



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102519471 A

(43) 申请公布日 2012.06.27

(21) 申请号 201110409278.0

(22) 申请日 2011.12.08

(71) 申请人 北京控制工程研究所
地址 100190 北京市海淀区 2729 信箱

(72) 发明人 管乐鑫 魏春岭 黄翔宇 张斌
熊凯 亢淼

(74) 专利代理机构 中国航天科技专利中心
11009

代理人 安丽

(51) Int. Cl.

G01C 21/24 (2006.01)

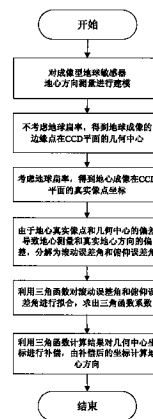
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 4 页

(54) 发明名称

基于三角函数拟合的成像型地球敏感器地球扁率补偿方法

(57) 摘要

基于三角函数拟合的成像型地球敏感器地球扁率补偿方法,首先对成像型地球敏感器的地心方向测量进行建模,不考虑地球扁率影响,由地球成像边缘点在 CCD 平面的几何中心坐标计算地心方向,考虑地球扁率影响后,地心成像的真实像点和几何中心存在偏差,导致地心测量矢量和真实矢量存在偏差,将偏差分解为滚动误差角和俯仰误差角,利用三角函数对滚动误差角和俯仰误差角进行拟合,求出三角函数相应的系数,然后利用三角函数的计算结果对几何中心坐标进行补偿,最后用补偿后的坐标计算地心方向。本发明方法操作简单,可以提供更为精确的地心方向测量信息。



1. 基于三角函数拟合的成像型地球敏感器地球扁率补偿方法,其特征在于步骤如下:
第一步,对成像型地球敏感器地心方向测量进行建模,公式如下

$$u_s = \frac{1}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + f}} \begin{bmatrix} -x_s \\ -y_s \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

第二步,先不考虑地球扁率,利用地球成像的边缘点在成像型地球敏感器 CCD 平面的坐标计算得到边缘点几何中心,将该几何中心点认为是地心在 CCD 平面的坐标,根据建模公式 (1) 计算得到地心方向 u_s ;

其中, f 为成像型地球敏感器透镜的焦距, (x_s, y_s) 为地心在 CCD 平面坐标系中的坐标;

第三步,考虑地球扁率影响,得到地心成像在 CCD 平面真实像点坐标 (x_e, y_e) ,将测量地心方向与真实地心方向比较,利用公式 (2) 构造滚动误差角 φ_m 和俯仰误差角 θ_m :

$$\begin{cases} \varphi_m = \arctan\left(\frac{x_s - x_e}{f}\right) \\ \theta_m = \arctan\left(\frac{(y_s - y_e)\cos\varphi_m}{f}\right) \end{cases} \quad (2)$$

第四步,通过三角函数公式 (3) 对上述滚动误差角 φ_m 和俯仰误差角 θ_m 进行拟合,求出三角函数系数 A_1 、 A_2 和 C_1 、 C_2 ,

$$\begin{cases} \varphi_a = A_1 \sin(2u) + C_1 \\ \theta_a = A_2 \sin(u) + C_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中 u 是近地点幅角和真近点角之和, φ_a 和 θ_a 为三角函数值;

第五步,利用公式 (3) 的计算结果 φ_a 和 θ_a ,对边缘点几何中心坐标进行补偿,利用公式 (4) 求出更接近地心真实像点坐标 (x_e, y_e)

$$\begin{cases} x_e = x_s - f * \tan(\varphi_a) \\ y_e = y_s - \frac{f}{\cos(\varphi_a)} * \tan(\theta_a) \end{cases} \quad (4)$$

第六步,由补偿后坐标 (x_e, y_e) 根据建模公式 (1) 计算,得到更精确的地心方向 u_e .

$$u_e = \frac{1}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + f}} \begin{bmatrix} -x_e \\ -y_e \\ f \end{bmatrix} \quad (5).$$

