杭州大学学术丛书

Principles of Matrix Optics

矩阵光学原理

王绍民　赵道木　著

杭州大学出版社

杭州大学学术丛书

Principles of Matrix Optics

矩阵光学原理

王绍民 赵道木 著

杭州大学出版社

（浙）新登字第 12 号

矩阵光学原理

王绍民等　著

*

杭州大学出版社出版发行

（杭州天目山路 34 号）

*

杭州大学出版社电脑排版中心排版

浙江上虞印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32　13.25 印张　333 千字

1994 年 12 月第 1 版　1994 年 12 月第 1 次印刷

印数：0001－1100

ISBN 7-81035-709-3/O·407

定价：12.00 元（平装）

16.00 元（精装）

前　　言

矩阵光学发展得如此之快，以至于每当您准备写书时，它又向前迅猛发展了。

这起源于 1966 年，为了分析高斯光束在光腔内外的变换，H. Kogelnik 和 T. Li 意味深长地引入了 *ABCD* 矩阵和 *ABCD* 定律[0-1]。九年后，A. Gerrard 和 J. M. Burch 概括了光学中的矩阵方法，成书[0-2]。

同时，笔者从实践中感到矩阵光学的潜力，作了系统的发展，尽量使它渗透到光学的各个领域。1981 年写成英文讲义《Matrix Optics》，于杭州大学等地执教。讲义颇受欢迎，广为流传，引起国内外的重视。1983 年赴德国讲学时和 H. Weber 教授合作，充实了该讲义，被 Physik-Verlag 预约修改成书。它的主要特色，当时应邀作为综述已在英国出版[0-3]。回国后，大家都在忙于矩阵光学的发展，邀请合作者甚多，又多次出国。1988 年，曾往返于意大利和德国，又和 S. Solimeno 教授及 H. Weber 教授重写过一遍，但自感不满意。此后，一直没有时间再全面改写。

幸运的是，我的朋友电子科技大学卢亚雄教授和四川大学吕百达教授接受了电子工业部之约，结合他们的经验并参考了我们的讲义，率先写成中文版的《矩阵光学》，并于 1989 年出版[0-4]，使国内读者终于有了一本较系统的书。

不久，我和我的合作者 L. Ronchi 教授建立的《列阵光学》[0-5]，得到社会的共识。我和我的年轻合作者林强副教授、陆璇辉副教授和西班牙的合作者又系统地建立了《拦光光学》[0-6]、《张量光学》[0-7]，并发现了第四类反射器[0-8]，以改善光学和激光系统。这使矩阵光学进入了更高的层次，有必要回过头来重新认识矩阵光学及意义。

杭州大学出版社蒋保纬先生最近告诉我：学校有出书的意向。为了使这本书不致在发展中流产，我请了更年轻的在读研究生赵道木同学为合作者，将用了十多年的几个版本的讲义、笔记和我的多篇有关论文译成中文，取其精华、易懂、有用的部分，结合近年来国内外其它重要成果，加以充实和完善，重新凝成现在的《矩阵光学原理》。

本书没有纳入另两本书[0-2,0-4]中有关偏振和薄膜光学的矩阵方法，因为它们是自成系统的不同方法。本书是用变换矩阵贯穿八章，分为两篇。基础篇适用于光学、激光、光电子和光子学专业的毕业班学生和研究生。进展篇适用于研究生和光学研究工作者。有的习题带有研究性。本书也可供相近专业的研究工作者参考。

在写前言时想到我在国内外的合作者：美国的 E. Wolf 教授和 H. Kogelnik 教授，加拿大的 P. A. Bélanger 教授，德国的 H. Weber 教授，意大利的 L. Ronchi 教授和 S. Solimeno 教授，日本的北野一郎教授和田中一夫教授，西班牙的 E. Bernabéu 教授和 J. Alda 教授等；中国的邓锡铭教授、梅遂生教授、范滇元教授、李富铭教授、陈英礼教授、周国生教授、魏光辉教授、吕百达教授、王效敬副教授、应成仁副教授、林强副教授和陆璇辉副教授等，以及我在国内外的历届学生。没有他们的讨论与合作，就没有今天的矩阵光学。

本书由魏光辉教授和陆祖康教授审定，他们所提的合理建议已纳入书中。笔者还要感谢十多年来国际理论物理中心(ICTP)、

水电部、国家科委、国家教委、国家自然科学基金委员会、浙江省科委、浙江省教委、浙江省自然科学基金委员会和《863》的关心和资助。矩阵光学是在完成这些实际任务中发展起来的。

