换光电探测器及示波器，读取此时被校仪器的闪烁百分比示值，计算闪烁百分比示值误差。



附录 F

频闪可视性测量 *SVM*特征值

表F.1 频闪可视性测量*SVM*特征值表

信号类型	被检仪器设置 采样频率 (kHz)	被检仪器设置 统计频率范围 (Hz)	闪烁百分比 (%)	任意波形发 生器频率 (Hz)	矩形波占空 比 (%)	<i>SVM</i> 值
------	-------------------------	--------------------------	--------------	-----------------------	-------------------	--------------

信号类型	被检仪器设置 采样频率 (kHz)	被检仪器设置 统计频率范围 (Hz)	闪烁百分比 (%)	任意波形发 生器频率 (Hz)	矩形波占空 比 (%)	<i>SVM</i> 值
矩形波	100kHz	1~2000	100	10	1.0	14.9562
					10.0	4.9776
					50.0	0.95943
					90.0	0.55337
				20	1.0	12.8468
					10.0	8.1829
					50.0	1.6622
					90.0	0.90943
				50	1.0	10.0944
					10.0	8.7136
					50.0	3.7212
					90.0	0.96753
				60	1.0	9.8606
					10.0	8.8724
					50.0	4.7222
					90.0	0.98456
				80	1.0	9.4336
					10.0	8.8181
					50.0	5.2023
					90.0	0.97686
				100	1.0	8.6891
					10.0	8.2069
					50.0	4.9587
					90.0	0.91009
				200	1.0	5.8796
					10.0	5.5688

信号类型	被检仪器设置 采样频率 (kHz)	被检仪器设置 统计频率范围 (Hz)	闪烁百分比 (%)	任意波形发 生器频率 (Hz)	矩形波占空 比 (%)	<i>SVM</i> 值
					50.0	3.4568
					90.0	0.61579
				500	1.0	3.1086
					10.0	2.9553
					50.0	1.7184
					90.0	0.31874
				800	1.0	2.4975
					10.0	2.4026
					50.0	1.3585
					90.0	0.25678
				1000	1.0	2.0203
					10.0	1.983
					50.0	1.2697
					90.0	0.20623

附录 G

短期闪烁指示值 P_{st} 特征值表G.1 短期闪烁指示值 P_{st} 特征值表

信号类型	被检仪器设置	闪烁百分比	矩形波占空比	P_{st} 值	任意波形发生
------	--------	-------	--------	------------	--------

	采样频率 (kHz)	(%)	(%)		器频率 (Hz)
矩形波	10	100	50	0.5	83.3070892
				1.0	71.4106625
				2.0	64.0753229
				3.0	60.2224086
				4.0	58.5271246
				5.0	55.8572953
				6.0	54.3302558
				7.0	53.1358951
				8.0	52.0650398
				9.0	51.2449085
				10.0	50.4082998
				15.0	47.4444626
				20.0	45.3985346
				25.0	43.8598065
				30.0	42.6292004