光学仪器的调整与稳象

反射棱镜共轭理论

连铜淑 著

北京理工大学出版社

反射棱镜共轭理论

光学仪器的调整与稳象

连铜淑 著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了平面镜系和反射棱镜于静止和运动两种状态下的物、象空间共轭关系的一般理论。在此基础上，探讨了用平面镜、反射棱镜作光学调整和光学稳象的一般规律及原理。通过计算，对几种典型光学仪器的光学系统的调整、扫描、稳象等问题，以及某些棱镜在光学系统中的调整或稳象的特性，进行了系统而深入的分析论证。书中还介绍了必要的数理基础，并提供了一套具有实用价值的反射棱镜图表。

本书可作为高等院校光学仪器专业研究生和本科生的教材或参考书，对从事光学仪器设计、制造、研究、修理的科技人员均有参考价值。

反 射 棱 镜 共 轭 理 论

光学仪器的调整与稳象

连铜淑 著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市房山区印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 16.75印张 446千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN7-81013-118-4/O·27

印数1—2300册 定价：4.15元

前　言

反射棱镜共轭理论主要研究反射棱镜物、象空间的共轭关系以及存在于此种关系之中的规律性。与透镜不同，反射棱镜在许多情况下表现为一个运动的光学元件。正是由于它的这种运动的特性，光学系统才具有千变万化的型式和功能。因此，本理论自应包括反射棱镜处在运动状态下的物、象关系。

反射棱镜共轭理论与光学仪器的原理、设计和生产密切相关，它对解决光学仪器的成象、扫描、测量、瞄准、调整、稳象、误差分析、结构设计等一系列技术问题，以至设计新型平面镜、棱镜系统，都有着重要和普遍的指导意义。

反射棱镜共轭理论属几何光学的一个分支，同时由于它的重要而广泛的实用意义，因而是理论性和实践性都比较强的一门光学知识。

我国广大的光学工作者，经过数十年的辛勤劳动和共同努力，在反射棱镜共轭理论方面已经取得了一些可喜的成果。这些成果表现为一系列的定理、引理、概念、公式、参量，以及于此基础上提出和编制的反射棱镜的分类法、工程图表及国家标准。

我国的光学工作者，在反射棱镜共轭理论的研究方法方面还创建了“刚体运动学”的学派体系。“刚体运动”的原理和观点贯穿于本理论之始终，它对促进整个反射棱镜共轭理论的发展具有重要的指导作用，为本书增添了鲜明的中国特色。

本书内容分数理基础、反射棱镜共轭理论和反射棱镜共轭理论的应用等三篇。

数理基础篇回顾了刚体运动学的基本知识，给出了关于反射、转动及坐标转换的几个矢量公式和转换矩阵。这些都是学习和解决反射棱镜共轭理论问题所必需的。

反射棱镜共轭理论篇是本书的重点，包括反射棱镜的成象、有限转动、微量位移、调整、调整规律和稳象等六章。其中，前三章属于反射棱镜的基础理论，后三章属于反射棱镜的应用理论。各章内容，彼此密切联系，总合起来，组成了反射棱镜共轭理论的一个比较系统和完整的体系。它为学习最后一篇的内容奠定了一个坚实的基础。

反射棱镜共轭理论的应用篇是上一篇理论的实际运用。其中，针对几个典型的光学仪器的某些有代表性的问题，作了系统而深入的分析。在本篇中，对于一些具体的调整原理和稳象原理亦作了某些补充。

在附录中，针对54块常用的反射棱镜，编制了一套内容比较齐全的反射棱镜图表。图表中列入的棱镜，均给出了一个调整图、一个成象特性参量表、一个调整特性参量表以及象偏转和象点位移等六个调整计算公式。这套图表可直接供生产车间使用。

丁汉章教授对本书进行了主审，侯迁正编审审阅了其中的部分篇章，他们都对本书提出了许多宝贵的意见。反射棱镜图表中新增部分的计算以及书中插图的绘制由许惠英高工完成。彭利铭付教授对作者撰写此书的工作始终给予了多方面的支持和鼓励。在此，谨向以上几位同志以及过去和现在对本书的编写和出版作出贡献的所有的同志致以衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中的缺点在所难免，敬请读者批评指正。

