

投影电视的均匀照明系统设计*

盛益强^{1**}, 方志良¹, 母国光¹, 张增宝², 翁志成²

(1. 南开大学现代光学研究所, 天津 300071; 2. 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:分析和设计了用于提高大屏幕投影电视光学性能的均匀照明系统:透镜阵列和积分方棒。基于弧长为 1.2 mm 的超高压水银灯(UHP), 建立嵌套圆筒的体光源模型, 给出了两个照明系统的设计方法和用于 2.3 cm 空间光调制器照明系统的设计参数。仿真结果表明, 透镜阵列系统实现了均匀性(+4.55%, -5.54%), 光能利用率为 81% 的照明输出; 积分方棒系统实现了均匀性(+4.37%, -4.58%), 光能利用率为 79% 的远心照明输出。均能满足投影电视对照明系统的指标要求。

关键词:光学设计; 照明系统; 透镜阵列; 积分方棒

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2004)04-0416-04

Design of Illumination Systems for Projection Displays

SHENG Yi-qiang^{1**}, FANG Zhi-liang¹, MU Guo-guang¹, ZHANG Zeng-bao²,
WENG Zhi-cheng²

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130022, China)

Abstract: Lens array and light pipe illumination systems were analysed and designed for improving optical performance of projection display. And the design method and parameters were discussed. Based on the UHP of 1.2 mm, a nested cylindrical volume source was modelled and the illumination systems with 2.3 cm imager were imitated. The modelling result by light tools shows the optical efficiency 81%, the uniformity +4.55%, -5.54% of the lens array system and the optical efficiency 79%, the uniformity +4.37%, -4.58% of the telecentric light pipe system. Both of them are satisfied with the illuminative requirement of projection display.

Key words: optical design; illumination system; lens array; light pipe

1 引言

在大屏幕投影显示系统中, 光学引擎具有举足轻重的作用, 它决定了整个系统的大部分性能参数, 而作为光学引擎系统主要组成部分的照明系统是实现高亮度、高均匀性的关键^[1]。

本文分析和设计了基于超高压汞灯(UHP)的大屏幕投影电视的照明系统: 透镜阵列和积分方棒。采用 LightTools 和 ZEMAX 软件进行了计算机辅助光

学设计、建模和仿真, 实现了高清晰度大屏幕投影显示的远心、高利用率和高均匀性的照明要求。

2 基于 UHP 的体光源建模

大屏幕投影系统的光源必须具备高亮度、高色温、长寿命、低造价及色温稳定性好。能产生全部可见光范围的波长; 在增大气压、增加电压和保证发光效率不变的情况下, 可减短弧长; 发光集中于弧的中心, 容易实现高光能利用率和照明均匀性^[2]。目前,

收稿日期: 2003-06-18

* 基金项目: 天津市光电子联合研究中心基金资助项目

** E-mail: shengyigiang@yahoo.com.cn

UHP 常用于高清晰度大屏幕投影显示的照明。

由于短弧灯的位置、尺寸和发光分布等参数较多,进行确切的公式表达较困难;而且光在使用过程中,随着使用时间的推移,发光特性等也会发生变化。因此,光源的建模和数值分析非常复杂。参考文献[3]提出一种建模方法,其要点是:将光源理想化成均匀的朗伯光源,在体发光角 $\pm\phi_m$ 的范围内发光强度为 L ,以外的范围发光强度为 0;光通量等于对所有发光角范围内的光进行积分。这种方法将复杂的光源建模进行了简化,能够近似给出照明的函数表达式。

但是,在用 LightTools 软件照明模块^[4]进行照明分析时发现,光强的空间分布和角度分布与朗伯光源有很大差别。以 UHP 为例,UHP 建立嵌套圆筒的体光源模型。100~130 W UHP 的弧长为 1.2 mm。在光源建模时,用一组嵌套的圆柱体光源实现实际光源的空间位置分布,每个分光源外形尺寸分别和实际光源辐射等值线上,其中 20%、40%、60%、80%和 100%的光源数据见表 1。这样一组嵌套的圆柱体光源就能近似模拟出实际光源发光的空间位置分布,光源模型如图 1 所示。光谱分布以权重的形式加于每一个圆柱光源,光源的空间角度分布可利用 Apodizer 功能模拟实现,空间角度分布数据见表 2。

表 1 各个圆柱体分光源的位置尺寸数据

Tab. 1 Data of each cylindrical volume sources

Luminance contour	Length	Diameter	Power P_i
20	1.20	0.151	73.17
40	1.20	0.082	21.65
60	0.42	0.039	1.73
80	0.25	0.034	0.74
100	0.18	0.022	0.23

