

导光板发光质量评价与优化设计

李萍¹, 钱维莹¹, 丁峥伟¹, 谭叶青¹, 高淑梅¹, 张琦², 王健³

¹江南大学理学院江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122;

²江苏新广联科技股份有限公司, 江苏 无锡 214122;

³苏州天禄光科技股份有限公司, 江苏 苏州 215500

摘要 为实现对导光板发光质量快速、精准的评判,找出亮度差异较大的区域进行优化设计,提出了一种新的基于图像处理技术的导光板优化设计方法,深入研究了导光板发光质量的评判标准。以灰度直方图表征光能分布,进而给出均匀度的评判公式,提出了均匀度评判精度 P 的概念,并且通过编程给出离散灰度级所对应的网点位置,从而实现精准优化。以 $184\text{ mm} \times 314\text{ mm} \times 0.55\text{ mm}$ 的导光板为例进行仿真验证,针对优化过程中三个不同阶段的照度图,基于灰度直方图对其进行评价分析,给出了均匀度与精度的变化关系,并与现有评价方法作了比较。结果表明:以精度为前提的灰度直方图评判法能定量、客观、全面地评价导光板的发光质量,避免了现有评价法可能出现的偶然性偏差,同时提升了导光板的优化速度、精度;比较优化前后的导光板,其均匀度可提升 64%,随着优化的递进,TracePro 软件和九点法存在的偶然性误差逐渐减小,三者的评判结果趋于一致。

关键词 光学设计; 发光质量; 图像处理; 导光板; 网点

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.062202

Evaluation and Optimization Design on Luminous Quality of Light Guide Plate

Li Ping¹, Qian Weiyang¹, Ding Zhengwei¹, Tan Yeqing¹, Gao Shumei¹, Zhang Qi²,
Wang Jian³

¹Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Opto-Electronic Engineering and Technology,
School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Jiangsu Xinguanglian Technology Co., LTD., Wuxi, Jiangsu 214122, China;

³Suzhou Tianlu Technology Company LTD., Suzhou, Jiangsu 215500, China

Abstract In order to realize the rapid and accurate evaluation of luminous quality of light guide plate (LGP) and find nonuniform areas to optimize, we propose a new design method based on image processing technology, the evaluation criteria of luminous quality of LGP is deeply researched. The light distribution is represented by gray histogram, the evaluation formula of uniformity is given and the concept of evaluation precision P is presented. Furthermore, the dots position corresponding to discrete grayscale is located with program, the accurate optimization is realized. The method is verified and simulated by taking $184\text{ mm} \times 314\text{ mm} \times 0.55\text{ mm}$ LGP for example. The relation between uniformity and precision is given by analyzing three stage irradiation maps based on gray histogram in the optimization process. The method is compared with conventional evaluation methods. Results show that the gray histogram method can evaluate luminous quality of LGP objectively and comprehensively on the premise of precision and the possible accidental deviation is avoided. The optimization speed and precision are improved. The uniformity of LGP can improve 64% after optimization. The accidental deviation is reduced gradually with TracePro and nine dots in the optimization process. What's more, the results tend to consistent with

收稿日期: 2017-10-27; 收到修改稿日期: 2017-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(11647144)、江苏省普通高校研究生实践创新计划(SJZZ16_0215)

作者简介: 李萍(1994—),女,硕士研究生,主要从事 LED 照明与成像方面的研究。E-mail: 13855170297@163.com

导师简介: 高淑梅(1961—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事 LED 照明与成像方面的研究。

E-mail: gaosm@jiangnan.edu.cn(通信联系人)

three evaluation methods.

Key words optical design; luminous quality; image processing; light guide plate; dots

OCIS codes 220.2740; 230.7400; 100.2960; 250.5590

1 引言

液晶显示器(LCD)以其环保特性取代了传统的阴极射线管成为显示领域的主流,而作为 LCD 光源的提供者——背光模组(BLM)的性能会直接影响其显像效果^[1-2]。其中,轻薄型的侧入式背光模组更受消费者的青睐^[3],如何提高其核心组件导光板的光转换效率和均匀性已成为目前研究的重点。目前,主要通过光学仿真或实验检测结果进一步优化网点的形状、大小、间距或密度来实现发光质量的改善^[4-7]。因此,如何快速准确地评判导光板的均匀度或亮度分布,并有效判断偏差点或区域出现的位置成为快速提高导光板发光质量的关键。