最后,必须感谢杭州大学学术著作出版基金的资助,感谢杭州大学出版社,特别是蒋保纬先生,没有他的督促和帮助,这本书不可能完成。

这本书献给全国的光学工作者。希望通过它,找到更多的合作者,提出意见和研讨,共同推动我国光学事业和光学产业的发展,并在再版时使之更臻完善。

王绍民

1993 年 7 月于杭州

杭州大学学术丛书

总　序

杭州大学出版社成立之初，即以传播新知，发展学术，出版高水平、高质量、高层次的教材和专著为宗旨。经过一段时间的筹备，现在相继推出《杭州大学学术丛书》和《钱塘青年学者论丛》两套丛书，这是值得庆贺的事。

以 1897 年创建的求是书院和育英书院为滥觞，杭州大学迄今已有近百年的历史。作为江南的著名高等学府，它素有优良的治学传统。名家辈出，著述宏富，成就卓著，在学术界享有很高的声誉。特别是 80 年代以来，欣逢改革开放的盛世，校内专家学者蹈励奋发，辛勤笔耕，在学术研究领域多有创获，许多优秀成果为国内外人士所瞩目。两套丛书面世，就是对这些成果的集中展示。

《杭州大学学术丛书》收录不同学科的专家具有代表

作性质的学术成果，反映了学校人文科学、社会科学和自然科学研究的最高水准。它可以是体系严密的鸿篇巨制，也可以是同一主题的论文结集，但都应具有学科上的前沿性和创新性，并且立论严谨、材料充实，力戒空泛和浮华。

培育人才，繁荣学术，是高等学校承担的双重任务。面对世纪之交，我们期待着有更多的佳作付梓，为学术文化事业的发展作出自己应有的贡献。

参 考 文 献

[0-1] H. Kogelnik, T. Li, Laser beams and resonators, Appl. Opt., **5**,1550, 1966.

[0-2] A. Gerrard, J. M. Burch,《Introduction to Matrix Methods in Optics》, John Wiley & Sons, 1975.

[0-3] 王绍民,Review: Matrix methods in treating decentred optical systems, Opt. & Quantum Electron., **17**,1,1985.

[0-4] 卢亚雄,吕百达,《矩阵光学》,大连理工大学出版社,1989.

[0-5] 王绍民,L. Ronchi,《Principles and Design of Optical Arrays》, PROGRESS IN OPTICS, **25**,279, 1988.

[0-6] 王绍民,林强,E. Bernabéu, J. Alda,《拦光光学导论》,杭州大学出版社,1991.

[0-7] 林强,王绍民,《张量光学》,杭州大学出版社,1994.

[0-8] 王绍民,E. Bernabéu, J. Alda, Retroflective properties of a hemispherical surface, Appl. Opt., **32**,4279,1993.

目　录

第一篇　基　础

第二篇　进　展

●第一篇　基　础

第一章　几何光学

§1.1　电磁波和光粒子的傍轴光线近似

电动力学中的麦克斯韦微分方程组完整地描述了电磁场的运动. 电磁场是一个物理实在,是物质存在的一种形式,但它不是几率波,可由一个空间连续的场来表示. 光粒子概念的引入只是表明电磁场能量的不连续性. 一个光子是与一个电磁模相联系的. 我们讨论的是光的传播,就是指一个电磁模的运动[1-1].

麦克斯韦方程组为[1-2]

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho, \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0. \end{cases} \tag{1.1-1}$$

其中 $\vec{E}$ 为电场强度,$\vec{H}$ 为磁场强度,$\vec{D}$ 为电位移矢量,$\vec{B}$ 为磁感应强度,$\vec{J}$ 为电流密度,ρ 为自由电荷密度.

然而在很多光学问题中,介质中的自由电荷密度 $\rho = 0$ 及宏观

电流密度 $\vec{J}=0$. 在此条件下，光波满足的麦克斯韦方程组简化为

$$\begin{cases}\nabla\times\vec{E}=-\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t},\\ \nabla\times\vec{H}=\dfrac{\partial\vec{D}}{\partial t},\\ \nabla\cdot\vec{D}=0,\\ \nabla\cdot\vec{B}=0.\end{cases}\tag{1.1-2}$$

对于线性响应的单色场和介质，场矢量 $\vec{B}$ 与 $\vec{H}$、$\vec{D}$ 与 $\vec{E}$ 间满足物质关系式：

$$\vec{B}=\mu_0\vec{H},\vec{D}=n^2\varepsilon_0\vec{E}.\tag{1.1-3}$$

其中 ε_0 为真空的介电常数，n 为介质的折射率. 考虑到光学介质一般都是非磁介质，上式中直接使用了真空的磁导率 μ_0. 关于光的传播问题都可以通过上面的麦克斯韦方程组的求解而得以解决.

