

红外热辐射光源配光特性的快速测量及仿真

邱乙耕^{1,2}, 范元媛^{1,2,3*}, 王倩^{1,2}, 颜博霞^{1,2}, 王延伟^{1,2}, 韩哲^{1,2}, 亓岩^{1,2}¹中国科学院微电子研究所光电技术研发中心, 北京 100094;²中国科学院大学光电学院, 北京 100049;³应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 红外热辐射光源在光声光谱检测等领域具有重要的应用价值, 明确其配光特性是后续光学系统设计的基础。根据水冷散热下红外热辐射光源辐射通量的变化规律, 提出快速获取高功率红外热辐射光源配光特性的方法并对其进行相关验证。实验结果表明, 光源辐射通量的最大值在 80° 的角度处, 两侧的辐射通量缓慢减小, 能量分散在 0°~130° 的角度范围内, 其中 54.5% 的能量集中在 50°~110° 的角度范围内。在长时间稳定的辐射状态下对配光特性进行对比实验, 验证快速测量方法的准确性和有效性。在 ZEMAX 软件中突破光源角度的限制, 使用测得的数据建立模型并模拟实验流程进行验证。在缺少高功率红外热辐射光源配光曲线的情况下, 所提方法可以简单快速地获取配光特性, 为光学设计提供初始条件。

关键词 测量; 配光曲线; 红外热辐射光源; 光学建模; 配光特性

中图分类号 O432.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0212003

Rapid Measurement and Simulation of Light Distribution Characteristic of Infrared Thermal Radiation Light Source

Qiu Yigeng^{1,2}, Fan Yuanyuan^{1,2,3*}, Wang Qian^{1,2}, Yan Boxia^{1,2},
Wang Yanwei^{1,2}, Han Zhe^{1,2}, Qi Yan^{1,2}¹ R & D Center of Optoelectronic Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;² School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Infrared thermal radiation light source has important applications value in such fields as photoacoustic spectroscopy detection, and its light distribution characteristic is the basis of subsequent optical system design. In this paper, according to the variation law of radiant flux of the infrared thermal radiation light source under water cooling, a method for quickly obtaining the light distribution characteristic of a high-power infrared thermal radiation light source is proposed and verified. The experimental results show that the radiant flux of the light source is at an angle of 80°, and the radiant flux on both sides decreases slowly, and the energy is dispersed in the range of 0°–130°, 54.5% of which is concentrated in the range of 50°–110°. Furthermore, the accuracy and effectiveness of the rapid measurement method are verified through a comparative experiment of the light distribution characteristics under stable radiation for a long time. Beyond that, breaking the limit of light source angle in the ZEMAX software, the measured data is used to build a model and simulate the experimental process for verification. In conclusion, in the absence of the light distribution curve of the high-power infrared thermal radiation

收稿日期: 2020-07-09; 修回日期: 2020-08-09; 录用日期: 2020-08-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01011801)、应用光学国家重点实验室开放基金(SKLAO-201915)、中国科学院青年创新促进会(2020121)

* E-mail: fanyuanyuan@ime.ac.cn

source, the proposed method can obtain the light distribution characteristics simply and quickly, providing initial conditions for optical design.

Key words measurement; light distribution curve; infrared thermal radiation light source; optical modeling; light distribution characteristic

OCIS codes 120.5630; 080.2740; 080.1510

1 引言

目前,常用的红外光源主要有二极管光源、激光光源、气体放电光源和红外热辐射光源^[1]。近年来,随着工艺和技术的发展^[2],红外热辐射光源的光学参数趋近理想黑体,该光源可在 3~14 μm 的光谱范围内提供高功率辐射,说明其是光声光谱仪等红外测量仪器的首选光源之一^[3]。光源的配光曲线可以表征辐射源辐射到立体空间各角度下辐射通量的分布情况,这是优化设计光学系统的基础。精密的光学系统中,根据实际需求对各角度的光线进行不同的调制^[4]以产生期望的光分布。与照明光源 LED (Light-Emitting Diode)等^[5]不同,红外热辐射光源的制造商一般不提供说明配光特性的配光曲线。

