

文章编号: 0253-2239(2004)03-413-5

# 基于稳像理论的空间光学遥感像移补偿的分析与计算

周庆才 王志坚 王春艳

(长春理工大学光电工程系, 长春 130022)

**摘要:** 动态光学是研究光学系统及元件动态成像特性的一门学科。稳像系统是动态光学系统的重要组成部分。稳像系统是为了维持图像的稳定、清晰,要求光学组元件按规定的要求做相对运动,从而实现图像的最终稳定、清晰。空间遥感成像的分析对于遥感器的运用至关重要。基于稳像理论——动态光学理论,进行了空间遥感器的成像面像移分析,分析结果与采用齐次坐标变换方法所得结论一致,不但证明通过齐次坐标变换方法得出的结果是正确的,而且说明采用动态光学的稳像理论解决以上问题物理概念更清楚,计算简便。同时对于类似的运动光学系统,稳像理论也具有很好的适用性。

**关键词:** 动态光学; 空间光学; 遥感; 稳像

中图分类号: O439 文献标识码: A

## The Application of the Theory About Image Stabilization in Calculating Image Motion on Space Remote Sensor

Zhou Qingcai Wang Zhijian Wang Chunyan

(Photoelectronics Department, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

(Received 10 December 2002; revised 2 June 2003)

**Abstract:** Dynamic optics is a subject, which studies dynamic imaging characteristics of optical system and optical components in dynamic status. Image stabilizing system is an important part of dynamic optical system. The aim of movement between optical components of optical system is to reach some goal, for example, goal of circumrotation of scanners of the scanning and tracking system is to capture and track target. In an imaging stabilizing system, when the optical instrument installed on some carrier, the motion of carrier causes the image motion, so causes the image blur, in order to keep the stabilization and clarity of picture, the optical components must have some relative motion. To apply a spacial remote sensor, the remote imaging analysis is the key problem. Based on image stabilizing theory —— dynamic optical theory, the analysis of image motion of spacial remote sensor is given. The result shows the concise concept and simple expression of this method, which is consistent with uniform coordinate transform method. Similarly, for the similar moving optical systems, the theory of image-stabilization is also applicable.

**Key words:** dynamic optics; space optics; remote sensor; image stabilization

## 1 引 言

空间遥感应用中运动成像可以采用多种方法来分析。比如坐标变换方法、矢量分解法(正交投影法)等等。用矢量分解法分析比较简单,但忽略了多变量的耦合作用,结果不精确;采用坐标变换方法可

以获得精确结果,不过是从坐标关系获得的;本文采用稳像理论——动态光学<sup>[1~5]</sup>——来分析空间遥感成像的像运动问题,这是通过矢量关系直接获得的。动态光学是研究光学系统及元件动态成像特性的一门学科,动态光学系统是指光学系统元件运动或相互间运动的系统:扫描系统、扫描跟踪系统、光学模拟系统、稳像系统、变焦系统等。这些光学系统中光学组元的运动往往是为了实现某种目的,如扫描跟

E-mail: zh-qc@263.net

收稿日期:2002-12-10;收到修改稿日期:2003-06-02

踪系统扫描头的旋转是为了捕获、跟踪目标,稳像系统是因为传感器装在载体上,载体的运动必然导致像的运动,从而导致像模糊。为了维持图像的稳定、清晰,要求成像元件有相对运动。客观现实对传感器的动态成像特性提出了新的要求,静态成像理论已满足不了现实的需求。

稳像光学系统是像相对某参照标记稳定的光学系统,又分为绝对稳像光学系统和相对稳像光学系统,即像相对基准坐标系(如大地坐标系)和相对接收器件稳定的光学系统。空间传感器像移补偿系统属于相对稳像光学系统,即像相对相机底片(接收器件)稳定。为了获得高精度的像移速度矢量,本文介绍一种基于动态光学理论的计算方法,用动态光学理论来计算和分析空间传感器的像移补偿。

## 2 基本概念

### 2.1 坐标系(如图 1 所示)

1) 地惯坐标系  $Ox_i y_i z_i$ : 设某一时刻  $t_0$ , 轨道降交点为  $k$ , 地球中心为  $O$ , 以  $Ok$  为  $z_i$  轴, 地球转轴为  $y_i$ , 建立直角坐标系  $Ox_i y_i z_i$ 。以此坐标系为地球自转的起始点。