目前,导光板均匀度的评价主要为多点测量法和软件评价,9点、13点、16点等多点测量法用最小与最大照度值之比表征均匀度^[4,8],TracePro 用平均照度与最大照度的比值来判定均匀度^[9-10]。这些判定方法各有优势,但因无法统计导光板出光面上的所有亮度信息,有可能存在出现偶然性的判断偏差,也易造成缺陷点或区域漏检,从而影响对导光板进一步优化的有效判断。

事实上,导光板性能的优劣就是人眼对目标面照度图像质量的评判。因此,可将导光板的照度均匀化问题转为图像处理问题。在这方面曾有初步的报道,如:张惜等^[11]将网点密度值分布转化为二值化图像,通过控制激光器的开关来实现直写;宋新丽等^[12]采用灰度直方图法对 LED 显示屏成品亮度的均匀性进行了分析和评判。但是,这些报道都没能给出各灰度级像素点对应的准确位置分布,所以也就无法将其运用于导光板的优化过程,更无法给出一个有效的评价标准。为此,本文将灰度直方图等图像处理技术用于导光板发光质量的均匀性优化中,表征出所有像素点的照度信息,直观地分析照度分布,并通过编程找出存在照度差异的区域,实现局部优化。这种方法可有效提高优化效率,优化结果更接近实际视觉效果。

2 设计原理

2.1 导光板网点填充率与照度的关系

侧入式导光板网点分布如图 1 所示,底面排布网

点时,LED 发出的光线经网点散射后直接由出光面射出,在其上方加入探测屏获取照度图,图上各点的照度值反映对应位置的出光亮度,初始时对导光板的底面、照度图沿 x 方向进行同步等区域划分,即 $\Delta x = b/n$, ($n=1,2,3,\dots$, 为分区数量),图 1 所示的侧入式导光板中的 $n=3$ 。在实际设计中, n 一般从 10 开始,随着优化的深入,对均匀度的要求越来越高,需要逐渐增加 n 值。

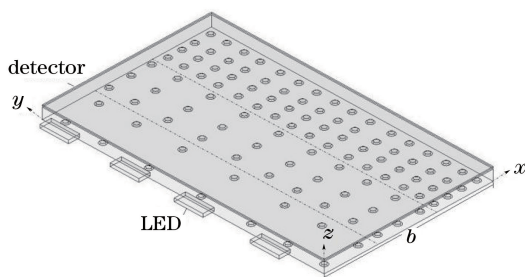


图 1 侧入式导光板模型图

Fig. 1 Model diagram of edge-lit light guide plate

导光板任意区域的网点填充率 $f(x, y)$ 定义为

$$f(x, y) = \frac{s_0(x, y)}{s(x, y)}, \quad (1)$$

式中: $s_0(x, y)$ 为区域内所有网点在 xy 平面的投影面积之和; $s(x, y)$ 为区域面积。

探测面上任意位置的照度值 $E(x, y)$ 与其下方的网点填充率 $f(x, y)$ 及 LED 光源在此处的入射光能量 $E_{in}(x, y)$ 呈正比^[13-14]:

$$E(x, y) = kf(x, y)E_{in}(x, y), \quad (2)$$

式中: k 为比例系数,与导光板的材质等有关。

若要导光板出光均匀,即 $E(x, y)$ 需保持不变,而 $E_{in}(x, y)$ 随着网点与光源距离的增大而减小,则 $f(x, y)$ 必须增大。对于确定区域 (x, y) , $E_{in}(x, y)$ 固定,则 $E(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 呈正比。

设 $E_0(x, y)$ 为目标的照度值, $f_0(x, y)$ 为其对应的填充率,则由(2)式可得:

$$\frac{f_0(x, y)}{f(x, y)} = \frac{E_0(x, y)}{E(x, y)}, \quad (3)$$

在通常的设计中, $f(x, y)$ 是已知的。这时,问题的关键就转化为如何快速准确地测得 $E(x, y)$, 以获得需要优化达到的 $f_0(x, y)$ 。