表 2 实际光源的空间角度分布

Tab. 2 Data of angular variations of actual light sources

Angle (°)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Weight	0	0.20	1.06	1.40	1.80	1.82	1.90	2.00	2.10
Angle (°)	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Weight	2.07	2.00	1.83	1.77	1.40	0.20	0.00	0.00	0.00

3 透镜阵列均匀化系统的分析和设计

透镜阵列又称为复眼透镜、蝇眼透镜或积分透镜,它由一系列相同的小透镜拼合而成^[5]。在本投影显示系统中,采用了双排透镜阵列获得高光能利用率和高均匀性的照明,系统工作原理如图 2 所示。

图 2 中,每排透镜阵列由一系列相同的小透镜组成。UHP 置于反光镜的焦点上,灯弧沿轴向放置,由灯弧发出的光经抛物面反光镜反射后近似平行的照射到第 1 组透镜阵列上,2 组透镜阵列的间隔等于第 1 组透镜中透镜元的焦距,灯弧通过第 1 排透镜阵列的每个小透镜成像到第 2 组透镜阵列上,形成多个灯弧像。光束经过 PBS 转化为偏振光,再经过聚光透镜将多个灯弧像叠加均匀地照明到空间光调制器上。由透镜阵列和聚光透镜可以实现远心照明。

设在某一方向上透镜阵列的个数为 5,如图 3 所示。其中(a)为透镜阵列均匀化系统工作原理图;(b)为灯弧发出的光强分布;(c)为经透镜阵列分割后的细光束光强分布。由于整个宽光束被分成多个细光束,而每个细光束的均匀性大于整个宽光束范围内的

