

自动优化非成像光学照明系统

谢尔盖 库达威^{*}，彼德 许莱柏

应用光学与精密机械研究所，夫琅和费协会

阿尔伯特爱因斯坦- STR. 7 D - 07745 德国 耶拿

摘要：非成像光学系统需要用一定的算法自动优化。现阶段商用的光学设计软件有两种，他们对光学设计非常适用。第一种方法是边缘光线修正原则。在这种情况下，优化的标准是几何光学中的字词（举例来说，准扩展光源）。应用边缘光线修正原则我们不仅可以讨论复式抛物线集光器的准直问题，还可以在设计复杂的折射反射类系统中应用。第二种优化准则体现在能量学的观点。在这种情况下，非序列光线追迹分析需要对光源发出大量的按一定空间光强分布的随机光线进行追迹分析。这些随机出射光线的位置、方向以及行进过程中与各界面所产生的反射、折射、散射、吸收都需用蒙特卡罗 (MonteCarlo) 方法来模拟。我们用直接优化算法，对入射光线采用统计学方法、忽略闲杂光线对系统灵敏性的影响。入射光能量为连续入射，不考虑其无规则性，将入射光通量作为一个参数描述，采用分段贝塞尔样条方法，这种方法可以优化形状复杂的光学系统，但需对系统光线交叉从叠部分分开考虑，以及温度升高所引起的漂移现象。

关键词：LED 光源，最优化算法，非成像光学，边缘光线原则，非连续光线追迹

1 引言

使用发光二极管作为光源的光学设备和传统照明方式相比有很多优势，主要的优势是低耗电量，长寿命和色彩多样逼真。然而，现有发光二极管发光利用率相对较低。因此，光学设计者的首要任务是让所有的光进入系统。分析现有光学系统表明，非成像光学理论在准扩展光源中应用广泛。同时，非成像光学设计与大家所熟知的成像光学设计理论相近，其算法已相当成熟，有些研究成果已获得专利。

成像技术中的关键光学设计是自动优化。设计者提供了一个合理的最初系统方案和评价（或误差）函数来估计系统的性能。不同的非线性优化算法（最初研究用阻尼最小二乘法，常用的模拟分析和反复迭代算法）都是为找到最佳的解决方案。

在整个漫长的成像光学设计历史上，成像质量和简单的几何参数，如光源作为点光源考虑时光斑半径作为偏差或作为一个光程差使用。这足以追迹少量的射线，以确定系统的性能。此外，这种评价函数作为系统参数几乎在所有的光学系统中都有应用。

边缘光线准则在非成像光学设计中广泛应用。大多数算法依据边缘光线准则确定集光器的最初形状，但在商用光学设计软件中应用较少。

用光学设计软件ZEMAX，利用非成像光学理论，我们已经开发出许多设计软件和优化算法。根据边缘光线原则制定出集光器的具体形状，满足特定的照度分布。下面以欧司朗公司产品为例说明，模块具体参数如下：

- 4个LED（每个面积为1×1毫米）按0.1毫米间距排列（红、绿、绿、蓝方式或单色排列）

- 每个LED典型光通量：红色： - 30流明； 绿色： - 40流明； 蓝色： 流明；
- 光源为朗伯辐射源；
- 没有透镜

2. 边缘光线原理设计

光源满足下列条件时可以用边缘光线原理设计集光器形状：射线，光源发出光线在规定最大角范围内传播（旨最大限度的仿真光线输出），当光线离开准直器后。光线模拟软件能很好的模拟、追迹该光束。

