

文章编号 1004-924X(2014)12-3342-06

空间相机调偏流机构运动公式的拟合

杨会生¹,李志来¹,徐 宏¹,曹乃亮¹,鲍 赫¹,关英俊^{2*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 长春工业大学 机电工程学院,吉林 长春 130012)

摘要:研究了空间相机调偏流机构运动公式的提取方法,以便提高运动机构精度,改善空间相机成像质量。分析了调偏流机构测试数据的分布规律,建立了它的分布规律模型。采用对角频率 ω 一维搜索的三参数三角函数拟合方法,对测试数据进行了最小二乘拟合,并研究分析了首次拟合残差的分布规律,提取并修正了其中的系统误差分量,从而进一步提高了拟合精度。试验结果表明:使用上述方法提取调偏流机构运动公式后,调偏流系统控制精度优于 $30''$,与最小二乘拟合结果(最大拟合偏差 $20.5107''$)相符,同时满足系统控制要求,不仅实现了高精度的偏流角控制,还降低了对零部件加工、装配的要求和制作成本。

关键词:空间相机;调偏流机构;曲线拟合;最小二乘法

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3342

Kinematic formula fitting of drift adjusting mechanism for space camera

YANG Hui-sheng¹, LI Zhi-lai¹, XU Hong¹, CAO Nai-liang¹, BAO He¹, GUAN Ying-jun^{2*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Changchun University of Technology, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yanghuisheng@126.com

Abstract: The extraction method of kinematic formula for a drift adjusting mechanism in space cameras was researched to accurately control the drift adjusting mechanism and to improve the imaging quality. The distribution law of test data for the drift adjusting mechanism was analyzed, and the model of distribution law was built. Based on three-parameter trigonometric function fitting method by use of angular frequency ω one-dimensional search, the test data were handled by the least square fitting. The distribution law of fitting residual was studied, and the inherent error components were extracted and modified, so that the fitting accuracy was further improved. The test results show that on basis of the kinematic formula of drift adjusting mechanism extracted by the proposed method, the control precision of drift adjusting system is less than $30''$, equal to that of least square fitting (maximum fitting deviation $20.5107''$). The kinematic formula also satisfies the requirements of control system, realizes

收稿日期:2013-11-18;修订日期:2014-01-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

high precision control of the drift angle and reduces the demand for part processing, assembling, and production costs.

Key words: space camera; drift adjusting mechanism; curve fitting; least square method

1 引言

空间相机是安装在空间飞行器(卫星)上对地面摄影的精密光学仪器,随着空间科学技术的发展,空间相机以其高分辨率和高可靠性,在军事、科研和国民经济各领域得到了广泛的应用^[1-3]。

星载空间相机在轨对地成像时,被摄目标与像面存在相对运动,其运动速度可近似为地球表面自转速度和相机飞行速度在地球表面投影速度的合成。此合成速度与像面坐标系的夹角即为偏流角,偏流角会导致像移,降低成像质量。为了保证成像质量,需要进行精确的像移补偿,消除或降低像移影响。像移补偿的一种途径是设计调偏流系统,对偏流角进行精确调整,对偏流角进行调整的机构就是调偏流机构。对于高分辨率空间相机,调偏流机构是空间相机的重要组成部分,是决定空间相机是否满足要求的关键部件之一^[4-6]。传统的调偏流机构通过不计成本的提高零部件加工、装配精度来保证运动精度,制造难度大,研制周期长,不利于量产推广。

本文通过分析调偏流机构误差性质和分布规律来进行误差修正,以提高机构运动精度。首先通过试验数据建立机构运动公式数学模型,进行最小二乘拟合,并进行拟合残差修正;最后对调偏流运动公式进行了试验验证。结果表明,提出的偏流运动公式满足系统控制要求,可以实现高精度的偏流角控制。

2 运动公式拟合的必要性

星载空间相机在对地成像时,主控系统根据轨道和姿态参数计算出当前偏流角,调偏流控制系统根据当前偏流角控制调偏流机构进行调偏流运动,直至消除像移。要完全补偿像移,使空间相机成像清晰,需要调偏流控制系统具有较高的控制精度,而调偏流机构运动精度是决定控制系统控制能力的关键^[7-8]。

