

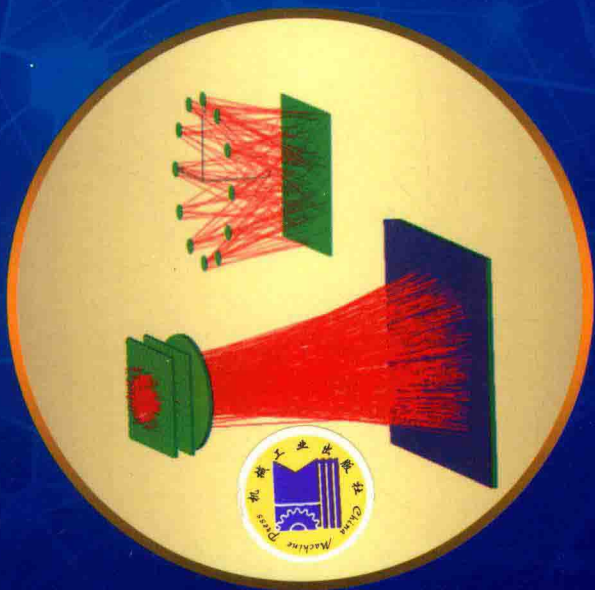
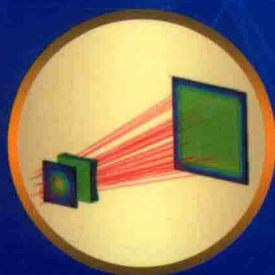
本书得到了江南大学和常熟黄论教育咨询有限公司的支持

非成像光学系统设计 方法与实例



◎苏宙平 编著

Design Methods for Non-imaging Optics



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

非成像光学系统设计 方法与实例

苏宙平 编著



机械工业出版社

本书详细地介绍了一些典型的非成像系统的 光学设计 方法及案例,全书共12章,包含 LED 照明 光学设计 、 太阳能集光系统 的 光学设计 、 激光扩束与整形光学系统设计 等内容。 LED 照明 光学设计 包括了 LED 窄光束 光学系统设计 、 LED 均匀照明的 光学系统设计 、扩展 LED 光源的二次 光学设计 及平面 LED 阵列和球形 LED 阵列设计;太阳能集光系统的 光学设计 包括了用于太阳能聚光的菲涅耳透镜及反射式 光学系统设计 ;激光扩束与整形 光学系统设计 包括了透镜扩束系统、棱镜扩束系统、自由曲面激光整形系统及微透镜阵列整形系统的设计。本书最后介绍了 光学仿真软件 FRED 在非成像 光学系统设计 中的应用。全书紧紧围绕工程应用中的实际案例,探讨设计思想,介绍设计方法及设计过程。读者可以将本书中的案例,根据自己的设计要求稍微做改动就可以应用,极大地简化了设计过程。

本书适合 光学工程 、 LED 照明、 太阳能集光技术 、 激光加工 、 激光整形 的高年级本科生、研究生及相关专业的工程技术人员和科研人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

非成像 光学系统设计 方法与实例/苏宙平编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-111-58226-7

I. ①非… II. ①苏… III. ① 光学系统 —系统设计 IV. ①TN202

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 245598 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:刘星宁

责任校对:潘蕊 封面设计:马精明

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 10 印张 · 186 千字

0 001—2600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-58226-7

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

非成像光学系统设计具有很广泛的应用价值，如照明中的光学设计、太阳能集光器设计、激光加工中的光束整形系统设计等。与成像光学系统有所不同，非成像光学系统很难通过商用的光学设计软件直接优化出最后的结果。究其原因如下：①非成像光学系统很难找到现成的初始结构；②非成像光学系统如照明系统需要计算辐照度分布，这需要追迹几十万甚至上百万条光线，因此优化速度会很慢，很难得到最佳的结果。尽管如此，大部分的从业人员都是使用商用的软件，通过反复调试的方法来得到一个设计结果，这种试错的方法非常耗时，而且很难取得满意的结果。本书总结了一些典型的非成像光学系统，针对每种非成像光学系统的设计思想、设计方法及设计过程进行了详细的介绍，并给出了设计案例。读者在掌握每种系统设计方法之后，使用相应的算法，只要修改一些参数，就能设计出自己想要的系统，这对读者完成相关的设计将起到有益的帮助。本书适合光学工程、LED照明、太阳能集光技术、激光加工、激光整形的高年级本科生、研究生及相关专业的工程技术人员和科研人员阅读。

本书共12章，包含LED照明光学设计、太阳能集光系统的光学设计、激光扩束与整形光学系统设计等内容。LED照明、太阳能利用属于新能源领域，激光扩束与整形在激光加工中有重要的应用，属于先进加工与制造领域，这些领域都是“十三五”期间国家重点规划的领域。全书紧紧围绕工程应用中的实际案例，总结了非成像领域近些年来的一些新的研究成果，归纳出了非成像领域里面的一些普遍性和通用性的设计方法。书中针对一些比较难的设计问题也进行了深入的探讨，如扩展LED光源的光学设计、发散激光光束的整形光学系统设计这些问题都具有很高的实际应用价值。