- 从光源的两个对称表面取一维扇形光线；
- 以这样一种方式优化系统，即光线以扇面形式在一个最大孔径角范围内传输。对应关系边缘点和孔径角（角度正或负）应该由设计师提前制定（这取决于系统的类型）。这种优化类似于成像光学，其所用到的标准波算法应考虑到以下特点：
 - 此功能的优点是每个扇形中光线的偏差用均方根误差表示；
 - 光线追踪是非顺序的。即复式抛物集光器发射光线路径不是预先确定的：折射光线通过一次折射直接出射（所谓的直接照射），或在反射器侧表面经过多次反射后出射。
 - 在最优化和参数逐步优化过程中聚能器形状会有一些的形状弯曲、凹凸变化；
 - 另一方面，形状应允许“微调”，以近似椭圆形的二次曲线或笛卡儿曲线描述；
 - 二维建模的优化是有利的，因为只用一个三维射线球追迹，从而节省计算时间。

常规边缘光线原则，就是将完美的近场投影扩展到远场的系统。因此，要求集光器有较高的集光率。如果不能达到设计要求，我们建议使用特殊加权运算功能，此功能的优点为：每条光线偏离目标角余弦加权后仍在原扇形区域内。因此，直接照射优化算法相当于朗伯光源分布。

2.1 RXI（从叠式）集光器设计

分析不同的设计结果表明，集光器聚光行为是光线通过折叠、多次反射（RXI形式）。此外，相对于单次光线折射类型的设备具有较大的内外径比（约1/3）。与传统的RXI设备相比，我们在集光器使用了中央透镜。由于简化制造，无反射涂层中心，该模型实施一套用户自定义的ZEMAX®软件和二阶分段贝塞尔曲线（曲线图1）全部系统用九条分段贝塞尔样条曲线表示：

- 反射面（图1a中曲线1）-4贝塞尔样条
- 反射面涂层（图1a中曲线2）-2贝塞尔样条
- 出射面（图1a中曲线3）-2贝塞尔样条
- 中央透镜（图1a中曲线4）-1贝塞尔样条
- 图1中的A和B，（a）眼睛在定点观察集光器中光线分布。

由于ZEMAX®软件的非连续性不能用于二维表示，我们制定了一个2.5维代表（见图1b）项。根据特别规定的参数的集光器形象图。图（a）可以通过加深深度挤出（优化，参见图1b）或绕Z-轴旋转（分析）得到图b）。

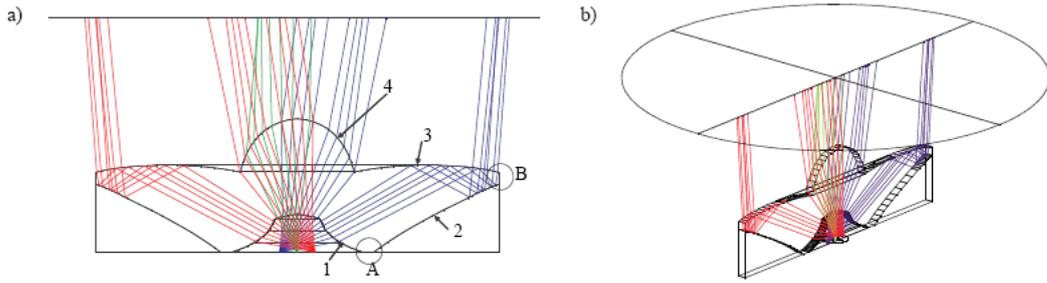


图 1 贝塞尔样条模型的聚能器样条组合 (RXI 样)

a) 二维剖面光线组合

b) 用 ZEMAX 软件优化的 2.5 维模型

我们使用 3 射线球优化：两个在 ± 1.49 毫米（光源对角线根据 OSTAR 规格）一个在中心。用这三条射线描述中央透镜优化（如成像光学领域中的光轴）。从每个角度范中选择这样一种出射方式：聚能器边缘光线几乎全部垂直出射、与中轴光线几乎平行（因为设备的轴对称性，没有必要追查 ± 90 ° 范围）。这个系统总的优化自由度是 34 。集光器边缘直径设置为 ± 4 ° ，出射时达到规定光学扩展量时的直径。计算公式如下：

$$etendue = n^2 \cdot area \cdot \pi \cdot \sin^2 \Theta_{max} \Rightarrow d_{conc} = \frac{2 \cdot size_{source}}{\sin^4 \Theta \cdot \sqrt{\pi}} \approx 34mm$$

