

文章编号: 1001- 2486(2008) 01- 0104- 06

# 光电稳定机构指向误差建模与敏感度分析<sup>\*</sup>

李 岩, 范大鹏

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 光电稳定机构在武器装备的侦察、瞄准设备中应用广泛, 其光轴指向误差直接影响着目标探测、识别的准确性。在加工和装配过程中难以避免的机构几何误差是指向误差的重要来源。基于多体系统运动学理论的误差建模方法, 以两轴式稳定机构为例, 建立了基于几何误差的指向误差模型。并通过误差模型的概率分析和误差敏感度的构建, 比较了各项几何误差的影响程度。此方法既可在设计阶段用于指向误差的评估和几何误差的分配, 也可在调试阶段用于几何误差标定。

**关键词:** 光电稳定; 指向误差; 误差建模; 敏感度分析

中图分类号: TH161+.2 文献标识码: A

## Development of Pointing Error and Sensitivity Analysis of Opto-electrical Stabilization Mechanism

LI Yan, FAN Da-peng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The mechanism of opto-electrical stabilization is widely used in the field of observation and measurement of the armament. Its pointing accuracy relates the realization of function as target realization or tracking. As the important source of pointing error, the geometric error of the mechanism is inevitable. So the paper develops the model of pointing error using the method of multi-body system error's development, which adopts the azimuth-elevation mechanism as the example. The effects of error sources are also compared according to the statistical and sensitivity analysis. The research can be applied not only to the estimation of pointing error during designing, but also to the allocation and calibration of errors.

**Key words:** opto-electric stabilization; pointing error; error model; sensitivity analysis

光电稳定机构是在移动载体条件下, 通过多轴运动补偿载体运动所造成的光轴扰动, 从而保持其指向惯性稳定的装置, 并在光轴稳定指向的基础上实现跟踪目标等其他功能。光轴的准确指向受到各轴以及轴间几何误差的影响。几何误差主要包括由于机构加工、装配的不准确导致的安装误差, 轴承跳动等原因造成的运动误差等。通过建立几何误差和机构指向误差的映射关系, 在设计阶段预估指向误差水平和合理分配几何误差, 无疑对光电稳定机构的精度提高有重要意义。对于多轴机构的指向误差, 许多学者进行过研究。金毅民等<sup>[1]</sup>等运用 PIGRAM 图的方法进行了四轴指向机构的轴系运动误差分析, 但对各项几何误差的影响机理和敏感程度未作研究; Alasty 等<sup>[2]</sup>通过 D-H 变换方法, Kifidena<sup>[3]</sup>和曲智勇<sup>[4]</sup>等运用多体系统误差建模方法也建立了三轴机构的指向误差模型等。然而针对光电稳定机构指向误差模型的研究很少有文献涉及。本文根据光电稳定机构的工作原理, 以两轴稳定机构为例, 建立基于几何误差的指向误差模型, 并在统计意义下揭示各项几何误差的影响机理。

\* 收稿日期: 2007- 06- 11

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 李岩(1978-), 女, 博士生。

# 1 光电稳定机构及其几何误差源分析

## 1.1 光电稳定机构及指向误差涵义

根据运动学原理, 载体在惯性空间的任意旋转运动均可分解为绕三个垂直轴向的角运动。因此若获得光轴的指向稳定, 必须通过光电稳定机构对载体至少两个轴向(绕指向自身轴向除外)的角运动进行补偿。通常采取的两轴稳定机构, 就是建立在这种运动学关系之上的。图 1 所示为典型的方位-俯仰式两轴稳定机构, 载体经基座、方位和俯仰框架造成光电传感器指向的偏差, 惯性元件敏感到扰动量, 并通过方位和俯仰轴系的运动加以补偿, 从而保持光轴的指向稳定。

通常采取稳定机构的指向误差来衡量其稳定效果, 其定义为实际和理想指向的角度误差, 统计意义下表示为  $RMS(1\sigma)$  (均方根值), 有  $RMS(1\sigma) = \sqrt{\Delta\bar{\theta}^2 + \sigma_{\Delta\theta}^2}$ <sup>[4]</sup>, 其中  $\Delta\bar{\theta}$ 、 $\sigma_{\Delta\theta}$  分别表示指向误差  $\Delta\theta$  的均值和标准差。