基于三角函数拟合的成像型地球敏感器地球扁率补偿方法

技术领域

[0001] 本发明属于航天光学遥感技术领域,涉及一种成像型地球敏感器地球扁率补偿方法,特别是一种基于三角函数拟合的成像型地球敏感器地球扁率补偿方法。

背景技术

[0002] 基于成像型地球敏感器和星敏感器进行自主导航是一种典型的天文导航方法。地球敏感器通过对地心矢量的测量,可以确定航天器的滚动和俯仰姿态;星敏感器对恒星观测得到惯性姿态;二者结合就可以确定航天器的位置。

[0003] 通常地球敏感器的测量模型中认为地球是标准的球体,而地球的实际形状近似为小扁率的椭球体,地球扁率的存在使地球敏感器测量值存在系统误差。目前,地球扁率修正方法主要是针对扫描式地球敏感器,如李捷在 1997 年第 15 卷第 4 期的航天控制上发表的论文“基于地球椭球特性的红外地球敏感器测量值的修正算法”,采用一阶修正算法对地球扁率误差进行了修正。

[0004] 成像型地球敏感器的基本工作原理是根据成像的边缘点集合对成像中心进行拟合。以往研究中往往忽略地球扁率,以标准圆或标准椭圆作为边缘拟合的模型,认为拟合后的几何中心就是地球中心在 CCD 平面的像点,利用该点计算得到地心方向矢量。由于地球形状并不是标准的球体,考虑地球扁率时,地球成像更加复杂,并不是简单的二次曲线,所以直接利用拟合后的几何中心计算出的矢量与真实地心矢量不一定重合。由于成像型地球敏感器和扫描式地球敏感器工作原理不同,所以地球扁率的补偿方法也有很大的不同。目前还尚未有关于成像型地球敏感器地球扁率的补偿方法。

发明内容

[0005] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供一种基于三角函数拟合的成像型地球敏感器地球扁率补偿方法,有效克服了地球扁率对地心测量的影响,提高了地心方向测量精度,进一步提高导航系统的精度。

[0006] 本发明的技术解决方案是:基于三角函数拟合的成像型地球敏感器地球扁率补偿方法,步骤如下:

[0007] 第一步,对成像型地球敏感器地心方向测量进行建模,公式如下

$$[0008] \quad u_s = \frac{1}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + f}} \begin{bmatrix} -x_s \\ -y_s \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0009] 第二步,先不考虑地球扁率,利用地球成像的边缘点在成像型地球敏感器 CCD 平面的坐标计算得到边缘点几何中心,将该几何中心点认为是地心在 CCD 平面的坐标,根据建模公式 (1) 计算得到地心方向 u_s ;

[0010] 其中, f 为成像型地球敏感器透镜的焦距, (x_s, y_s) 为地心在 CCD 平面坐标系中的

坐标；

[0011] 第三步,考虑地球扁率影响,得到地心成像在 CCD 平面真实像点坐标 (x_e, y_e) ,将测量地心方向与真实地心方向比较,利用公式 (2) 构造滚动误差角 φ_m 和俯仰误差角 θ_m :

[0012]

$$\begin{cases} \varphi_m = \arctan\left(\frac{x_s - x_e}{f}\right) \\ \theta_m = \arctan\left(\frac{(y_s - y_e)\cos\varphi_m}{f}\right) \end{cases} \quad (2)$$

[0013] 第四步,通过三角函数公式 (3) 对上述滚动误差角 φ_m 和俯仰误差角 θ_m 进行拟合,求出三角函数系数 A_1 、 A_2 和 C_1 、 C_2 ,

[0014]

$$\begin{cases} \varphi_a = A_1 \sin(2u) + C_1 \\ \theta_a = A_2 \sin(u) + C_2 \end{cases} \quad (3)$$

[0015] 其中 u 是近地点幅角和真近点角之和, φ_a 和 θ_a 为三角函数值；

[0016] 第五步,利用公式 (3) 的计算结果 φ_a 和 θ_a ,对边缘点几何中心坐标进行补偿,利用公式 (4) 求出更接近地心真实像点坐标 (x_e, y_e)

[0017]

$$\begin{cases} x_e = x_s - f * \tan(\varphi_a) \\ y_e = y_s - \frac{f}{\cos(\varphi_a)} * \tan(\theta_a) \end{cases} \quad (4)$$