本书在编写过程中得到了讯技光电科技（上海）有限公司的大力支持，提供了本书第12章“基于FRED非成像光学设计案例”。感谢机械工业出版社的刘星宁先生在本书出版过程中给予的帮助。感谢我的学生彭亚蒙、李潇的帮助，也感谢参加我的光学设计课程的学生们，你们在课程中的反馈对本书内容的完善起到了重要的作用。

由于作者水平有限，加之编写时间紧张，书中难免有不妥甚至是错误之处，敬请读者批评指正。

作者

目 录

前 言

第 1 章 LED 窄光束光学系统设计	1
1.1 TIR 透镜（含双透射自由曲面）设计的基本原理	3
1.1.1 折射部分自由曲面的设计	3
1.1.2 反射部分自由曲面的设计	7
1.1.3 案例设计与分析	9
1.2 TIR 透镜（含单透射自由曲面）设计的基本原理	10
1.2.1 透射部分的外表面设计	10
1.2.2 反射部分的反射面设计	11
1.2.3 案例设计与分析	12
参考文献	14
第 2 章 实现 LED 均匀圆形辐照度分布自由曲面光学设计	15
2.1 实现 LED 均匀圆形辐照度分布自由曲面透镜设计	15
2.1.1 实现 LED 均匀圆形辐照度分布自由曲面透镜设计过程	16
2.1.2 旋转对称自由曲面透镜设计实例	20
2.2 实现 LED 均匀圆形光斑的自由曲面反光杯设计	21
2.2.1 LED 反光杯设计原理	21
2.2.2 LED 反光杯设计过程	21
2.2.3 LED 反光杯设计实例	24
参考文献	25
第 3 章 实现 LED 均匀矩形辐照度分布自由曲面光学设计	26
3.1 用于产生均匀辐照度分布矩形光斑的自由曲面透镜设计	26
3.1.1 将光源按等光通量进行划分	26
3.1.2 将目标面按等面积进行划分	29
3.1.3 自由曲面透镜的构建算法	30
3.2 非旋转对称的非连续自由曲面透镜设计案例	33
参考文献	34

第 4 章 基于 LED 扩展光源的二次光学设计	35
4.1 基于反馈优化算法设计 LED 扩展光源的自由曲面透镜	35
4.1.1 反馈优化算法的原理	35
4.1.2 基于几种不同参数调整的反馈优化	36
4.1.3 设计案例	38
4.2 基于全局优化算法设计 LED 扩展光源的自由曲面透镜	40
参考文献	43
第 5 章 平面 LED 阵列辐照度均匀化技术	44
5.1 平面 LED 阵列的优化设计与集成技术	44
5.1.1 LED 阵列设计理论	44
5.1.2 模拟退火算法设计	46
5.1.3 平面 LED 阵列设计案例	47
5.2 大颗数 LED 阵列的设计	59
5.2.1 基本 LED 阵列模块的形成	60
5.2.2 大颗数 LED 阵列的形成方法	61
参考文献	62
第 6 章 球形 LED 阵列辐照度均匀化技术	64
6.1 球形 LED 阵列设计理论	64
6.2 遗传算法设计	66
6.3 对称分布的球形 LED 阵列照明平面目标面	67
6.4 非对称分布的球形 LED 阵列照明球形目标面	70
参考文献	73
第 7 章 用于太阳能聚光的菲涅耳透镜设计	74
7.1 用于太阳能集光的菲涅耳透镜设计原理	74
7.1.1 等分入射到菲涅耳透镜上的光能	75
7.1.2 菲涅耳面的设计原理与方法	77
7.1.3 菲涅耳透镜设计案例	79
7.2 用于太阳能集光的菲涅耳透镜设计中的其他问题	81
参考文献	82

第 8 章 基于反射式的太阳能集光系统的设计	83
8.1 复合抛物面反射器优化设计方法	83
8.2 实现辐照度均匀分布的双反射太阳能集光系统设计	86
参考文献	89
第 9 章 激光扩束系统的 optical 设计	90
9.1 棱镜扩束系统的 optical 设计	90
9.1.1 影响单棱镜扩束的因素	90
9.1.2 多棱镜扩束系统中相邻棱镜的位置关系确定	93
9.1.3 棱镜扩束系统设计案例	94
9.2 透镜扩束系统的 optical 设计	95
9.2.1 折射式扩束系统设计案例	96
9.2.2 反射式扩束系统设计案例	98
9.2.3 柱透镜扩束设计案例	102
参考文献	102
第 10 章 自由曲面激光光束整形系统设计	103
10.1 用于准直激光光束整形的自由曲面透镜设计	104
10.1.1 旋转对称自由曲面整形透镜设计	104
10.1.2 非旋转对称自由曲面整形透镜设计	107
10.2 用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计	110
10.3 用于同时控制波前与辐照度均匀度的双自由曲面透镜	115
10.3.1 旋转对称的双自由曲面透镜设计	115
10.3.2 旋转对称的双自由曲面透镜设计案例	118
参考文献	119
第 11 章 基于微透镜阵列的激光光束整形	120
11.1 基于微透镜阵列的激光光束整形原理	120
11.2 基于微透镜阵列的旋转对称激光光束整形光学系统设计	120
11.3 基于微透镜阵列的非旋转对称激光光束整形光学系统设计	124
11.3.1 基于柱透镜阵列的一维光束整形	125
11.3.2 基于柱透镜阵列的二维光束整形	127
参考文献	130

