

分光光谱法与光度法测量灯具光通量自吸收效应补偿的差异

刘向远¹ 张穗萌^{1*} 徐文清² 范传宇¹ 王 锦¹

¹皖西学院电气与光电工程学院, 安徽 六安 237012

²中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 利用积分球比较法测量灯具光通量时, 常采用分光光谱法和光度法, 这两种方法都需要引入修正系数以补偿灯具自吸收效应造成的光通量损失。研究了分光光谱法和光度法测量灯具光通量自吸收效应补偿的差异, 从两种方法测量灯具光通量的基本原理出发, 得到了光通量修正值的表达式。通过实验测量数据和理论分析, 探讨了不同光谱分布的辅助灯对两种方法测量灯具光通量的影响。研究结果表明, 分光光谱法测得的光通量修正值与辅助灯相对功率分布无关, 光度法测得的光通量修正值与辅助灯相对功率分布有关, 分光光谱法选择不同光谱的辅助灯测得的光通量修正值具有唯一性, 而光度法选择不同光谱的辅助灯测得的光通量修正值不同。

关键词 测量; 光通量修正值; 辅助灯; 相对功率分布; 自吸收效应

中图分类号 O432.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.101204

Difference in Self-Absorption Effect Compensations Between Power-Spectral Method and Photometric Method for the Luminous Flux Measurements

Liu Xiangyuan¹ Zhang Suimeng¹ Xu Wenqing² Fan Chuanyu¹ Wang Jin¹

¹College of Electrical and Photoelectric Engineering, West Anhui University, Lu'an, Anhui 237012, China

²Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Integrating spheres are often used to measure the total luminous flux of lamps by comparison methods, including power-spectral method and photometric method. Correction factors are introduced to compensate the loss of luminous flux due to self-absorption effect in the measurement process with the two methods. Difference in self-absorption effect compensation between the power-spectral method and the photometric method in luminous flux measurement is studied. According to the fundamental principle of luminous flux measurement, the expressions of modified luminous flux are obtained. Based on experimental data and theoretical analysis, influence of auxiliary lamps with different spectra on luminous flux results measured by the two methods is discussed. The results show that modified luminous flux is irrelevant to the relative power distribution of auxiliary lamps by the power-spectral method instead of that by the photometric method. Further results indicate that the modified luminous flux obtained by the power-spectral method remains same in spite of auxiliary lamps with different spectra, however, the modified value of luminous flux changes when the photometric method is used.

Key words measurement; modified value of luminous flux; auxiliary lamp; relative power distribution; self-absorption effect

OCIS codes 120.5240; 120.3150; 120.3930; 120.4640

收稿日期: 2016-07-05; 收到修改稿日期: 2016-07-08; 网络出版日期: 2016-09-23

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2016A749)、皖西学院质量工程(2016wxyy05, 2016wxyy44)

作者简介: 刘向远(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事应用光学方面的研究。E-mail: lxy0564@aliyun.com

*通信联系人。E-mail: smzhang@wxc.edu.cn

1 引言

灯具光通量的测量常常采用积分球比较法,根据测量方法的不同,可以分为分光光谱法和光度法。分光光谱法测量灯具光通量时需要光纤和分光光光谱仪,并且可以直接测得灯具发光的相对功率分布。光度法则是利用光度探测器获得发光灯具的照度信号,经过光电转换,将照度信号转变为可测量的电压或电流。这两种测量方法都需要考虑灯具自吸收效应的影响,引入恰当的修正系数来校正灯具自吸收效应产生的光能损失。为了补偿自吸收效应造成的光通量损失,采用辅助灯标定自吸收效应的修正系数^[1-2]。一般来说,要求选取的辅助灯的光谱与被测灯的光谱一致,并且选取的辅助灯应当发光稳定、受温度等因素影响较小^[3]。但是,在实际测量中,有多种光谱分布的辅助灯光源可供选择,例如白炽灯、LED灯、节能灯。为了明确不同光谱的辅助灯对灯具光通量测量结果的影响,本文从分光光谱法和光度法测量灯具光通量的基本原理出发,通过理论分析得到两种测量方法的光通量修正值表达式,在实验测量数据的基础上研究了白炽灯、LED灯、节能灯作为辅助灯对光通量测量修正结果的影响,分析了分光光谱法和光度法测量灯具光通量产生修正值差异的原因,提出了减小光通量测量误差的方案,旨在为提高灯具光通量测量精度提供有益的参考。