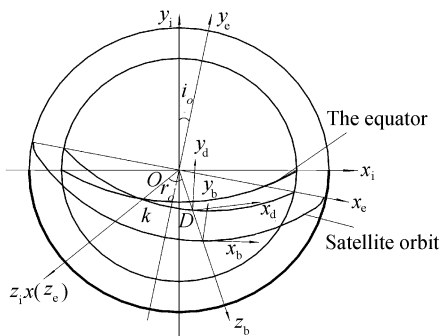


Fig. 1 Illustration of coordinate

2) 轨道坐标系  $Ox_e y_e z_e$ : 以  $OK$  为  $z_e$  轴, 卫星转轴为  $y_e$  轴, 建立直角坐标系  $Ox_e y_e z_e$ , 以此作为卫星绕地球转动的原始坐标。

3) 地物坐标系  $Dx_d y_d z_d$ : 随地球自转的坐标系, 原点取在星下点  $D$ ,  $OD$  为  $z_d$  轴,  $y_d$  轴与  $y_i$  轴平行, 建立直角坐标系  $Dx_d y_d z_d$ 。

4) 卫星坐标系  $Bx_b y_b z_b$  或  $D'x_b y_b z_b$ : 绕卫星转轴  $y_e$  转动的坐标系。  $B$  为卫星相机镜头的等效节点,  $D'$  为底片上星下点  $D$  的像。  $OB$  (或  $O'D'$ ) 为  $z_b$  轴,  $y_b$  轴与  $y_e$  轴平行, 建立直角坐标系  $Bx_b y_b z_b$  或  $D'x_b y_b z_b$ 。

### 2.2 空间遥感器的作用矩阵

1) 物、像坐标基底转换矩阵  $R_0$  (反映静态下物像方向共轭关系)

$$\begin{cases} (i', j', k') = (i, j, k)R_0, \\ R_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (1)$$

2) 倍率矩阵  $B$  (反映静态下物像的伸缩变换)

$$B = \begin{bmatrix} |\beta| & 0 & 0 \\ 0 & |\beta| & 0 \\ 0 & 0 & |\beta| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f'}{H-h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f'}{H-h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f'}{H-h} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $H$  表示卫星至海拔零位线的高度,  $h$  表示星下点  $D$  的海拔高度,  $f'$  表示镜头的像方焦距,  $\beta$  表示镜头的横向放大率。

3) 作用矩阵  $R$  (反映静态下物像方向共轭和伸缩变换的矩阵)

$$R = BR_0 = \begin{bmatrix} -\frac{f'}{H-h} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f'}{H-h} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f'}{H-h} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

## 3 空间传感器像移补偿公式

空间传感器的像移补偿公式主要用来计算相机在运动状态下胶片相对相机底片框的运动量, 以便控制胶片的运动。以卫星坐标系  $Bx_b y_b z_b$  为基础建立物像坐标系, 以等效节点  $B$  为原点。物坐标为  $Bxyz$  (即  $Bx_b y_b z_b$ ), 像坐标为  $Bx'y'z'$  (即  $Bx_b y_b z_b$ , 图 2)。