第 12 章 基于 FRED 非成像光学设计案例	131
12.1 FRED 功能与应用领域介绍	131
12.2 基于 FRED 的单反相机的鬼像与杂散光分析	133
12.2.1 导入光机系统模型	133
12.2.2 杂散光计算与分析的主要过程	133
12.2.3 总结	144
12.3 基于 FRED 优化导光管实现预定的辐照度分布	144
12.4 基于 FRED 最大激光能量密度位置计算及可视化	147
12.4.1 聚焦 TEM_{00} 模式的能量密度可视化	147
12.4.2 聚焦的“非高斯”能量密度可视化	148
参考文献	152

第 1 章 LED 窄光束光学系统设计

LED 光源直接输出的光发散角比较大，在远距离照明的时候，能量比较分散，如图 1-1 所示，这样照射在目标面上的辐照度比较低，很难满足照明要求。因此将 LED 光源应用于手电筒，港口或码头用的信号投射灯，需要设计合理的二次光学系统以减小 LED 输出光的发散角。

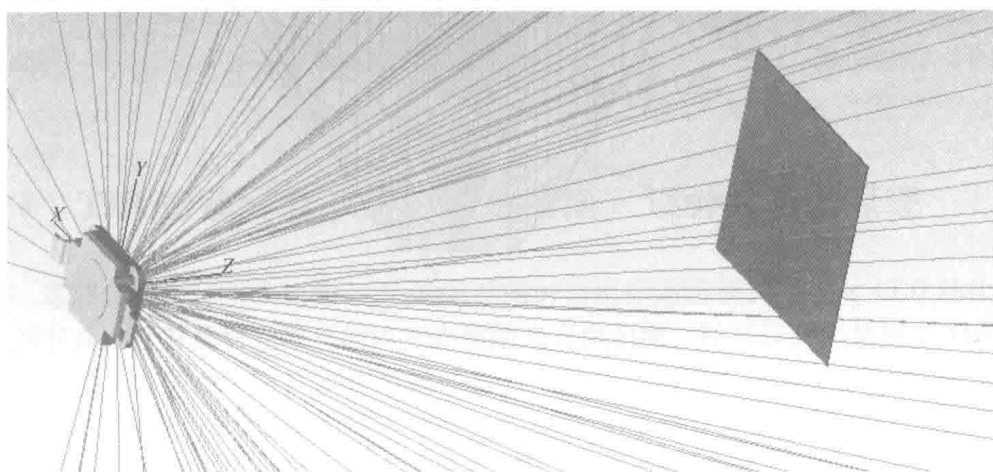


图 1-1 LED 直接照明目标面示意图

采用单个反光杯或者透镜都可以对 LED 光源进行准直。如果采用反光杯，对于发散角比较大的区域的光线可以很好地准直，而发散角比较小的区域的光线要照到反光杯上，需要把反光杯做得很深，导致了反光杯的体积很大，如图 1-2a 所示，

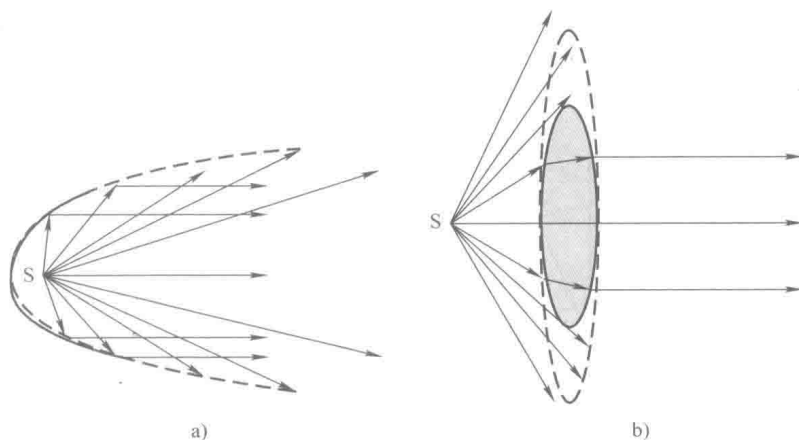


图 1-2 单个反光杯或透镜对 LED 光源进行准直

使用起来不方便。如果采用透镜，小角度的区域的光线可以很好地准直，为使大角度光线能够照到透镜，透镜的口径要比较大，如图 1-2b 所示。

TIR（全内反射）透镜有效地将反射与透射结合起来，解决了上述提到的使用单个反光杯或单个透镜的缺点。TIR 透镜的结构如图 1-3 所示。TIR 透镜工作的基本原理都是将小角度区域的光采用透射式进行准直，大角度区域的光以反射式的方式进行准直。本章主要讨论图 1-3b 和 c 所示两种结构的 TIR 透镜设计。

