

光学系统理论

〔苏〕 В. Н. 别戈诺夫
Н. П. 柴卡斯诺夫
С. И. 基留辛
В. И. 柯雪契夫 著

机械工业出版社

光 学 系 统 理 论

[苏] Б. Н. 别戈诺夫
Н. П. 柴卡斯诺夫
С. И. 基留辛
В. И. 柯雪契夫 著
包学诚 译 张善钟 校



机 械 工 业 出 版 社

译 者 的 话

几十年来，光学仪器和其他光学装置得到了很大的发展，其中光学系统的设计和计算具有非常重要的意义。本书系统地叙述了光学系统的基本理论，比较详尽地介绍了各种基本光学系统和新型光学系统（激光、光电、电视等）的结构原理，对某些问题（如光阑的作用和分类）提出了新的见解。本书作为教科书，内容丰富，取材新颖，适于教学。译者相信，本书的翻译出版将为我国有关专业的大学生和教师提供一本有益的参考书，对于从事光学系统设计和研究的工程技术人员也将具有较大的参考价值。

本书承哈尔滨工业大学张善钟教授校订，并得到浙江大学王子余教授的关心和帮助，在此表示衷心感谢！在翻译过程中，对原书的一些错误已作了改正，有的还作了注解。

由于译者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

986年 8月

序

光学仪器是多种多样的，其中包括用于全息、电视、高速摄影等的仪器，以及带有各种激光器的仪器，所以不能按仪器的类型设置教学课程，因为这样的体系太庞大了。

复杂仪器光学系统的作用可以看成是各种物象位置具有一定特征的光学部件相互作用的结果。根据这个原则来编写教材，传统上将光学系统分为四种类型：显微镜、望远镜、照相物镜和投影（放映）仪器。虽然现代光学系统的样式越来越多，但每一种光学系统，按照物象位置的特征都可以归入上述四种中的一种类型。

本书简要地阐述了光学系统的理论基础和结构以及应用电子计算机进行象差计算的原理。

光学系统理论这一课程的任务包括：教会学生正确选择光学仪器；进行光学系统的光能和外形尺寸计算；选择组成光学系统的光学部件、光源和辐射探测器（如果没有规定），并在选定后对它们的相互匹配进行校验，以便得到要求的成像质量；对现有各个部件的特性，例如焦距和外形尺寸进行复算；计算系统或各光组的结构参数以便得到要求的象质（象差校正）。

光学系统理论以几何概念为基础，因此常常称为几何光学。

几何光学可以有条件地分成三个部分：几何光学本身，这一部分主要论述基本概念和定律，包括象差知识；光学系

统理论，它是利用前一部分的内容建立各种类型光学系统的几何理论；光学系统的象差校正，它将在以后的《光学系统的象差计算》课程中进行深入研究。在设计光学系统时，必须考虑光学辐射的物理基础，因此在学习光学理论以前先学习物理光学课程。

本书第三、四章由Б. Н. 别戈诺夫编写；序、绪论、第一、二、五、六、七、九、十二、十七、二十章和第二十一章18以及附录1由Н. П. 柴卡斯诺夫编写；第八、十、十四、十五、十六章以及第二十一章1~6、14和16由С. И. 基留辛编写；第九、十三、十八、十九章和第二十一章7~13、15、17以及附录2由柯雪契夫编写。