2.2 约束优化

用分段形状描述和对数量有限的射线额外限制进行纯数值化设计，对集光器形状的不确定性加以限制。以下有两种准则：

- 器件边缘交叉点附近光线（图 2 a）；
- 内部交叉部分光线分布（图 2 b）。

一条贝塞尔曲线仅通过其中一个这样的终端。因此，相对容易检测和控制边缘交叉光线（图 2 a） 。内部交叉段的两条贝塞尔曲线部分（图 2 b ）需要额外计算。通过几何光学计算很容易获得如图中红绿光线的传播方向。能确定两个问题，一是否连续线，二：器件连接点处光线是否相交。

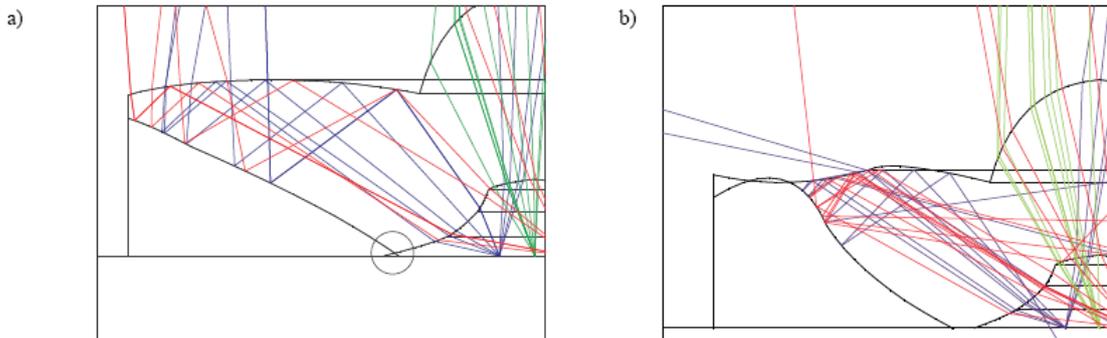


图 2 人工数值最优化按自然法则无法确定聚能器形状

a-边缘交叉点处光线分布

b-内部交叉部分光线分布

这种计算方法与一般方法相比，减小计算复杂度，对不同部分光线分别考虑计算。对以上计算采用二进制图表：

- 1 选择一组较小的若干点为“基地点”，第二点（大量的点）作为曲线的“测试点”；
- 2 从基地选择光线出发点；
- 3 使用二进制法从测试点出发确定光线经过点，用与“基地点”最相近的坐标表

- 示基地 4 两点之间用矢量表示;
- 5 从“基地”出发选择下一个点;
- 6 从测试点出发找到与光线出发点最接近的坐标点;
- 7 如果这两点之间矢量方向与实际不符, 计算回到步骤 4, 直到确定交叉点位置; 此算法打破以往对系统光线进行射线追迹的方法;
- 8 重复步骤 5 到 7, 设置每个“基地点”。

正确构造出实际系统的几何模型可以降低选择测试点进行的计算: 曲面 1 和 2 之间交叉点的确定 (见图 1 a) 我们通过对 Y 坐标进行旋转表示; 曲面 2 和 3 之间交叉点坐标用 X-坐标表示。该算法在最优化自动化设计器件过程中运算速度非常快。

2.3 集光器形状、性能的最优化

理论测得这样得到的集光器发光率约为 85 % , 因为菲涅尔损失 (光线在经过两界面时发生折射) 和反射损失 (在模型表面的镀上理想铝涂层, 可使透过率 $R = 0.95$) 。

集光器的边缘形状, 优化技术显示如图 1, 集光器长 11.3 毫米, 直径 34 毫米。中央透镜直径 9.6 毫米, 长度 4.5 毫米。射线追迹结果 (图 3, 对 10⁶ 条射线追踪) 显示, 集光器整体耦合出射光线大约 84 % , 大部分光以剩余分歧的形式在 $\pm 8^\circ$ 传播。