2 理论分析

2.1 分光光谱法

常用的分光光谱法测量灯具光通量的系统包括积分球、光纤、光谱仪等,光通量测量精确度受到多种因素影响,例如积分球大小、温度、内壁涂层的光谱吸收、传感器的光谱响应等^[4-7]。在研究自吸收效应时,假设除上述影响因素之外的其他因素均已经得到了校正。因此,在考虑自吸收效应的情况下,光通量的测量满足

$$\Phi_{\text{test}}(\lambda) = \Phi_s(\lambda) \times \frac{y_t(\lambda)}{y_s(\lambda)} \times \frac{1}{\alpha(\lambda)}, \quad (1)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{y_{\text{aux},t}(\lambda)}{y_{\text{aux},s}(\lambda)}, \quad (2)$$

式中 $\Phi_{\text{test}}(\lambda)$ 为被测光源的光谱光通量; $\Phi_s(\lambda)$ 为标准灯的光谱光通量, $\Phi_s(\lambda) = K_m P(\lambda) V(\lambda)$, $K_m = 683 \text{ lm/W}$, $P(\lambda)$ 为光源的光谱功率分布, $V(\lambda)$ 为明视觉条件下光谱光视效率函数^[6]; 在不考虑自吸收效应的情况下, $y_t(\lambda)$ 为被测灯相对功率分布, $y_s(\lambda)$ 为标准灯相对功率分布; 考虑自吸收效应的情况下, 引入吸收系数 $\alpha(\lambda)$, $y_{\text{aux},t}(\lambda)$ 为被测灯吸收辅助灯光辐射后的相对功率分布, $y_{\text{aux},s}(\lambda)$ 为标准灯吸收辅助灯光辐射后的相对功率分布。对(1)式进行积分,在可见光波段内得到被测灯的光通量为

$$\Phi_{\text{test}} = \int_{380}^{780} \Phi_{\text{test}}(\lambda) d\lambda = \int_{380}^{780} \Phi_s(\lambda) \times \frac{y_t(\lambda)}{y_s(\lambda)} \times \frac{1}{\alpha(\lambda)} d\lambda. \quad (3)$$

从吸收系数看,当 $\alpha(\lambda) < 1$, 即 $y_{\text{aux},t}(\lambda) < y_{\text{aux},s}(\lambda)$ 时, 被测灯对辅助灯的光辐射吸收大于标准灯, 经过校正和补偿, 被测灯的光通量大于未补偿的光通量。当 $\alpha(\lambda) > 1$ 时, 情况相反。

当标准灯的总光通量 Φ_{total} 已知时, 取 $P(\lambda) = y_s(\lambda)$, 由于光谱光通量 $\Phi_s(\lambda)$ 是波长的函数, 因此不同波长的光谱光通量可表示为

$$\Phi_s(\lambda) = \Phi_{\text{total}} \frac{K_m P(\lambda) V(\lambda)}{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} = \Phi_{\text{total}} \frac{y_s(\lambda) V(\lambda)}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda}. \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 得到被测灯的总光通量为

$$\Phi_{\text{test}} = \Phi_{\text{total}} \int_{380}^{780} \frac{y_t(\lambda) V(\lambda)}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \frac{1}{\alpha(\lambda)} d\lambda. \quad (5)$$

对于标准灯, $\int_{380}^{780} y_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ 是固定值, 因此(5)式可表示为

$$\Phi_{\text{test}} = \frac{\Phi_{\text{total}}}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \int_{380}^{780} y_t(\lambda) V(\lambda) \frac{y_{\text{aux},s}(\lambda)}{y_{\text{aux},t}(\lambda)} d\lambda. \quad (6)$$

令 $y_{aux,s}(\lambda) = y_{aux,t}(\lambda) + \Delta y_{aux}(\lambda)$, 则被测灯的总光通量可表示为

$$\Phi_{test} = \Phi_{total} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda} + \Phi_{total} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda)V(\lambda) \frac{\Delta y_{aux}(\lambda)}{y_{aux,t}(\lambda)} d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda}。 \quad (7)$$