目 录

译者的话

序

绪论 1

第一章 几何光学的基本原理和定律 4

1. 费马原理 4

2. 折射率 6

3. 符号规则 7

4. 折射定律和反射定律 8

5. 全内反射 9

6. 折射表面和反射表面 10

第二章 光线的折射和反射 13

1. 光线对平面的折射 13

2. 光线对球面的折射 14

3. 光线对平面的反射 17

4. 光线对球面的反射 19

5. 光线对非球面的折射 21

6. 非球面的反射 23

第三章 理想光学系统 25

1. 理想光学系统的概念和它的性质、线性放大率 25

2. 理想光学系统的基本要素 25

3. 物象位置和大小的关系式 29

4. 角放大率、节点 32

5. 纵向放大率 33

6. 光线通过基本要素给定的光学系统的光路作图法 35

7. 倾斜物面的象	40
8. 光线通过理想光学系统的光路计算	43
9. 几个镜组成的光学系统	45
第四章 近轴光线和零光线光学	50
1. 近轴光线的作用	50
2. 惠更斯-亥姆霍茨不变量	52
3. 零光线的光路计算	55
第五章 光学系统的零件	60
1. 制造光学零件用的材料	60
2. 透镜	66
3. 平行平板	79
4. 平面反射镜、球面反射镜和非球面反射镜	82
5. 反射棱镜	86
6. 折射棱镜和光楔	92
7. 导光管和纤维光学	100
8. 菲涅耳透镜、轴线镜、光学栅网	102
第六章 光学系统中光束的限制	112
1. 光阑	112
2. 入射光瞳和出射光瞳	114
3. 线视场和角视场、渐晕、入射窗和出射窗	117
4. 入射光瞳的有效孔径	122
第七章 光学仪器的辐射能传递	125
1. 光学辐射、辐射通量	125
2. 能量值和光度值以及它们的单位	128
3. 光度值与能量值之间的关系	134
4. 辐射的传播	137
5. 光学系统的透射系数	145
6. 通过滤光片的辐射通量	151
7. 光学系统作用下象的照度	153

第八章 光线通过光学系统的光路计算	159
1. 电子计算机的光路计算公式	159
2. 无限细象散光束的计算公式	165
3. 光路计算的初始数据选择	171
第九章 光学系统的单色象差	176
1. 光学系统象差计算的一般原理	176
2. 三级象差	178
3. 辅助光线的规化条件	182
4. 球差	186
5. 子午慧差	191
6. 正弦条件和等晕条件	193
7. 象散和象面弯曲	195
8. 畸变	199
第十章 光学系统的色差	202
1. 位置色差	202
2. 倍率色差	208
3. 色球差	210
第十一章 作为光学系统的眼睛	212
1. 眼睛的构造	212
2. 眼睛的基本特性	214
3. 眼睛的缺陷及其矫正	221
第十二章 照明光学系统	223
1. 照明光学系统的用途和型式	223
2. 远距离投射器的光学系统	224
3. 反射式照明系统	230
4. 透镜式聚光镜	233
第十三章 放大镜和显微镜	237
1. 放大镜和它的特性	237
2. 显微镜的光学系统及其基本特性	241

3. 显微镜的分辨率	244
4. 显微镜的景深	246
5. 显微镜的物镜和目镜	248
6. 显微镜的照明系统	253
第十四章 望远系统	256
1. 望远系统的型式和它的基本特性	256
2. 望远系统的分辨率、有效放大率	260
3. 望远系统的物镜和目镜概述	261
4. 望远系统目镜的调焦	266
5. 集光镜在望远镜中的应用	268
6. 刻普勒望远镜的计算	271
7. 伽利略望远镜的型式和它的计算	275
8. 棱镜式单筒望远镜的计算	277
9. 带有透镜转象系统的望远镜的计算	281
10. 变倍望远镜的基本知识	285
11. 体视望远系统	294
12. 带有电子光学变象管的望远镜和它的计算	298
第十五章 摄影物镜	302
1. 摄影物镜的基本特性	302
2. 摄影系统的分辨率和调制传递函数	307
3. 成象空间深度和清晰深度	313
4. 摄影曝光时间的确定	316
5. 摄影物镜的基本型式	319
第十六章 电视系统光学	336
1. 电视发射管(摄象管)和接收管(显象管)的光学特性	336
2. 电视发射机(摄象机)的物镜及其基本特性	344
3. 电视系统的分辨率和调制传递函数	347
4. 带有扫描射线的电视系统	350

第十七章 投影系统	355
1. 投影系统的型式和特点	355
2. 反射式投影系统	357
3. 透射式投影系统	359
4. 带有反射镜式照明系统的投影仪器的外形尺寸和光能计算	363
第十八章 光电光学系统	369
1. 辐射探测器的某些特性和参数	369
2. 根据积分特性确定光电光学系统入射光瞳的直径	372
3. 根据光谱特性确定光电光学系统入射光瞳的直径	374
4. 辐射探测器位于光源象平面上的光电光学系统	381
5. 光源象大于探测器感光表面的光电光学系统	388
6. 辐射探测器位于出射光瞳上的光电光学系统	389
7. 几种光电光学系统的原理图	392
第十九章 激光光学系统	396
1. 激光辐射的性质	396
2. 激光束的参数及其被光学系统变换时的基本关系式	397
3. 激光辐射的会聚光学系统	401
4. 减小激光束发散性的光学系统	403
5. 带有激光器的光电光学系统	406
6. 全息照相应用的光学系统	408
第二十章 双重对称光学系统	410
1. 变形影象的特性及其获得方法	410
2. 柱面和球面柱面变形物镜	413
3. 柱面远焦系统	418
第二十一章 光学系统的象差计算	422
1. 光学系统象差计算方法概述	422
2. 各种光学系统允许的残余象差值	427
3. 第一和第二辅助光线的参数之间的关系	430

