

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0117-03

发光二极管在高速纹影仪中的应用

吴国俊 何俊华 吴玲玲 仓玉萍 石科峰

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 纹影法是进行流场测量的重要手段之一。在高速纹影法测量过程中,照明的质量将对测量结果产生重要影响。为了获得照度分布均匀、光能利用率高、价格便宜、控制方便的照明系统,提出了发光二极管(LED)照明方式。对纹影系统的结构及光学扩展量进行了分析,并结合成像设备计算出实际测量面所需光通量。根据光通量的要求,对 LED 进行选型、布局,并设计采用开普勒式望远镜结构进行准直。针对工程中常用的反射式纹影仪,利用 Tracepro 建立光学模型,并计算出纹影仪测量面的照度分布及光通量。计算结果表明,采用 LED 照明系统可以很好地满足纹影仪照明要求。

关键词 几何光学;纹影仪;发光二极管;光通量

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0117

Light Emitting Diode Applied to Fast-Speed Schlieren Device

Wu Guojun He Junhua Wu Lingling Cang Yuping Shi Kefeng

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract Schlieren device is an important method for the measurement of transient flow field. The illumination effect serves as a vital role for its measuring result. A lighting system based on light emitting diode (LED) was designed to solve the problem of schlieren's illumination. The structure and etendue of schlieren device was analyzed, and the light flux of the object plane was calculated. According to the calculated result, the type of LED was selected, the layout and the optical collimating system were designed. The model of the lighting system was built through Tracepro, the illuminance distribution and light flux were analyzed. The calculated result indicated the lighting system based on LED met the challenge of schlieren device.

Key words geometric optics; schlieren device; light emitting diode; light flux

1 引言

纹影仪结合高速摄影机不仅可以直观地记录流场密度分布,也可以验证流场的数值计算,是研究高速流场不可缺少的重要手段^[1]。

在记录过程中,光源对纹影系统的灵敏度和偏折范围有着重要的影响。为了实现纹影或阴影的记录,纹影系统需要将光源光束准直为平行光束照明被测物面。常用的光源有激光、脉冲氙灯和电火花,然而激光因相干性好,易产生衍射光斑,不利于纹影和阴影照像;脉冲氙灯和放电火花由于发光面积大、准直效果差、能量利用率低(通常不足 1%),也不利于纹影和阴影照像。

随着半导体技术的不断改进,发光二极管(LED)

已成为一种重要的照明光源。LED 光源运用于纹影仪中具有如下优点:1)可实现瞬时开关;2)转换效率高;3)输出光束接近单色光;4)接近于点光源,通过封装准系统,可实现准平行光束出射^[2~5]。

本文对纹影系统的光学扩展量、能量利用率、光通量等参数进行了计算,在参数分析的基础上提出了以降低能量利用率为代价,通过增加 LED 阵列面积来增加物面光通量的光源设计方法,并利用 Tracepro 模拟计算了物面的光通量及照度分布。

2 系统参量计算

纹影仪结合高速摄影机的工作原理如图 1 所示。光源发出的光束经纹影镜 1 准直后穿过物面,

基金项目: 国家自然科学基金(60337030)和中国科学院“西部之光”人才培养计划西部博士资助课题。

作者简介: 吴国俊(1978—),男,助理研究员,博士,主要从事光学设计方面的工作。E-mail: wuguojun@opt.ac.cn

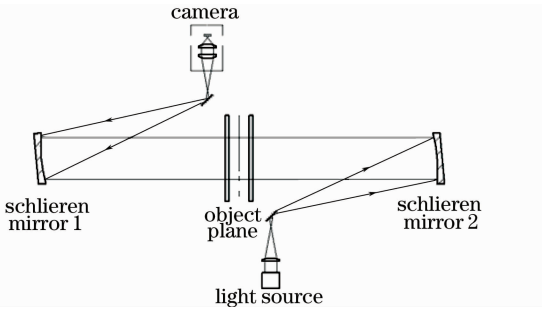


图1 高速纹影仪结构示意图

Fig. 1 Sketch of high-speed schlieren device

并经纹影镜2反射进入摄影机光学系统。

通常单个LED的光通量只有几十个流明(lm),难以满足纹影仪的要求。为了增加光通量,需要将多个LED排成阵列。

由于封装准直系统的LED阵列出射光束为准平行光^[6~8],可以采用开普勒(Keppler)式结构作为扩束准直系统,如图2所示,其中 O_1 为聚光镜, O_2 即为纹影镜。