## 1.2 几何误差源分析

影响指向误差的几何误差源主要包括各框架和框架间的安装误差、光电传感器的安装误差、轴系运动时由于轴承跳动等原因造成的回转运动误差和绕回转轴运动的定位误差等。根据多体系统的误差建模方法, 将实际条件下任意两相邻体固定连接时产生的误差称为静止误差, 而相对运动时产生的误差称为运动误差。静止误差与固定连接过程的精确与否有关, 而运动误差则取决于运动过程的精确性, 并与运动量有关<sup>[5]</sup>。据此在两轴光电稳定机构中, 可认定加工和装配过程中产生的安装误差为静止误差, 而运动过程中轴系的回转误差和定位误差为运动误差。具体地, 静止误差包括基座相对载体、方位轴(指方位轴系所有相对基座静止的零部件, 例如电机定子等)相对基座、俯仰轴相对方位轴的误差以及光电传感器的安装误差。运动误差则包括方位、俯仰轴在旋转过程产生的误差。为了统一清晰地表示各项几何误差及其分量, 建立如下各坐标系:

**惯性坐标系  $\{i\}$ :** 在此坐标系下衡量指向的准确性。将载体静止时纵轴向前、横轴向左定义为轴  $x_i$  和  $y_i$  的正向, 并与轴  $z_i$  组成右手坐标系。原点  $o_i$  同系  $\{b\}$  的  $o_b$  重合。

**载体连体系  $\{b\}$ :** 轴  $x_b$ 、 $y_b$  在基座与载体的联接法兰平面内, 轴  $z_b$  则垂直于此平面且取机构一侧为正向。原点  $o_b$  位于法兰中心处。令载体相对惯性系的运动, 依次分解为俯仰  $\varepsilon$ (绕轴  $y_i$ ) 和方位  $\eta$ (绕变化后的轴  $z_i$ ) 的角运动。

**方位轴参考系  $\{a0\}$ :** 取方位轴静止时的方向为轴  $z_{a0}$ 。根据小角度假设, 轴  $x_{a0}$  和  $y_{a0}$  可由系  $\{b\}$  通过误差分量  $\delta_{bx}$ (绕轴  $x_b$ ) 和  $\delta_{by}$ (绕轴  $y_b$ ) 不依次序地变换得到, 此两项误差即为方位轴联接于基座的垂直度误差。原点  $o_{a0}$  取于方位与俯仰轴的连接零件中心处。

**方位轴连体系  $\{a\}$ :** 描述方位轴的运动误差。取

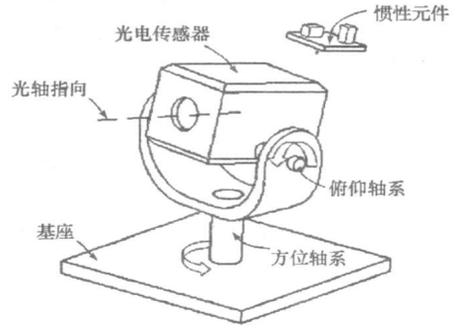


图 1 方位-俯仰式稳定机构示意图  
Fig. 1 Mechanism of azimuth-elevation stabilization

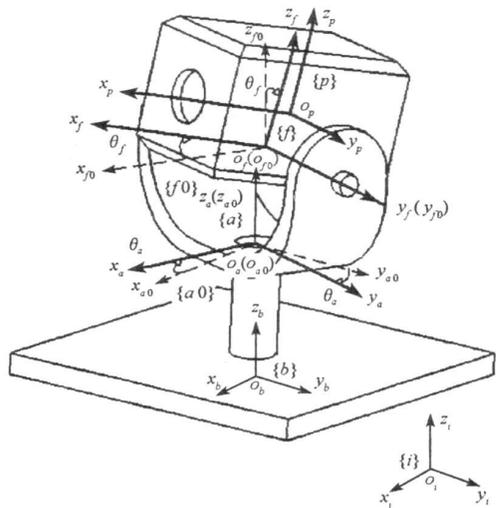


图 2 方位-俯仰式稳定机构坐标系设置示意图  
Fig. 2 Setup of reference of azimuth-elevation stabilization mechanism