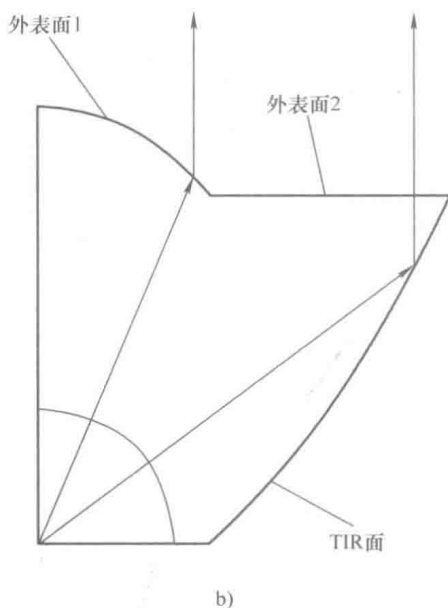
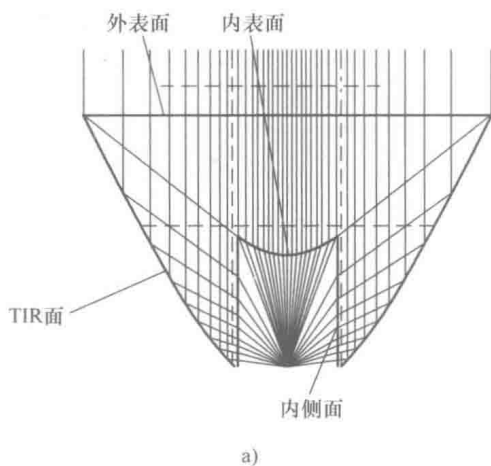


图 1-3 几种典型的 TIR 透镜结构

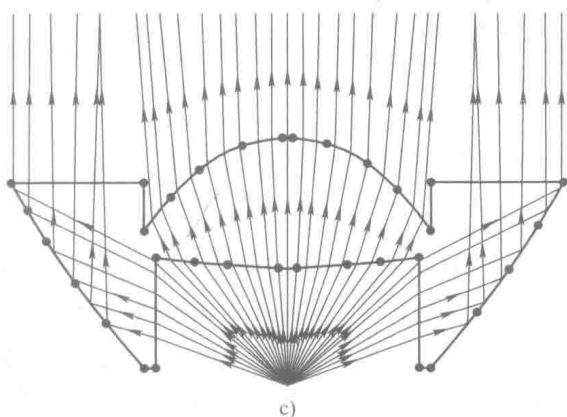


图 1-3 几种典型的 TIR 透镜结构 (续)

1.1 TIR 透镜 (含双透射自由曲面) 设计的基本原理

这部分将设计一个如图 1-3c 所示结构的自由曲面透镜, 实现对 LED 输出光束的准直, 针对透射光准直的内外表面均为自由曲面, 针对反射光使用了 TIR 面进行准直。接下来将探讨 TIR 透镜的折射部分和反射部分的设计。这里使用的 LED 尺寸比较小, 可以看作是点光源。这里使用的 LED 光源发光强度分布是旋转对称的, 因此可以先设计一个二维 (2D) 结构, 然后旋转对称得到透镜的三维 (3D) 模型。

1.1.1 折射部分自由曲面的设计

对于发散角比较小的光线采用折射式的准直系统, 这里使用双自由曲面构成的透镜, 如图 1-4 所示。光线从 O 点发出, 按等角度间隔取一系列的采样光线, 这些光线与光轴的夹角分别为 A_1, A_2, \dots, A_i 。这些光线与自由曲面 S_1 的交点为 e_1, e_2, \dots, e_i , 经过 S_1 折射后与自由曲面 S_2 的交点为 E_1, E_2, \dots, E_i 。透射部分由两个自由曲面 S_1 和 S_2 构成。 S_1 面上各点坐标为 $e_i (x_{1i}, y_{1i})$, S_2 面上各点坐标为 $E_i (x_{2i}, y_{2i})$, e_1 点

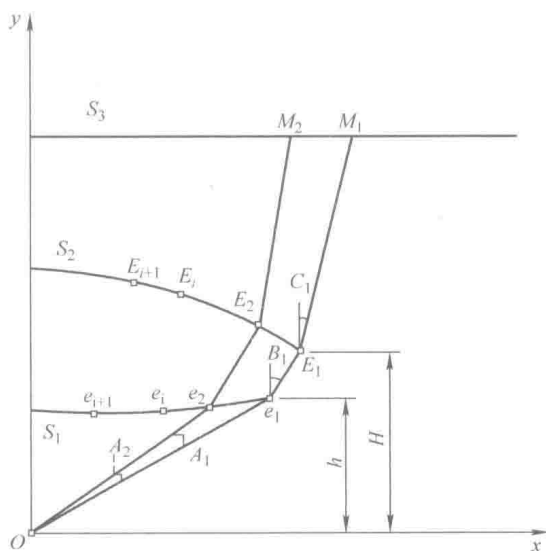


图 1-4 透射部分示意图

和 E_1 点的纵坐标分别为 $y_{11} = h$, $y_{21} = H$ 。其中下标中的第 1 个数字表示面的序号, 而第 2 个数字表示该面上的坐标点的序号, 以下规定类似。经过 S_1 折射后的光线与光轴夹角分别为 B_1, B_2, \dots, B_i 。经过 S_2 出射后的夹角分别为 C_1, C_2, \dots, C_i 。其中 C_i 按等角度依次递减, 计算方法为 $C_i = C_1 - (i-1) \frac{(C_1 - 0)}{m}$, 为了使最终输出的光发散角比较小, 要求 $C_1 \leq 6^\circ$ 。这里 $B_i = \xi (A_i + C_i)$, 其中 ξ 为分角比例因子, 关于 ξ 的选取将在后面讨论。 S_3 面是一个目标面, 位置可以任意选取, 又因为 C_i 已知, 所以 S_3 面的各点坐标容易获得。