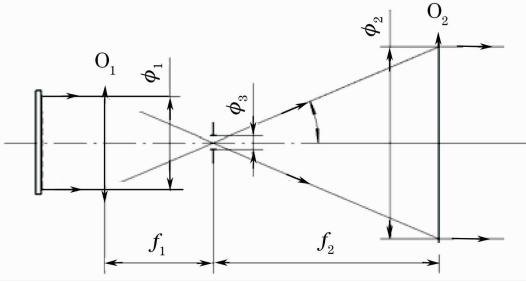


图2 开普勒扩束准直系统

Fig. 2 Kepler's extend-collimating system

2.1 物面光通量

摄影机的光学系统孔径光阑要求与纹影仪孔径光阑共轭,因此物面光通量 Φ'_v 和像面光通量 Φ''_v 存在如下关系

$$\Phi''_v = \tau \Phi'_v, \quad (1)$$

式中 τ 为光学系统透过率。

像面照度 E' 与光通量 Φ''_v 的关系为

$$\Phi''_v = E' \cdot S, \quad (2)$$

式中 S 为像面面积。

胶片的曝光量 H 为

$$H = E' \cdot t_e, \quad (3)$$

式中 t_e 为有效曝光时间。

2.2 开普勒扩束准直系统光学扩展量

为了减小球差的影响,纹影镜相对孔径(D/f)通常设计为 $1/10$ 。

根据准直性要求,在扩束准直系统焦面位置需设置一个孔径光阑,设该光阑直径为 ϕ_3 ,则这一位置

处的光学扩展量 E_1 为^[9~11]

$$E_1 = \frac{1}{2} \pi^2 \phi_3^2 \sin^2 \theta, \quad (4)$$

式中

$$\sin \theta = \frac{(1/2)\phi_2}{\sqrt{[(1/2)\phi_2]^2 + (f_2)^2}} = \frac{(\phi_2/2f_2)}{\sqrt{[(\phi_2/2f_2)]^2 + 1}} \approx \frac{1}{20},$$

代入(4)式得

$$E_1 = \frac{1}{800} \pi^2 \phi_3^2, \quad (5)$$

由于准直性的要求, ϕ_3 通常需要小于3 mm。

对于开普勒系统,任意位置处光学扩展量均相等,因此上式结果即为该系统的光学扩展量。

2.3 LED光源光学扩展量

光源的扩展量计算公式为

$$E_2 = \pi A' \sin^2 \theta', \quad (6)$$

式中 A' 为LED阵列(含封装准直光学系统)出射端垂直于光轴方向的面积。 θ' 为光源出射光束发散角,由于LED并非绝对点光源,经封装光学系统准直的光束仍然有一定的发散角,目前可以降至 3° 。

(6)式表明,光源的面积将决定从光源至扩束准直系统的能量利用率。而光源的面积又决定了LED阵列数,即决定了光源的总能量。因此在确定光源面积时,既要考虑光源总能量,还要考虑光能利用率,以保证物面处光通量能够满足纹影仪记录要求。

2.4 光源能量利用率

对上述系统(包含光源和扩束准直系统)采用Tracepro建立模型,光源直径从3 mm增大至30 mm时相应的能量利用率模拟计算结果如图3所示。

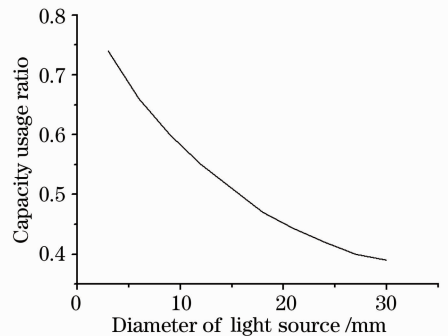


图3 能量利用率与光源面积的关系

Fig. 3 Relationship between capacity usage ratio and light-emitting area

模拟结果证明,能量利用率随着光源面积的增加而下降。以LED阵列直径从10 mm增至20 mm为例,对应的面积(即能量)增加了4倍,而能量利用

率从 0.58 降至 0.44。这表明,可以降低能量利用率为代价,通过增加 LED 阵列面积来增加物面光通量。

3 实例分析

假设系统参数如下:像面直径为 10 mm,光学系统透过率 τ' 为 0.01,有效曝光时间 t_e 为 0.1 μ s,胶片为 30 din 的国产 1032 流光片,其产生 1.8 黑密度所需曝光量为 0.018 lx·s。通过(1)~(3)式计算可得物面处光通量需要达到 141.4 lm。