令 $\Phi_t = \Phi_{total} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda}$, $\Phi_c = \Phi_{total} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda)V(\lambda) \frac{\Delta y_{aux}(\lambda)}{y_{aux,t}(\lambda)} d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda}$, 则(7)式可表示为

$$\Phi_{test} = \Phi_t + \Phi_c, \quad (8)$$

式中 Φ_t 为不考虑自吸收效应的光通量, Φ_c 为考虑自吸收效应时光通量的修正值。 Φ_c 的取值有赖于 $\Delta y_{aux}(\lambda)$, 当 $\Delta y_{aux}(\lambda) > 0$ 时, $\Phi_{test} > \Phi_t$; 当 $\Delta y_{aux}(\lambda) < 0$ 时, $\Phi_{test} < \Phi_t$ 。

2.2 光度法

光度法又称光电积分法, 测量灯具光通量的系统主要包括积分球、光度探测器、光电转化电路等, 在光度探测器前需要加滤光片实现 $V(\lambda)$ 的校正^[8]。在考虑自吸收效应的情况下, 被测灯光通量的测量满足^[9]

$$\Phi'_{test} = \alpha' \times \frac{E_t}{E_s} \times \Phi_s, \quad (9)$$

式中 α' 为自吸收效应修正系数, E_t 为被测灯的照度, E_s 为标准灯照度, Φ_s 为标准灯的光通量。如果光度法和分光光谱法使用的标准灯相同, 则在数值上 $\Phi_s = \Phi_{total}$ 。根据光度法测量灯具光通量的方法和步骤, 可得

$$\frac{E_t}{E_s} = \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda}。 \quad (10)$$

为了获得光度法测量灯具光通量的修正系数, 实验时只点亮辅助灯, 先后在积分球内放入标准灯和被测灯, 分别测得两次辅助灯的照度 $E_{aux,s}$ 和 $E_{aux,t}$, 则 α' 可表示为

$$\alpha' = \frac{E_{aux,s}}{E_{aux,t}} = \frac{\int_{380}^{780} y_{aux,s}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} y_{aux,t}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}。 \quad (11)$$

在不考虑自吸收效应的情况下, 光度法测得的灯具光通量为

$$\Phi'_t = \Phi_{total} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda}。 \quad (12)$$

比较(12)式和(7)式的第一项, 能够看出在不考虑自吸收效应的情况下, 分光光谱法与光度法测得的同一灯具的光通量相同。

由以上分析能够得到补偿自吸收效应光通量的修正值为 $\Phi'_c = \Phi'_t (\alpha' - 1)$, 因此, 自吸收效应修正值的正负取决于 $\alpha' > 1$ 还是 $\alpha' < 1$ 。再比较补偿值 Φ_c 和 Φ'_c , 能够看出两种方法获得的光通量修正值存在差异。

3 实验测量

3.1 测量过程

为了比较分光光谱法和光度法测量光通量的具体情况, 采用积分球比较法进行实验测量。第一步校准标准灯; 第二步校准辅助灯; 第三步分别测量不考虑自吸收效应和考虑自吸收效应情况下灯具的光通量^[10]。

选择直径为 1.5 m 的积分球, 测量时使用同一积分球, 积分球内探测器可以更换, 采用光度法测量时使用光度探测器, 采用分光光谱法测量时使用光纤探测器, 两种测量方法分别采用两个测量系统。分光光谱法测量系统由积分球、光纤探测头(OFD)、光纤(OF)、光谱仪(OSE)、数据采集系统(DAQ), 以及上位机(PC)等组成, 如图 1 所示。光度法测量系统由积分球、光度探测器(D)、光电转化电路(I/V)、数据采集系统以及

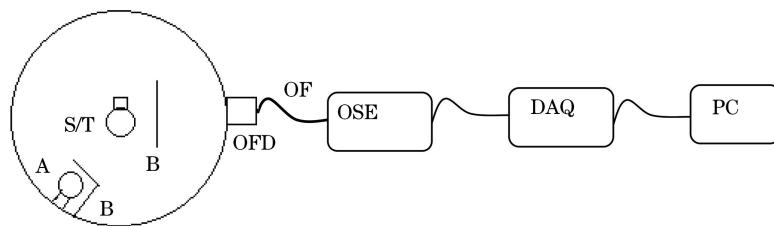


图 1 分光光谱法测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of measurement system for power-spectral method