构建 S_1 面和 S_2 面, 就是获得 e_1, e_2, \dots, e_i 以及 E_1, E_2, \dots, E_i 一系列点的坐标过程, 为了计算自由曲面 S_1 和 S_2 上任一个采样点的坐标, 需要推导自由曲面上相邻两个采样点之间的迭代关系。如果这种迭代关系建立起来, 知道 e_i 点就可以计算出 e_{i+1} 点, 同理知道 E_i 点可以计算出 E_{i+1} 点。

先假设 e_i 点和 E_i 点的坐标已知, 分别为 (x_{1i}, y_{1i}) 和 (x_{2i}, y_{2i}) , 如图 1-5 所示, 光线 Oe_i 经过 e_i 点折射后, 折射角为 B_i , e_i 点处的法线矢量为 N_{1i} , 根据折射定律的矢量形式

$$[1 + n^2 - 2n(\mathbf{Out} \cdot \mathbf{In})]^{1/2} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{Out} - n\mathbf{In} \quad (1-1)$$

其中

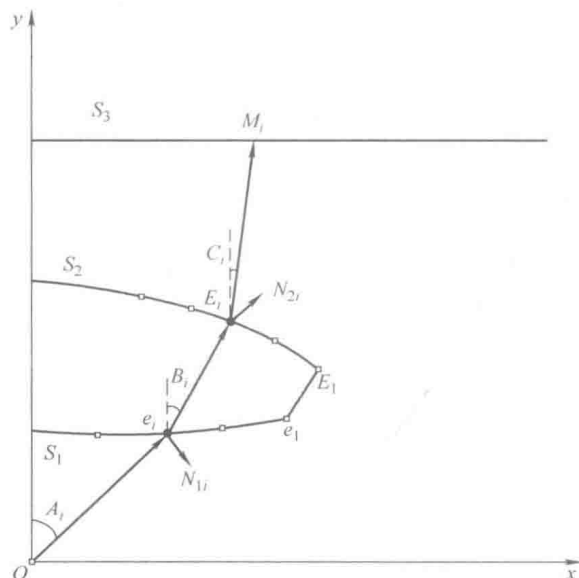


图 1-5 过自由曲面上任意点的法向矢量计算示意图

$$\begin{aligned} \mathbf{Out}_{1i} &= \left(\frac{(x_{2i} - x_{1i})}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}} \mathbf{i}, \frac{(y_{2i} - y_{1i})}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}} \mathbf{j} \right) \\ \mathbf{In}_{1i} &= \left(\frac{x_{1i}}{\sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2}} \mathbf{i}, \frac{y_{1i}}{\sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2}} \mathbf{j} \right) \\ N_{1i} &= (-dy\mathbf{i}, dx\mathbf{j}) \end{aligned} \quad (1-2)$$

可以求得过 e_i 点的切线的斜率为

$$k_{1i} = \frac{\frac{n(x_{2i} - x_{1i})}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}} - \frac{x_{1i}}{\sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2}}}{\frac{y_{1i}}{\sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2}} - \frac{n(y_{2i} - y_{1i})}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}}} \quad (1-3)$$

同样也可以求得过 E_i 点的切线的斜率为

$$k_{2i} = \frac{\frac{(x_{3i} - x_{2i})}{\sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2}} - \frac{n(x_{2i} - x_{1i})}{\sqrt{x_{2i}^2 + y_{2i}^2}}}{\frac{n(y_{2i} - y_{1i})}{\sqrt{x_{2i}^2 + y_{2i}^2}} - \frac{(y_{3i} - y_{2i})}{\sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2}}} \quad (1-4)$$

目标面 S_3 上 M_i 点的坐标为 (x_{3i}, y_{3i}) 。

接下来构建 S_1 面上相邻采样点 e_i 和 e_{i+1} 之间的迭代关系。如图 1-6 所示, 当获得 e_i 点的坐标 (x_{1i}, y_{1i}) 以后, 如果 S_1 面上采样点的数量比较多, 过 e_i 点的切线与从 O 点出射的第 $i+1$ 条采样光线的交点可近似为 e_{i+1} 点。过 e_i 点的切线的斜率可以用 e_i 和 e_{i+1} 的坐标来表示为

$$k_{1i} = \frac{y_{1i+1} - y_{1i}}{x_{1i+1} - x_{1i}} \quad (1-5)$$

e_{i+1} 点位于从 O 点出射的第 $i+1$ 条采样光线上, 所以满足

$$x_{1i+1} = y_{1i+1} \tan(A_{i+1}) \quad (1-6)$$

联立式 (1-5) 和式 (1-6) 可以得到

$$y_{1i+1} = \frac{k_{1i} x_{1i} - y_{1i}}{[k_{1i} \tan(A_{i+1}) - 1]} \quad (1-7)$$

$$x_{1i+1} = \frac{k_{1i} x_{1i} - y_{1i}}{[k_{1i} \tan(A_{i+1}) - 1]} \tan(A_{i+1}) \quad (1-8)$$

