

反射镜组像旋转器的成像特性理论分析

赵跃进 任志文

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要 以对像旋转器类棱镜的分析为基础, 提出了用反射镜组作像旋转器的方法, 并通过理论推导, 证明该反射镜组具有像旋转器的作用。该反射镜组的优点在于能够适用于不同的工作波段范围, 尤其适用于红外系统。

关键词 反射镜, 成像, 像旋转器。

1 引 言

在光学仪器中, 为了消除仪器作扫描和跟踪运动时而产生的附加像旋转, 使用各种方法来实现像的补偿运动。常用的方法有光学图像消旋和电子图像消旋。其中光学消旋的特点是没有时间滞后, 但要在光学系统中加入相应的像旋转器(如棱镜)和驱动单元, 使整个仪器机构增加; 而电子消旋的特点是需要一定的时间延迟, 优点是仪器的机构简单。根据两种方法的特点, 在现有的光学仪器中均有应用。在一般图像的实时观瞄光学仪器中以应用光学消旋的方法较多, 而电子图像消旋的方法较多应用于以对实时性要求不太高的仪器中。为了满足全天候观瞄光学仪器的需要, 红外观瞄仪器正在逐渐成为常规的观瞄仪器。对于红外系统, 使用长光程的棱镜像旋转器消旋是不合适的, 而使用电子消旋方法又有时间滞后的问题。本文通过分析棱镜像旋转器的消旋原理, 提出了一种用反射镜组作像旋转器的方法, 以满足红外观瞄系统的消旋需要。

2 反射镜组像旋转器

棱镜是比较常用的消旋元件, 例如道威棱镜、别汉棱镜和阿贝棱镜。它们的成像特性是: 当棱镜绕光轴转动 θ 角时, 像面将绕同一轴向同方向转动 2θ 角, 从而可以消除像旋。同时它不产生附加的其它的像的运动。这也是它们常被用在可见光系统中起消旋作用原因之一。但是棱镜光程长, 光能传输过程中损失较大。为了减少光能损失, 在红外系统中, 使用反射镜系统来进行消旋, 是比较理想的方案。作者分析了一些像旋转器类棱镜, 发现阿贝棱镜等在去掉折射部分以后, 其反射部分可以在同轴系统中起到像旋转器的作用。这是因为根据棱镜的展开原理, 棱镜的成像特性由折射和反射部分组成。其中折射部分影响系统轴向成像位置而反射部分对系统的成像方向起作用。阿贝棱镜能作为像旋转器, 其有效作用部分是它的反

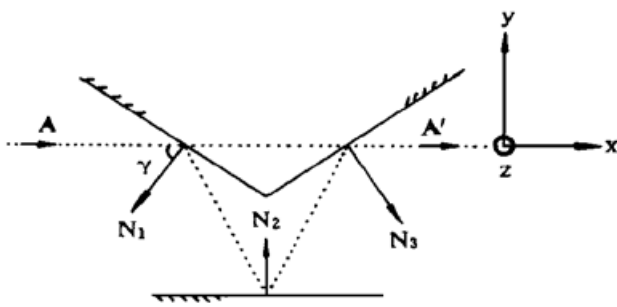


Fig. 1

射部分。所以，用阿贝棱镜的反射部分所组成的反射镜组可以起到像旋转器的作用。该反射镜组如图 1 所示。为了定量地分析该反射镜组的成像特性，以下用反射棱镜共轭理论来分析该反射镜组的成像特性。

反射定理的矢量公式为

$$A' = A - 2(A \cdot N)N \quad (1)$$

式中 A' 和 A 为像、物矢量， N 为反射面的法矢量。

(1) 式也可以写成下列在直角坐标系 xyz 中表示的形式。

$$(A') = R(A) \quad (2)$$

其中 R 为反射矩阵，具体表达式为

$$R = \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_yN_x & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_zN_x & -2N_zN_y & 1 - 2N_z^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

像 (A') 和物 (A) 可分别写为

$$(A') = \begin{pmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{pmatrix}, \quad (A) = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

先计算反射镜组的各反射面的反射矩阵，由图 1 中的坐标系，可知 N_1 、 N_2 、 N_3 为

$$N_1 = \begin{pmatrix} -\cos r \\ -\sin r \\ 0 \end{pmatrix}, \quad N_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad N_3 = \begin{pmatrix} \cos r \\ -\sin r \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

将(5)式分别代入(3)式，得

$$R_1 = \begin{pmatrix} -\cos 2r & -\sin 2r & 0 \\ -\sin 2r & \cos 2r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} -\cos 2r & \sin 2r & 0 \\ \sin 2r & \cos 2r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