测量光源辐射光场的空间分布方式可按测量过程中是否进行旋转操作分为非旋转测量和旋转测量两类。非旋转测量的方式是在被测辐射源的各空间角度处等距安装探测器,这可以同时获取各角度下的探测数据^[6]。旋转测量的方式一般通过旋转光源并使用单探测器即可完成各角度的测量,根据被测辐射源的对称性及需求可旋转一至三轴^[7]。单探测器旋转测量的方式是在光路中加入反射镜和滤光片等光学元件^[8],这可以达到折叠光路和过滤光线的目的。目前,单探测器旋转测量的方式广泛应用于照明光源的测量。Jenkins 等^[9]使用 CCD (Charge Coupled Device)对超高压汞灯进行三轴成像测角,从而获取光源在各方向上的发光强度。石丽平等^[10]对钨丝灯进行了大量的研究,并介绍了钨丝灯在工作条件下各参数和探测器误差对测量结果的影响。王善鑫等^[11]搭建了用于测量光导管配光曲线的光导测试系统。蔡志岗等^[12]将像素坐标与空间坐标进行了标定,可以实现 LED 发光强度与出射角度的一一映射,扣除图像背景后可以通过像素灰度来获取光强。目前,关于高功率异形红外热辐射光源配光特性的研究鲜有报道。

高功率异形红外热辐射光源的工作温度较高,导致自身发热量较大,达到稳定的输出功率需要几个小时。光源的体积较小,导致能量密度较高,所以

无法充分发挥水冷散热器的优势。在有限的空间中安装水冷散热装置后,光源达到稳定的输出功率也需要几十分钟。辐射通量的持续波动加之红外线的热效应会在探测器上形成热积累,无法使用测量普通照明光源配光特性的单探测器转台。多探测器可以同时测量以解决由时间带来的差异,但中红外探测器的价格昂贵,每个测量角的角度差又受限于探测器的体积,这会影响测量精度。

本文使用单红外探测器对特定的旋转角度和时间进行多次测量,能够快速且稳定地获取高功率异形红外热辐射光源的配光曲线,多次测量可以减少由红外热辐射光源辐射通量随着通电时间的增长而增长,以及红外探测器持续工作的热积累造成的影响。

2 实验装置及测量条件

2.1 实验装置

使用单探测器测量红外热辐射光源配光特性的装置如图 1 所示,其中 IR 为红外。红外热辐射光源的中心在转台的旋转轴上,这可以使二者同时旋转。红外探测器与红外热辐射光源同轴等高,通过调整二者间距离来保证所探测的辐射通量始终在有效的量程范围内。测量过程中,红外热辐射光源发出的光线在传播特定的距离后被红外探测器接收,通过旋转转台来改变红外热辐射光源与探测器之间的相对角度,从而得到各角度下的辐射通量。

实验选用由 Hawkeye 公司生产且型号为 IR-SI272 的红外热辐射光源,其辐射区的材料为棒状氮化硅,尺寸为 2.8 mm (D) \times 5 mm (L),由电压为 6 V 和电流为 5 A 的直流电源驱动,典型的工作温度为 1160 $^{\circ}\text{C}$,电光效率为 80%,其中 D 为直径, L 为长度。红外热辐射光源的自身发热量大,需要配合散热装置来工作。红外探测器选用由 GENTEC-EO 公司生产且型号为 XLP12-3S-H2-D2 的热电堆探测功率计,响应波段为 0.19~20.00 μm ,探测孔径为 12 mm。探测孔径的外罩为管状光阑,其内径为 25.5 mm,用于消除由空气湍流造成的功率波动并遮挡大角度的杂散光^[13]。

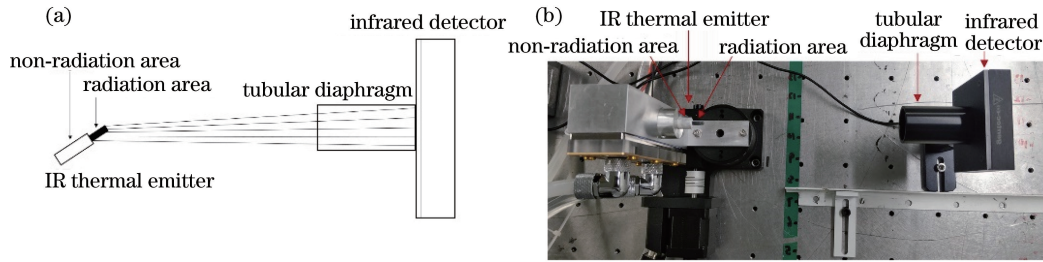


图 1 红外热辐射光源配光特性的测量装置。(a)原理图;(b)实物照片

Fig. 1 Measuring device for light distribution characteristics of infrared thermal radiation light source.