从式 (1-7) 和式 (1-8) 可以看出 e_{i+1} 点的坐标可以用 e_i 点的坐标 $(x_{1i},$

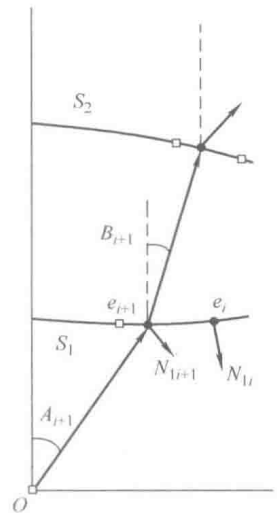


图 1-6 曲面 S_1 上相邻两采样点迭代关系计算示意图

y_{1i})、过 e_i 点的切线斜率 k_{1i} 以及第 $i+1$ 条采样光线与 LED 光源的法向夹角 A_{i+1} 来计算。

这样就建立起来了曲面 S_1 上相邻采样点 e_i 和 e_{i+1} 之间的迭代关系, 知道曲面上任意点 e_i 就可以得到相邻点 e_{i+1} 。在透镜设计的初始条件中 e_1 点的坐标就确定了 (见图 1-4), 这样利用迭代关系式 (1-7) 和式 (1-8) 可以计算出曲面 S_1 上所有点的坐标。

当获得了曲面 S_1 上所有点的坐标之后, 接下来推导曲面 S_2 上相邻两个采样点 E_i 和 E_{i+1} 之间的迭代关系。假设 E_i 如图 1-7 所示, 从 O 点出射的第 $i+1$ 条光线 Oe_{i+1} 经曲面 S_1 折射后与过 E_i 点的切线的交点可看作是 E_{i+1} 。过 E_i 点的切线率可用式 (1-4) 获得, 该斜率也可用 E_i 点和 E_{i+1} 的坐标表示为

$$k_{2i} = \frac{y_{2i+1} - y_{2i}}{x_{2i+1} - x_{2i}} \quad (1-9)$$

光线 $e_{i+1}E_{i+1}$ 的斜率可以用 E_{i+1} 和 e_{i+1} 坐标表示为

$$\cot(B_{i+1}) = \frac{y_{2i+1} - y_{1i+1}}{x_{2i+1} - x_{1i+1}} \quad (1-10)$$

联立式 (1-9) 和式 (1-10) 可以得到

$$x_{2i+1} = \frac{y_{2i} - y_{1i+1} + \cot(B_{i+1})x_{1i+1} - k_{2i}x_{2i}}{\cot(B_{i+1}) - k_{2i}} \quad (1-11)$$

$$y_{2i+1} = \frac{k_{2i}[y_{2i} - y_{1i+1} + \cot(B_{i+1})x_{1i+1} - k_{2i}x_{2i}]}{\cot(B_{i+1}) - k_{2i}} - k_{2i}x_{2i} + y_{2i} \quad (1-12)$$

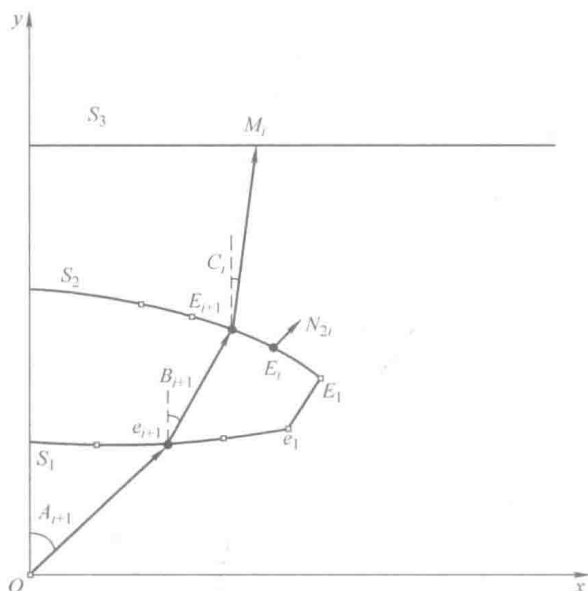


图 1-7 曲面 S_2 上相邻两个采样点迭代关系计算示意图

从式(1-11)和式(1-12)可以看出 E_{i+1} 点的坐标可以用 E_i 点的坐标 (x_{2i}, y_{2i}) 、 e_{i+1} 点的坐标 (x_{1i+1}, y_{1i+1}) 、过 E_i 点的切线斜率 k_{2i} 以及光线 e_{i+1} 与LED光源的法向夹角 B_{i+1} 来计算。这样就建立起来了曲面 S_2 上相邻采样点 E_i 和 E_{i+1} 之间的迭代关系,知道曲面上任意点 E_i 就可以得到相邻点 E_{i+1} 。在透镜设计的初始条件中 E_1 点的坐标就确定了(见图1-4),这样利用迭代关系式(1-11)和式(1-12)可以计算出曲面 S_2 上所有点的坐标。