作　者

1987年12月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　　录

第一篇　数理基础

第二篇　反射棱镜共轭理论

第三篇 反射棱镜共轭理论的应用

第一篇　数理基础

第一章　数理基础

§1-1　反射矢量公式

棱镜包括几个反射面，所以单一反射面或单平面镜的反射定律的矢量表达式是最基本的，简称为反射矢量公式。见图1-1-1，用单位矢量N代表平面镜的法线方向（朝外）；矢量A和A'分别代表入射光线和反射光线的方向，或换一种说法，A和A'代表一对共轭的物、象矢量。由图中的矢量三角形o12，不难求得

$$A'=A-2(A\cdot N)N \tag{1-1-1}$$

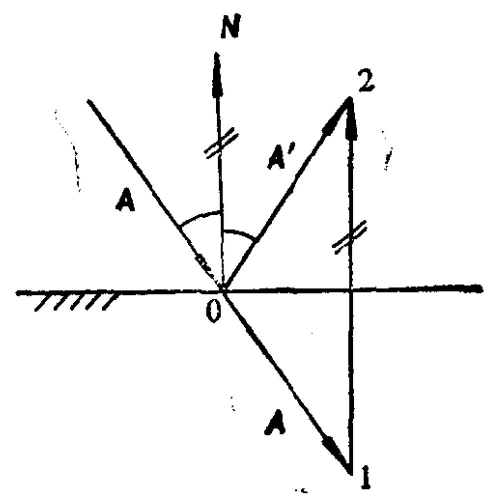

图 1-1-1

这就是所谓的反射矢量公式。

众所周知，当矢量表达式用作具体运算时，通常须设置一坐标系。设A、N、A'在坐标xyz上的分量为A_x、A_y、A_z、N_x、N_y、N_z、A'_x、A'_y、A'_z，将它们代入（1-1-1）式，得

$$\left.\begin{aligned}A'_x&=(1-2N_x^2)A_x-2N_xN_yA_y-2N_xN_zA_z\\A'_y&=-2N_xN_yA_x+(1-2N_y^2)A_y-2N_yN_zA_z\\A'_z&=-2N_xN_zA_x-2N_yN_zA_y+(1-2N_z^2)A_z\end{aligned}\right\}\tag{1-1-2}$$

由此可见，反射作用是一种线性变换，所以（1-1-2）式可写成矩阵的形式：

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

$$(A')_o = R(A)_o \tag{1-1-3}$$

式中，$(A)_o$和$(A')_o$分别代表矢量A和矢量A'所对应的列矩阵：

$$(A)_o=\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix},\quad (A')_o=\begin{pmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{pmatrix}$$

R代表单平面镜的反射作用矩阵：

$$R=\begin{pmatrix} (1-2N_x^2) & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & (1-2N_y^2) & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & (1-2N_z^2) \end{pmatrix} \tag{1-1-4}$$

有必要再强调一下，反射矢量公式（1-1-1）成立的前提是，把平面镜的法线矢量N认定为单位矢量。在此情形，入射光线矢量A的模允许等于任意值，只不过由（1-1-1）式所求得的反射光线矢量A'具有和A同一个模罢了。另外，由（1-1-1）式或（1-1-4）式可见，正反向的法线矢量N都将给出同样的结果，所以对平面镜的镜面来说，规定N朝里或朝外均无妨。

§1-2　转动矢量公式

在图1-2-1中，设矢量A绕转轴单位矢量P转动一大角度θ而成为矢量A'。现求A'的矢量表达式，而此表达式简称为转动矢量公式。在此情形，转轴矢量P属自由矢量，因此，为使推导过程简单起见，将P平移至通过矢量A的始点的位置，如图1-2-1所示。图中的虚线圆代表当矢量A绕P回转一圈时A的终点1的轨迹，圆心在o'。

为求得未知矢量A'，宜将它分解到一些已知的方向上。为此，作虚线圆在点1处的切线14，又经A'的终点2引至$o'1$的垂线23，自然$32 \parallel 14$。这里的已知方向，除A和P之外，还有$o'1$、14以及32等直线的方向。从图中的封闭多边形$oo'32o$，得

$$A' = \overrightarrow{oo'} + \overrightarrow{o'3} + \overrightarrow{32} \tag{1-2-1}$$

式中，右边的三个矢量分别等于

$\overrightarrow{oo'} = (A \cdot P)P$

$\overrightarrow{o'3} = [A - (A \cdot P)P]\cos\theta$

$\overrightarrow{32} = -(A \times P)\sin\theta$

将其代入（1-2-1）式，得

$$A' = A\cos\theta + (1-\cos\theta)(A \cdot P)P - \sin\theta(A \times P) \tag{1-2-2}$$