机构运动精度是指执行部件到达理论位置的

能力。影响机构运动精度的因素较多,零件制造误差、部件装调误差、组件检测误差以及控制模型(运动公式)不准确都会在不同程度上造成精度损失。随着成像分辨率的提高,对调偏流机构运动精度的要求也不断提高,通过高精密加工制造技术来减小上述制造、装调误差的难度越来越大,甚至无法实现。实际上,虽然影响机构运动精度的误差因素有很多,但是从误差分布规律来说,只有两类,一种是系统误差,另一种是随机误差,系统误差可以通过试验的方式进行测量并加以修正,而随机误差需要通过优秀的拟合算法来降低其影响。所以,在降低制造难度的同时保证运动精度,需要对调偏流机构进行试验测试,并利用最小二乘法对试验数据进行拟合处理,以求得不受系统误差影响的运动公式来提高调偏流机构控制精度。

3 建立运动公式模型

调偏流机构组装完毕后需进行运动精度测试,检测过程如图 1 所示。调偏流机构安装有检测元件(调偏流编码器)可以测量驱动量(输入量),机构输出端(焦面基板)安装有焦面棱镜,使用经纬仪测量焦面棱镜的转动角度可以检测像面转角位移(输出量)。测试曲线如图 2 所示。由图可知,实测曲线形状近似半周期正弦曲线,但是不过零点,在两坐标轴存在平移,与实际调偏流机构试验情况相符,输入量平移是调偏流编码器初始安装位置与机构零点不重合造成的,输出量平移是由于经纬仪测量角度基准与相面角度基准不重

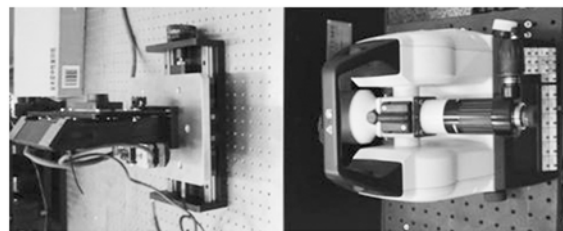


图 1 调偏流机构精度测试

Fig. 1 Accuracy measuring of drift adjusting mechanism

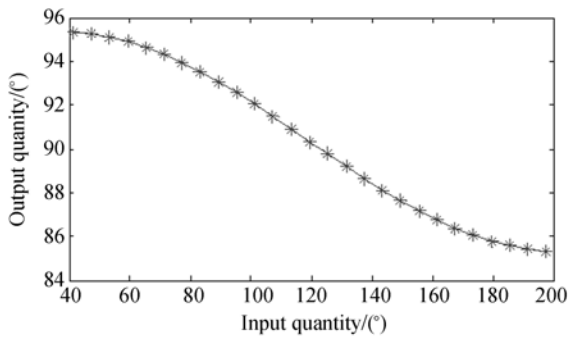


图 2 调偏流机构实测运动曲线

Fig. 2 Motion curve of drift adjusting mechanism

合造成的。由此，利用标准正弦函数建立调偏流机构运动公式模型为：

$$y = A \sin(\omega x + \varphi) + D, \quad (1)$$

式中： x 为输入量（驱动角度）； y 为输出量（相面角度）； A 为幅值； ω 为角频率； φ 为初始相位； D 为输出量的平移量。

4 最小二乘法公式拟合

最小二乘法的基本原理是寻找合适的函数值 $f(x)$ ，使其与测量值之间的误差平方和最小：^[9]

$$\epsilon^2 = \sum_{i=0}^n [y_i - f(x_i)]^2. \quad (2)$$

当检测点数量高于拟合曲线待定参量个数时，最小二乘法具有滤除随机误差的作用，并且检测点越多滤波作用越明显。当参数模型如式(1)所示的正弦函数时， ϵ^2 是角频率 ω 和初始相位 φ 的高度非线性函数^[10]，同时对式(1)的 4 个参数进行求解难度较大，故采用基于三参数正弦函数拟合的角频率 ω 一维搜索逼近方式，可以实现 4 参数拟合。

4.1 三参数正弦函数拟合方法

对于角频率已知的正弦函数，将其分解为标准形式^[9,11]：

$$y(t) = a_0 + a_1 \varphi_1 + a_2 \varphi_2, \quad (3)$$

式中： $a_0 = D$ ， $\varphi_1 = \sin t$ ， $\varphi_2 = \cos t$ ， $t = \omega x$ ， $A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ ， $\varphi = \arctan(a_2/a_1)$ 。