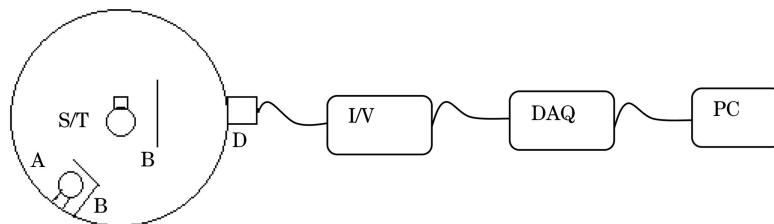


图 2 光度法测量系统示意图

Fig. 2 Schematic of measurement system for photometric method

上位机等组成,如图 2 所示。图 1 和图 2 中,S/T 表示标准灯/被测灯,B 表示挡板,A 表示辅助灯。

选择卤素灯作为标准灯(24 V,2.1543 A,50 W),其体型很小,标准灯光通量为 796.1 lm。

被测灯包括带装饰节能灯(标称值 40 W,内部安装环形节能灯,外壳采用半透明塑料且有少量纹饰,属于 2π 型光源)、螺旋管式节能灯(标称值 45 W,上端为塑料外壳,下部为螺旋状荧光管,属于近似 4π 型光源)、LED 路灯(标称值 98 W,正白,外壳为铝合金散热片,发光面覆盖一层玻璃,发光角度 120°)。

辅助灯包括钨丝白炽灯(标称值 40 W,外壳为玻璃,属于近似 4π 型光源)、节能灯(标称值 40 W,上部为塑料外壳,下部为螺旋状荧光管,属于近似 4π 型光源)、LED 灯泡(标称值 15 W,正白,上部为塑料外壳,下部为亚克力材质半球罩,属于 2π 型光源)。

在不考虑吸收效应的情况下,经过标准灯校正,以上被测灯和标准灯在可见光波段的相对功率分布 $y_t(\lambda)$ 和 $y_s(\lambda)$,如图 3 所示。

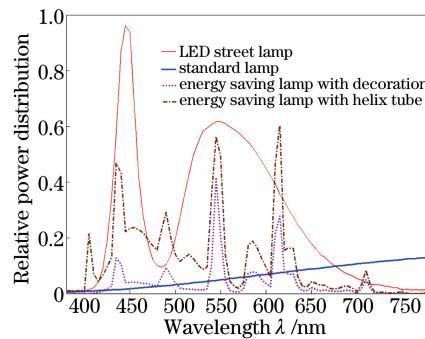


图 3 不考虑自吸收效应时灯具的相对功率分布

Fig. 3 Relative power distribution of lamps without self-absorption effect

由图 3 可知,不同类型的灯具光谱分布不同,尽管螺旋管式节能灯和带装饰的节能灯发光机制和发光材料相同,但是灯的结构和外罩材料不同,造成光谱分布存在一定差异。根据图 1 所示的测量方法和标准灯的光通量可以得到不考虑自吸收效应时被测灯的光通量。

3.2 测量结果

分别采用分光光谱法和光度法测量被测灯具的光通量,结果如表 1 所示。为了分析自吸收效应补偿的结果,表 1 列出了光通量修正值 Φ_c 和 Φ'_c ,括弧内为实际测量时被测灯、辅助灯的实际功率。

由表 1 的数据可知,不考虑自吸收效应的情况下,被测灯的光通量相等,由于采用的测量方法不同,光通

量值有所差异;考虑自吸收效应的情况下,两种方法测得的光通量值相差较大,分光光谱法测得的光通量值非常相近,而光度法测得的光通量值相差较大。在不同的辅助灯修正下,采用分光光谱法测得的光通量修正值非常接近,在实验误差范围内可以认为相等,而采用光度法测得的光通量修正值相差较大。

表 1 分光光谱法和光度法测量被测灯具的光通量值和修正值

Table 1 Luminous flux and modified luminous flux of test lamps by power-spectral method and photometric method