方位轴在转动到  $\theta_a$  时的瞬时轴线为轴  $z_a$ , 在轴系回转等误差的作用下, 相对于理想位置(即系  $\{a_0\}$  绕轴  $z_{a0}$  旋转  $\theta_a$  形成的坐标系)的误差可分解  $\Delta\alpha(\theta_a)$ 、 $\Delta\beta(\theta_a)$  (倾角回转误差) 和  $\Delta\theta_a$  (定位误差), 原点  $o_a$  同系  $\{a_0\}$ 。

同理建立俯仰轴参考系  $\{f_0\}$ , 用以描述俯仰轴相对方位轴的安装误差; 俯仰轴连体系  $\{f\}$  描述俯仰轴的运动误差, 采用  $\theta_f$  表示俯仰转角; 指向参考系  $\{p\}$ , 用以描述光电传感器在俯仰轴上的安装误差, 则代表光轴指向的单位矢量  $r$ , 在此系下用齐次坐标表示为  $r_p = [1, 0, 0, 0]^T$ 。上述各系坐标轴的具体设置如图 2 所示, 在表 1 中列出了各项几何误差的物理含义及表达式。

两轴光电稳定机构的功能在于保持光轴指向在惯性系中的稳定, 故对于各轴系的线性误差(包括相交度等), 以及各轴径向偏心、轴向窜动误差等不会对指向误差产生影响, 故文中不予考虑。对其他类型的稳定机构, 则需根据稳定对象具体定义衡量指标, 并相应地考虑几何误差的影响。

表 1 两轴方位-俯仰式稳定机构误差源列表

Tab. 1 Error source of two-axis stabilization mechanism of azimuth-elevation

	几何意义(静止误差)	表达式	几何意义(运动误差)	表达式
系 $\{a_0\}$	方位轴相对基座垂直度误差(绕 $x_b$ 轴)	$\delta_{bx}$	方位轴倾角回转误差(绕 $x_{a0}$ 轴)	$\Delta\alpha(\theta_a)$
	方位轴相对基座垂直度误差(绕 $y_b$ 轴)	$\delta_{by}$	方位轴倾角回转误差(绕 $y_{a0}$ 轴)	$\Delta\beta(\theta_a)$
系 $\{f_0\}$	俯仰轴相对方位轴垂直度误差(绕 $x_a$ 轴)	$\delta_{fx}$	方位轴转动定位误差(绕 $z_{a0}$ 轴)	$\Delta\theta_a$
	俯仰轴相对方位轴垂直度误差(绕 $z_a$ 轴)	$\delta_{fz}$	俯仰轴倾角回转误差(绕 $x_{f0}$ 轴)	$\Delta\alpha(\theta_f)$
系 $\{p\}$	传感器相对俯仰轴垂直度误差(绕 $y_f$ 轴)	$\delta_{py}$	俯仰轴转动定位误差(绕 $y_{f0}$ 轴)	$\Delta\theta_f$
	传感器相对俯仰轴垂直度误差(绕 $z_f$ 轴)	$\delta_{pz}$	俯仰轴倾角回转误差(绕 $z_{f0}$ 轴)	$\Delta\beta(\theta_f)$

## 2 指向误差建模

根据上述各坐标系, 对稳定机构的指向误差在惯性系  $\{i\}$  中进行描述, 如图 3 所示。其中  $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$  表示  $\Delta\theta$  的两个分量, 分别定义为俯仰误差和方位误差。采用单位矢量  $r_i$ , 代表光轴指向在无几何误差情况下的理想指向, 称为理想指向矢量; 采用单位矢量  $r'_i$ , 代表光轴指向存在几何误差时的实际指向, 称为实际指向矢量。并定义指向误差矢量为:  $\Delta r_i = r'_i - r_i$ 。