反射镜组的反射矩阵 R 为

$$R = R_3R_2R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

由(9)式可以看出影响像的方向的反射作用矩阵 R 同一般的像旋转器类棱镜的作用矩阵是完全相同的。该反射镜组能否起到像旋转器的作用, 可以通过下面的推导来定量分析。

假设图 1 中的物不动, 而反射镜组作为一个整体绕光轴转动角度 θ , 相应地反射镜组中的各反射面的法矢量有了变化。各法矢量在转动 θ 后为:

$$N'_1 = S_{x, \theta} N_1, \quad N'_2 = S_{x, \theta} N_2, \quad N'_3 = S_{x, \theta} N_3 \quad (10)$$

由转动定理, 可知

$$S_{x, \theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式, 可求得 N'_1 、 N'_2 和 N'_3 , 再将 N'_1 、 N'_2 和 N'_3 分别代入(3)式, 得

$$R'_1 = \begin{bmatrix} -\cos 2r & -\sin 2r \cos \theta & -\sin 2r \sin \theta \\ -\sin 2r \cos \theta & -\cos 2\theta + 2\cos^2 \theta \cos^2 r & -\sin^2 r \sin 2\theta \\ -\sin 2r \sin \theta & -\sin^2 r \sin 2\theta & \cos 2\theta + 2\sin^2 \theta \cos^2 r \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R'_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R'_3 = \begin{bmatrix} -\cos 2r & \sin 2r \cos \theta & \sin 2r \sin \theta \\ \sin 2r \cos \theta & 1 - 2\sin^2 r \cos^2 \theta & -\sin^2 r \sin 2\theta \\ \sin 2r \sin \theta & -\sin^2 r \sin 2\theta & 1 - 2\sin^2 r \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

反射镜组的作用矩阵为

$$R' = R'_3 R'_2 R'_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

对于任一垂直于光轴的入射物矢量 $\mathbf{A} = (0, A_y, A_z)$ 当反射镜组不转动时, 其像矢量

$$\mathbf{A}' = \mathbf{R}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ -A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

当反射镜组绕光轴 (x 轴) 转动 θ 角后, 其共轭的像矢量为

$$\mathbf{A}'_1 = \mathbf{R}'\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ -A_y \cos 2\theta - A_z \sin 2\theta \\ -A_y \sin 2\theta + A_z \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

\mathbf{A}' 与 \mathbf{A}'_1 之间的夹角 α 为

$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{A}'_1 \cdot \mathbf{A}'}{|\mathbf{A}'_1| |\mathbf{A}'|} = \cos 2\theta \quad (18)$$

$$\alpha = 2\theta$$

由此说明,当物不动,反射镜组绕光轴转动 θ 角后,像将绕同一轴向转动 2θ 角。同一般的光学像旋转器具有同等的效果。同时该反射镜组可以使用于平行光路和会聚光路。

结 论 通过对棱镜成像特性中影响成像方向的是反射部分的分析,提出了一个新的像旋转器反射镜组。由于该像旋转器是由反射镜组成的,不受工作波段的限制,可以使用于各种光波段的光学系统中,光能损失较小。同时,还可以根据实际光学系统的需要,将该反射镜组放于平行光路或会聚光路中。该像旋转器反射镜组为全天候光学系统的消旋提供了一个新的方法。尤其对于红外系统,是一个较好的消除像旋的方法。

参 考 文 献

- [1] 连铜淑, 反射棱镜共轭理论. 北京, 北京理工大学出版社, 1988
- [2] 冯俊卿, 图像消转仪. 第三届全国高速摄影与光子学学术会议论文选集. 北京, 科学出版社, 1987: 127~ 134
- [3] Zhao Yuejin, Line-of-sight stabilization mirror assembly. *Proc. SPIE*, 1992, **1697**: 499~ 503
- [4] Zhao Yuejin, Discal image rotator. *Proc. SPIE*, 1994, **2238**: 184~ 188

Analysis on Imaging Characteristics of Image Rotator Mirror Assembly

Zhao Yuejin Ren Zhiwen

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 22 July 1996; revised 6 December 1996)

Abstract On the basis of analyzing the characteristics of image formation of image rotator prisms, a method of using a mirror assembly for image rotator is suggested. It is theoretically proved that this mirror assembly can be applied in kinds of optical systems with different wavelength range, especially suitable for working in infrared system.

Key words mirror, image formation, image rotator.