Test lamp	Auxiliary lamp	Luminous flux without self-absorption effect Φ_t/lm		Luminous flux with self-absorption effect $\Phi_{\text{test}}/\text{lm}$		Modified luminous flux Φ_c/lm	
		Power-spectral method	Photometric method	Power-spectral method	Photometric method	Power-spectral	Photometric
						method	method
Incandescent							
Energy saving lamp with decoration (38.0 W)	light bulb (38.1 W)	1046.8	1036.4	1259.0	1238.1	212.2	201.7
	Energy saving lamp (35.4 W)	1046.8	1036.4	1259.4	1265.4	212.6	229.0
	LED lamp (14.3 W)	1046.8	1036.4	1259.1	1278.4	212.0	242.0
Incandescent							
Energy saving lamp with helix tube (39.4 W)	light bulb (38.1 W)	2566.9	2577.7	2628.2	2619.0	61.3	41.3
	Energy saving lamp (35.4 W)	2566.9	2577.7	2627.6	2651.1	60.7	73.4
	LED lamp (14.3 W)	2566.9	2577.7	2627.3	2645.2	60.4	64.5
Incandescent							
LED street lamp(96 W)	light bulb (38.1 W)	6973.7	6978.0	9567.1	9540.7	2583.4	2562.7
	Energy saving lamp (35.4 W)	6973.7	6978.0	9569.8	9384.6	2596.1	2406.6
	LED lamp (14.3 W)	6973.7	6978.0	9576.2	9681.6	2592.5	2903.6

4 分析与讨论

实验结果表明,分光光谱法测得的光通量修正值不因辅助灯的不同而变化,光度法测得的光通量修正值随辅助灯相对功率分布的不同而变化。采用分光光谱法测量灯具光通量时,考虑积分球的匀光作用,使用辅助灯标定吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 。辅助灯点亮,先后放入标准灯和被测灯,经过光纤探测和分光光谱仪等获得辅助灯的相对功率分布为

$$y_{\text{aux},t}(\lambda) = kP_0(\lambda)[1 - \epsilon_t(\lambda)], \quad (13)$$

$$y_{\text{aux},s}(\lambda) = kP_0(\lambda)[1 - \epsilon_s(\lambda)], \quad (14)$$

式中 k 为转换因子, $P_0(\lambda)$ 为辅助灯在可见光波段内的相对功率, $\epsilon_s(\lambda)$ 、 $\epsilon_t(\lambda)$ 分别为标准灯和待测灯对光的光谱吸收因子。光谱吸收因子是指灯具吸收一定波段的光功率占整个波段总的发光功率的百分比。由 $y_{\text{aux},s}(\lambda) = y_{\text{aux},t}(\lambda) + \Delta y_{\text{aux}}(\lambda)$ 可得

$$\Delta y_{\text{aux}}(\lambda) = kP_0(\lambda)[\epsilon_t(\lambda) - \epsilon_s(\lambda)], \quad (15)$$

联立(13)式和(14)式可得 $\frac{\Delta y_{\text{aux}}(\lambda)}{y_{\text{aux},t}(\lambda)} = \frac{\epsilon_t(\lambda) - \epsilon_s(\lambda)}{1 - \epsilon_t(\lambda)}$ 。根据 $\Phi_c = \Phi_{\text{total}} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda)V(\lambda) \frac{\Delta y_{\text{aux}}(\lambda)}{y_{\text{aux},t}(\lambda)} d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda)V(\lambda) d\lambda}$, 可得

$$\Phi_c = \Phi_{\text{total}} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda) V(\lambda) \frac{\epsilon_t(\lambda) - \epsilon_s(\lambda)}{1 - \epsilon_t(\lambda)} d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (16)$$

(16)式表明分光光谱法测量灯具光通量的修正值与不考虑自吸收效应下的被测灯和标准灯的相对功率分布有关，并与被测灯和标准灯的光谱吸收因子有关，而光谱吸收因子与灯具的表面积和材料的性质有关^[11]。一般来说，灯具体积越大，光谱吸收因子也越大。但是，在灯具的形状和材料确定之后， $\epsilon_s(\lambda)$ 与 $\epsilon_t(\lambda)$ 的取值是确定的。因此，从理论上分析，分光光谱法无论采用哪种光谱的辅助灯补偿自吸收效应获得的光通量，修正值都是唯一确定的。

根据光度法测量灯具光通量的理论，分析(12)式和 $\Phi'_c = \Phi'_t (\alpha' - 1)$ ，可得光度法测量灯具光通量的修正值为

$$\Phi'_c = \Phi'_t \left[\frac{\int_{380}^{780} y_{\text{aux},s}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} y_{\text{aux},t}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} - 1 \right] = \Phi'_t \frac{\int_{380}^{780} [y_{\text{aux},s}(\lambda) - y_{\text{aux},t}(\lambda)] V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} y_{\text{aux},t}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (17)$$