现在我们考虑各向同性非均匀介质，假定介质的折射率 n 为实数，并且为空间位置的缓变函数. 据方程(1.1-2)和(1.1-3)式，得光波波动方程为

$$\nabla^2\vec{E}+\nabla\left(\vec{E}\cdot\frac{\nabla n^2}{n^2}\right)-n^2\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}=0.\tag{1.1-4}$$

很显然平面波不再是方程(1.1-4)式的解. 然而，因 n 是缓变函数，可以用准平面波表示光场

$$\vec{E}=\vec{E}_0(\vec{r})\exp\{i[k_0L(\vec{r})-\omega t]\}.\tag{1.1-5}$$

其中 $k_0=\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}=2\pi/\lambda_0$（$\lambda_0$ 是真空中光波波长）是真空中的波数；$L(\vec{r})$ 是程函，是位置的实标函数. 把方程(1.1-5)式代入方程(1.1-4)式，经简单运算后得

$$\vec{E}_0[n^2-(\nabla L)^2]+\frac{i}{k_0}[\nabla^2L\cdot\vec{E}_0+2(\nabla L\cdot\nabla)\vec{E}_0$$

$$+\nabla L(\vec{E}_0\cdot\nabla\ln n)]+\frac{1}{k_0^2}[\nabla^2\vec{E}_0+2\nabla(\vec{E}_0\cdot\nabla\ln n)]=0. \tag{1.1-6}$$

考虑在几何光学下，$\lambda\to 0$ 或 $k_0\to\infty$，则方程(1.1-6)式为

$$(\nabla L)^2=n^2. \tag{1.1-7}$$

上式就是几何光学中的程函方程.它描述了光线传播路径上的几何相移的变化规律.显然

$$L(x,y,z)=\text{常数} \tag{1.1-8}$$

的空间曲面，就是光波传播的等相位面.等相位面的法线方向就是光波的传播方向.因此，光波传播方向上的单位矢量 $\vec{s}$ 可以写为

$$\vec{s}=\frac{\nabla L}{|\nabla L|}=\frac{\nabla L}{n}. \tag{1.1-9}$$

另一方面，光线通过非均匀介质可用矢量函数 $\vec{r}(s)$ 表示某点状态，s 为表示沿光线轨迹计算的长度.利用数学关系式 $\mathrm{d}\vec{r}=\vec{s}\mathrm{d}s$，则由(1.1-9)式可得

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left(n\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}s}\right)=\nabla n. \tag{1.1-10}$$

上式就是几何光学中光线传播所满足的光线方程.

实际上，光线方程(1.1-10)式和程函方程(1.1-7)式具有相同的物理意义，它们是几何光学中光线传播规律的不同描述.根据这些方程，可以证明在均匀介质中光线沿直线传播，可以计算光线在介质中的传播轨迹，可以得出光线在介质面上的反射和折射规律.总之，可以得到几何光学中光线的传播规律.

虽然方程(1.1-10)式是一个关于 $\vec{r}$ 的二阶微分方程，求解较为困难，但在实际中，光线往往沿着光学系统的光轴附近向前传播，光线的传播方向与光轴的夹角很小.在这个近似下，若用 z 表示光轴，那么

$$\mathrm{d}s\approx\mathrm{d}z. \tag{1.1-11}$$

则光线方程简化为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left(n\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}z}\right)=\nabla n. \tag{1.1-12}$$

这就是傍轴光线近似下的光线方程.

§1.2 光线变换矩阵的定义

现在考虑几何光学中如何用矩阵来表示光学系统对光线的变换. 所谓光线是指光波波阵面的法线,光线完全可由位置 $\vec{q}$ 和动量 $\vec{p}$ 来描述. 如果光线以 z 轴为参考轴,那么[1-3]

$$q_x = x\ ,\ q_y = y, \tag{1.2-1}$$

$$\begin{cases} p_x = n(x,y,z)x'/[1+(x')^2+(y')^2]^{1/2}, \\ p_y = n(x,y,z)y'/[1+(x')^2+(y')^2]^{1/2}. \end{cases} \tag{1.2-2}$$

其中

$$x' = \mathrm{d}x/\mathrm{d}z\ ,\ y' = \mathrm{d}y/\mathrm{d}z. \tag{1.2-3}$$

这里 x'、y' 表示光线的角度,折射率 $n(x,y,z)$ 是位置 x、y、z 的函数.

通常光学系统大多是轴对称的. 若选 z 轴为光学系统的公共对称轴,那么在任何包括 z 轴的平面内,光学系统对光线施加的作用是完全相同的. 因而我们只需研究傍轴条件下的二维系统即可,把表示光线特性的参数方便地记为

$$r = (x\ 或\ y)\ ,\ r' = (p_x/n\ 或\ p_y/n) = (x'\ 或\ y'). \tag{1.2-4}$$

若一条傍轴光线经过如图 1-1 的线性光学系统,对于出射参考面 RP_2、入射参考面 RP_1 上的光线参数间肯定有如下线性关系:

$$\begin{cases} r_2 = ar_1 + br_1', \\ r_2' = cr_1 + dr_1'. \end{cases} \tag{1.2-5}$$

其中 a、b、c 和 d 表示光学系统的线性系数.