1.1.2 反射部分自由曲面的设计

计算了透射部分的曲面轮廓之后,继续计算反射部分的曲面。如图1-8所示,小角度区域的光线经过折射透镜输出,而角度大的光线先入射到 S_4 面折射后到 S_5 面,经 S_5 面反射后,最终经 S_6 面出射,假设 S_6 面出射的光线都是平行于 y 轴。 S_1 面的下面是个圆柱形的空腔,可以用来放LED光源。这里假设透射部分光线的角度范围为 $0 \sim A_1$,而反射部分的光线的角度区域为 $A_1 \sim P_1$,其中 A_1 为折射部分和反射部分的分界角(见图1-9), P_1 为最下边缘的光线 OF_1 与 y 轴的夹角,该区域内的光线按等角度间隔进行采样,即任意一条采样光线 OF_i 与 y 轴夹角 P_i 都是已知的。第 i 条光线 OF_i 入射到 S_4 面上的 F_i 点的坐标为

$$x_{4i} = d, y_{4i} = d \tan\left(\frac{\pi}{2} - P_i\right) \quad (1-13)$$

式中, P_i 为光源发出的光线 OF_i 与 y 轴的夹角。如图1-9所示,这里 d 为圆柱形空腔的半径, $d = h \tan \alpha$, α 为折射部分和反射部分的分界角,即 $A_1 = \alpha$ 。 h 为 e_1 点的纵坐标。

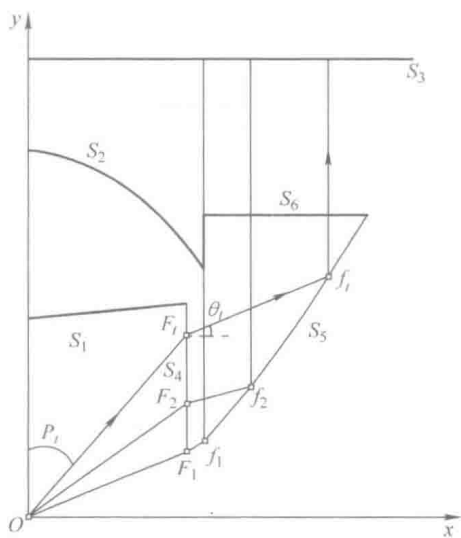


图1-8 反射部分光路示意图

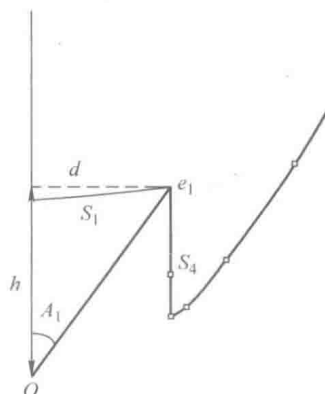


图1-9 透镜的边界条件示意图

光线 OF_t 经过 S_4 面折射后照到了 S_5 面, 根据折射定律

$$n_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - P_t\right) = n_1 \sin Q_t \quad (1-14)$$

式中, Q_t 为从 S_4 面出射的光线 $F_t f_t$ 与过 F_t 点法线矢量的夹角; n_0 和 n_1 分别为空气和介质的折射率。第 1 条光线 OF_1 , 经过 S_4 面折射后照到 S_5 面的起始点 f_1 , 要保证从 f_1 点出射的光线刚好通过 S_2 面边缘点, 因此 f_1 的坐标为

$$x_{51} = x_{21}, y_{51} = d \cot P_1 + (x_{21} - d) \tan Q_1 \quad (1-15)$$

如图 1-10 所示, 光线 OF_t 经过 S_4 面折射后, 入射到了 S_5 面上的 $f_t (x_{5t}, y_{5t})$ 点, 光线 $F_t f_t$ 的单位方向矢量为 I_{5t} , 当光线 $F_t f_t$ 入射到 S_5 面的 f_t 点上, 经其反射之后的出射光线方向矢量为 O_{5t} , 矢量 O_{5t} 平行于 y 轴, 曲面 f_t 点处的法向矢量为 N_{5t} 。 I 、 O 和 N 三者满足反射定律, 即

$$\sqrt{2 - 2(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{O} - \mathbf{I} \quad (1-16)$$

$$\mathbf{I} = \left[\frac{(x_{5t} - x_{4t})\mathbf{i}}{\sqrt{(x_{5t} - x_{4t})^2 + (y_{5t} - y_{4t})^2}}, \frac{(y_{5t} - y_{4t})\mathbf{j}}{\sqrt{(x_{5t} - x_{4t})^2 + (y_{5t} - y_{4t})^2}} \right] \quad (1-17)$$

$$\mathbf{O} = [0, \mathbf{j}] \quad (1-18)$$

根据这个关系可以求出过 S_5 面上 f_t 点的切线斜率为

$$p_{5t} = \frac{(x_{5t} - x_{4t})}{1 - \frac{\sqrt{(x_{5t} - x_{4t})^2 + (y_{5t} - y_{4t})^2}}{(y_{5t} - y_{4t})}} \quad (1-19)$$