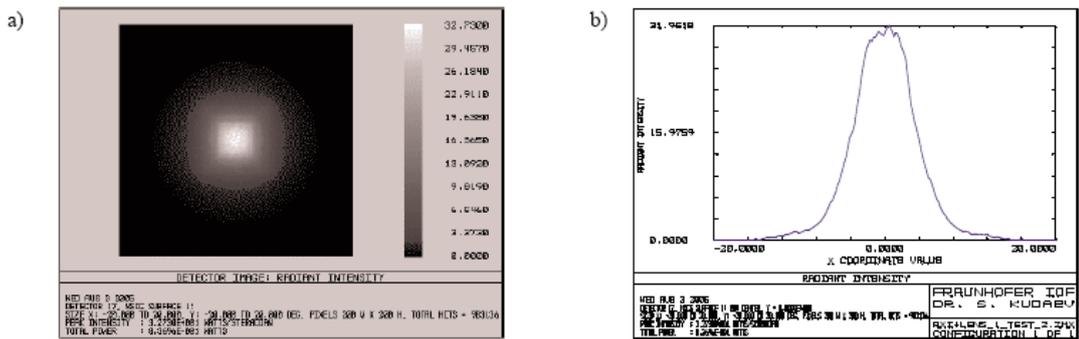


图 3 射线追踪结果法完整模型集光器形状

a) 二维远场分布, $\pm 20^\circ$ 范围

b) 轴向截面的分布

分析图 3 显示, 该集光器不能完全满足光学扩展量为 $\pm 4^\circ$ (优化标准)。我们假定这种差异由以下原因引起:

- 集光器的直径根据光学扩展量条件设定, 假定所有到达器件边缘部分的光线都能出射, 从图 1 (a) 如下, 可知实际有部分光线在器件边缘不能出射;
- 二阶贝塞尔曲线在表示曲线形状时不具有足够的灵活性,
- 较大的扩展光源发出光线中边缘残余光线经器件校准后出射角一般大于 $\pm 4^\circ$ 。

为克服这些缺点, 需要进一步改进集光器模型和优化算法。但是, 这个集光器的性能已经非常好: 例如, 复式抛物线系统在 $\pm 8^\circ$ 角内能汇聚整体出光的 80%, 抛物线系统长半轴至少 100 毫米。

值得提及的是: 旋转坐标式贝塞尔曲线在连接端点处优化后几乎连续出射 (所有出射光线几乎完全平行)。这意味着, 该优化过程是稳定的, 其收敛率逐层提高, 在描述一个单一高阶样条曲线时可取代分段贝塞尔样条, 这样可以提高光线追迹的速度。

2.4 实现和测量

为了程序化获得集光器模型，系统进行自动优化过程中宏命令被定义和应用，（见图 4，图 5）固态集光器通过直接角度定义方法，在 PMMA 边缘处得到，造成的形状误差（偏差小于 5 微米）和表面质量有足够的“经验验证”。损失光能，通过整体侧角光分布范围内的剩余发散角来测量（图 5）。设计与实测值符合得很好，但总的耦合光能大约小于设计值 5%到 6%。这种差异可以用光线在凹槽处的衍射、表面上的散射和在粗糙面的反射损失来解释。

集光器（图 6）性能在计算机三维模拟表现出良好的光强分布后，二维扫描侧角处的远场光强分布，在中垂线两侧对称放置两个光源，达到对光能的平均分布（通过在整个区域内进行微分，调整准确度，以达到精确）。一方面可以通过坐标表示确定 LED 发光的光线分布，发光二极管（图 6，a b 的发散角大小为 $\pm 5^\circ$ ）。