通常, $E(x, y)$ 信息的获得是使用 TracePro 或 LightTools 等追光软件完成的,但需要手动定标,

像素点过多,操作比较繁琐;或者通过照度计检测产品的亮度分布,但有一定的随机性,且增加了生产周期和成本。本文提出一种新的基于图像处理技术的优化与检测方法使优化实现精准、快速。

2.2 基于图像处理技术评判标准的建立

在导光板的仿真优化中,照度图的均匀性评判是必不可少的环节。目前,通常根据软件或多点法给出的均匀度评价指标来判断,但它们的评价公式没有涵盖整个照度图的信息,不能反映图像的真实亮度分布,可能导致评价结果出现偶然性偏差,从而误导设计者。先以设计中出现的一幅照度图(图2)为例进行说明。

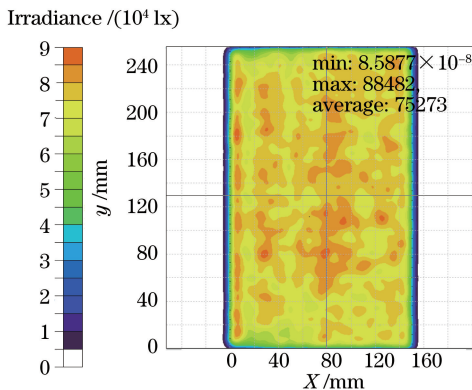


图2 TracePro中均匀度为85%的照度图

Fig. 2 Irradiance map with 85% uniformity in TracePro

从图2可以看出存在色彩不一的区域,照度分布差异较大,按照 TracePro 中平均值与最大值之比的均匀度计算公式,可以得到85%的均匀度,已达到国家照明标准 $\geq 80\%$ 的要求,但与实际观感相差较大。而用九点法或多点法计算均匀度时,取点上却存在随机性,如图2上测量点位置的选取直接决定了均匀度的数值,评价结果的客观性不足,虽然根据照度图的大小可以增加取点的个数来降低随机性,但比较耗时、繁琐。

虽然 TracePro 也可以给出 txt 格式的目标面上的照度分布,但数据量庞大,处理较复杂。实际上,导光板的照度图是光学仿真软件利用伪彩色来形象描述探测面上不同位置照度数据的一种表现形式,本课题组将照度图看作是一幅反映照度强弱的图像,其色彩变化只是照度强弱的变化,每种视觉上的颜色代表的是一定范围的照度值,对照度图进行灰度化,即以256个灰度等级(0~255)来表征照度分布,这样可大大简化数据量,同时还能保持原图像照度等级的分布特征^[15],可编程找出灰度级 g 与照度 E 的实际对应关系。灰度级以矩阵的形式贮存,

信息提取变得更方便、快捷。因此,在设计中将所有照度图灰度化后再处理,根据(3)式通过反馈的 g 值优化各区域的填充率 $f(x,y)$,以使 $E(x,y)$ 达到目标值。

灰度直方图用以表征图像中各个灰度级出现的次数或频率,即灰度级为 g 的像素总数为 N_g ,图像总像素数为 N ,则该灰度级对应的频率为 N_g/N ^[16]。图3是图2的灰度直方图表征。

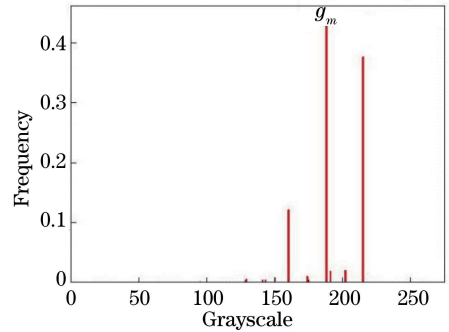


图3 灰度直方图表征

Fig. 3 Presentation of gray histogram

从图3可以看出, g 的分布范围为162~215, $\Delta g = 53$,最高频率为0.43,即图像43%的区域的照度值是相同的,其对应的灰度级为190,但还有约38%的区域的灰度级为215,人眼对此差异感觉较明显,与图2显示的情况吻合。显然,如果所有区域都趋近于某一个灰度级,即 $\Delta g \rightarrow 0$,图像的均匀性就越好,直方图中只有一个灰度级 g_m ,频率接近1。因此,将包含 g_m 在内的从 g_1 到 g_2 范围内的频率和定义为均匀度 U :