4. 由薄透镜组成的光学系统的赛德和数的变换	436
5. 薄镜组的基本参数	442
6. 带有非球面的光学系统的象差	447
7. 球差极小的光学系统的计算	454
8. 双透镜胶合物镜的计算	460
9. 双透镜分离物镜的计算	464
10. 双组强光物镜的计算	467
11. 三片型物镜的计算	470
12. 反射镜系统的计算	475
13. 折反射系统的计算	479
14. 光学系统的电子计算机自动校正	485
15. 象差的综合	489
16. 关于光学系统的公差	493
17. 根据象差计算结果评价成像质量	501
18. 光学系统的波象差	503
附录1 反射棱镜	507
附录2 光学产品实例	514
参考文献	518

绪 论

用于形成一定光束的光学零件（透镜、棱镜、反射镜、平行平板、光楔等）的综合称为光学系统。光学中系统理论包括各种光学零件的理论以及它们综合的理论。

光学零件组成仪器的光学部件。仪器是保证实现观察、测量、检查、计算、记录、调整、控制、防护、联锁等作用的装置。基于利用某种光学现象或光的本性的仪器称为光学仪器。

在人类活动的各个领域里，应用各种不同的光学仪器：显微镜和望远镜、照相机和电影放映机、干涉仪和分光计、用于得到全息图的装置等等。此外，与激光器一起工作的光学系统，在焊接、淬火、小孔加工等工艺装备和医学中广泛应用，也用于形成等离子区以及定向和通讯等。

光学系统按照物体和它的象的位置，可以分为下列几种类型：

- (1) 显微镜（物体位于有限距离，而象则在无限远）；
- (2) 望远镜系统（物体和它的象都位于无限远）；
- (3) 摄影物镜（物体位于无限远，而象位于有限距离）；
- (4) 投影系统（物体和它的象都位于离光学系统有限距离处）。

必须指出，物点象的总和——物体的象充满被称为象空间的空间，而物体本身作为点的总和充满物空间。无论物空

间或象空间都充满整个空间。

也有这样的光学系统，它不形成与物体有某种程度相似的象，而是依赖于光线的重新分布，造成照度均匀的场，这也就是物体的积分影象。照明、光度和某种光电子仪器的光学系统都属于这样的光学系统。然而，在这种光学系统中也有物镜、显微镜等形式的部件。

各式各样的光学仪器以及其他光学装置，在获得良好成像质量的条件下，随着它们基本特性的改善，如几何孔径、线视场或角视场以及成象比例的提高，而得到越来越广泛的应用。

电子计算机在光学系统计算实践中的应用，对光学仪器工业的发展是非常重要的。

在A. Γ. 斯多列托夫(1839~1896年)发现光电效应产生条件的基础上，发展了光电子仪器工业。光电子装置在自动控制和计算技术中得到应用，可以用于宇宙飞船天文定向和宇宙航行，也可用于电视以及许多其他的技术领域。

苏联学者H. Γ. 巴索夫和A. M. 普洛霍洛夫及美国学者Q. 汤斯的基础研究，以及在此基础上激光器的研制成功，导致了配用激光器的光学系统的发展。

英国学者Д. 伽伯和苏联学者Ю. H. 琴尼索克的研究决定了全息光学系统研制的必要性。

也应该提到宽银幕电影，它促进了各种变形光学系统的发展。

人类进入宇宙，促使更完善的新型摄影物镜的出现。

变焦距物镜的成功应用，扩大了电影和电视的使用范围。

光学零件中非球面的应用，以及纤维光学装置和光栅光

学装置的应用，为光学系统开辟了更广阔的发展前景。

M. M. 鲁西诺夫^[24]在超广角物镜领域中和 П. С. 伏洛索夫 (1910~1980 年)^[8]在变焦距和强光物镜领域中的著作为新的物镜类型和结构的出现奠定了理论基础。这些成就使苏联在摄影光学方面成为世界先进国家之一。П. П. 马克苏托夫 (1896~1964 年)^[14]在月牙形折反射物镜领域中的著作，Г. Г. 斯留萨列夫^[36, 37]在发展光学系统象差计算方法方面的著作，B. H. 楚里洛夫斯基^[30, 31]在象差理论和折反射系统方面的著作，M. M. 鲁西诺夫^[23, 24]和 И. А. 杜留金 (1904~1966 年)的研究成果在全世界享有盛誉。