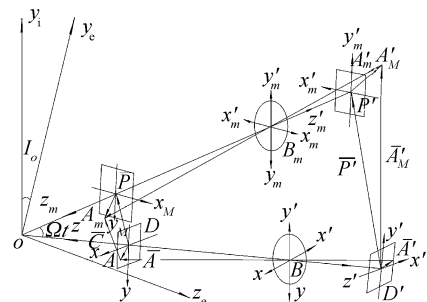


Fig. 2 Illustration of conjugate vectors

### 3.1 动态物像矢量共轭关系

以  $B$  为物像坐标原点。当卫星在  $t_0$  时刻转到某位置时,地球表面上一点  $A$  成像于卫星相机底片的  $A'$  点。分别用物矢量  $\mathbf{A}$  和像矢量  $\mathbf{A}'$  表示。经过  $t$  时间后,卫星绕  $y_e$  轴转  $\Omega t$  角,此时等效节点变为  $B_m$ 。在运动后的物像坐标分别为  $B_m x_m y_m z_m$  和  $B_m x'_m y'_m z'_m$ 。底片框中心由  $D'$  转动到  $P'$ ,与之共轭的地面点为  $P$  点, $P$  点相当于星下点  $D$  绕  $y_e$  轴转动  $\Omega t$  角。 $D$  点位移用矢量  $\mathbf{P}$  表示, $\mathbf{P} = \mathbf{D}\mathbf{P}$ ;  $D'$  点位移用矢量  $\mathbf{P}'$  表示, $\mathbf{P}' = \mathbf{D}'\mathbf{P}'$ 。

由于地球自转, $t$  时刻后,地球表面上的  $A$  点转到  $A_M$ ,其位移用矢量  $\mathbf{C}$  表示, $\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{A}_M$ ,与  $A_M$  共轭的像点为  $A'_M$ ,其在静像面坐标  $D'x'y'z'$  内用  $A'_M$  表示,在动像面坐标  $P'X'Y'Z'$  内用  $A'_m$  表示。

1) 物点  $A_M$  在动物面坐标  $Px_my_mz_m$  内标定,像点  $A'_M$  在动像面坐标  $P'x'_my'_mz'_m$  内标定:

$$\mathbf{A}'_{mP'} = \mathbf{B}\mathbf{A}_{MP}, \quad (4)$$

由矢量四边形  $DPA_M A$  知

$$\mathbf{A}_{MP} = \mathbf{A}_P + \mathbf{C}_P - \mathbf{P}_P, \quad (5)$$

由矢量三角形  $D'P'A'_M$  知

$$\mathbf{A}'_{mP'} = \mathbf{A}'_{MP'} - \mathbf{P}'_{P'}, \quad (6)$$

2) 物矢量  $\mathbf{A}_M$  在静物面坐标  $Dxyz$  内标定,像矢量  $\mathbf{A}'_M$  在静物面坐标  $D'x'y'z'$  内标定:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{MD} = \mathbf{T}^{-1}(y_{eD}, \Omega t)\mathbf{A}_{MP}, \\ \mathbf{A}_{mD'} = \mathbf{T}^{-1}(y_{eD'}, \Omega t)\mathbf{A}_{mP'}, \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\mathbf{T}^{-1}(y_{eD}, \Omega t)$  是绕  $y_e$  轴旋转  $\Omega t$  角的旋转矩阵的逆矩阵, $y_e$  轴在  $Dxyz$  坐标内标定; $\mathbf{T}^{-1}(y_{eD'}, \Omega t)$  是绕  $y_e$  轴旋转  $\Omega t$  角的旋转矩阵的逆矩阵, $y_e$  轴在  $D'x'y'z'$  坐标内标定。

将(7)式代入(4)式,得

$$\mathbf{A}_{MP'} = \mathbf{T}(y_{eD'}, \Omega t)\mathbf{B}\mathbf{T}^{-1}(y_{eD}, \Omega t)\mathbf{A}_{MP}, \quad (8)$$

将(5)式、(6)式代入(8)式,得

$$\mathbf{A}'_{mD'} - \mathbf{P}'_{D'} = \mathbf{T}(y_{eD'}, \Omega t)\mathbf{B}\mathbf{T}^{-1}(y_{eD}, \Omega t)(\mathbf{A}_D + \mathbf{C}_D - \mathbf{P}_D), \quad (9)$$

3) 物像矢量均在静像面坐标  $D'x'y'z'$  内标定。

由动态光学知

$$\mathbf{T}^{-1}(y_{eD}, \Omega t) = \mathbf{R}_0\mathbf{T}^{-1}(y_{eD'}, \Omega t)\mathbf{R}_0^{-1}, \quad (10)$$

且

$$(\mathbf{A}_D + \mathbf{C}_D - \mathbf{P}_D) = \mathbf{R}_0(\mathbf{A}_{D'} + \mathbf{C}_{D'} - \mathbf{P}_{D'}), \quad (11)$$