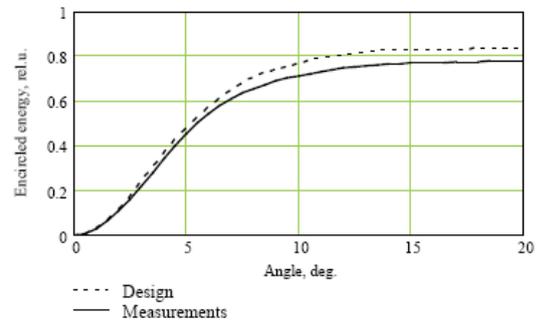
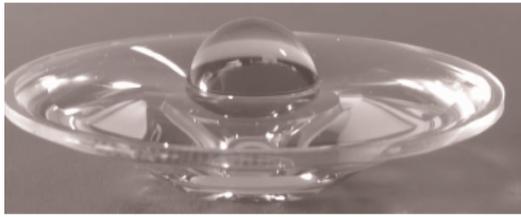


图 4 金刚石结构晶体旋转得到的集光器查看光强度分配（见具有尺度标注的图 6 的 c, d）也与设计目标符合的较好。

测量数据

设计数据

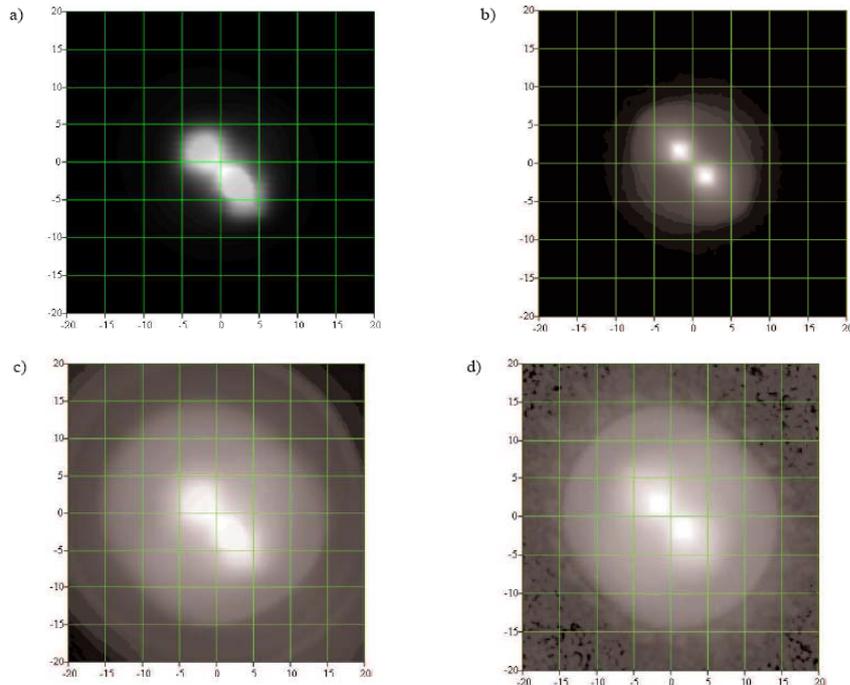


图 6 远场分布的结合集光器，测量数据与设计数据
a) b)-线性亮度分布 c) d)-对数亮度分布

3 直接优化实现

除了良好的准直性能,复合式反折射集光器并不是 LED 照明系统普遍应用的器件,一般照明和图像投影均需光源具有均匀的近场光分布。

不考虑光源的偏斜和区域分割的形状如:三角形,长方形或正六边形,均匀光场分布可通过集光器的多次反射得到。因此,光学扩展量不能定义集光器的所有特性,最优化设计依附于参数最优化估计:总光通量及其分布。这种算法优点在于:评价函数是一个偏差估计的加权函数和均匀场分布的估计函数:

$$MF = \frac{w_1 \cdot \sigma^2 + w_2 (1 - k_{angle})^2}{w_1 + w_2}$$

其中: σ 为有效值或辐射偏差; k_{angle} : 出光率 (LED 光源发光通过集光器发射后的出光率); w_1, w_2 : 定义的权重值。

这种评价函数能获得一般收集率的集能器件,获得高发光率的集能器件的一种必要条件是有高的光收集率,然而,这将使优化过程变得繁琐,优化速度变慢,应用于评价函数的一种下山单法,每个检测器收集到的光线至少 100 条,这时系统偏差将小于人眼对物体的识别率,然而这个最优化标准将无法精确达到。这时和由于:

- 光通量取决于探测器追踪到的光线数目,参数的小幅度改变也许不会改变整体光通量的变化;如果没有足够的射线进入探测器使光圈改变,阻尼最小二乘算法不能计算有限差在这种情况下表示出光线的改变。
- 最优化算法参数有较大的可变范围,改变优化参数不影响评价函数,如图 7 加以解释说明,具有确定的入射孔径角、出射孔径角和形状的二维正方形贝塞尔式集光器的自由曲线, x 、 y 坐标位于发光点中心,图 7 (a) 显示出系统明显的光强变化. 7 (b) 由于长周期和系统的非光滑拓展,波优化过程中显示出找到最低限度的难度。

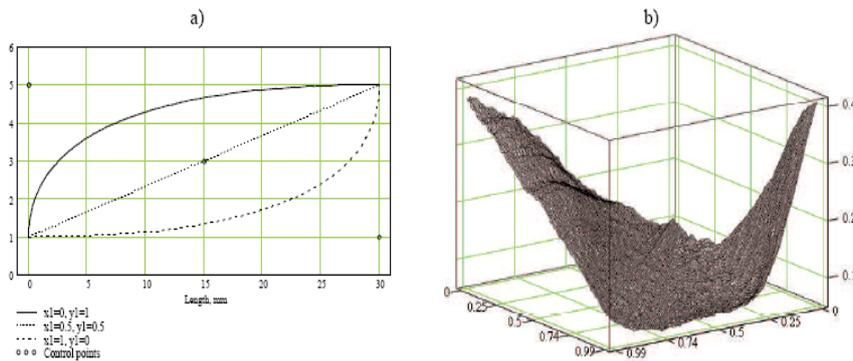


图 7 正方形贝塞尔曲线形状的集光器二维最优化允许变化范围:

(a) $0 \leq x_1 \leq 1, 0 \leq y_1 \leq 1$; 优化相空间 (b) 优异函数值与对应参数值

在先进的最优化非线性仿真过程中,鲍威尔方法是最好的,特别是在优化过程中参数的设定¹⁰,详细说明该方法可找到¹¹。我们已经实现了以 ZEMAX® 为附加软件的一维布伦特式鲍威尔优化(见图 8)

- 算法性能的独立(即单变量)优化,或者迭代优化,或者逐点优化:如图 8:

0 → 1 → 2

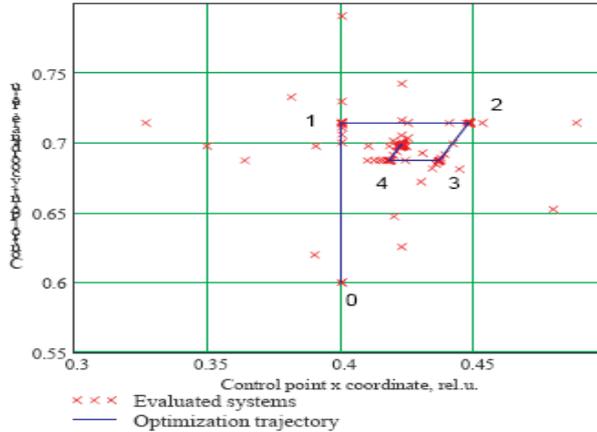


图 8 鲍威尔轨迹的优化方法。

毕竟，独立优化算法迭代增加计算过程：如图沿虚线 2 → 3 优化，必须再次考虑 0 → 2 点。

- 这种新算法通过改变参数值大小而不是最大参数方向来实现最优化，（如图 8 中 3 点后在垂直方向上在没有改变，在平行方向上由 2-3 有所改变）。
- 经过 n 次反复成功的迭代，其中 n 是独立变量改变次数，该算法执行重置矩阵变量的初始状态（这对集光器二次配光是必要的¹¹⁾）；
- 终止对系统优化微不足道的相对变量改变与自定义假定。