这就是所谓的转动矢量公式或称为任意角转动公式。在使用（1-2-2）式时，应注意到P必须是单位矢量。

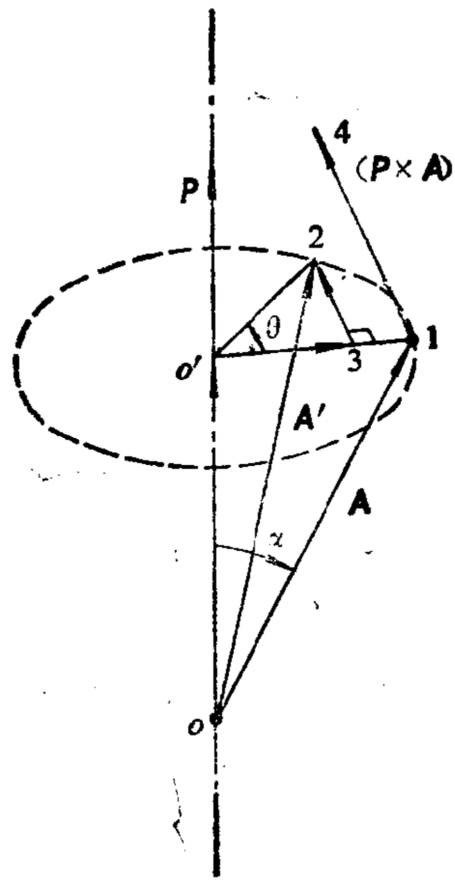

图 1-2-1

设（1-2-2）式中的A、P、A'在右手坐标xyz上的分量为A_x、A_y、A_z、P_x、P_y、P_z、A'_x、A'_y、A'_z，将它们代入(1-2-2）式，经展开运算后，得

$$\left.\begin{aligned}
A'_x = {} & (\cos\theta + 2P_x^2\sin^2\frac{\theta}{2})A_x + (-P_z\sin\theta \\
& + 2P_xP_y\sin^2\frac{\theta}{2})A_y + (P_y\sin\theta \\
& + 2P_xP_z\sin^2\frac{\theta}{2})A_z \\
A'_y = {} & (P_z\sin\theta + 2P_xP_y\sin^2\frac{\theta}{2})A_x + (\cos\theta \\
& + 2P_y^2\sin^2\frac{\theta}{2})A_y + (-P_x\sin\theta + 2P_yP_z\sin^2\frac{\theta}{2})A_z \\
A'_z = {} & (-P_y\sin\theta + 2P_xP_z\sin^2\frac{\theta}{2})A_x + (P_x\sin\theta \\
& + 2P_yP_z\sin^2\frac{\theta}{2})A_y + (\cos\theta + 2P_z^2\sin^2\frac{\theta}{2})A_z
\end{aligned}\right\}$$

$$(1\text{-}2\text{-}3)$$

由于方程组（1-2-3）呈现线性的关系，所以可写成矩阵的形式

$$(A')_o = S_{P,\theta}(A)_o \qquad (1\text{-}2\text{-}4)$$

式中 $(A)_o = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix}$，$(A')_o = \begin{pmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{pmatrix}$

$S_{P,\theta}$代表绕$\boldsymbol{P}$转θ角的转动矩阵

$$S_{P,\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta + 2P_x^2 \sin^2\frac{\theta}{2} & -P_z \sin\theta + 2P_xP_y \sin^2\frac{\theta}{2} & P_y \sin\theta + 2P_xP_z \sin^2\frac{\theta}{2} \\ P_z \sin\theta + 2P_xP_y \sin^2\frac{\theta}{2} & \cos\theta + 2P_y^2 \sin^2\frac{\theta}{2} & -P_x \sin\theta + 2P_yP_z \sin^2\frac{\theta}{2} \\ -P_y \sin\theta + 2P_xP_z \sin^2\frac{\theta}{2} & P_x \sin\theta + 2P_yP_z \sin^2\frac{\theta}{2} & \cos\theta + 2P_z^2 \sin^2\frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \qquad (1\text{-}2\text{-}5)$$

应当指出，式（1-2-5）中的$\boldsymbol{P}$必须是一个单位矢量。

在特殊情况下，$\boldsymbol{P}$与坐标xyz中的某一根坐标轴重合。此时，转动矩阵$S_{i,\theta}$、$S_{j,\theta}$和$S_{k,\theta}$分别等于

$$S_{i,\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \quad S_{j,\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix},$$

$$S_{k,\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (1\text{-}2\text{-}6)$$