将(10)式、(11)式代入(9)式,并去掉下角标“ $D'$ ”,规定物像矢量及转轴均在  $D'x'y'z'$  内标定,得

$$\mathbf{A}'_M - \mathbf{P}' = \mathbf{T}(y_e, \Omega t)\mathbf{R}\mathbf{T}^{-1}(y_e, \Omega t)(\mathbf{A} + \mathbf{C} - \mathbf{P}), \quad (12)$$

$$\text{即} \quad \mathbf{A}'_M = \mathbf{P}' - \mathbf{R}\mathbf{P} + \mathbf{R}(\mathbf{A} + \mathbf{C}), \quad (13)$$

(13) 式为空间遥感器在正确状态下的物像共轭关系式,其中  $\mathbf{P}' - \mathbf{R}\mathbf{P}$  为称为原点项,反映位置共轭关系; $\mathbf{R}(\mathbf{A} + \mathbf{C})$  为称为旋变项,反映方向共轭关系。

卫星有三种姿态,即偏航、俯仰和横滚。此三种运动用矩阵  $\mathbf{S}$  代表新坐标相对原坐标的变化,则

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(\theta, \varphi, \psi). \quad (14)$$

相机的此三种姿态运动可视为等效节点  $B$  的平移和绕  $B$  的旋转,由动态光学知像面上产生的像点位移对于空间遥感器而言等于等效节点的位移  $B$ 。将此项加到(14)式中

$$\mathbf{A}'_M = \mathbf{P}' - \mathbf{R}\mathbf{P} + \mathbf{R}(\mathbf{A} + \mathbf{C}) + \mathbf{B}. \quad (15)$$

### 3.2 底片框的运动

1) 正确姿态下底片框的运动

$$\mathbf{A}'_D = \mathbf{P}' + \mathbf{T}(y_e, \Omega t)\mathbf{A}' = \mathbf{P}' + \mathbf{T}(y_e, \Omega t)\mathbf{T}\mathbf{A}, \quad (16)$$

2) 有了姿态角后底片框的运动

$$\mathbf{A}'_D = \mathbf{P}' + \mathbf{B} + \mathbf{D} + \mathbf{T}(y_e, \Omega t)\mathbf{R}\mathbf{A}, \quad (17)$$

式中  $\mathbf{D}$  为由姿态角引起的像面坐标运动:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{x'} \\ D_{y'} \\ D_{z'} \end{bmatrix} = (\mathbf{S} - \mathbf{E}) \begin{bmatrix} \beta A_{x'} \\ \beta A_{y'} \\ f' \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$\mathbf{E}$  为单位矩阵。

### 3.3 相对底片框的位移

$$\Delta\mathbf{A}' = \mathbf{A}'_M - \mathbf{A}'_D = \mathbf{R}[\mathbf{E} - \mathbf{T}(y_e, \omega t)]\mathbf{A} + \mathbf{R}\mathbf{C} - \mathbf{R}\mathbf{P} - \mathbf{D}, \quad (19)$$

式中

$$\mathbf{A} = (i', j', k') \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ h - H \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{T}(y_i, \omega t) - \mathbf{E}] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ r + h \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P} = [\mathbf{T}(y_e, \Omega t) - \mathbf{E}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r + h \end{bmatrix},$$

$r$  为地球半径。

(19) 式是各矢量在正确姿态时像面坐标  $D'x'y'z'$  内标定,将其在有了姿态角的像面坐标内标定,则

$$\Delta\mathbf{A}'' = \mathbf{S}^{-1}\Delta\mathbf{A}', \quad (20)$$

计算可得

$$\Delta A'' = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{R} \left\{ \left[ \mathbf{T}(y_i, \omega t) - \mathbf{T}(y_e, \Omega t) \right] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ r+h \end{bmatrix} + [\mathbf{E} - \mathbf{S}] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ -(H-h) \end{bmatrix} \right\} \quad (21)$$

### 3.4 像移公式的物理意义

上式中  $\mathbf{S}^{-1} \mathbf{R} [\mathbf{T}(y_i, \omega t) - \mathbf{T}(y_e, \Omega t)] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ r+h \end{bmatrix}$  表示