[0018] 第六步,由补偿后坐标 (x_e, y_e) 根据建模公式 (1) 计算,得到更精确的地心方向 u_e

$$[0019] \quad u_e = \frac{1}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + f}} \begin{bmatrix} -x_e \\ -y_e \\ f \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0020] 本发明与现有技术相比的优点在于:本发明将地球扁率对成像型地球敏感器地心方向测量的影响简化为地球成像边缘点的几何中心坐标与地心真实像点坐标的差异,将测量地心方向与真实地心方向比较,构造了滚动误差角和俯仰误差角,用三角函数进行拟合得到三角函数系数,再用三角函数计算结果对几何中心坐标进行补偿,从而得到更接近地心真实像点的坐标,可以得到更精确的地心方向测量,有效克服了地球扁率对地心测量的影响,进一步提高了导航精度;而且操作简单,易于实现。

附图说明

[0021] 图 1 为本发明方法的流程图；

[0022] 图 2 为成像型地球敏感器测量坐标系示意图；

[0023] 图 3 为地球椭球面与地平平面示意图；

[0024] 图 4 为地球敏感器成像几何关系；

[0025] 图 5 为滚动角误差和俯仰误差角的示意图；

[0026] 图 6 为补偿前后成像几何中心与地心真实像点的坐标比较图；

[0027] 图 7 为补偿前后导航滤波误差比较图。

具体实施方式

[0028] 如图 1 所示,本发明的具体实现过程如下：

[0029] (1) 定义坐标系:地心惯性坐标系 $(O-X_i Y_i Z_i)$, 原点位于地球质心, XY 面与赤道面重合, X_i 轴正半轴指向春分点, Z_i 轴以指向北极方向为正, Y_i 轴与 XZ 成右手坐标系。成像型地球传感器测量坐标系 $(O-X_s Y_s Z_s)$, 原点位于理想光学透镜的中心, Z_s 轴沿传感器光轴方向, X_s 轴垂直于光轴并与 CCD 行扫描方向一致, Y_s 轴与 CCD 列扫描方向一致, 且构成右手坐标系。CCD 平面坐标系 $(O-X_{\text{ccd}} Y_{\text{ccd}} Z_{\text{ccd}})$, 原点位于 CCD 焦平面中心, X 轴、Y 轴平行于传感器坐标系的 X 与 Y 轴, 且以像素为单位量测坐标大小。

[0030] (2) 对成像型地球传感器地心方向测量进行建模, 图 2 为成像型地球传感器测量坐标系示意图, 由地心在 CCD 平面坐标系中的坐标 (x_s, y_s) , 可以计算得到地心方向在传感器测量坐标系下的表示：

$$[0031] \quad u_s = \frac{1}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -x_s \\ -y_s \\ f \end{bmatrix}$$

[0032] 其中, f 为成像型地球传感器透镜的焦距, (x_s, y_s) 为地心在 CCD 平面坐标系中的坐标；

[0033] (3) 将地球形状描述为绕地球极轴形成的旋转椭球, 其表面 E 在地心赤道惯性系中的方程为

$$[0034] \quad f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2(1 + 2\varepsilon) - R_u^2 = 0$$

[0035] 其中 ε 为地球扁率, R_u 为地球椭球在赤道的半径, x, y, z 分别是地球表面点在惯性系 X、Y、Z 的坐标值。

[0036] 设卫星 S 在地球惯性系 X、Y、Z 的坐标值分别为 (u, v, w) , 从 S 向地球引切线矢量 $\vec{L} = \vec{SP}$, 与 E 曲面相切于 P (x, y, z) 点, \vec{L} 与 P 点处的曲面法线矢量 \vec{n} 正交, 得到地平平面方程, 记作平面 Π

$$[0037] \quad g(x, y, z) = ux + vy + (1 + 2\varepsilon)wz - R_u^2 = 0$$

[0038] 如图 3 所示, Π 平面与 E 曲面的交线即为卫星上观测到的地球轮廓线, 轮廓线上的点就是地球成像的原像点。由轮廓线上的点在 CCD 平面中的像点坐标, 利用边缘拟合算法求出几何中心坐标。当忽略地球扁率认为地球为标准球体时, 零姿态下地球成像为标准圆形, 几何中心与地心真实像点重合。

[0039] (4) 先不考虑地球扁率, 利用地球成像的边缘点在成像型地球传感器 CCD 平面的坐标计算得到边缘点几何中心, 将该几何中心点认为是地心在 CCD 平面的坐标, 根据建模公式 (1) 计算得到地心方向 u_s ；

