

光 学 设 计

主讲人：王之江

上 海 光 机 所

序 言



去年年底，我同王之江先生谈起想在国内举办一次光学设计的讲习班，时隔一天，王先生就认真地答复愿意承担这一任务。其实，这种类型的讲习班在国际上已经非常普遍，往往伴随着大型学术会议，会有各类相关专业性很强的速成讲习班。现代社会的发展要求技术专家终生学习！

王之江先生在光学设计方面的成就是有目共睹的。早在上世纪六十年代，就由科学出版社出版了《光学设计理论基础》一书。该书全面总结发展了像差理论和像质评价理论，形成了全新、完整的理论体系，奠定了中国特色的光学设计的基石。我国一大批从事光学设计的专家，都得益于王之江先生及其早期长春光机所同事们卓有成效的科研工作。

当今光学技术已经渗透到越来越多的领域，各类新型的光学系统大量涌现，每年国际上都会产生数以万计的光学设计专利。随着光学设计软件的日臻完善，一般的系统通过简单的变异、移植就可以完成。但是对于一个优秀的光学工程师，应该说没有像差理论做基础是没有生命力的，没有像差理论的指导，在设计过程中的参数选取和调整也是盲目的。本讲义的编写宗旨贯穿了从理论到实践的主线，讲义内容涵盖了光学设计的理论以及利用软件开展具体光学系统设计的实例。相信通过王先生的讲解，能极大增进新时期光学工程师的设计水准。

正值上海光机所建所四十周年之际，回顾历史，展望未来，思绪万千，能聆听大师的报告，实为有幸，受益终身。

朱熹曾言：问渠哪得清如许，为有源头活水来。做人、做学问当是如此！

2004年4月27日

1. 光学设计和光学仪器的发展史
2. 对光学系统的基本要求、指标
3. 高斯光学

光学表面对光线偏折，光路计算，近轴光线，像差，物像关系，薄透镜，拉氏不变量，光管，传输耦合的基本条件，近轴光路计算，**ABCD**矩阵，光焦度和主平面。

4. 像差理论

球面的球差，球差零点，球差与折射率，初级球差，正弦条件，彗差，透镜弯曲，主光线，主光线光路像差，畸变，像散，像面弯曲，初级像差理论，像差与光阑移动，像差与物面移动，色差，光学玻璃和晶体，二级光谱，薄透镜组，非球面，校正像面弯曲的措施，可能校正的像差与不可能校正的像差，轴对称与非轴对称。

5. 为何有多种不同结构的光学系统：望远镜、显微镜、照相物镜、目镜、光刻物镜。
6. 成像质量

衍射，点扩散函数和像差，能量集中度，分辨能力，伪分辨，光学传递函数，星点检验，杂光，降低杂光的措施，鬼像。

7. 光学设计软件的基本功能

* 成像质量的计算和分析：光学系统结构数据输入，孔径，视场，波长，表面模型，玻璃表，玻璃模型，光阑，望远镜系统，**Analysis**包含的项目计算，像差量级不同时要用不同方法分析。

* 结构优化（**Optimization**）：变量选择，优化目标函数选择，内定目标函数调出，限制边界条件，**Tools**和**Solves**的作用，如何改变优化过程。**Global Optimization**。

*公差计算，内定的公差初值，初值修改，公差计算，根据各变量的灵敏度修改公差，放宽公差的可能性，公差和成本，机械固定和装校的原则，美国标准，**ISO**

8. 设计的例子

单透镜：焦距控制，视场选择，目标选择。

消色差透镜组：色差和玻璃、校正像差的可能性。

非球面单透镜：优化步骤的影响。

LensView对光学系统的分类，浏览。

高倍显微物镜：从专利出发，修改内容目标函数，边界条件。

双高斯物镜：从专利出发，变量的变动，玻璃作为变量。

- ◆ R.Kinslake, Lens design Fundamental, 1978.
- ◆ R.Kinslake, optical system design, 1983, Academic Press.

这位百岁老人去年刚去世，他是A.E.Conrady的学生，从上世纪三十年代被请到美国，美国的光学工业大致是他的学生们发展起来的。

- ◆ M.LaiKin, Lens design, 1991, March 1 Dekker. 非常实用的各种光学系统设计，有新版。

- ◆ R.E. Fischer, Optical system design, 2000, McGraw Hill.

此人从上世纪八十年代一直到现在，都在SPIE Photonics West 之类的会上讲Short Courses——“光学设计”，本书属于这种教材。

- ◆ 斯留萨列夫，谈光学中一些可能的和不可能的问题，1966，科学出版社。本书可启发人们去认真思考问题。
- ◆ 张以谟，应用光学，机械工业出版社，中国高校教科书
- ◆ 王之江，光学设计理论基础，1985，科学出版社。本教材的公式取自此书。

光学设计方法随使用工具的更新而改变面貌。使用电子计算机之前的方法统称为“手工”设计法。那时主要通过追迹光线，计算像差和逐次修改结构参数使之接近使用要求的方法来做设计。电子计算机的使用，使得对光学系统(特别是复杂系统)的分析计算更加完善了，进而使光学自动设计逐步发展起来。

任何光学系统都不可能把所有各种像差都校正到理想。所以，设计时我们应该根据像差理论对系统提出尽量合理的像差要求。即使是利用电子计算机做自动设计，这一点也是很重要的。用优化技术来自动平衡光学系统的像差时，如果要求提得太多，且提出了矛盾的要求(例如同时提出正弦条件和赫谢耳条件)，就可能产生“病态”方程，使自动平衡不能顺利进行。