在小角度的假设条件下, 则指向误差  $\Delta\theta = |\Delta r_i|$ , 其中  $|\cdot|$  代表矢量模。由此建立在各项几何误差的影响下, 系  $\{p\}$  相对系  $\{i\}$  的齐次变换矩阵为:

$${}^i T(e) = {}^i T \cdot {}^{a_0} T \cdot {}^a T \cdot {}^{f_0} T \cdot {}^f T \cdot {}^p T \quad (1)$$

式中  ${}^m T$  均表示坐标系  $\{m\}$  相对系  $\{n\}$  的变换矩阵;  $e = \delta_{bx}, \dots, \Delta\beta(\theta_f)$ , 表示各项几何误差。

若令式(1)中所有几何误差为零, 即得到在理想情况下的系  $\{p\}$  相对系  $\{i\}$  的齐次变换矩阵:

$${}^i T(0) = {}^i T(e = 0)$$

据此计算理想指向矢量为:  $r_i = {}^i T(0) \cdot r_p$ ; 实际指向矢量为:  $r'_i = {}^i T(e) \cdot r_p$ , 进而可求得指向误差矢量在系  $\{i\}$  中的表示为:  $\Delta r_i = r'_i - r_i = [{}^i T(e) - {}^i T(0)] \cdot r_p$ 。

根据光电稳定机构的实现功能, 考虑下面两种情况下的指向误差模型:

(1) 载体在惯性系发生俯仰  $\varepsilon$  和方位  $\eta$  的角运动, 由稳定机构的补偿机理, 不考虑控制系统等其他误差, 上式中有  $\theta_a = -\eta$ 、 $\theta_f = -\varepsilon$  成立。则各矩阵表示为:

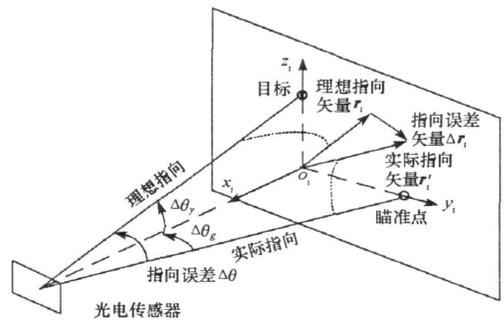


图 3 稳定机构的指向误差矢量示意图  
Fig. 3 Vector of pointing error of stabilization mechanism

$$\begin{aligned} {}^i_b T &= \text{Rot}(y, \varepsilon) \text{Rot}(z, \eta); \quad {}^b_{a0} T = \text{Rot}(x, \delta_{bx}) \text{Rot}(y, \delta_{by}) \text{Trans}(0, 0, l_a) \\ {}^a_a T &= \text{Rot}(z, \theta_a) \text{Rot}(x, \Delta\alpha(\theta_a), y, \Delta\beta(\theta_a), z, \Delta\theta_a); \quad {}^a_{f0} T = \text{Rot}(x, \delta_{fx}) \text{Rot}(z, \delta_{fz}) \text{Trans}(0, 0, l_f) \\ {}^f_f T &= \text{Rot}(y, \theta_f) \text{Rot}(x, \Delta\alpha(\theta_f), y, \Delta\theta_f, z, \Delta\gamma(\theta_f)); \quad {}^b_{a0} T = \text{Rot}(y, \delta_{py}) \text{Rot}(z, \delta_{pz}) \text{Trans}(0, 0, l_{fp}) \end{aligned}$$

其中  $\text{Rot}(f, \bullet)$  表示绕轴  $f$  的旋转变换,  $\text{Trans}(\bullet)$  表示平移变换, 具体的变换公式参考文献[5]。  $e$  表示各项几何误差,  $l_a$ 、 $l_f$  和  $l_{fp}$  分别代表方位轴长度、俯仰轴至方位轴和光轴至俯仰轴的距离。忽略二阶以上小量, 计算得到指向误差矢量为:

$$\begin{aligned} \Delta r_{i1} &= [0, -(\delta_{fx} + \Delta\alpha(\theta_a)) \sin \varepsilon - \delta_{bx} \cos \eta \sin \varepsilon + \delta_{by} \sin \varepsilon \sin \eta + (\Delta\theta_a + \delta_{bz}) \cos \varepsilon + (\Delta\gamma(\theta_f) + \delta_{pz}) \\ &\quad - \delta_{bx} \sin \eta - \delta_{by} \cos \eta - (\Delta\beta(\theta_a) + \Delta\theta_f + \delta_{py}), 0]^T \end{aligned} \quad (2)$$