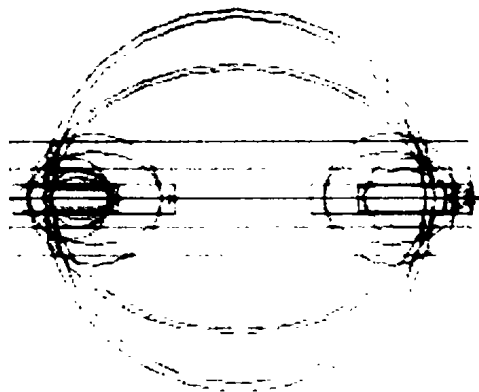


图 1 嵌套圆筒的体光源模型

Fig. 1 Nested cylindrical volume sources model

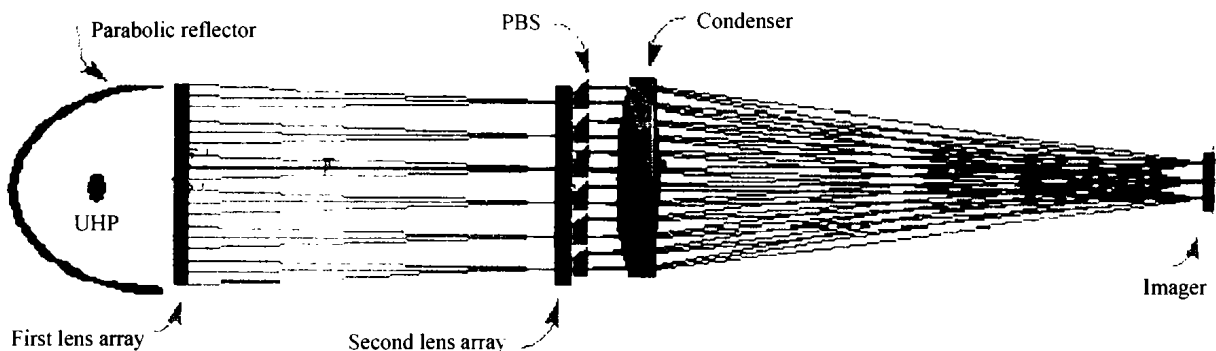


图 2 透镜阵列照明系统的结构图

Fig. 2 Structural diagram of lens array illumination system

均匀性,且对称位置细光束的相互叠加使细光束的细微不均匀性获得进一步的补偿,因此采用双排透镜阵

列可使整个孔径内的光能更均匀更有效地被利用,从而得到了细光束相互叠加后的均匀光强分布(d)。

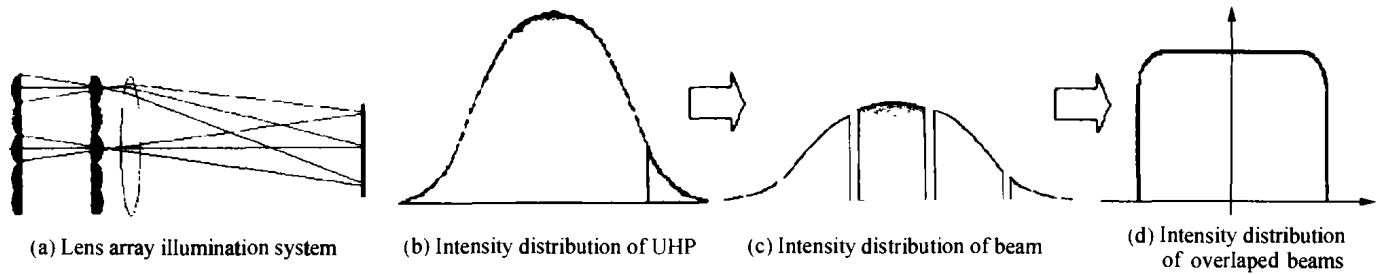


图3 透镜阵列照明系统的均匀化方法

Fig. 3 Schematic diagram of lens array illumination system

用 ZEMAX 软件对系统进行了计算机辅助光学设计和优化^[6]。设计过程为:设光源弧长 1.2 mm,光调制器 2.3 cm,投影镜头 $D/f=1/2$;由光源的弧长和反光镜焦距确定旋转抛物面反光镜产生的发散角 θ ,即有

$$\theta = \arctan\left(\frac{d}{4f}\right) \quad (1)$$

式中, d 为光源的弧长; f 为反射聚光镜焦距。透镜阵列的口径大小主要由光源的发光面尺寸及照明系统的发散角确定。光源由第 1 透镜组成像到第 2 透镜组,第 2 透镜组各透镜的最小尺寸 B 由第 1 透镜组各透镜焦距以及光源发散角 θ 确定,即有

$$B = 2f_A \tan\theta = \frac{f_A d}{2f} \quad (2)$$

式中 f_A 为第 1 透镜组各透镜焦距。从反光镜出射的是近似平行光,所以第 1 透镜组各透镜的尺寸与第 2 透镜组各透镜的尺寸相同。第 1 透镜组的每个透镜都应通过第 2 透镜组成像到空间光调制器上,因此空间光调制器和第 1 透镜组的每个透镜之间有一比例关系。第 2 透镜组到空间光调制器间的距离 L_{bc} 由空间光调制器的尺寸 W 确定,即为

$$L_{bc} = \frac{2Wf}{d} \quad (3)$$

为充分发挥透镜阵列的作用,应选择适当的透镜组数目。透镜组个数太少,失去了利用透镜组将宽光束分割为细光束的均匀化作用。但由于照明系统像差的影响,个数太多并不能使照明均匀性获得更进一步的提高,并且还增加了加工的成本和难度。因此应当综合考虑反射聚光镜、光源的发光特性和照明均匀性的指标参数来确定小透镜的数目。在本系统中,每个透镜阵列使用了 44 块小透镜。

将前后 2 组设计成完全相同(包括材料、曲率及尺寸),以减小设计加工的难度,降低加工成本。设计

结果(两组全同的 6×8 透镜阵列)如图 4 所示。利用 LightTools 软件照明模块建模^[4],通过追迹 200 000 条光线在模拟空间光调制器上得到了优化的设计结果。由美国国家标准化组织(ANSI)均匀性计算方法在光调制器上取 13 点数据(见表 3)。结果显示,光调制器上的光分布可实现 ANSI 均匀性 $+4.55\%$ 、 -5.54% 及光能利用率为 81% 的照明输出,能够满足投影显示对照明系统的指标要求。



图4 透镜阵列的 LightTools 模拟输出图

Fig. 4 The lens array outputted by LightTools

表3 透镜阵列系统的 ANSI 均匀性计算 13 点数据

Tab. 3 Data of ANSI thirteen points for lens array system (Units: lx)

55.941	55.941	55.480
56.380	57.352	57.272
55.005	56.005	56.052
52.131	51.969	51.909
		51.816

4 积分方棒远心照明系统的分析和设计

椭球-方棒照明系统,因其结构简单、造价低廉,同时又能高效率、高均匀性地将圆形的光束转化成矩

形光束,在投影显示中已经得到了广泛的应用^[7]。方棒可以是实心的玻璃棒也可由内镀高反射膜的反射玻璃平板组成的中空玻璃棒,在建模时采用实心的玻璃棒。由于分色薄膜的膜系设计要求,照明系统要求近远心的照明在空间光调制器上,我们设计了一个远心的中继透镜系统,参数见表4。