[0040] (5) 考虑地球扁率影响, 得到地心成像在 CCD 平面真实像点坐标 (x_e, y_e) , 与成像边缘点几何中心并不重合, 传感器成像的几何关系如图 4 所示。

[0041] 设 (x_s, y_s) 为拟合的几何中心, (x_e, y_e) 为真实地心像点, f 为传感器透镜的焦距, 将测量地心方向和真实地心方向比较, 利用公式 2 构造滚动误差角 φ_m 和俯仰误差角 θ_m

[0042]

$$\begin{cases} \varphi_m = \arctan\left(\frac{x_s - x_e}{f}\right) \\ \theta_m = \arctan\left(\frac{(y_s - y_e) \cos \varphi_m}{f}\right) \end{cases}$$

[0043] (6) φ_m 、 θ_m 的变化曲线近似为三角函数, 利用三角函数对上述滚动误差角 φ_m 和俯仰误差角 θ_m 两个误差角进行拟合, 三角函数为公式 3

[0044]

$$\begin{cases} \varphi_a = A_1 \sin(2u) + C_1 \\ \theta_a = A_2 \sin(u) + C_2 \end{cases}$$

[0045] 其中 u 是近地点幅角和真近点角之和。

[0046] (7) 利用公式 (3) 的计算结果 φ_a 和 θ_a , 对边缘点几何中心坐标进行补偿, 利用公式 (4) 求出更接近地心真实像点坐标 (x_e, y_e)

[0047]

$$\begin{cases} x_e = x_s - f * \tan(\varphi_a) \\ y_e = y_s - \frac{f}{\cos(\varphi_a)} * \tan(\theta_a) \end{cases}$$

[0048] (8) 由补偿后坐标 (x_e, y_e) 根据建模公式 (1) 计算, 得到更精确的地心方向 u_e 。由补偿后坐标计算地心方向

$$[0049] \quad u_e = \frac{1}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + f}} \begin{bmatrix} -x_e \\ -y_e \\ f \end{bmatrix}$$

[0050] 实施例

[0051] 为了更清楚的表明本方法的优点, 在此进行数学仿真。仿真条件: 卫星飞行在约 500km 的圆轨道上。卫星对地零姿态。图 5a 为地球扁率引起的真实滚动角误差角和三角函数拟合得到的滚动误差角, 图 5b 为真实滚动误差角与三角函数拟合的滚动误差角的差值, 图 5c 为地球扁率引起的真实俯仰角误差角和三角函数拟合得到的俯仰误差角, 图 5d 为真实俯仰误差角与三角函数拟合的俯仰误差角的差值。利用三角函数计算结果对计算得到边缘点几何中心坐标进行补偿, 图 6a 为补偿前后几何中心和地心真实像点间的 X 轴坐标误差比较, 图 6b 为补偿前后几何中心和地心真实像点间的 Y 轴坐标误差比较, 可以看出经过补偿后的几何中心与真实地心像点的坐标误差明显减小。图 7a 为利用补偿前后的地心方向用来导航滤波的位置误差结果比较, 图 7b 为利用补偿前后的地心方向用来导航滤波的速度误差结果比较。从仿真结果图可以看出, 采用本发明方法对成像型地球敏感器地球扁率补偿后, 有效提高了地心方向的测量精度, 从而提高卫星导航精度。