$$U = \sum_{g=g_1}^{g_2} \frac{N_g}{N}, g_m \in [g_1, g_2], \quad (4)$$

$g_2 - g_1$ 的大小决定了 U 的最终结果。当在 g_m 的两侧均有灰度级分布时,从其两侧取积分和;当只有一侧有灰度级时,则从 g_m 处向左或右侧积分。如图3中 $g_m = 190$,若令 $g_2 - g_1 = 8$,此时灰度级的积分范围即从186到194。(4)式表明,同一幅照度图的 U 会随着 $g_2 - g_1$ 的增大而增大,但照度分布状况本身没有变化。而不同照度图对应相同的 U 值时, $g_2 - g_1$ 取值越小,实际图像的均匀性越好。因此,根据(4)式评判一幅照度图的均匀性时,必须首先设定 $g_2 - g_1$ 的范围,并将其作为一个评判标准,这样才公平,有实际意义。所以, $g_2 - g_1$ 是一个很重要的评判均匀度的参量,它能反映所评价图像均匀度的准确性。因此,把它定义为均匀度的评价精度 P :

$$P = g_2 - g_1. \quad (5)$$

在不同情况下, P 值可根据设计者对精度的要求而定。 P 值越小, 精度越高, 对照度的均匀性要求也就越高。比如对一幅照度分布范围比较大的图像进行评判时, P 越小, U 越小, 反之, P 越大, U 会越大。因此, 可以通过比较灰度级的离散程度来分析照度图的整体分布情况, 以此来进一步确定导光板的优化方案。

3 优化与分析

3.1 仿真

以 $184 \text{ mm} \times 314 \text{ mm} \times 0.55 \text{ mm}$ 的导光板设计为例, 采用所提理论和方法进行分析。在其一侧放置 24 颗 LED 灯珠, 其模型结构如图 1 所示。选择圆台形的网点, 其外径为 0.053 mm , 高为 0.003 mm 。优化过程中结合 2.2 节提出的基于图像处理技术的评价体系对照度图进行分析评判。图

4 给出的是优化过程中的照度图, 其中图 4(a)~(c) 是优化前、中、后三个阶段用 TracePro 软件给出的彩色编码照度图, 图 4(d)~(f) 优化前、中、后三个阶段彩色编码照度图对应的以灰度直方图法表征的照度图。

比较图 4 中两种照度图的表征结果可以看出, 优化前, 图 4(d) 中灰度直方图法显示出 g 的分布范围很宽, $g_m = 148$ 对应的最高频率还不到 5%, 照度差异很大。随着优化深入, 分区逐渐细化 (n 增加), g 的分布范围逐渐变小, 最后 g_m 增大到 215 (如图 4(f) 所示), 且频率非常高, 达到近 60%, 几乎是很窄的一条直线了, g 的分布范围也从 69 减小到 6, 对应图像的均匀性提升了, 同时光效也增加了。由此可见, 灰度直方图法可以直接定量地表征出导光板的出光均匀性, 而通常的彩色编码图只能定性地表征。