这里，θ角的正负号应遵守右螺旋规则。

在微量转动的情况下，用$\Delta\theta$取代θ。此时，若略去二阶及高阶以上的微量，则可令$\cos\Delta\theta\approx 1$，$\sin\Delta\theta\approx\Delta\theta$，从而（1-2-2）式变成

$$A' = A - \Delta\theta(A\times P) \tag{1-2-7}$$

设$\Delta A = A' - A$，则

$$\Delta A = -\Delta\theta(A\times P) \tag{1-2-8}$$

§1-3 转动与坐标转换的关系

本节讨论如何把一个转动矩阵表达成为与转动有关的一对坐标系之间的坐标转换矩阵。为此，设坐标$x_1y_1z_1$和矢量A一起绕P转θ而成为坐标$x_2y_2z_2$和矢量A'。

首先，在坐标$x_1y_1z_1$中写出（1-2-4）式

$$(A')_1 = S_{P,\theta}(A)_1 \tag{1-3-1}$$

式中

$$(A)_1 = \begin{pmatrix} A_{x_1} \\ A_{y_1} \\ A_{z_1} \end{pmatrix},\quad (A')_1 = \begin{pmatrix} A'_{x_1} \\ A'_{y_1} \\ A'_{z_1} \end{pmatrix}$$

转动矩阵$S_{P,\theta}$由（1-2-5）式求得，只是那里的P_x、P_y、P_z用P_{x_1}、P_{y_1}、P_{z_1}取代。

考虑到，$x_1y_1z_1$和A在绕P转动的过程中一直保持着彼此的相对位置不变，并最终到达$x_2y_2z_2$和A'。所以，有$A_{x_1}=A'_{x_2}$，$A_{y_1}=A'_{y_2}$，$A_{z_1}=A'_{z_2}$，或

$$(A)_1 = (A')_2 \tag{1-3-2}$$

将（1-3-2）式代入（1-3-1）式，得

$$(A')_1 = S_{P,\theta}(A')_2 \tag{1-3-3}$$

设G_{21}代表由$x_2y_2z_2$向$x_1y_1z_1$的坐标转换矩阵，则

$$(A')_1 = G_{21}(A')_2 \tag{1-3-4}$$

对照（1-3-3）及（1-3-4）式，可得

$$S_{P,\theta}=G_{21} \qquad (1\text{-}3\text{-}5)$$

（1-3-5）式说明，在（1-3-3）式中原意为转动矩阵的$S_{P,\theta}$已经变成为坐标转换矩阵了。

面对（1-3-3）式，读者可能会产生这样一个问题："当用（1-2-5）式确定$S_{P,\theta}$时，是否亦可以用$\boldsymbol{P}$在$x_2y_2z_2$中的三个方向余弦值P_{x_2}、P_{y_2}、P_{z_2}代入？"回答是肯定的，因为$x_2y_2z_2$系由$x_1y_1z_1$绕$\boldsymbol{P}$转θ而成，所以必然存在$P_{x_2}=P_{x_1}$，$P_{y_2}=P_{y_1}$和$P_{z_2}=P_{z_1}$等关系。

由于上述的坐标$x_1y_1z_1$和$x_2y_2z_2$将分别同第三章的定坐标和动坐标相对应，所以（1-3-5）式可以表达成文字性的结论：

"绕$\boldsymbol{P}$转θ的转动矩阵$S_{P,\theta}$正好等于由动坐标向定坐标的坐标转换矩阵G_{mf}。"或换句话说，"绕$\boldsymbol{P}$反转θ的转动矩阵$S_{P,-\theta}$等于由定坐标向动坐标的坐标转换矩阵G_{fm}。"

这里，用小写英文字母m表示"动"，用f表示"定"。为便于记忆，把（1-3-5）式重新写成

$$S_{P,\theta}=G_{mf} \quad 或 \quad S_{P,-\theta}=G_{fm} \qquad (1\text{-}3\text{-}6)$$

实际上，上述结论包含着非常明确的物理意义。前一段加引号的话表示，当一个观察者站在定坐标中去观察动坐标上的物体的时候，观察者的感觉将是这些物体绕$\boldsymbol{P}$转θ的运动。而后一段加引号的话则表示，当一个观察者站在动坐标中去观察定坐标上的物体的时候，观察者的感觉将是这些物体绕$\boldsymbol{P}$反转θ的运动。