(a) Schematic diagram; (b) physical photo

2.2 测量条件

为了保证测量结果的相对准确,实验过程中应避免内、外部环境变化对红外热辐射光源及红外探测器产生干扰。实验全程是在暗室中进行的,无其他光源和热源,控制暗室内的温度为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 55% 。

2.2.1 辐射通量的线性增长区

在红外热辐射光源周围固定部分集成式微水道,使用水冷散热器对红外热辐射光源进行散热。红外热辐射光源在对称轴的方向上正对红外探测器,二者间距为 70 mm ,测得的辐射通量与通电时间的关系如图 2 所示。从图 2 可以看到,水冷散热在测量周期内可以有效降低并稳定辐射通量的增长速率。对数据进行线性拟合,拟合后的残差平方和低至 0.00079 ,拟合直线方程可表示为

$$\varphi = 0.00211t + 2.55377, \quad (1)$$

式中: φ 为辐射通量; t 为通电时间。

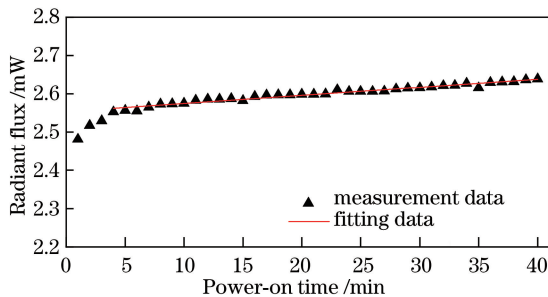


图 2 辐射通量与通电时间的关系

Fig. 2 Relationship between radiant flux and power-on time

从图 2 可以看到,水冷散热器的工作时间范围为 $4\sim 40\text{ min}$,红外热辐射光源所辐射的辐射通量随着通电时间的增长呈一次函数缓慢增长,最后逐渐达到稳定,定义此时间段为辐射通量的线性增长区。在此区域内,辐射通量与通电时间的关系满足配光特性测量实验的数据采集要求,此时可对光源进行测量。

2.2.2 转台旋转路径的规划

根据 2.2.1 节得到的辐射通量与通电时间的变化规律并参考同等探测距离在各角度下的辐射通量,使用单探测器并采用旋转光源的方式对各角度下的辐射通量进行数据采集,以规划探测器的旋转方式与数据的采集路径,进而设计数据的处理方式。利用同一位置的多组数据来计算红外热辐射光源在各角度下的相对辐射通量,从而完成对配光特性的测量。

为了避免红外热辐射光源的辐射通量随着通电时间的增长呈线性增长,以及前向角度位置的热积累对后向角度位置辐射通量的影响,规划两组测量路径。以光源对称轴正对探测器的方向为正方向,定义二者夹角 θ 为 0° ,此为最小的旋转角度。光源转台的旋转路径有两组。第 I 组是从最小的旋转角度处开始测量,逐步增加角度,每个测量位置的旋转角度及测量的时间间隔固定,直至测量最大的旋转角度;随后逐步减小角度,每个测量位置的旋转角度及测量的时间间隔与之前的设置相同,直至测量最小的旋转角度。第 II 组是从最大的旋转角度处开始测量,逐步减小角度,每个测量位置的旋转角度及测量的时间间隔与第 I 组相同,直至最小的旋转角度;随后逐步增加角度,每个测量位置的旋转角度及测量的时间间隔与之前的设置相同,直至测量最大的旋转角度。