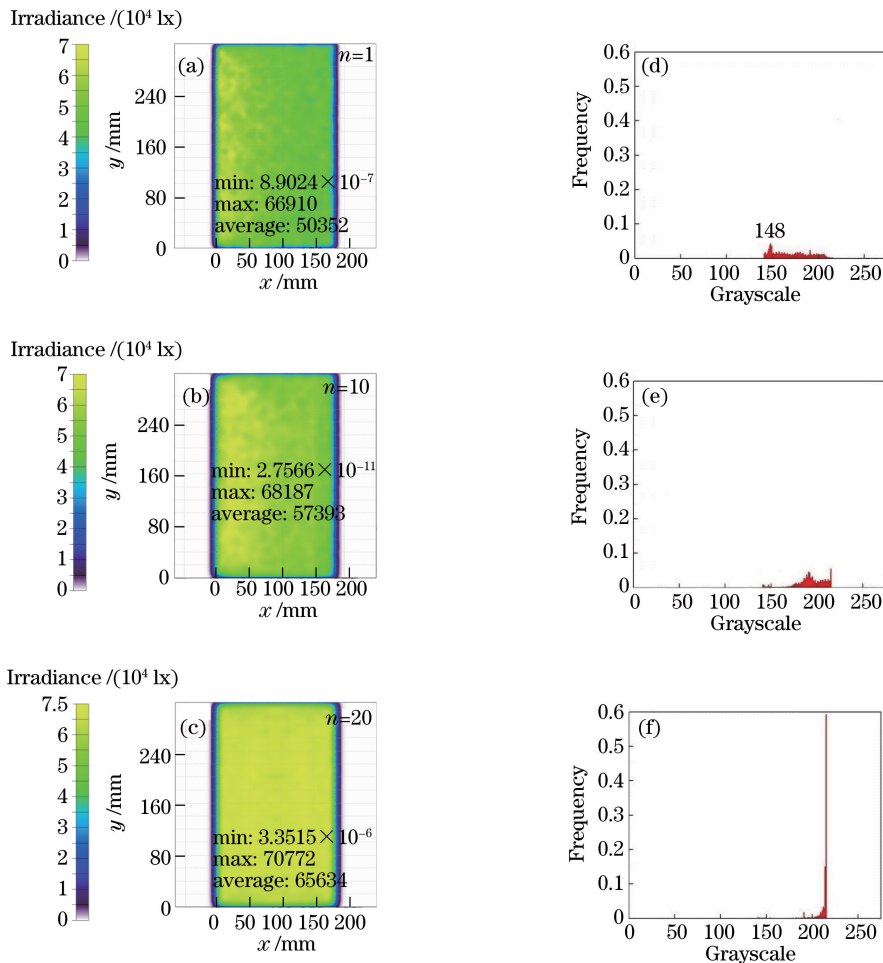


图 4 优化过程中的照度图表征。(a)~(c)彩色编码图;(d)~(f)灰度直方图

Fig. 4 Irradiance maps presentation during optimization process. (a)-(c) Color code maps; (d)-(f) gray histograms

3.2 基于灰度直方图法实现精准、快速的优化

2.2 节分析了如何根据灰度直方图定性及定量

地评价照度图的均匀性, 而减小 Δg 和增大 g 才能提高均匀度及光能利用率, 因此需要找出离散大或

较小的 g 将其消除。通过 MATLAB 编程,由对应的灰度矩阵可识别直方图中每个 g 对应像素点在照度图中的具体位置,调整网点填充率使其达到预期的灰度值,即可减小离散大的灰度级的频率。

如图 5 中红点标记的是优化三个阶段中对应 $g=148$ 所在像素点的位置。可以看出:随着优化的

递进,红色标记点越来越少,在图 4 灰度直方图中的频率也逐渐减小。因此,可以在优化过程中有针对性地找出离散大的 g ,优化对应的网点填充率。本方法在优化过程中可同时消除多个离散灰度级,提高优化速度,在实际优化中先根据灰度直方图分析图像的均匀性,再优化网点填充率。

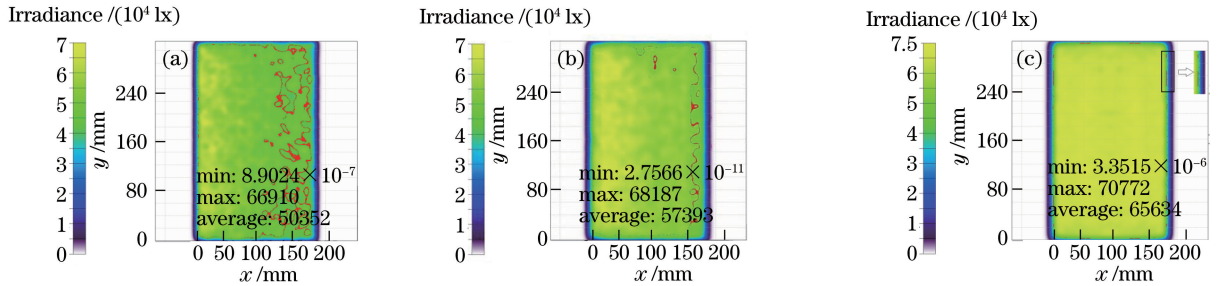


图 5 $g=148$ 的像素点所在位置。(a)优化前的位置;(b)优化中的位置;(c)优化后的位置

Fig. 5 Pixel location of $g=148$. (a) The location before optimization; (b) the location during optimization; (c) the location after optimization