[0052] 本发明说明书中未作详细描述的内容属本领域技术人员的公知技术。

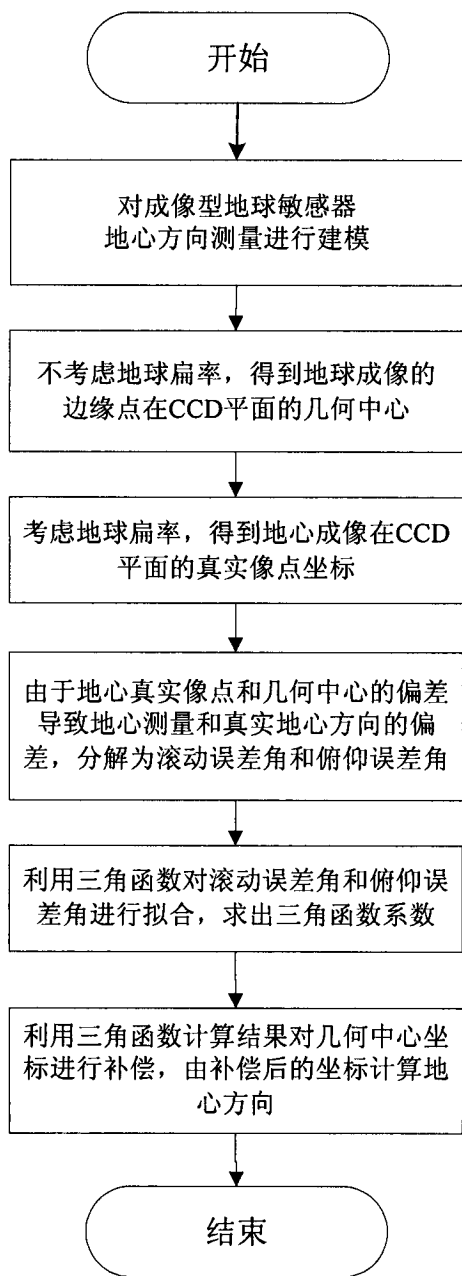


图 1

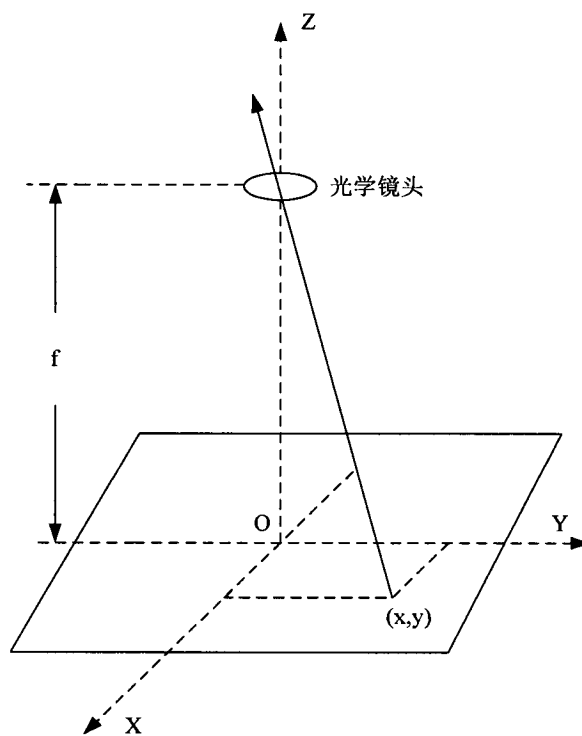