红外热辐射光源的辐射通量随着通电时间的增长呈缓慢增长,所以在不同的通电时间中无法直接对所测量的数据进行比较,故选取测量组内最大的测量值对所有角度下的测量值进行归一化处理,得到此测量组内各角度归一化后的辐射通量。对同一角度的所有归一化辐射通量进行平均处理,所得结果为光源各角度的相对辐射通量,其可以表征光源的配光特性。详细的数据处理过程可表示为

$$\bar{\varphi}_{1,n} = \frac{\varphi_{1,n}}{\langle \varphi_{1,n} \rangle_{\max}}, \quad (2)$$

$$\bar{\varphi}_{\parallel, m} = \frac{\varphi_{\parallel, m}}{\langle \varphi_{\parallel, m} \rangle_{\max}}, \quad (3)$$

$$\theta = \begin{cases} (n-1)d, & n \leq N \\ (2N-n)d, & n > N \\ (N-m)d, & m \leq N \\ (m-N-1)d, & m > N \end{cases}, \quad (4)$$

$$\bar{\varphi}_{\theta} = \frac{\bar{\varphi}_{\text{I}, n} + \bar{\varphi}_{\text{I}, 2N-n+1} + \bar{\varphi}_{\text{II}, N-n+1} + \bar{\varphi}_{\text{II}, N+n}}{4}, \quad (5)$$

式中: N 为单组测量的总位置数; n 为第 I 组测量顺序的编号, $n=1, 2, 3, \dots, N, \dots, 2N$; m 为第 II 组测量顺序的编号, $m=1, 2, 3, \dots, N, \dots, 2N$; $\varphi_{\text{I}, n}$ 和 $\varphi_{\text{II}, m}$ 分别为第 I 组中第 n 次和第 II 组中第 m 次测量的辐射通量; $\langle \varphi_{\text{I}, n} \rangle_{\max}$ 和 $\langle \varphi_{\text{II}, m} \rangle_{\max}$ 分别为第 I 组和第 II 组中测量得到的最大辐射通量; $\bar{\varphi}_{\text{I}, n}$ 和 $\bar{\varphi}_{\text{II}, m}$ 分别为第 I 组中第 n 次和第 II 组中第 m 次测量得到的相对辐射通量; d 为旋转步长; $\bar{\varphi}_{\theta}$ 为在 θ 角度下的相对辐射通量。

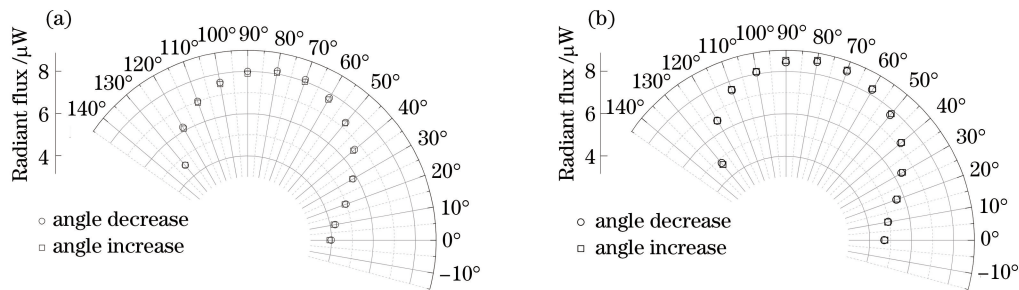


图 3 辐射通量在不同测量方案中的角度分布。(a) 第 I 组测量; (b) 第 II 组测量

Fig. 3 Angular distribution of radiant flux in different measurement schemes. (a) Group I measurement; (b) Group II measurement

采用(2)~(5)式对同一角度下的 4 个测量数据进行归一化与均值处理, 可以获得各角度下的相对辐射通量, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看到, 受到光源非辐射区物理尺寸的限制, 测量的最大角度为 130° , 在 0° 和 130° 的角度处得到的相对辐射通量均为 80° 的一半, 红外辐射几乎覆盖了全空间立体角且极