由图3中对指向误差的表示知,  $\Delta r_{i1}$  的分量即俯仰和方位误差分别为:

$$\Delta\theta_y = -\delta_{bx} \sin \varepsilon \cos \eta + \delta_{by} \sin \varepsilon \sin \eta - (\delta_{fx} + \Delta\alpha(\theta_a)) \sin \varepsilon + (\Delta\theta_a + \delta_{bz}) \cos \varepsilon + (\Delta\gamma(\theta_f) + \delta_{pz}) \quad (3)$$

$$\Delta\theta_z = -\delta_{bx} \sin \eta - \delta_{by} \cos \eta - (\Delta\beta(\theta_a) + \Delta\theta_f + \delta_{py}) \quad (4)$$

指向误差  $\Delta\theta_1 = |\Delta r_{i1}| = \sqrt{\Delta\theta_y^2 + \Delta\theta_z^2}$ 。

(2) 稳定机构对目标进行跟踪, 此时假设载体发生扰动已被补偿掉, 目标位于惯性系的方位  $\eta'$  和俯仰  $\varepsilon'$  的位置, 如图4所示。此时有  $\theta_a = \eta'$ 、 $\theta_f = \varepsilon'$ 、 ${}^i_b T = I_{4 \times 4}$  成立, 其他变换矩阵同上, 则得到指向误差矢量为:

$$\begin{aligned} \Delta r_{i2} &= [-\delta_{by} \sin \varepsilon' - (\delta_{fx} + \Delta\alpha(\theta_a)) \sin \varepsilon' \sin \eta' - (\Delta\beta(\theta_a) + \Delta\theta_f + \delta_{py}) \cos \eta' \sin \varepsilon' - (\Delta\theta_a + \delta_{bz}) \cos \varepsilon' \sin \eta' \\ &\quad - (\Delta\gamma(\theta_f) + \delta_{pz}) \sin \eta' \delta_{bx} \sin \varepsilon' + (\delta_{fx} + \Delta\alpha(\theta_a)) \cos \eta' \sin \varepsilon' + (\Delta\theta_a + \delta_{bz}) \cos \eta' \cos \varepsilon' \\ &\quad - (\Delta\beta(\theta_a) + \Delta\theta_f + \delta_{py}) \sin \varepsilon' \sin \eta' + (\Delta\gamma(\theta_f) + \delta_{pz}) \cos \eta' \cos \varepsilon' \sin \eta' \delta_{bx} - \cos \varepsilon' \cos \eta' \delta_{by} \\ &\quad - (\Delta\beta(\theta_a) + \Delta\theta_f + \delta_{py}) \cos \varepsilon', 0]^T \end{aligned} \quad (5)$$

此时指向误差有  $\Delta\theta_2 = |\Delta r_{i2}|$ 。从式(2)、(5)中分析各项几何误差对指向误差的影响, 可以得出以下结论:

(1)  $\Delta\alpha(\theta_a)$  与  $\delta_{fx}$ 、 $\Delta\beta(\theta_a)$  和  $\delta_{py}$  与  $\Delta\theta_f$ 、 $\delta_{fz}$  与  $\Delta\theta_a$ 、 $\Delta\gamma(\theta_f)$  与  $\delta_{pz}$  对指向误差的影响方式是相同的。对于完成装配的稳定机构而言, 各项位置误差也已固定,  $\delta_{fz}$  和  $\delta_{py}$  相当于方位、俯仰轴系的零位误差。