图 2

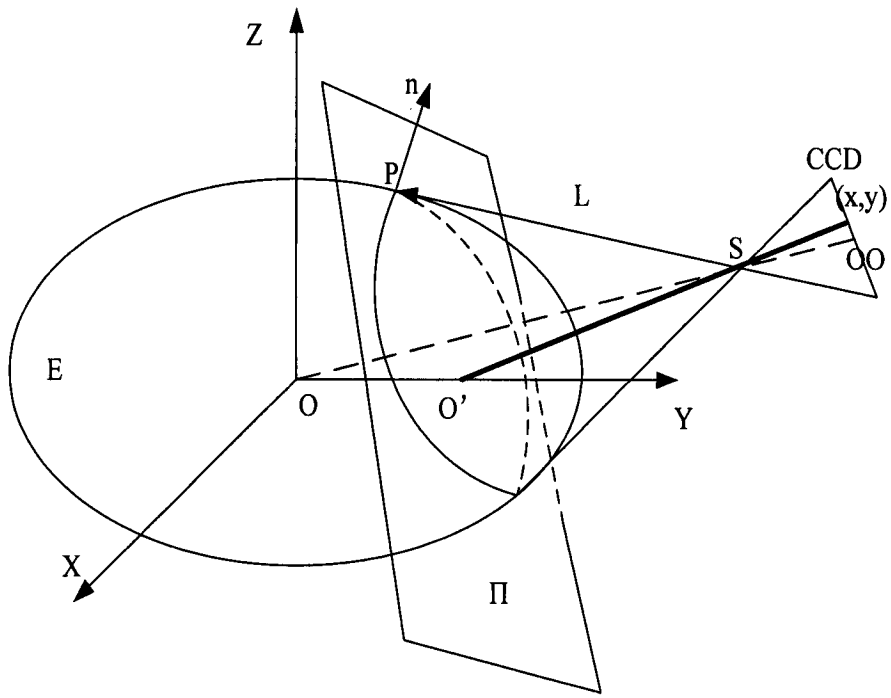


图 3

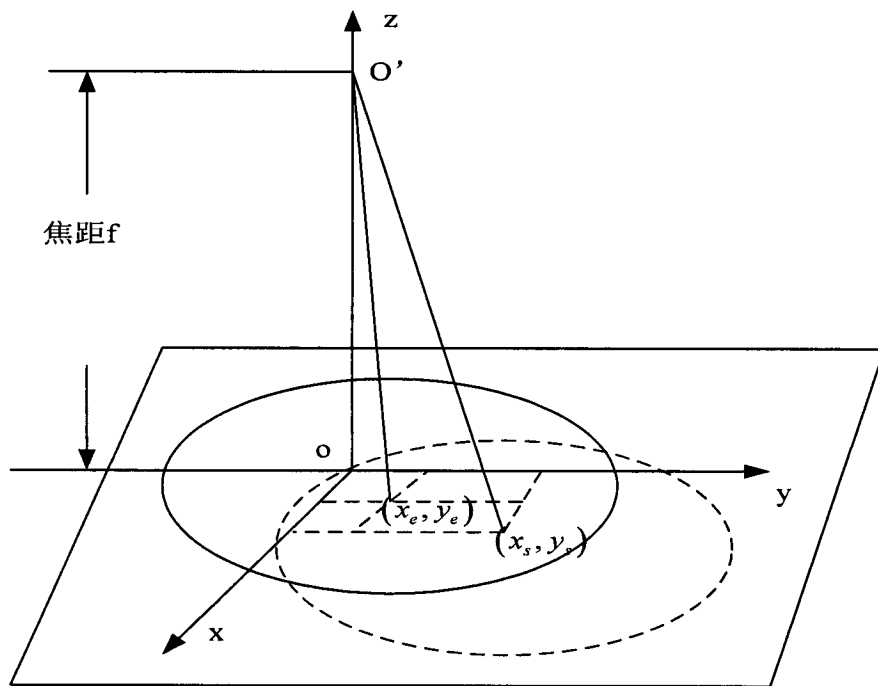


图 4