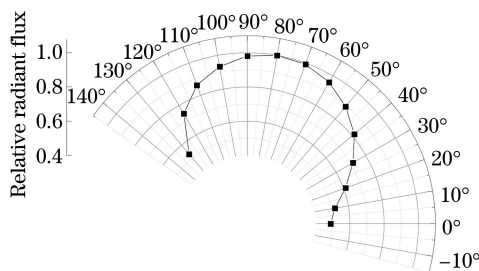


图 4 相对辐射通量与角度的关系

Fig. 4 Relationship between relative radiant flux and angle

3 实验结果及对比较验证

3.1 实验结果

初始状态下, 配光特性测量装置中的光源在对称轴的方向上正对探测器, 二者间距为 225 mm 。在对光源进行通电的同时, 红外探测器开始工作。

光源辐射区的材料为棒状结构, 具有轴对称性, 因此光源的辐射分布是关于光源在正方向上角度为 0° 对称, 测量过程中只需选取其中一个方向进行旋转即可。在辐射通量的线性增长区, 按照设定的路径和间隔来获取各角度下的相对辐射通量。对于此光源, 设定的测量角度间隔为 10° , 最大的旋转角度为 130° , 测量的时间间隔为 20 s , 测量过程应在 30 min 内完成。辐射通量的角度分布如图 3 所示。从图 3(a) 可以看到, 角度减小的过程中测得的数值大于角度增大的过程。从图 3(b) 可以看到, 角度增大的过程中测得的数值大于角度减小的过程, 原因在于光源的辐射通量随着时间的增长呈缓慢线性增长。

为分散, 其中 77.5% 的能量集中在 $30^\circ \sim 120^\circ$ 的角度范围内, 54.5% 的能量集中在 $50^\circ \sim 110^\circ$ 的角度范围内, 18.9% 的能量集中在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的角度范围内。

将各角度下的相对辐射通量数据导入光学仿真软件 ZEMAX 中以生成配光曲线^[14], 如图 5 所示。

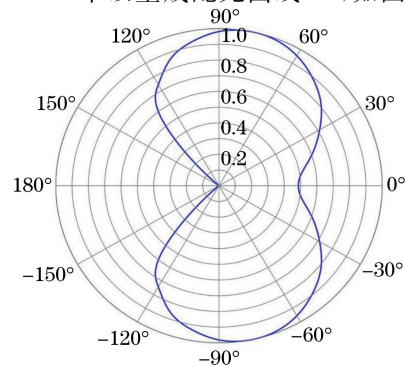


图 5 配光曲线

Fig. 5 Light distribution curve

从图 5 可以看到,光源的配光曲线类似蝴蝶形状,辐射通量集中在棒状辐射体柱面的周围且前表面的能量较少。

3.2 对比验证

为了验证快速测量方法的准确性,关闭实验装置中的水冷电源。在被动散热无其他干扰因素的情况下,对光源进行长时间通电,待其达到相对稳定的辐射通量输出后对其进行旋转测量以获取各角度下的辐射通量,对其进行归一化处理后与快速测量结果进行对比。光源在对称轴的方向上正对红外探测器,辐射通量与通电时间的关系如图 6 所示。从图 6 可以看到,当通电时间近 175 min 时,辐射通量相对稳定。

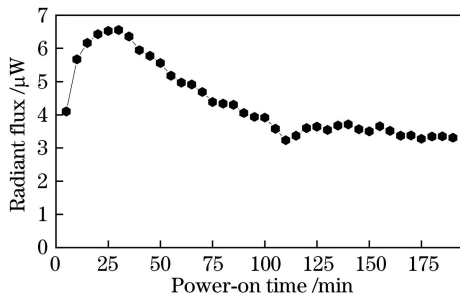


图 6 被动散热下的辐射通量与通电时间的关系

Fig. 6 Relationship between radiant flux and power-on time under passive cooling

通电 190 min 后对辐射通量进行旋转测量,记录 $0^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 角度下的辐射通量,对其进行归一化处理可以得到各角度下的相对辐射通量,将其与快速测量得到的数据进行对比,对比曲线如图 7 所示。从图 7 可以看到,两种情况下的测量结果基本吻合,说明快速测量方法及装置可获得稳定的测量效果,并具有相对的准确性。