3.3 均匀性的评判

根据(4)式对图 4(d)~(f)进行均匀性评判,结果见图 6。可以看出,各幅图像的均匀度 U 都随着 P 值的增加而上升,只是在图 4(f)中 $P>8$ 后明显趋缓,在 $P=8$ 时, U 已达 88%, $P=16$ 时,精度降低, $U=92.7\%$ 。

根据(4)式的分析,在图 4(f)中 $P>8$ 的区域, g 对应的频率很小,所以对积分的贡献也就很小,而图 4(d)和图 4(e)中 g 的分布范围大,积分范围的扩大可有效增加 U 的积分值。因此,在评价不同图像的均匀性时,应在同一精度标准下,即 P 取值相同,并且对于本身照度分布均匀的图像, P 值的选取对评价结果的影响很小,而对照度分布不均的图像,如图 4(d) 和图 4(e), U 随 P 的增大而快速增加。

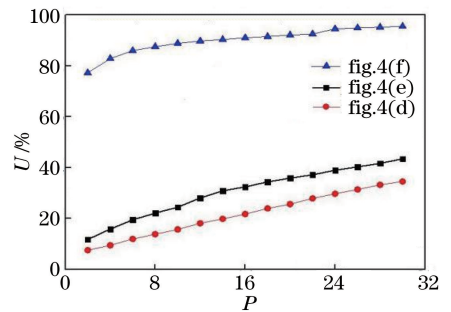


图 6 U 随 P 的变化

Fig. 6 Variation of U with P

3.4 不同评价方法的比较

针对图 4(a)~(c)所示的三幅彩色编码照度图,采用灰度直方图法、TracePro 软件评价和九点测量法进行均匀性评价与比较。为了使分析更全面,增加 $P=16$ 精度较低的情况,结果列于表 1。

表 1 不同照度图在不同方法下的 U 值

Tab.1 U value of different irradiance images with different methods

Irradiance image	$U / \%$			
	Gray histogram ($P=8$)	Gray histogram ($P=16$)	TracePro	Nine dots
Fig.4(a)	13.8	20	75.2	67.7
Fig.4(b)	22.1	32	84.2	81.4
Fig.4(c)	88	92.7	92.7	96

表 1 表明,三种方法评价的 U 值均有所差异,且在不同 P 下灰度直方图的评价结果也不同。对图 4(c)而言,三种方法评判的 U 比较接近,且 P 的变化对 U 影响不大,但对另外两图则差异较大。图 4(b)用 TracePro 软件和九点测量法得到的 U 值均

超过 80%,而实际观察时两幅图的均匀性是很差的,根本达不到照明要求,这会给设计者错误的信息反馈,影响最终的优化结果。而用灰度直方图法评判时,即使精度较低 ($P=160$) 时,均匀度也不到 40%,显然这更符合实际情况。

TracePro 软件和九点测量法有时会造成误判,特别是在优化过程中一些实际照度分布不均的图像可能会得到较好的评价结果,从而干扰设计者的决策判断。在实际应用中,不同应用产品对均匀度的精度要求可以是不同的,如照明的精度可以低一些,而显示的效果则要求更高些,这一点软件评价和多点法均无法做到。由此可见,所提灰度直方图照度均匀性评价方法更合理、更适用、更精准。

4 结 论

基于图像处理理论对导光板发光质量的评价和优化设计进行了深入研究,可以得出以下结论:1)将导光板的彩色编码照度图转换成灰度图像,可以简化数据处理量,提高处理速度;2)采用灰度直方图表征可以直接分析每一点的照度信息和灰度分布;3)基于灰度直方图建立的均匀度评判公式能够客观地评价图像的均匀度,避免了常规评价方法可能出现的偶然性;4)均匀度评判以确定的精度范围为前提才更合理,更有意义;5)基于灰度直方图,通过编程可以识别任意灰度级在图中的确定位置,进而消除离散大的灰度级,提高均匀性,实现精准、快速的局部优化;6)所提方法优化设计的导光板,其照度均匀度用 TracePro 评价可达 92.7%,九点测量法评价为 96%,灰度直方图法评价在高精度($P=8$)时也可达 88%。