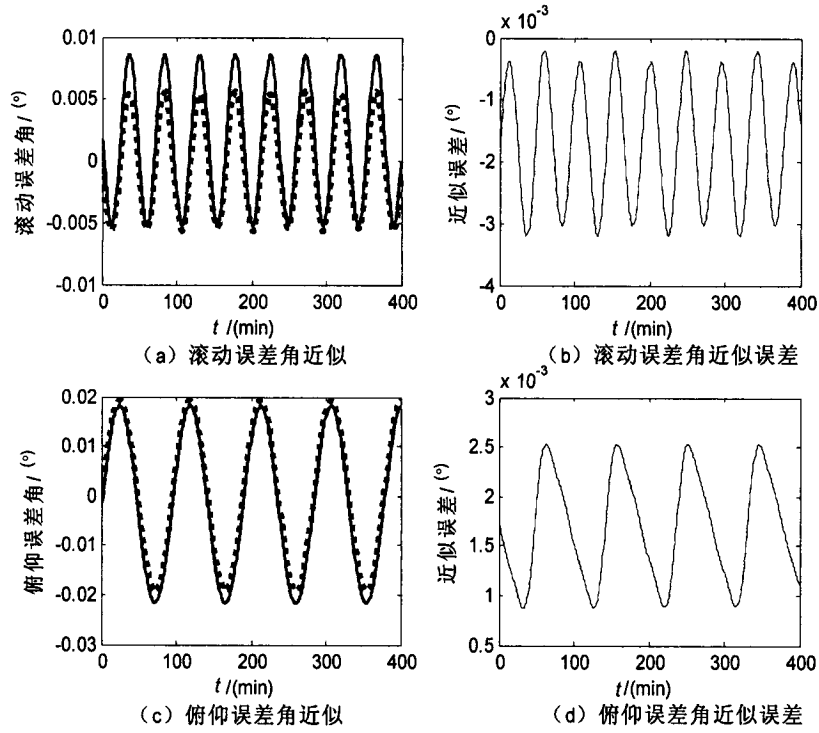


图 5

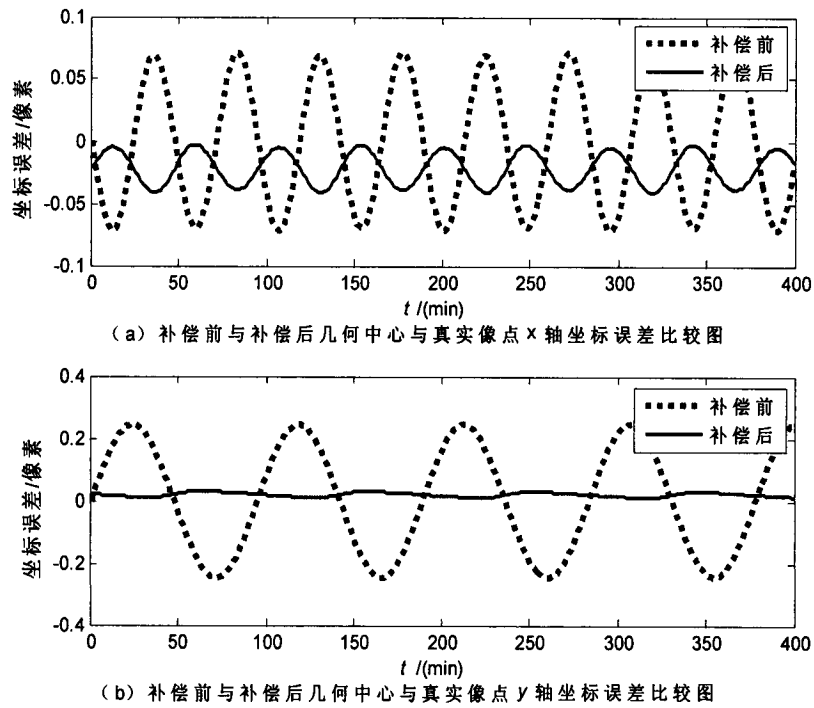


图 6

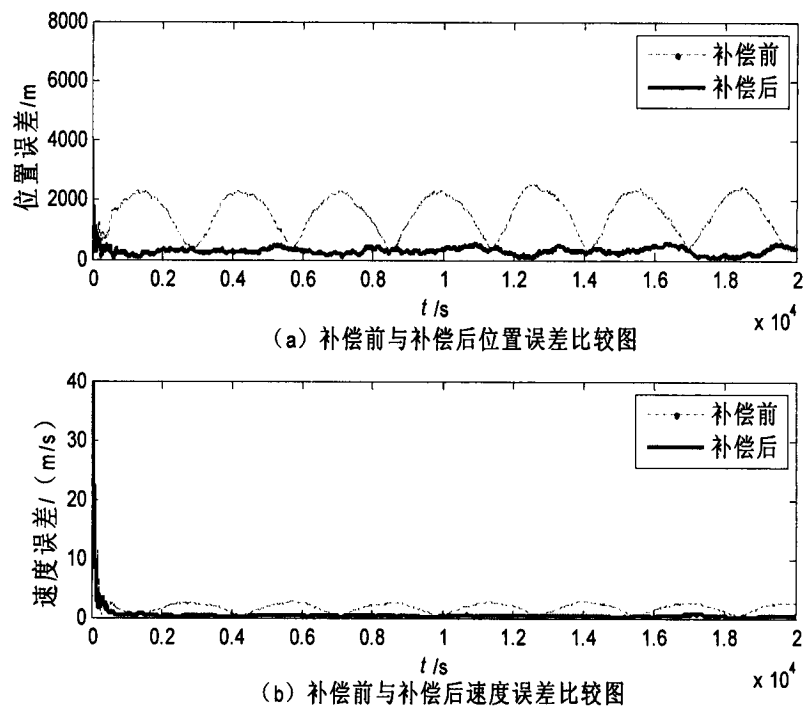


图 7