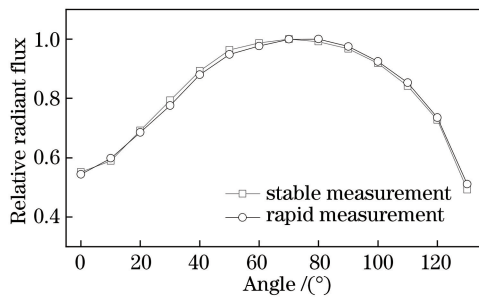


图 7 稳定测量与快速测量的结果对比

Fig. 7 Comparison of results of stable and rapid measurement

4 光学建模

为了后续的光学设计,在 ZEMAX 软件中按照红外热辐射光源和红外探测器的几何尺寸进行建

模,并将快速测量法测得的相对辐射通量与角度分布作为光学系统激励源的辐射条件,采用该条件对光源辐射光线的分布情况进行设置。

ZEMAX 软件的非序列模式中有多种类型的光源可供设计者选择,其中管光源、圆柱体光源和径向光源的辐射区形状均与实验过程中使用的红外热辐射光源类似。管光源和圆柱体光源所模拟的光线分别从管壁和柱体内的任意点发出,且均是沿着随机的方向进行传播,而且在发光位置和传播方向上均具有均等的概率,但模拟的辐射分布与实际光源不符。径向光源为轴对称光源,其可基于任意强度与角度数据进行样条拟合,这满足自定义光源配光特性的需求。径向光源可设置的最大角度为 90° ,远远小于实验过程中所测量的角度。为了在全空间中对光源的配光特性进行模拟,建模过程中设置由两个径向光源组成的光源辐射区域。其中一个径向光源的发光角度范围为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$,称为前向光源;另一个光源设置在相同的位置处,以圆形辐射面的直径为轴旋转 180° ,发光角度范围为 $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$,称为后向光源。对测得的相对辐射通量与角度数据进行积分可以获得两个光源的能量比重,表达式为

$$\bar{\Phi}_f = \int_0^k \bar{\varphi}_\theta = 0.690, \quad (6)$$

$$\bar{\Phi}_b = \int_k^1 \bar{\varphi}_\theta = 0.310, \quad (7)$$

式中: $\bar{\Phi}_f$ 为前向光源能量的比重; $\bar{\Phi}_b$ 为后向光源能量的比重; k 为前向光源的比例系数,用于描述前向光源辐射角度占光源总辐射角度的比重。

由(6)式和(7)式可知,角度范围为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的前向光源能量占总能量的 69.0%,角度范围为 $90^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 的后向光源能量占总能量的 31.0%,实际的 $90^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 的角度范围对应后向光源的 $90^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。前向和后向两个径向光源按所占总能量的比重来设置光源参数,即能量与光线条数。将(5)式所得的相对辐射通量代入光学仿真软件 ZEMAX 中,分析过程中对 1×10^6 条光线进行追迹。

红外热辐射光源配光特性的模拟测量装置如图 8 所示。在软件中旋转光源角度以获得红外探测器在 $0^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 的角度范围内所接收到的辐射通量,采用处理原始实验数据的方法对辐射通量进行归一化处理,得到各角度下的相对辐射通量。所得结果符合实验测得的相对辐射通量与角度的关系,说明该光学建模方法准确可行。

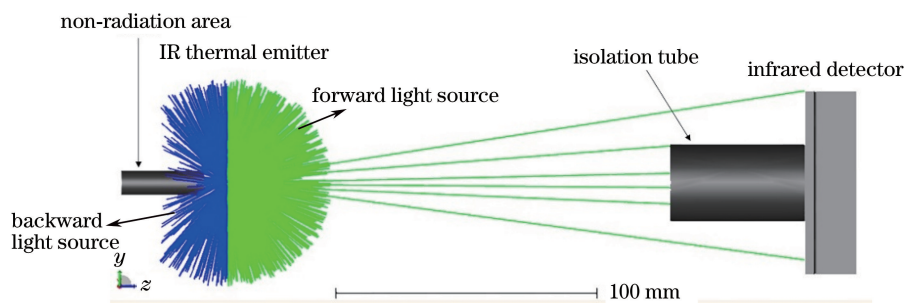


图 8 配光特性的模拟测量装置

Fig. 8 Simulation of light distribution characteristic measuring device

5 结 论

本课题组设计集成微水道的测量装置,使用水冷散热器对红外热辐射光源进行散热,在测量周期内可以有效降低并稳定辐射通量的增长速率,在时间与空间维度中规划数据的采集方式并设计数据的处理方法,采用旋转测量的方式可以实现对红外热辐射光源配光特性的快速测量。根据变化规律而设定的多次旋转测量方式可以避免红外热辐射光源的辐射通量随通电时间呈线性增长,并减少快速测量中前向角度位置的热积累对后向角度位置辐射通量的影响。首先测得 HAWKEYE IR-SI272 光源辐射分散在角度范围为 $0^{\circ}\sim 130^{\circ}$,在角度为 80° 处有相对辐射通量的最大值,而两侧的辐射通量缓慢减小。然后将在长时间稳定的辐射状态下测量得到的结果与快速测量方法进行比较,测量结果基本吻合,说明快速测量方法具有准确性。最后将测量数据作为光源参数代入光学仿真软件 ZEMAX 中,使用两个径向光源对实验测得的光源配光特性进行全空间模拟,所得结果与实验结果一致。快速测量方法可以简单地快速获取高功率异形红外热辐射光源的配光特性,绘制的配光曲线可为光学设计与初始条件优化提供支撑。