卫星相机和地球转轴在转速不同时造成的像点相对

于底片框的运动;  $\mathbf{S}^{-1} \mathbf{R} [\mathbf{E} - \mathbf{S}] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ -(H-h) \end{bmatrix}$  表示由于

相机姿态角造成的像点相对于底片框的运动。

(21) 式为像移补偿的通用公式, 对于地球同步卫星相机和航空相机, 公式可以简化。

#### 1) 地球同步卫星相机

因  $y_i = y_e, \bar{\omega} = \Omega$ , 故  $\mathbf{T}(y_i, \omega t) = \mathbf{T}(y_e, \Omega t)$ , 则 (21) 式变为

$$\Delta A'' = [\mathbf{S}^{-1} - \mathbf{E}] \mathbf{R} \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ -(H-h) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

#### 2) 航空相机

由于飞机没有脱离地球引力场, 相机除随地球自转外, 尚相对地面以速度  $V$  飞行。取飞机飞行方向为  $x'_i$  轴, 无姿态角时光轴为  $z'_i$  轴, 则 (21) 式变为

$$\Delta A'' = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{R} \left\{ \begin{bmatrix} \cos \Omega t & 0 & \sin \Omega t \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Omega t & 0 & \cos \Omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ r+h \end{bmatrix} + [\mathbf{E} - \mathbf{S}] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ -(H-h) \end{bmatrix} \right\}, \quad (23)$$

式中  $\Omega = V/(r+h)$ 。

## 4 应用实例讨论

### 4.1 中低轨道卫星相机计算实例

一般俯仰角  $\theta_0$  不大 ( $-0.5^\circ < \theta_0 < 0.5^\circ$ ), 横滚角  $\varphi_0$  也不大 ( $-0.5^\circ < \varphi_0 < 0.5^\circ$ ), 故取  $\theta_0 = \varphi_0 = 0^\circ$ , 取

偏航角  $\psi_0 = 20^\circ$ ; 同时取  $i_0 = 15^\circ; H = 300 \text{ km}; r = 6370 \text{ km}; h = 0.8 \text{ km}; f = -2 \text{ m}; A_{x'} = -13 \text{ km}; A_{y'} = -10 \text{ km}$ 。这时来求卫星飞越地交点  $K$  时, 像点相对底片框的运动速度为  $V''_{x'}, V''_{y'}$  和  $V''_{z'}$ 。

取  $t_0 = 0$ , (21) 式对时间微分, 得

$$\begin{bmatrix} V''_{x'} \\ V''_{y'} \\ V''_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(\bar{\omega} \cos i_0 - \Omega) \sin \psi_0 + (\cos \psi_0 - 1)] A'_{x'} + \bar{\omega} \cos \psi_0 \sin i_0 A'_{y'} - f \left[ \frac{r+h}{h-H} \cos \psi_0 (\bar{\omega} \cos i_0 - \Omega) - \sin \psi_0 \right] \\ - \bar{\omega} \sin i_0 A'_{y'} \\ [\sin \psi_0 - (\bar{\omega} \cos i_0 - \Omega)] A'_{x'} + \bar{\omega} \sin \psi_0 \sin i_0 A'_{y'} - f \left[ \frac{r+h}{h-H} \sin \psi_0 (\bar{\omega} \cos i_0 - \Omega) + (\cos \psi_0 - 1) \right] \end{bmatrix}, \quad (24)$$

式中  $A'_{x'} = \frac{f}{h-H} A_{x'} = 87 \text{ mm}, A'_{y'} = \frac{f}{h-H} A_{y'} = 67 \text{ mm}$ 。由有关数据可以看出, (24) 式中各项之间在数值上差距很大, 可以近似为

$$\begin{bmatrix} V''_{x'} \\ V''_{y'} \\ V''_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \left[ \frac{r+h}{h-H} \cos \psi_0 (\bar{\omega} \cos i_0 - \Omega) \right] \\ 0 \\ f \left[ \frac{r+h}{h-H} \sin \psi_0 (\bar{\omega} \cos i_0 - \Omega) \right] \end{bmatrix}, \quad (25)$$

可知地球自转角速度  $\bar{\omega} = 1.09 \times 10^{-4} \text{ (rad/s)}$ 。设卫星 90 min 转一圈, 则  $\Omega = 1.16 \times 10^{-3} \text{ (rad/s)}$ 。将数