设 a_i^* ($i=1,2,3$) 为正弦函数的最小二乘解，则有：

$$\partial \epsilon^2 / \partial x_i^* = 0. \quad (4)$$

即：

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i [a_0^* + a_1^* \varphi_1 + a_2^* \varphi_2 - y_i] = 0 \quad (k = 0,1,2) \quad (5)$$

法方程组为：

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n \varphi_1 & \sum_{i=1}^n \varphi_2 \\ \sum_{i=1}^n \varphi_1 & \sum_{i=1}^n \varphi_1^2 & \sum_{i=1}^n \varphi_1 \varphi_2 \\ \sum_{i=1}^n \varphi_2 & \sum_{i=1}^n \varphi_1 \varphi_2 & \sum_{i=1}^n \varphi_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0^* \\ a_1^* \\ a_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i \varphi_1 \\ \sum_{i=1}^n y_i \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

引入矩阵：

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \sin t_1 & \cos t_1 \\ 1 & \sin t_2 & \cos t_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin t_n & \cos t_n \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad a^* = \begin{bmatrix} a_0^* \\ a_1^* \\ a_2^* \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则最小二乘解为：

$$a^* = (C'C)^{-1} C'y. \quad (8)$$

根据式(3)可以求得标准正弦函数幅值 A 、初始相位 φ 和输出量的平移量 D 。

4.2 角频率 ω 的搜索方法

在角频率 ω 已知的情况下，上述 3 参数正弦函数拟合方法绝对收敛，并具有很高的拟合精度。当角频率 ω 存在偏差时，上述方法无法获得幅值 A 、初始相位 φ 和输出量的平移量 D 的最小二乘估计值，但仍然是给定角频率 ω 下的最佳估计。

研究角频率 ω 偏差对上述 3 参数拟合的影响规律，特殊情况下，式(1)中 4 个参数均为已知，使用其 1 个周期的无误差数据序列，按上述 3 参数正弦函数拟合得如图 3 所示拟合均方差与角频率偏差 $\Delta\omega = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ (式中： ω 为拟合角频率， ω_0 为已知角频率)的关系曲线。

实际检测过程中存在检测误差，需要验证检测误差对图 3 所示变化规律的影响，同样使用上述 4 参数，已知正弦函数 1 个周期数据序列，并引入 1%、5%、10% 的随机误差得如图 4 所示拟合均方差与角频率偏差 $\Delta\omega$ 的关系曲线。

由图 3 和图 4 可知，3 参数正弦函数拟合法在角频率 $\omega = \omega_0 \pm 0.3\omega_0$ (即 $[0.7\omega_0 \quad 1.3\omega_0]$) 内，极值存在且唯一，检测误差不影响其分布规律。可以在上述范围内，对角频率 ω 进行一维搜索求得该极值点。

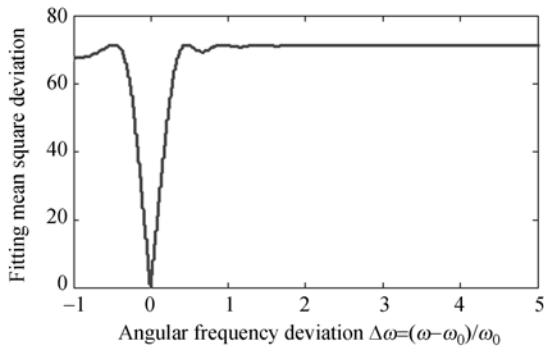


图 3 拟合均方差与角频率偏差的关系

Fig. 3 Relationship of fitting mean square deviation and angular frequency deviation

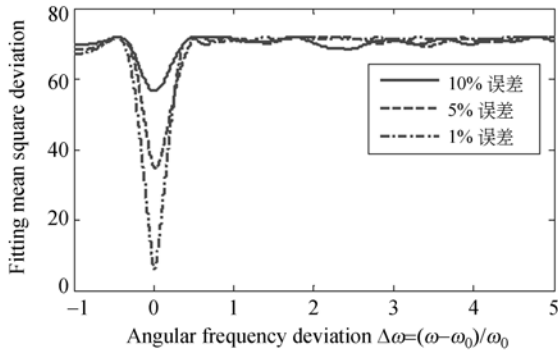


图 4 随机误差角对频率偏差与拟合均方差关系的影响

Fig. 4 Influence of random error on relationship of angular frequency deviation and fitting mean square deviation