用于光学系统自动设计的电子计算机，70年代趋向于使用大型机，80年代则有趋向于改用微机的势头。这一方面当然是为了节省设计费用，另一方面也说明设计过程需要进行多次人工“干预”，这种“干预”过程无疑是设计者运用像差理论和设计经验的过程。这可能就是光学设计者更喜欢用微机的理由，同时也是未有真正成功的光学CAD软件问世的证据。

归结起来，光学设计方法就是：

- a) 根据使用要求提出光学系统设计要求，把光学中“不可能”的要求去掉(“手工”完成)；
- b) 用高斯光学理论，给出高斯结构(多数由“手工”设计)；
- c) 平衡初级像差和实际像差，使系统残留像差达到公差允限(一般用优化技术，由电子计算机来实现)；
- d) 公差计算和画光学系统图，零件图(可由电子计算机完成)。

◆提供给光学系统设计者广泛而有益的入门指南：

- 概念，顺着这些概念合理过渡到被开发真实系统的设计
- 一些术语或常用的“行话”要慎用
- 不要专注于数学公式及其详细的推导。相反，需重视对设计和工程过程的理解
- 光学设计不仅要考虑基本的概念设计和理论，而且要预计可制造能力与可测试能力。

十六、十七世纪：伽利略、牛顿、惠更斯时代
已经有望远镜、显微镜、目镜等雏形，经验为主。

十九世纪：像差理论、设计方法，衍射成像理论趋于成熟。
Seidel, Abbe, Zeiss 工厂，**Schott** 工厂
由光学设计而制造光学仪器，德国领先世界近百年。

二十世纪：四十年代开始用机械计算机。**1946年** 发明电子计算机**Eniac**，
五十年代用于光路计算、分析，
六十年代“自动平衡”（优化）程序，
八十年代普遍使用优化程序，美国商业程序

光学设计理论的作用

挑选合理的初始结构，设计指标，
尽量少用光线就能对现状作出判断
包括初始要求是否合理，可能不可能达到要求。

判断修改的方向

德、美、英、日、俄概况 detector、波段、激光使应用领域扩展。

中国光学仪器历史

- ◆ 光学系统的要求和技术规格
- ◆ 成像基础
 - 理想成像与像差使像质变坏
- ◆ 基本系统分析
- ◆ 一些有用的基本公式
- ◆ 光学系统中的像差和最小化的方法
 - 球差、彗差、像散、场曲，离焦、和色差
- ◆ 光学系统的配置——透镜和反射镜组
- ◆ 玻璃材料选择
- ◆ 光学设计过程
- ◆ 性能计算
- ◆ 高斯光束成像
 - 用于激光系统
- ◆ 用于红外波段的光学系统和材料
- ◆ 环境因素考虑
- ◆ 公差和其它可制造性问题
- ◆ 杂散辐射考虑
- ◆ 光学设计过程中应用大规模优化程序的说明

◆ 性能

- 提供理想像质，足够分辨视场内最小尺寸的特定物体
- 像弥散元尺寸与探测器像素尺寸匹配
- 有效孔径和透过率必须足够满足设计要求

◆ 构形选择

- 设计形式必须能满足所需的性能
- 特殊的技术要求比如在扫描系统，在红外系统中的光阑等，要符合要求

◆ 可制造性考虑

- 最小尺寸/成本/重量/环境影响

光学系统技术要求



基本要求

Object distance (物距)	_____	Image formats (成像形式)	_____
Image distance (像距)	_____	Configuration (结构)	_____
f/number or NA (F数或数值孔径)	_____	Magnification (放大率)	_____
Full field of view (全视场)	_____	Transmittance (透过率)	_____
Focal length (焦距)	_____	Vignetting (渐晕)	_____

成像质量要求

Detector type (探测器类型) _____

Central or major wavelength (主波长) _____ $\lambda =$ _____

Spectral range (光谱范围) 从 $\lambda =$ _____ 到 $\lambda =$ _____

Spectral weights 光谱权重(@3或5 λ) λ 1/W1 _____ λ 2/W2 _____ λ 3/W3 _____
 λ 4/W4 _____ λ 5/W5 _____

MTF _____

RMS wavefront degradation (RMS波前衰减) _____

Encircled energy (能量中心度) _____ % 能量在 _____ 直径

Distortion (畸变) _____

机械和包装要求

Length (长度)	_____	Diameter (直径)	_____
Back focus dist (后焦距)	_____	Weight of optics(光学载重)	_____
Object to image (物像间距离)	_____	Other(其它)	_____

光学系统技术要求(续)



具体要求

Central obscuration (中心遮拦) _____
Off axis rejection (离轴抑制) _____
Number of elements (元件数量) _____
Materials (材料) _____
Cost guidelines (价格准则) _____
Illumination profile(光照图) _____

Environment (环境):

Temperature (温度) _____

Soak range _____

Gradients (倾斜度) _____

Shock & vibration(振动) _____

Other(其它) _____

IR系统的要求

Narcissus _____
Scan noise (扫描噪音) _____
NE Δ T _____
Cold stop efficiency _____

如果扫描:

Magnification (放大) _____

Scanner geometry (扫描几何图) _____

Other (其它) _____

其它系统要求