经验证,基于图像处理技术的导光板优化设计方法不受网点模型以及追击光线数等其他建模因素的影响,只需对追光后的照度图进行处理,理论上适合各种尺寸的导光板优化,也可结合动态数据交换技术(DDE)实现全自动优化,对实际生产具有一定的指导作用。另外,对不同类的产品精度的选择也可以不同,这也符合实际产品的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Pan J W, Fan C W. High luminance hybrid light guide plate for backlight module application [J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20079-20087.
- [2] Zhang T, Qiu L, Wu H Y, *et al.* Design and implementation of backlight module of high dynamic range video display system based on geometrical optics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100801.
张涛, 邱亮, 巫红英, 等. 基于几何光学的高动态范围视频显示系统背光模组的设计与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100801.
- [3] Moon H R, Shin M H, Lee J Y, *et al.* Design of integrated light guide plate with functional structure of enhanced diffusion length for ultra-slim LED back light unit[J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(1): 44-52.
- [4] Huang Y F, Li X, Gao P L, *et al.* Automatic optimization design of dot patterns for edge-lit LGP [J]. Chinese of Journal Luminescence, 2016, 37(6): 751-757.
黄逸峰, 李潇, 高培丽, 等. 侧入式导光板网点全自动优化设计研究[J]. 发光学报, 2016, 37(6): 751-757.
- [5] Chen C F, Kuo S H. A highly directional light guide plate based on V-groove microstructure cell [J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(10): 1030-1035.
- [6] Park S, Shin Y, Choi E, *et al.* Improvement of luminance and uniformity of light guide panel using scatter pattern by laser processing [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(5): 1301-1306.
- [7] Wang Z P, Cao Y H, Liu Y Q, *et al.* Design of blue laser diode flat-panel display backlight module [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0505003.
王志平, 曹银花, 刘友强, 等. 蓝光激光二极管平板显示背光模组设计[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0505003.
- [8] Huang B L, Guo T L, Chen E G, *et al.* Study on optimal scale of average netted dot density for light guide plate [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0522002.
黄炳乐, 郭太良, 陈恩果, 等. 导光板网点平均密度范围的最优化研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522002.
- [9] Zhou Y C, Guo K X, Xiao B. Design and simulation of circle module for edge LED back-light [J]. Journal Applied Optics, 2016, 37(3): 446-451.
周英初, 郭康贤, 肖波. 一种圆环 LED 侧入式背光模组设计[J]. 应用光学, 2016, 37(3): 446-451.
- [10] Chen E Z, Guo Z N, Zhi J J, *et al.* Study on dot shape for the light guide plate of backlight [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 032203.
陈俄振, 郭震宁, 智佳军, 等. 背光源导光板散射网点形状的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 032203.
- [11] Zhang X, Liu X D. Design of net dots in laser direct writing light guide plate based on imaging processing technique [J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 751-755.

- 张惜, 刘晓东. 基于图像处理技术的激光直写导光板网点设计[J]. 激光技术, 2015, 39(6): 751-755.
- [12] Song X L, Zheng X F, Ling L Q, *et al.* The evaluation method of luminance uniformity for LED display [J]. Chinese Journal of Liquid Crystal Displays, 2009, 24(1): 140-144.
宋新丽, 郑喜凤, 凌丽清, 等. 基于灰度直方图的LED显示屏亮度均匀性评估方法[J]. 液晶与显示, 2009, 24(1): 140-144.
- [13] Ji L L. Side-emitting and flat-panel LED backlight design and optimization [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
纪玲玲. 侧入平板式LED背光源设计与优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [14] Huang C, Jiang Y S, Shen Y, *et al.* Design of scattering netted dots on light guide plate of edge-lighting LED backlight [J]. Journal Applied Optics, 2008, 29(5): 689-692.
黄翀, 姜言森, 沈奕, 等. 侧光式LED背光源的导光板网点设计[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 689-692.
- [15] Jiang X G. Digital image recognition software design project[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
蒋先刚. 数字图像模式识别工程软件设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [16] Zhang Z. Digital image processing and machine vision [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014.
张铮. 数字图像处理与机器视觉[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.