据代入 (25) 式, 得

$$\begin{bmatrix} V''_{x'} \\ V''_{y'} \\ V''_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50.21 \\ 0 \\ 17.17 \end{bmatrix} \text{ (mm/s)}$$

式中  $V''_{x'}$  为像点在像面上  $x'_f$  方向的像移速度;  $V''_{z'}$  为离焦速度, 一般相机的离焦量小于 1 倍焦距, 故此项可不考虑。所以胶片相对底片框的补偿速度为  $-V''_{x'}$ 。

### 4.2 地球同步卫星相机

由 (22) 式可以看出, 当姿态角固定时, 无须进行像移补偿。

### 4.3 航空相机(垂直摄影)

一般航空相机采用垂直摄影方式,此时(23)式变为

$$\Delta A'' = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \cos \Omega t & 0 & \sin \Omega t \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Omega t & 0 & \cos \Omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x' \\ A_y' \\ r+h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega t & 0 & \sin \Omega t \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Omega t & 0 & \cos \Omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x' \\ A_y' \\ r+h \end{bmatrix}, \quad (26)$$

取  $t_0 = 0$ , 上式对时间微分, 得像点相对底片框的运动速度:

$$\begin{bmatrix} V''_{x'} \\ V''_{y'} \\ V''_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V}{r+h} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{V}{r+h} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_x \\ A'_y \\ f \frac{r+h}{H-h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{fV}{H-h} \\ 0 \\ -\frac{V}{r+h} A'_x \end{bmatrix}, \quad (27)$$

同样  $V''_{z'}$  可以不考虑, 像点在像面上飞行方向上的运动速度为

$$V''_{x'} = \frac{fV}{H-h}, \quad (28)$$

则像移的补偿速度为  $-V''_{x'}$ 。

**结语** 本文运用动态光学的稳像理论论述了空间遥感器在沿轨道运行时, 地球表面物体在空间遥感器像面的像相对底片框的位移和运动速度, 从而探讨像移补偿问题。文中并没论及补偿方法, 同时也没涉及相机振动、变形等的稳像问题。所得结果与采用齐次坐标变换方法<sup>[6,7]</sup> 结论一致, 不但证明了通过齐次坐标

变换方法得出的结果是正确的, 而且说明采用动态光学的稳像理论解决以上问题物理概念清楚, 计算简便。

由文中的计算分析可得出以下结论:

1) 中、低轨道卫星相机, 像移补偿沿飞行方向, 补偿速度

$$-V''_{x'} = f' \left[ \frac{r+h}{H-h} \cos \phi_0 (\dot{\omega} \cos i_0 - \Omega) \right];$$

2) 地球同步轨道卫星不用进行像移补偿;

3) 采用垂直摄影的航空相机, 像移补偿沿飞行方向, 补偿速度  $-V''_{x'} = \frac{fV}{h-H}$ 。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Zhijian, Zheng Jianping. The image-forming properties of optics systems and elements in motion. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics* (长春光学精密机械学院学报), 1992, 15(2):14~24 (in Chinese)
- 2 Wang Zhijian, Zheng Jianping. The object-image conjugate theory of optical systems and optical elements in motion. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics* (长春光学精密机械学院学报), 1992, 15(2):1~13 (in Chinese)
- 3 Wang Zhijian, Zheng Jianping. Optical image-stabilization and generalized optical image-stabilization. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics* (长春光学精密机械学院学报), 1992, 15(2):29~37 (in Chinese)
- 4 Wang Zhijian, Zheng Jianping. Optical image-stabilizing system. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics* (长春光学精密机械学院学报), 1992, 15(2):38~51 (in Chinese)
- 5 Zheng Jianping, Wang Peng, Wang Zhijian. Board optical stabilizing image. *Proc. SPIE*, 1994, 2321:532~537
- 6 Yan Changxiang, Wang Jiaqi. Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2000, 8(3):203~207 (in Chinese)
- 7 Ghosh S K. Image motion compensation through augmented colinearity. *Opt. Engng.*, 1985, 24(6):1014~1017