(2) 指向误差模型可直接用于对几何误差的标定, 相比之下  $\Delta r_{i1}$  的表达更为简单, 故下文主要针对此种情况下的指向误差研究。此时须遵守  $\theta_a = -\eta$ 、 $\theta_f = -\varepsilon$  的条件, 则对于捷联式稳定机构(即敏感元件安装于载体), 可直接进行各项几何误差标定; 而平台式(敏感元件安装于俯仰框架)需已知载体扰动的角度方可标定。

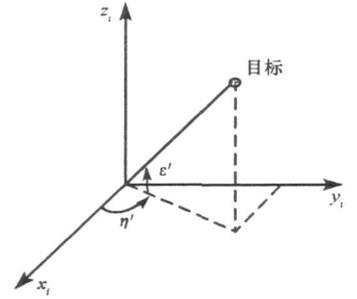


图4 目标位置示意图  
Fig. 4 Sketch of target position

### 3 指向误差的敏感度分析

以上得到了指向误差与几何误差的明确关系, 但每项几何误差都会由于生产、装配的条件不同而具有一定的随机性, 因此有必要研究在统计意义下指向误差与各项几何误差的定量关系。

#### 3.1 概率模型

直接求取指向误差  $\Delta\theta$  的概率分布特征较为复杂, 故首先对其分量  $\Delta\theta_y$  和  $\Delta\theta_z$  考察分布特征。

分别令  $e_1 = \delta_{bx}$ ;  $e_2 = \delta_{by}$ ;  $e_3 = \delta_{fx} + \Delta\alpha(\theta_a)$ ;  $e_4 = \Delta\theta_a + \delta_{bz}$ ;  $e_5 = \delta_{pz} + \Delta\gamma(\theta_f)$ ;  $e_6 = \delta_{py} + \Delta\beta(\theta_a) + \Delta\theta_f$ , 则根据随机变量的性质, 得到均值为:

$$\begin{aligned} m_{\Delta\theta_y} &= -m_{e_1} \cos \eta \sin \varepsilon + m_{e_2} \sin \varepsilon \sin \eta - m_{e_3} \sin \varepsilon + m_{e_4} \cos \varepsilon + m_{e_5} \\ m_{\Delta\theta_z} &= -m_{e_1} \sin \eta - m_{e_2} \cos \eta - m_{e_6} \end{aligned}$$

依据误差传递定律, 得到标准差为:

$$\sigma_{\Delta\theta_y} = (\sigma_{e_1}^2 \cos^2 \eta \sin^2 \varepsilon + \sigma_{e_2}^2 \sin^2 \varepsilon \sin^2 \eta + \sigma_{e_3}^2 \sin^2 \varepsilon + \sigma_{e_4}^2 \cos^2 \varepsilon + \sigma_{e_5}^2)^{1/2}$$

$$\sigma_{\Delta\theta_z} = (\sigma_{e_1}^2 \sin^2 \eta + \sigma_{e_2}^2 \cos^2 \eta + \sigma_{e_6}^2)^{1/2}$$

两者的相关系数为:

$$\rho = \frac{(\sigma_{e_1}^2 - \sigma_{e_2}^2) \sin \varepsilon \sin \eta \cos \eta}{\sigma_{\Delta\theta_y} \sigma_{\Delta\theta_z}}$$

上述各式中  $m_x$ 、 $\sigma_x$  分别表示随机变量  $x$  的均值和标准差。假设上述的各项误差均在统计意义下独立且均值为零, 并服从正态分布, 则当发生特定的  $\varepsilon$ 、 $\eta$  干扰运动时, 在  $\sigma_{e_1} = \sigma_{e_2}$  的条件下, 根据线性组合且相互独立随机变量的特点, 可知  $\Delta\theta_y$  和  $\Delta\theta_z$  也互相独立且均值为零, 并服从正态分布, 即  $\Delta\theta_y \sim N(m_{\Delta\theta_y}, \sigma_{\Delta\theta_y}^2)$ ,  $\Delta\theta_z \sim N(m_{\Delta\theta_z}, \sigma_{\Delta\theta_z}^2)$ 。若进一步假设, 在各项误差作用下有