4.3 确定角频率 ω 搜索区间

完成调偏流机构运动公式拟合,首先要确定角频率 ω 的搜索区间,而调偏流机构实际运动角频率 ω_0 通常未知或者存在较大偏差,需要对检测数据进行处理来确定。考虑到在调偏流机构运动精度测试过程中,一般都采用等间隔检测:

$$x_i = x_1 + (i-1)\Delta x. \quad (9)$$

因为检测误差很小,对确定角频率 ω 搜索区间影响较小,故不考虑随机误差的影响,则有:

$$\begin{aligned} y_{i-1} &= A\sin[\omega(x_i - \Delta x) + \theta] + D \\ y_i &= A\sin(\omega x_i + \theta) + D \\ y_{i+1} &= A\sin[\omega(x_i + \Delta x) + \theta] + D \end{aligned} \quad (10)$$

联立式(10):

$$y_{i-1} + y_{i+1} = 2y_i \cos \omega \Delta x + 2D(1 - \cos \omega \Delta x). \quad (11)$$

求解可得:

$$\omega_0^* = \arccos[(y_i + y_{i+2} - y_{i-1} - y_{i+1}) / 2(y_{i+1} - y_i)] / \Delta x, \quad (12)$$

由式(12)可知,可以利用 4 个等间隔的连续检测点计算出角频率 ω 的近似值 ω_0^* ,确定角频率 ω 的搜索区间为 $[0.7\omega_0^* \quad 1.3\omega_0^*]$ 。

4.4 拟合算法

综上所述,结合三参数正弦函数拟合和一维搜索方法,制定调偏流机构运动曲线拟合算法如下:

- 1) 输入调偏流机构检测数据 y_i, x_i ;
- 2) 设定迭代拟合过程的终止条件为迭代拟合均方差小于 ϵ_0 ,或者迭代次数超过 n_0 ;
- 3) 从检测数据中选择等间隔连续 4 点,利用式(5)计算初值角频率 ω 的近似值 ω_0^* ;
- 4) 确定角频率 ω 搜索区间 $[0.7\omega_0^* \quad 1.3\omega_0^*]$,则初始迭代点取值分别为: $\omega_1 = 0.7\omega_0^*, \omega_2 = \omega_1 - 0.618(\omega_1 - \omega_1), \omega_3 = \omega_1 + 0.618(\omega_1 - \omega_1)$;
- 5) 分别使用初始迭代点 $\omega_i (i=1 \sim 4)$ 进行 3 参数正弦函数拟合,记录拟合结果 $A_i = [a_0, a_1, a_2] (i=1 \sim 4)$ 和拟合均方差 $\epsilon_i (i=1 \sim 4)$;
- 6) 如果 $\epsilon_2 < \epsilon_3$,则 $\omega_0 \in [\omega_1 \quad \omega_3], \omega_1 = \omega_3, A_1 = A_3, \epsilon_1 = \epsilon_3, \omega_3 = \omega_2, A_3 = A_2, \epsilon_3 = \epsilon_2, \omega_2 = \omega_1 - 0.618(\omega_1 - \omega_1)$,对 ω_2 进行 3 参数正弦函数拟合,求得 A_2, ϵ_2 ;如果 $\epsilon_2 \geq \epsilon_3$,则 $\omega_0 \in [\omega_2 \quad \omega_1], \omega_1 = \omega_2, A_1 = A_2, \epsilon_1 = \epsilon_2, \omega_2 = \omega_3, A_2 = A_3, \epsilon_2 = \epsilon_3, \omega_3 = \omega_1 + 0.618(\omega_1 - \omega_1)$,对 ω_3 进行 3 参数正弦函数拟合,求得 A_3, ϵ_3 ;
- 7) 判断是否满足迭代终止条件 $\epsilon_{\min} < \epsilon_0$ 或者迭代次数 $n > n_0$,满足迭代终止条件时拟合过程结束,输出 ϵ_{\min} 时的 ω_{\min}, A_{\min} ,否则重复 2) 的操作;
- 8) 利用式(3)计算正弦函数 $y = A\sin(\omega x + \varphi) + D$ 。