该算法不遭受多余的随机性干扰。这个简单的例子只要 4 次迭代就可达到最优化，少于 100 次对系统优化的评估（光线跟踪）。相比之下，随机光线追迹，可用 ZEMAX®（点优化），估计需要设定 150000 点以使系统达到预设效果，然而算法确保只在一个点找到最佳值。此算法与传统优化算法相结合是非常有用的。

在成像光学系统中鲍威尔算法与标准 DLS 算法相结合。不再需要很长的计算时间，两种情况下优化系统具有相同的参数值。因此，我们在最优化算法中假定数值稳定。

3.1 矩形集光器：设计，实现和测量

最新最优化算法依据以下条件设计集光器：

- 光源类型：欧司朗公司的 OSTAR® RGG 模块；
- 最小的剩余分歧光线；
- 固定输出孔径角

均匀的近场分布（距离集光器 0.5 至 2 毫米处）。这种光强分配应估计剩余光线的发散角。由于固体集光器的数值孔径确定，使 LED 发出光线耦合进集光器的效率大大提高（这可以整体提高出射光通量的 30% 至 100 %）。集光器的形状由三条贝塞尔曲线（两个侧表面和一个透镜顶端）和方形截面组成，变量总数为 12。

优化过程用双处理器电脑需要 10 分钟（用 ZEMAX® 软件进行多射线追踪是非常便捷的），并要求大约 800 个评价函数优化系统功能。优化后系统长度为 39 毫米，传输 LED 光源发光总量的 72%，照度不均匀性小于 15%。

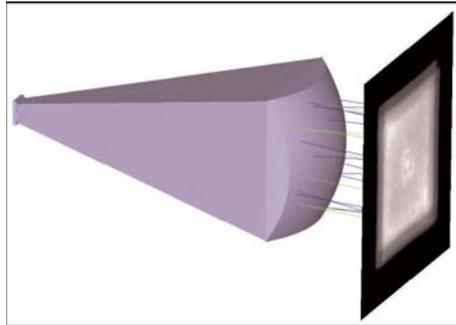


图 9 广场选矿厂均匀近场分布.

集光器透镜由 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)制造,具有远场 4f 系统物象 1:1 的成像特性,整个系统的发散角为 $\pm 10^\circ$ 。

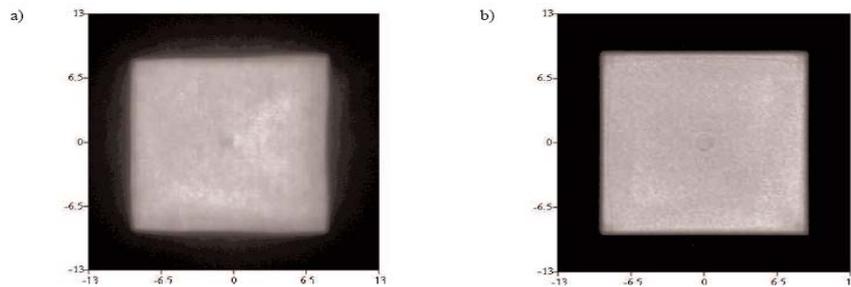


图 10 近场分布的矩形集光器的透镜:

a) -测量 b) -设计 坐标轴上量程均为 ± 13 毫米

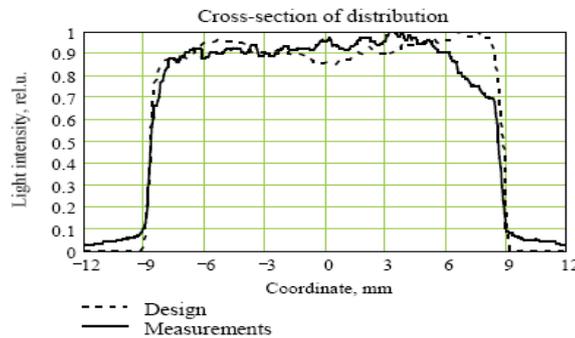


图 11 辐射场的截面分布。

测量结果为单光源情况，二维辐射分布，（图 10）表明测量结果与设计想要结果吻合较好。图上中心孔径处有一个暗点，这在设计以及测量中都比较明显，这是由透镜的形状导致的：旋转对称的自由贝塞尔曲线，凹陷处曲线的连续导数的中心旋转，即一个小尖。但是，如果这个自由形状的透镜是一个最佳的二次非球面，一般会使系统的传输率提高 5 %（模拟结果）

辐射场的截面分布（图 11）所示，场分布并不完全一致，但边缘照度下降均约为最高值的 20 %（这个值已接近人眼敏感度的极限）。该图还表明，辐射场分布略非对称：右侧有约 5%到 10%的高辐照度（这是有效的设计和测量）。然而，视觉感知的模块发出的光几乎为均匀场分布。

4 结论

这项工作主要研究非成像光学设计算法在光学设计软件中的普遍应用，使其与传统设计软件相结合，快捷方便的达到应用和设计目标。

- 最小方差优化法可用于光学扩展量有限的系统设计，附加以非序列光线追迹原则可以很好的达到设计效果；
- 对于多重折射/反射集光器，依据边缘光线原则优化非常有效，（发光效率更高，超过 80%）集光器的体积由 LED 光源最小发散角决定（较小，不超过 $\pm 10^\circ$ ）；
- 分段贝塞尔曲线适用于描述集光器的形状，依据不同的直接优化标准，但应考虑不可实现的优化部分；
- 用确定性优化算法设计集光器的光通量分布、（特别是-均匀光场分布）照度分布，不考虑闲杂光线影响；
- 具有聚光、均匀光场分布效果的集光器其光学扩展量很难确定，可以收集 LED 光源发光总量额 70% 以上，（发散角一般为 $\pm 10^\circ$ 或以上）；
- 指数匹配，确保 LED 具有较高光耦合率，但在优化过程中必须考虑到集光器的实际模型；
- 集光器原型，根据先进的优化算法，可很好的达到设计目标并进行仿真预测。

致谢

作者要感谢斯特凡博士和欧司朗 LED 光源供应商格奥尔格、博勒尔先生。这项工作由德国联邦教育与研究部（ BMBF ）通过合同 13N8271

参考文献

1. R. Winston, J.C. Minano, P.G. Benitez, *Nonimaging Optics*, Academic Press, San Diego, 2004
2. J. C. Minano, P. Benitez, J. C. Gonzalez, W. Falicoff, and H. J. Caufield, *High efficiency non-imaging optics*,
U.S. Patent 6,639,733, Oct. 28, 2003
3. W.J. Smith, *Modern optical engineering*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2000
4. H. Ries and R. Winston, *Tailored edge-ray reflectors for illumination*, *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**, 1260 (1994).
5. <http://www.osram-os.com/ostar/index.php?init=1>
6. S. Kudaev, P. Schreiber, Optimization of symmetrical free-shape non-imaging concentrators for LED light source applications, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5942, to be published
7. P.J. Schneider, D.H. Eberly, *Geometric Tools for Computer Graphics*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2003
8. D. Knuth, *The Art of Computer Programming, Volume 3*, 1st edition, Addison-Wesley Professional, Stanford, 1998
9. W. Cassarly, *Nonimaging optics: Concentration and Illumination*, in *Handbook of Optics*, Vol. 3, McGraw-Hill, New-York, 2001
10. D.M. Himmelblau, *Applied nonlinear programming*, McGraw-Hill, New York, 1972
11. R.P Brent, *Algorithms for minimization without derivatives*, Prentice-Hall, New Jersey, 1973