$\sigma_{\Delta\theta_y} = \sigma_{\Delta\theta_z} = \sigma$  成立, 则可证明指向误差  $\Delta\theta$  服从瑞利 (Rayleigh) 分布, 其均值、均方差、RMS 值分别为:  $m_{\Delta\theta} = \sqrt{\pi/2} \sigma$ ,  $\sigma_{\Delta\theta} = \sqrt{(4 - \pi)/2} \sigma$ ,  $RMS_{\Delta\theta} = \sqrt{2} \sigma$ 。

这也符合通常采取的指向误差模型<sup>[4]</sup>。若不满足以上假设条件, 则必须通过  $\Delta\theta_y$  和  $\Delta\theta_z$  各自的数字特征得到  $\Delta\theta$  的分布函数, 通常不符合已知的概率分布<sup>[1]</sup>。但是可以通过计算模拟的方法在已知各项误差分布的前提下, 求取指向误差的分布特征。图 5 所示即为利用 Monte Carlo 方法(每点进行 5000 次采样计算)得到  $\Delta\theta$  的 RMS(1 $\sigma$ ) 分布图。此时假设  $e_1 \sim e_6$  均服从均值为 0, 均方差为  $0.1^\circ$  的正态分布, 且载体的干扰运动在方位角  $\pm 180^\circ$ , 俯仰角  $\pm 90^\circ$  范围内。

### 3.2 敏感度分析

为了衡量单项误差对指向误差影响的程度, 通常选择误差敏感度进行定量化分析<sup>[2,6]</sup>。但由上述分析可知, 随着载体干扰运动的方位、俯仰角度的不同, 指向误差对误差项的敏感程度也会发生改变。以  $\delta_{bac}$  和  $\Delta\theta_a$  为例, 图 6 给出了两者均服从零均值正态分布且单独作用时不同均方差引起的指向误差变化情况, 干扰运动空间在俯仰角  $\pm 45^\circ$ , 方位角  $\pm 180^\circ$  之间。

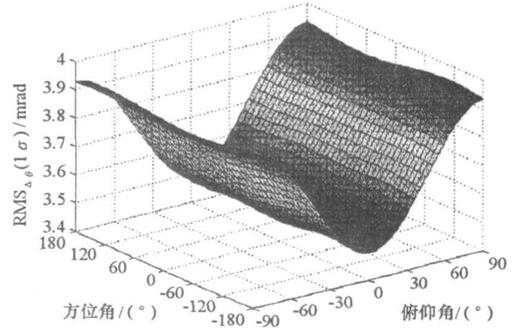
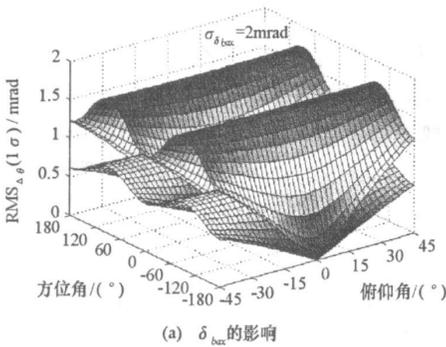
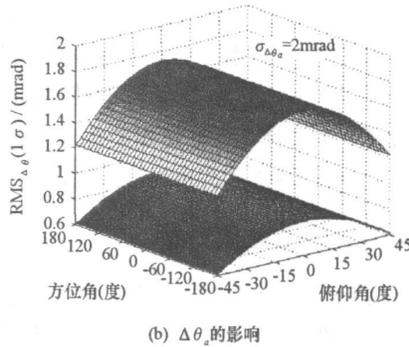


图 5 指向误差(RMS(1 $\sigma$ ))的分布示意图  
Fig. 5 Distribution of pointing error(RMS(1 $\sigma$ ))



(a)  $\delta_{bac}$  的影响



(b)  $\Delta\theta_a$  的影响

图 6  $\delta_{bac}$  和  $\Delta\theta_a$  对指向误差(RMS(1 $\sigma$ ))在干扰运动空间的影响示意图

Fig. 6 Effect of  $\delta_{bac}$  and  $\Delta\theta_a$  to pointing error (RMS(1 $\sigma$ )) on disturbance motion space