第一章 几何光学的基本原理和定律

1. 费马原理

光或光辐射是具有波的传播特性的、波长从 1nm 到 1mm （此界限是有条件的）的电磁辐射。

如果光波波阵面的线性尺寸远大于波长（通常如此），则光波在均匀介质中的传播方向可以认为是直线的。

图1表示从点辐射源 A 发出的光波在均匀介质中的传播。光波的球面波阵面按最短距离，即沿通过点 A 和 B 的直线到达 B 点。

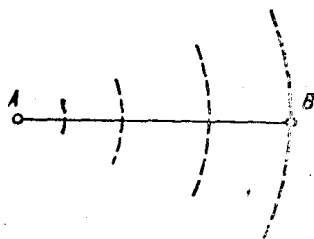


图1 从点辐射源 A 发出的光波在均匀介质中的传播

如果在光波的行程中遇到具有其他性质的介质，则根据该介质的性质和介质分界面的形状，波阵面发生变形。为了利用光线束（所谓光线，就是沿光波波阵面法线传播光能的直线）得到清晰的象点，必须使这一束光线重新形成球面波，则球面波的中心即为清晰的象点。在图2中，这一条件得到满足。在从 A 点发出的所有光线同时到达 A' 点时， A' 点将是 A 点的清晰的象。所有光线的行进时间应是相同的，并且一定是最小的，因为从 A 点发出的光线中有一条光线沿直线到达 A' 点。

因而，如果在光线的行程中遇到以界面 $1、2、3、\dots、p$ 分隔的不同的均匀介质 $1、2、3、\dots、p、p+1$ ，则对于形

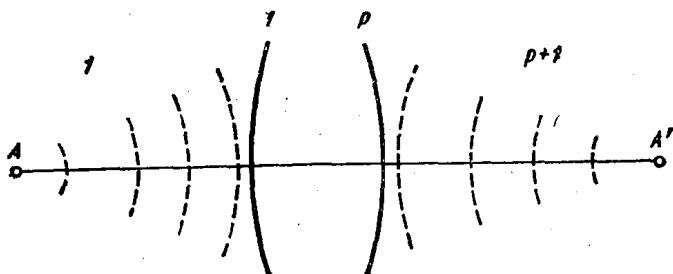


图2 得到清晰点象的条件

成点象为一点的每一条光线可以得到下列的表达式

$$T_{\min} = t_1 + t_2 + t_3 + \cdots + t_k + \cdots + t_{p+1} = \text{常数} \quad (1)$$

式中 $T_{\min}$ —— 从物点到象点光线行进的最少时间；

$t_k = d_k / v_k$ —— 某一光线在介质 k 中的行进时间；

d_k —— 介质 k 中的光线长度；

v_k —— 该介质中光的传播速度；

p —— 介质界面的数目。

根据式 (1) 可以得到：

$$\frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} + \cdots + \frac{d_k}{v_k} + \cdots + \frac{d_{p+1}}{v_{p+1}} = \text{常数}$$

或

$$\frac{1}{v_1} \left(d_1 \frac{v_1}{v_1} + d_2 \frac{v_1}{v_2} + \cdots + d_k \frac{v_1}{v_k} + \cdots + d_{p+1} \frac{v_1}{v_{p+1}} \right) = \text{常数}$$

单色光线 (具有一定波长的光线) 在一介质中的传播速度与该光线在另一介质中的传播速度之比称为折射率, 用 n 表示。则:

$$d_1 n_{11} + d_2 n_{12} + \cdots + d_k n_{1k} + \cdots + d_{p+1} n_{1p+1} = \text{常数}$$

或简化符号，表示为：

$$d_1 n_1 + d_2 n_2 + \cdots + d_k n_k + \cdots + d_{p+1} n_{p+1} = \text{常数}$$

或

$$\sum_{k=1}^{p+1} d_k n_k = \text{常数} \quad (2)$$

按式(2)求得和称为光线的光学长度。它是光线循序地通过不同介质的距离与相应介质折射率的乘积之和。

根据几何光学的观点，如果联结物点和它的象点的所有光线的光学长度相等，并且为最小，则物点成一点象。这个条件称为费马(1601~1665年)原理，是几何光学的基本定律。

2. 折 射 率

光在真空中的传播速度与波长无关，根据最新资料，它等于 $299792458.7 \pm 1.1 \text{ m/s}$ 。光在气体、液体和固体中的速度较在真空中为小，并且与波长和介质状态有关。

任何介质的折射率可以相对真空的折射率来确定，真空的折射率 $n=1$ 。某介质相对真空的折射率等于光在真空中的传播速度与一定波长的光在所讨论的介质中的传播速度之比。

空气的折射率在温度 15°C 和压力 101325 Pa 下等于 1.00029 ；而在绝大多数情况下，可以认为在规定的条件下，空气的折射率 $n=1$ ，并且与波长无关。

对于大多数光学介质，取波长 $\lambda=0.58929 \mu\text{m}$ ，相应于夫琅和费表的 D 线(黄橙的钠线)的折射率作为基本折射