4.5 拟合残差修正

求得调偏流机构运动公式为:

$$y^\circ = 5.008\sin(1.0946x + 49.2005^\circ) + 90.3367^\circ$$

拟合均方差为 $26.3139''$,最大拟合偏差为 $42.7579''$,拟合残差曲线如图 5 所示,拟合残差呈近似正弦分布,说明其中含有正弦系统误差,可以对其进行正弦函数拟合来修正系统误差,从而提高拟合精度。修正拟合残差需要确定拟合残差的搜索区间,但因为残差数值很小,依据式(12)所

得初始角频率误差太大,无法满足要求。对比图 2 与图 5,可以发现图 5 角频率约为图 2 角频率的 4 倍,故可以使用 $4\omega_0^*$ 确定搜索区间,得到残差拟合公式为:

$$y^\circ = 0.0091 \sin(4.9457x - 59.9033^\circ) - 0.0003^\circ. \quad (14)$$

拟合均方差为 $10.1897''$,最大拟合偏差为 $20.5107''$,拟合残差曲线如图 6 所示,对比图 6 与图 5 可知,经过修正,拟合残差中所含的系统误差明显减少。

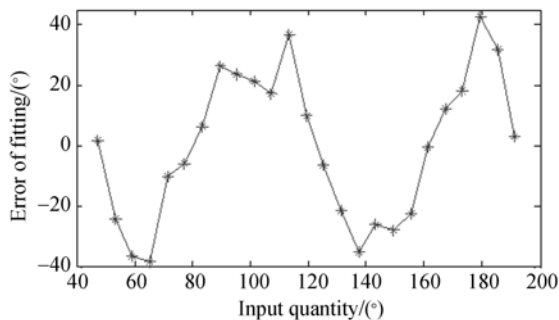


图 5 调偏流机构运动公式第一次拟合残差曲线

Fig. 5 Fitting curve based on initial data for kinematic formula of drift adjusting mechanism

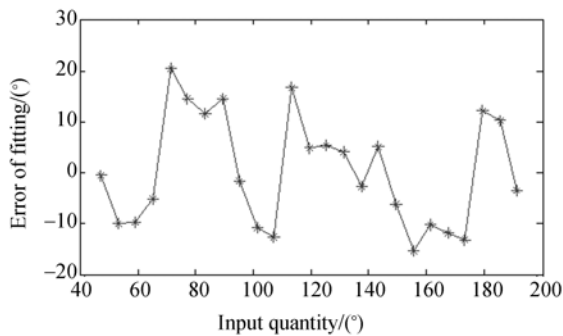


图 6 调偏流机构运动公式第二次拟合残差曲线

Fig. 6 Fitting curve based on fitting residual for kinematic formula of drift adjusting mechanism

将上述拟合结果进行合并,可得最终拟合结果为:

$$y^\circ = 5.008 \sin(1.0946x + 49.2005^\circ) + 0.0091 \sin(4.9457x - 59.9033^\circ) + 90.3364^\circ, \quad (15)$$

式(15)所示的定值分量 90.3364° 是由于实际检测过程中经纬仪测量角度基准与相面角度基准不重合导致的固有检测误差,应加以修正,则调偏流机构运动公式为:

$$y^\circ = 5.008 \sin(1.0946x + 49.2005^\circ) + 0.0091 \sin(4.9457x - 59.9033^\circ). \quad (16)$$

5 调偏流机构运动公式试验验证

为了检验调偏流机构运动公式的正确性,需要设计相关试验。首先将式(16)所示调偏流机构运动公式转化为程序代码,并注入到调偏流控制系统内;然后将调偏流机构恢复零位,记录此时经纬仪读数,此值即为检测过程中经纬仪测量角度基准与相面角度基准不重合导致的固有检测误差;最后在调偏流机构行程范围内,规划检测点,进行调偏流操作,计算实际运动位置与期望位置的偏差,但是因为调偏流控制系统存在控制误差,实际控制精度要略低于拟合精度。为了使测试结果具有覆盖性,采用等间隔循环采点的检测方式,测试误差曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,调偏流控制系统在调偏流机构分别从正向和负向靠近期望位置时,控制精度均优于 $30''$,考虑到调偏流机构电子学控制误差的影响,试验结果与拟合结果相符,同时满足调偏流机构控制精度需求。