（1-3-6）式以及对它的物理意义的理解，是一个很重要的问题，这将使我们在进行坐标转换的运算中避免发生一些不应有的差错。公式（1-3-6）的运用具有双向性，有时由$S_{P,\theta}$求得G_{mf}，有时则反过来由G_{mf}求得$S_{P,\theta}$。

§1-4 刚体运动的一般规律

刚体运动学的原理在我国的棱镜调整理论中占有一个非常重要的位置，因此有必要对刚体运动的有关知识作一简单回顾。

一、刚体任意运动的等效

见图1-4-1，设$o1234567$代表刚体的原始方位。在经过某种复杂运动之后，该刚体到达$o'1'2'3'4'5'6'7'$的方位。为了找出与这种复杂运动等效的运动，在刚体上选择一参考点o，它在刚体的最终方位中占据o'点的位置。设S代表由o至o'的矢量：$S=$

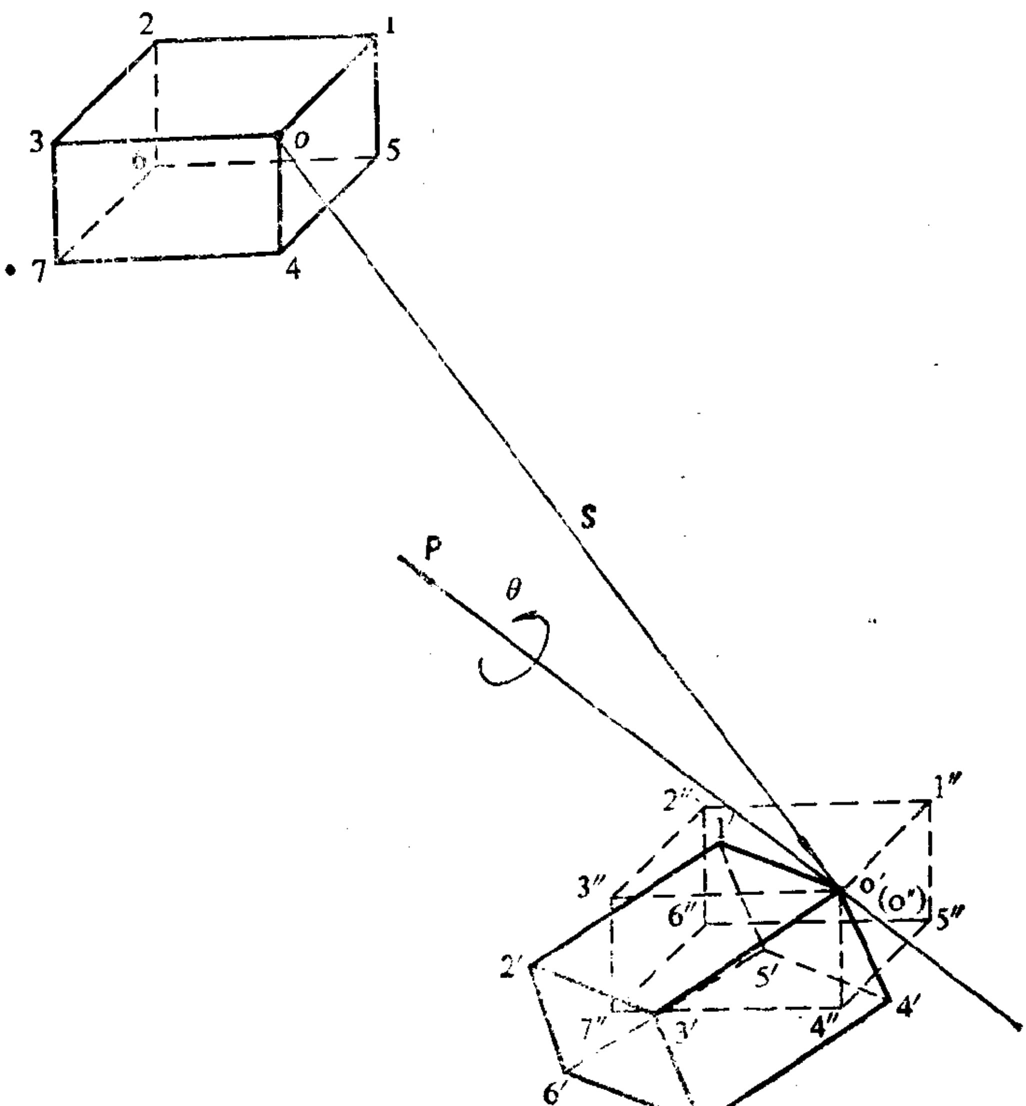

图 1-4-1

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com