根据上述分析, 同时由正态分布的普遍性, 构建关于稳定机构的误差敏感度定义: 若每项误差均服从零均值正态分布时, 单位均方差引起的指向误差 RMS(1 $\sigma$ ) 值(在干扰运动空间内)的平均表示为:

$$s_{e_k} = \iint_{\Omega} \frac{\partial \Delta\theta}{\partial e_k} d\Omega \quad (k = 1, \dots, 6)$$

其中  $\Omega$  表示干扰运动空间, 在计算时则采用  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Delta\theta_i}{\partial e}$  来近似,  $\Delta\theta_i$  表示在运动空间内的第  $i$  个位置的指向误差,  $n$  表示在运动空间内被计算位置的总数。故敏感度与干扰运动的范围也是相关的。图

7 所示为应用 Monte Carlo 方法(每点取 10 000 次采样, 干扰运动在方位角  $\pm 180^\circ$ 、俯仰角  $\pm 90^\circ$  范围内)得出的误差敏感度直方图, 可直接解释为单项误差 1mrad 的均方差引起的指向误差值。由此可直观地看到,  $\delta_{pz}$ 、 $\delta_{py}$ 、 $\Delta\beta(\theta_x)$ 、 $\Delta\theta$  和  $\Delta\gamma(\theta_y)$  的影响程度相对较大, 故对俯仰轴的倾角回转误差、光电传感器相对俯仰轴的安装误差需严格要求, 对其他项可依照敏感度大小而有所侧重, 利用敏感度也可直接获得对各误差分布特征(均方值)的要求。

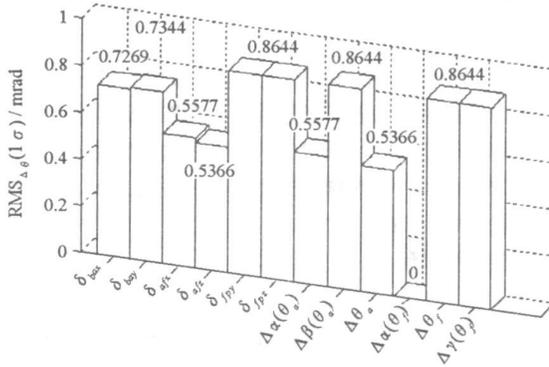


图 7 稳定机构几何误差的敏感度直方图

Fig. 7 Sensitivity of geometric error of stabilization mechanism

## 4 结论

研究了光电稳定机构指向误差的建模方法, 以典型的两轴稳定机构为例, 得出了指向误差与各项几何误差的定量关系, 对各项几何误差的影响机理也进行了分析。根据几何误差存在随机性的特点, 建立了在统计意义下的指向误差模型, 通过敏感度的构建比较了各项几何误差的影响程度。对用于图像、波束稳定的三轴或多轴机构, 同样可依此方法建立误差模型和构造误差敏感度, 这不仅为几何误差的运动学标定, 更为误差补偿和误差分配等工作奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 金毅民, 陶忠, 孙治家. 轴系运动的数学仿真与轴系误差[J]. 应用光学, 2003, 24(B08): 37- 49.
- [2] Alasty A, Abedi H. Kinematic and Dynamic Sensitivity Analysis of a Three axis Rotary Table[C]//Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003: 1147- 1152.
- [3] Křídlena V S B, Ferreira P M. Kinematic Modeling of Quasistatic Errors of Three-axis Machining Centers[J]. Int. J. Machine. Tools & Manufacturing, 1994, 34(1): 85- 100.
- [4] 曲智勇, 等. 仿真转台误差分析及误差建模[J]. 计算机仿真, 2006, 23(3): 301- 304.
- [5] Huston R L, 刘又午. 多系统动力学(上、下册) [M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- [6] 黄田, 李亚, 李思维, 等. 一种三自由度并联机构几何误差建模、灵敏度分析及装配工艺设计[J]. 中国科学E辑, 2002, 32(5): 628 - 635.