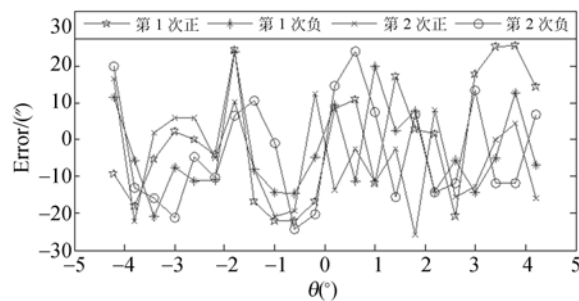


图 7 调偏流控制误差曲线

Fig. 7 Error curves of drift adjusting control

6 结 论

本文基于最小二乘方法,对调偏流机构试验测试数据进行拟合,分析了调偏流机构测试数据的分布规律,建立了其分布规律模型。采用三参数拟合方法,对测试数据进行了最小二乘拟合,提取并修正了其中的系统误差分量。结果表明:该方法提取的调偏流机构运动公式,调偏流系统控制精度优于 $30''$,与最小二乘拟合相符,满足系统控制要求,可以实现高精度的偏流角控制。

参考文献:

- [1] 徐宏,关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学精密工程,2013,21(6):1488-1495.
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1488-1495. (in Chinese)
- [2] 陈洪达,陈永和,史婷婷,等. 空间相机调焦机构误差分析[J]. 光学精密工程,2013, 21(5):1349-1356.
CHEN H D, CHEN Y H, SHI T T, *et al.*. Error analysis for focusing mechanism of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1349-1356. (in Chinese)
- [3] 刘磊. 空间三反相机调焦范围的确定[J]. 光学精密工程,2013, 21(3):631-636.
LIU L. Focusing range of space off-axial TMA optical camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):631-636. (in Chinese)
- [4] 鲍赫,杨利伟,姜肖楠,等. 空间光学相机调偏流机构设计[J]. 光电工程,2012, 39(6):22-28.
BAO H, YANG L W, JIANG X N, *et al.*. Design of draft adjusting mechanism for space optical camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(6):22-28. (in Chinese)
- [5] 黄群东,杨芳,赵健. 姿态对地指向不断变化成像时的偏流角分析[J]. 宇航学报,2012, 33(10):1544-1551.
HUANG Q D, YANG F, ZHAO J. Drift angle analysis for agile satellite imaging when its attitude points to the earth changing continuously [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(10):1544-1551. (in Chinese)
- [6] 孙阳,闫锋,薛栋林,等. 太阳同步椭圆轨道偏流角分布规律与像质分析[J]. 红外与激光工程,2013, 42(3):767-773.
SUN Y, YANG F, XUE D L, *et al.*. Drift angle distribution and image quality decreasing of solar synchronizing elliptic orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3):767-773. (in Chinese)
- [7] 于涛,徐抒岩,韩诚山,等. 空间相机偏流角的间歇式实时调整[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1908-1914.
YU T, XU SH Y, HAN CH SH, *et al.*. Batch-type real-time adjustment for drift angle of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1908-1914. (in Chinese)
- [8] 于平,吴伟平. 空间光学遥感器偏流机构控制单元的闭环实时模拟检测[J]. 光学精密工程,2009,17(11):2800-2805.
YU P, WU W P. Closed-loop simulation and testing of control cell of drift angle for space optical remote sensor in real time [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2800-2805. (in Chinese)
- [9] 易大义,沈云宝,李有法. 计算方法[M]. 杭州:浙江大学出版社,2002, 70-74.
YI D Y, SHEN Y B, LI Y F. *Computational Method* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002, 70-74. (in Chinese)
- [10] 齐国清,吕健. 正弦曲线拟合若干问题探讨[J]. 计算机工程与设计,2008, 29(14):3677-3680.
QI G Q, LV J. Investigation of sine wave fitting algorithms [J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, 29(14):3677-3680. (in Chinese)
- [11] 梁志国,朱济杰,孟晓风. 四参数正弦曲线拟合的一种收敛算法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(11):1513-1519.
LIANG ZH G, ZHU J J, MENG X F. Convergence algorithm of four-parameter sine wave curve-fit [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(11):1513-1519. (in Chinese)

作者简介:



杨会生(1982—),男,河北献县人,硕士,助理研究员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器光机结构及精密机械等方面的研究。E-mail: yanghuisheng@126.com