以美国流明公司 100 mW LED 参数为例,发光效率为 70 lm/W,设计采用 50 个 LED,排列成直径为 24 mm 的圆形阵列光源。

通过 Tracepro 建模计算得对应能量利用率为 42%,即物面的光通量为 147 lm,能够满足物面照度要求。另外纹影仪物面照度如图 4 所示,照度不均匀性优于 10%。

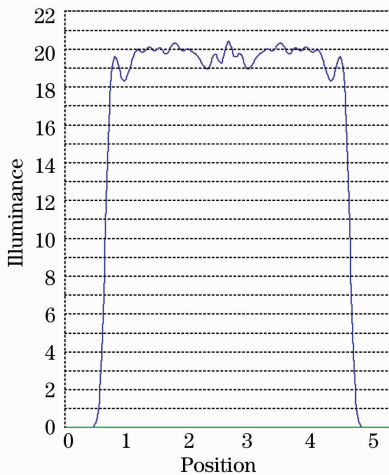


图 4 物面照度分布

Fig. 4 Illumination curve of object plane

4 结 论

提出了采用封装准直光学系统的 LED 阵列作为光源,并通过开普勒系统扩束准直的照明方法。在对系统光学扩展量、能量利用率等参量计算分析基础上,提出了以降低能量利用率为代价,通过增加 LED 阵列面积来增加物面光通量的光源设计方法。

Tracepro 实例模型表明这种照明方式能够满足纹影仪物面光通量的要求,并具有较好的照度分布。与常用光源相比,这种照明方式还具有能量利用率高、物面照度均匀、无衍射条纹等优点。

参 考 文 献

- Li Guichun. Optical Instrumentation for Wind Tunnel Testing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 7~24
李桂春. 风洞试验光学测量方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. 7~24
- Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 963~971
罗毅,张贤鹏,王霖等. 半导体照明中的非成像光学及其运用[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 963~971
- Luo Tao, Qian Keyuan, Luo Yi. Research on luminous-per-etendue of LED array designed for projector light source[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(1): 41~45
罗滔,钱可元,罗毅. 面向投影仪的 LED 阵列单位 Etendue 光通量的研究[J]. 半导体光电, 2008, **29**(1): 41~45
- Huseyin Murat, Herbert De Smet, Dieter Cuypers *et al.*. Increased lumens per etendue by combining pulsed LEDs[C]. *SPIE*, 2005, **5740**: 1~12
- Wang Erzhen, Wang Chunfeng. Development and application of white LED[J]. *Electro-Optics Technology*, 2002, **43**(1): 1~9
王尔镇,王春锋. 白色 LED 的开发和运用[J]. 光电技术, 2002, **43**(1): 1~9
- Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 540~544
丁毅,顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, **27**(3): 540~544
- Wang Le. Computer simulation and the luminaire design of LED illumination[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2007, **18**(1): 25~29
王乐. LED 应用于照明的计算和仿真[J]. 照明工程学报, 2007, **18**(1): 25~29
- Wu Baoning, Li Hongguang, Yu Bing *et al.*. Measurement of optical parameters for LEDs[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(4): 573~516
吴宝宁,李宏光,俞兵等. LED 光学参数测试方法研究[J]. 应用光学, 2007, **28**(4): 573~516
- Han Jingfu. Application of etendue theory in LED projection display[J]. *Advanced Display*, 2006, **70**(12): 13~16
韩景福. 光束扩展理论应用于 LED 投影显示系统[J]. 现代显示, 2006, **70**(12): 13~16
- Li Juntao, Zhu Jian, Wang Zixin *et al.*. Study of temporal and spatial coherence of light emitting diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 31~34
李俊韬,朱健,王自鑫等. 发光二极管的时间与空间相干性研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 31~34
- J. S. Donald, R. S. Tasso, C. Stephen *et al.*. LED luminaire with controlled light distribution [C]. *SPIE*, 2006, **6337**: 63371E