接下来构建 S_5 面上相邻采样点 f_t 和 f_{t+1} 之间的迭代关系。如图 1-10 所示, 当获得 f_t 点的坐标 (x_{5t}, y_{5t}) 以后, 如果 S_5 面上采样点的数量比较多, 过 f_t 点的切线与从 F_{t+1} 点出射的第 $t+1$ 条采样光线的交点可近似为 f_{t+1} 点。过 f_t 点的切线的斜率可以用 F_t 和 f_t 的坐标来表示, 如式 (1-19)。

$F_{t+1} f_{t+1}$ 的斜率可表示为

$$m_{4,t+1} = \tan(Q_{t+1}) = \frac{y_{5,t+1} - y_{4,t+1}}{x_{5,t+1} - x_{4,t+1}} \quad (1-20)$$

过 f_t 点的切线的斜率为

$$p_{5,t} = \frac{y_{5,t+1} - y_{5,t}}{x_{5,t+1} - x_{5,t}} \quad (1-21)$$

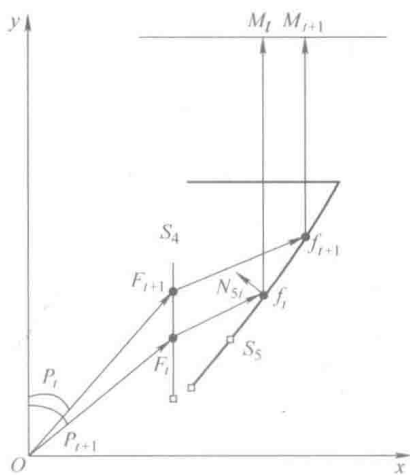


图 1-10 构建反射面上相邻两个坐标点之间的迭代关系

联立式(1-20)和式(1-21)可以得到

$$x_{5,t+1} = \frac{-y_{5,t} + y_{4,t+1} - m_{4,t+1}x_{4,t+1} + p_{5,t}x_{5,t}}{p_{5,t} - m_{4,t+1}} \quad (1-22)$$

$$y_{5,t+1} = p_{5,t}(x_{5,t+1} - x_{5,t}) + y_{5,t} \quad (1-23)$$

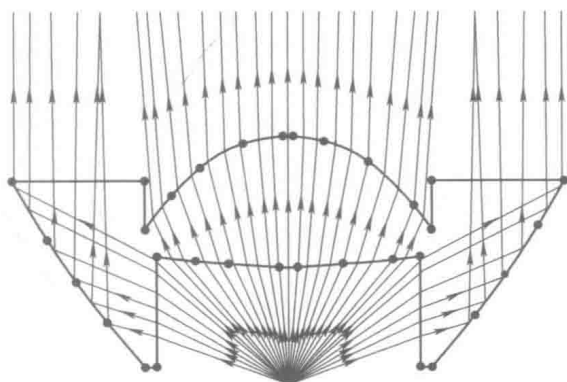


图 1-11 光学系统的二维轮廓

1.1.3 案例设计与分析

根据前面的设计理论,我们选取初始结构的参数,设计一个准直系统。设计过程中,选取的初始结构参数如下:分界角 $\alpha = 45^\circ$,LED最大发散角为 70° ,分角比例因子 $\xi = 0.5$; e_1 点的纵坐标 $y_{11} = 4$, E_1 点的纵坐标 $y_{21} = 4.8$ 。

准直光学系统二维轮廓如图 1-11 所示,进行光线追击分析,可以看出经过光学系统以后光线准直性比较好。图 1-12 为光学系统的三维轮廓。

光线追击过程中使用的 LED 尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$,是朗伯光源,其直接输出发光强度的配光曲线如图 1-13a 所示。从图上可以看出,发散角(半角)约为 60° (发光强度降为一半)。当 LED 光源发出的光线经过准直系统后,其发光强度配光曲线如图 1-13b 所示,可以看出,LED 发光的发散角(半角)减小到了约 3.8° 。

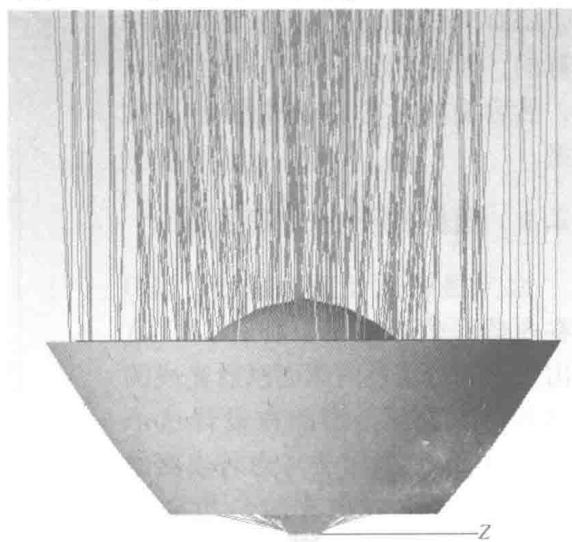


图 1-12 光学系统的三维结构光线追击图