表4 积分方棒系统的中继透镜参数

Tab. 4 Relay system parameter of the light pipe system

Surface	Radius	Distance	Glass
Object	Infinity	13	Air
1	-47.95	5	K9
2	-23.38	1	Air
3	209.62	5	K9
4	-22.03	25.34	Air
Stop	Infinity	42.33	Air
6	394.80	5	K9
7	-54.29	1	Air
8	54.29	5	K9
9	-394.80	60	Air
Image	Infinity	0	Air

在积分方棒均匀化系统中,短弧灯发出的光被旋转椭球面成像到方棒前端,灯弧像无论空间位置还是角度分布都具有旋转对称性^[8]。光线在方棒中的反射次数决定了均匀性的高低,一般情况反射次数大于3就能满足均匀性的要求。用ZEMAX软件对其进行了计算机辅助光学设计和优化,再由LightTools建模可以得到总的光照度和照明均匀性。在光源、反射镜和方棒截面尺寸确定的情况下,均匀性和方棒长度直接相关,方棒越长,均匀性越好,但光能利用率越低。设光源弧长1.2 mm,椭球反射镜 $R_0=9.0$, $e=0.85$, $a=4.0$, $b=2.1$,口径 $\phi 3.84$ mm;方棒尺寸为6.78 mm \times 9.00 mm \times 200.00 mm,光调制器为2.3 cm,投影镜头 $F/\#$ 为2.0。

利用LightTools软件照明模块建模和仿真^[4],将短弧灯沿光轴放在旋转椭球面反射镜的内焦点,方棒放在反射镜的第2焦点附近,光线进入方棒经多次反射,在方棒的末端形成均匀的照明。然后通过中继透镜耦合到LCD、LCoS或DLP等空间光调制器上,与光调制器的尺寸和投影镜头的 $F/\#$ 相匹配,系统的设计结果如图5所示。通过追迹200 000条光线,在模拟空间光调制器上得到了仿真结果。由美国标准化(ANSI)均匀性计算方法在光调制器上取13点数据(见表5)。结果显示,光调制器上的光分布可实现ANSI均匀性+4.37%、-4.58%及光能利用率为79%的照明输出,也能够满足投影显示对照明系统

的指标要求。

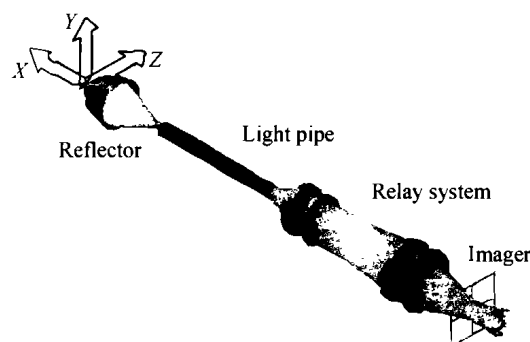


图5 积分方棒系统的LightTools输出图

Fig. 5 Light pipe illumination system by LightTools

表5 积分方棒系统的ANSI均匀性计算13点数据

Tab. 5 Data of ANSI thirteen points for light pipe system (Units: lx)

53.812	53.207	54.120
55.825	55.671	55.836
53.988	53.757	53.867
51.764	51.160	51.048
		51.448

参 考 文 献:

- [1] H F Li, Z R Zheng, et al. Improved projection optics for reflective silicon CMOS light valves[A]. SPIE[C]. 1999, 3634:123-131.
- [2] R Ramamoorthi, P Hanrahan. On the relationship between radiance and irradiance; determining the illumination from images of a convex lambertian object[J]. JOSA A, 2001, 18(10):2448.
- [3] Benjamin A Jacobson, Robert D Gengelbach, John M Ferri. Beam-shape Transforming Devices in High-efficiency Projection Systems[A]. SPIE[C]. 1997, 3139:141-150.
- [4] Optical Research Associates. LightTools illumination module user's guide[Z]. 1997.
- [5] J C Yoo, C P Kung, et al. Compact projection optical engine[A]. SPIE[C]. 1998, 3296:46-52.
- [6] Focus Software, Inc. ZEMAX optical design program user's guide[Z]. Version 10.0, 2001.
- [7] J A Shimizu. Single panel reflective LCD projector[A]. SPIE[C]. 1999, 3634:197-206.
- [8] Akira Kikuchi. Illumination optical system[P]. U. S. Patent:4953937, 1990.

作者简介:

盛益强 (1978—),男,浙江人,2000年考入南开大学现代光学研究所攻读光学工程硕士学位,主要研究方向是投影显示光学引擎研究与照明系统设计。