参 考 文 献

- [1] Hu L J, Ren X H, Dong C. Application of infrared source in the detection of harmful gases[J]. *Infrared*, 2016, 37(3): 1-5.
胡莉军, 任向红, 董超. 红外光源在有害气体检测中的应用研究[J]. *红外*, 2016, 37(3): 1-5.
- [2] Sakat E, Wojszwyk L, Hugonin J P, et al. Enhancing thermal radiation with nanoantennas to create infrared sources with high modulation rates [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 175-179.
- [3] Mikkonen T, Amiot C, Aalto A, et al. Fourier transform photoacoustic spectroscopy with supercontinuum light source[C]//Frontiers in Optics 2019, September 15-19, 2019, Washington, DC United States. Washington, D. C.: OSA, 2019: JTU4A.103.
- [4] Zhang Z M, Li K, Kong F M, et al. Study on improving light emitting efficiency of LED by using silver nanodisk array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0423001.
张振明, 李康, 孔凡敏, 等. 采用银纳米圆盘阵列提高 LED 发光特性的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0423001.
- [5] Qian K Y. Near field optical modeling of LED and design optimization for direct-type backlight optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0522001.
钱可元. LED 近场光学模型与直下式背光源透镜的设计优化[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0522001.
- [6] Ren H, Li K Y, Wang Q B, et al. LED light source intensity space distribution characteristic test device: CN200820046804.5[P]. 2009-04-29.
任豪, 李康业, 王巧彬, 等. 一种 LED 光源光强空间分布特性测试装置: CN200820046804.5[P]. 2009-04-29.
- [7] Yu Z P, Zheng Z R, Lu W. Automatic measurement for light distribution curve of ultra high pressure mercury lamps [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(8): 1269-1272.
於志平, 郑臻荣, 陆巍. 超高压汞灯配光曲线的自动测量[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(8): 1269-1272.
- [8] Pan J G, Pan W S. Distribution photometer: CN201530014600.9[P]. 2015-07-08.
潘建根, 潘文松. 分布光度计: CN201530014600.9 [P]. 2015-07-08.
- [9] Jenkins D R, Monch H. P-81: source imaging goniometer method of light source characterization for accurate projection system design [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2000, 31(1): 862.
- [10] Shi L P, Liu B C, Zhang S C. Measurement of

- luminaire light distribution curve [J]. *China Metrology*, 2009(7): 80-81.
- 石丽平, 刘宝成, 张守超. 照明器配光曲线的测量 [J]. *中国计量*, 2009(7): 80-81.
- [11] Wang S X, Zhang J H, Gao Y M, et al. Measurement of light distribution curve for light guide illuminating system [J]. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 2014, 33(1): 66-70.
- 王善鑫, 张竞辉, 高英明, 等. 光导照明系统配光曲线的测试 [J]. *大连工业大学学报*, 2014, 33(1): 66-70.
- [12] Cai Z G, Ma H J, Lin Y L, et al. A fast measurement method of LED light distribution curve is presented: CN201510387472.1[P]. 2015-10-14.
- 蔡志岗, 马鸿键, 林燕玲, 等. 一种 LED 配光曲线快速测量方法: CN201510387472.1[P]. 2015-10-14
- [13] Yang K Y, Jin N, Cao L, et al. Optimization design of stop aperture shape for uncooled infrared detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0811002.
- 杨开宇, 金宁, 曹凌, 等. 非制冷红外探测器光阑开孔的优化设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0811002.
- [14] IESNA. ANSI/IESNA standard file format for the electronic transfer of photometric data and related information: ANSI/IESNA LM-63-02 [S]. USA: The Subcommittee on Photometry of the IESNA Computer Committee, 2002.