联立(13)~(15)式，可得

$$\Phi'_c = \Phi_{\text{total}} \frac{\int_{380}^{780} y_t(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} y_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int_{380}^{780} P_0(\lambda) [\epsilon_t(\lambda) - \epsilon_s(\lambda)] V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P_0(\lambda) [1 - \epsilon_t(\lambda)] V(\lambda) d\lambda} \quad (18)$$

比较(16)式与(18)式可知，分光光谱法测量灯具光通量修正值与辅助灯的相对功率分布无关，与辅助灯的功率大小也无关；而光度法测量灯具光通量修正值与辅助灯的相对功率分布有关。因此，表1的实验数据中，分光光谱法测得的光通量修正值几乎相等，而光度法测得的灯具光通量修正值不同。

5 结 论

在考虑被测灯具的自吸收效应的情况下，通过理论分析得到了分光光谱法和光度法测量灯具光通量修正值的表达式。在分析实验数据的基础上，探讨了两种测量方法对光通量修正值的影响。根据以上研究，得到如下结论：

- 1) 相同情况下分光光谱法与光度法测量灯具光通量，在不考虑自吸收效应时光通量理论上应该相同，而考虑自吸收效应时，光通量与辅助灯的选取有关；
- 2) 积分球比较法测量灯具光通量时，采用辅助灯补偿灯具的自吸收效应，分光光谱法测得的光通量修正值与辅助灯相对功率分布无关，光度法测得光通量的修正值与辅助灯相对功率分布有关；
- 3) 分光光谱法测量灯具光通量时，采用不同光谱的辅助灯测得的光通量修正值相同；而光度法测量灯具光通量时，采用不同光谱的辅助灯测得的光通量修正值有差异。

因此，采用分光光谱法测量灯具的光通量时，辅助灯可以选取白炽灯、LED 灯或节能灯，但是光度法测量灯具光通量时，需要考虑辅助灯选取所引入的测量误差。建议光度法测量灯具光通量时，选取白炽灯、LED 灯和节能灯作为辅助灯测量光通量修正值，再取平均值，以减小测量误差。

参 考 文 献

- 1 Ohno Y. New method for realizing a luminous flux scale using an integrating sphere with an external source[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1995, 24(1): 106-115.
 - 2 Gorrotxategi P, Consonni M, Gasse A. Optical efficiency characterization of LED phosphors using a double integrating sphere system[J]. Journal of Solid State Lighting, 2015, 2(1): 1-14.
 - 3 Li Zhenguo, Wei Qing. Measurement principle and technology of optical radiation [M]. Beijing: Chinese Building Materials Industry Press, 1998: 30-31.
- 李振国，魏青. 光辐射测量原理与技术[M]. 北京：中国建材工业出版社，1998: 30-31.

- 4 Carrasco-Sanz A, Martín-López S, Corredora P, *et al.* High-power and high-accuracy integrating sphere radiometer design, characterization, and calibration[J]. Applied Optics, 2006, 45(3): 511-518.
- 5 Sun Jingxu, Zhang Hanzhuang. Thermal design for a kind of high-light-level integrating sphere calibration source[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0312002.
孙景旭, 张汉壮. 一种高亮度积分球定标光源的热设计[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0312002.
- 6 Yang Benyong, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.* System design of the integrating sphere used for on-board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3545-3550.
杨本永, 张黎明, 陈洪耀, 等. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3545-3550.
- 7 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Qu Yi, *et al.* Research of UV spectral radiance characteristics of the integrating sphere based on calibration by the absolute radiance radiometer[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1008007.
杨小虎, 王淑荣, 曲艺, 等. 基于绝对辐亮度计定标的积分球紫外光谱辐射特性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008007.
- 8 Vos J J. Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer[J]. Color Research and Applicaiton, 1978, 3(3): 125-128.
- 9 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiometry photometry colorimetry theory and measurement[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011: 209-211
金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011: 209-211
- 10 International Commission on Illumination. The measurement of luminous flux[S]. 1989.
- 11 Huang Kun. Solid state physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2014: 437-752
黄昆. 固体物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 437-752.