



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102878989 B

(45) 授权公告日 2014. 12. 17

(21) 申请号 201210355302. 1

CN 102364311 A, 2012. 02. 29,

(22) 申请日 2012. 09. 21

JP 特開平 11-230756 A, 1999. 08. 27,

CA 2733940 A1, 2010. 02. 18,

(73) 专利权人 航天东方红卫星有限公司

地址 100094 北京市 5616 信箱

审查员 赵孟丹

(72) 发明人 王海明 赵伟 孙峻 杨芳 赵键

雷军刚 霍红庆 罗世魁

(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 19/56 (2012. 01)

G01C 21/16 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102023051 A, 2011. 04. 20,

CN 102353812 A, 2012. 02. 15,

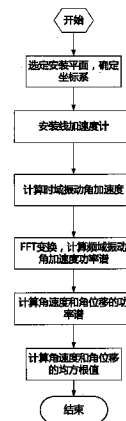
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法

(57) 摘要

一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法,步骤为(1) 在被测对象上选定一个能够代表被测对象的角振动特征的安装平面;(2) 在安装平面上选择矩形区域并且安装4个线加速度计;(3) 采集4个线加速度计的时域数据,在星上经过放大和滤波处理后,下载到地面;(4) 计算被测对象绕X轴、Y轴、Z轴三个轴向的振动角加速度;(5) 计算振动角加速度均方根值、振动角速度均方根值和振动角位移均方根值,即完成了三轴角振动的测量。采用本发明方法,既降低了传感器对卫星安装平面的要求和卫星资源的占用,又使得传感器安装精度更加容易保证,实现方式更为简单。



1. 一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法,其特征在于步骤如下:

(1) 在被测对象上选定一个安装平面并且确定坐标系,该平面能够代表被测对象的角振动特征,坐标系的原点、X 轴和 Y 轴均位于该安装平面内,被测对象滚动轴方向为 X 轴,俯仰轴方向为 Y 轴, Z 轴与 X 轴、Y 轴成右手坐标系,所述被测对象是指卫星或者星上有效载荷;

(2) 在安装平面上选择矩形区域,在矩形四个顶角分别安装四个线加速度计,其中第一线加速度计为三轴线加速度计;第二和第三线加速度计为两轴线加速度计,第二线加速度计的两个轴向分别指向 Y 向和 Z 向,第三线加速度计的两个轴向分别指向 X 向和 Z 向;第四线加速度计为单轴加速度计,其轴向指向 Z 向,所述矩形区域的边与 X 轴、Y 轴平行;

(3) 采集 4 个线加速度计的时域数据,在星上经过放大和滤波处理后,下传到地面;

(4) 通过公式
$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_{1x} &= \frac{c_z - a_z}{La} & \ddot{\theta}_{2x} &= \frac{d_z - b_z}{La} \\ \ddot{\theta}_{1y} &= \frac{b_z - a_z}{Lb} & \ddot{\theta}_{2y} &= \frac{d_z - c_z}{Lb} \\ \ddot{\theta}_{1z} &= \frac{c_x - a_x}{La} & \ddot{\theta}_{2z} &= \frac{b_y - a_y}{La} \end{aligned} \right\} \text{计算得到两组被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴}$$

三个轴向的振动角加速度 $\ddot{\theta}_{1x}$ 、 $\ddot{\theta}_{1y}$ 、 $\ddot{\theta}_{1z}$ 与 $\ddot{\theta}_{2x}$ 、 $\ddot{\theta}_{2y}$ 、 $\ddot{\theta}_{2z}$, 之后再通过公式
$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_x &= \frac{\ddot{\theta}_{1x} + \ddot{\theta}_{2x}}{2} \\ \ddot{\theta}_y &= \frac{\ddot{\theta}_{1y} + \ddot{\theta}_{2y}}{2} \\ \ddot{\theta}_z &= \frac{\ddot{\theta}_{1z} + \ddot{\theta}_{2z}}{2} \end{aligned} \right\} \text{求其}$$

平均值得到 $\ddot{\theta}_x$ 、 $\ddot{\theta}_y$ 和 $\ddot{\theta}_z$,

式中: a_x 、 a_y 、 a_z 分别为第一线加速度计的 X 向、Y 向、Z 向加速度, b_y 、 b_z 分别为第二线加速度计的 Y 向、Z 向加速度, c_x 、 c_z 分别为第三线加速度计的 X 向、Z 向加速度, d_z 为第四线加速度计的 Z 向加速度; La 、 Lb 分别为四个线加速度计组成的矩形沿 Y 轴和 X 轴的边长;

(5) 根据步骤 (4) 中得到的 $\ddot{\theta}_x$ 、 $\ddot{\theta}_y$ 和 $\ddot{\theta}_z$ 计算振动角加速度均方根值、振动角速度均方根值和振动角位移均方根值,即完成了三轴角振动的测量;

所述步骤 (5) 中根据 $\ddot{\theta}_x$ 、 $\ddot{\theta}_y$ 和 $\ddot{\theta}_z$ 计算振动角加速度均方根值、振动角速度均方根值和振动角位移均方根值,按照如下步骤进行:

(5.1) 通过公式
$$\left. \begin{aligned} B_x(i\Delta f) &= \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{X}(i\Delta f) \cdot X(i\Delta f)} \\ B_y(i\Delta f) &= \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{Y}(i\Delta f) \cdot Y(i\Delta f)} \\ B_z(i\Delta f) &= \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{Z}(i\Delta f) \cdot Z(i\Delta f)} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2 \text{ 计算被测对象绕}$$

X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度，

其中， i 为功率谱密度值的序号， N 为采样总数；

Δf 为频率间隔，

$B_x(i \Delta f)$ 、 $B_y(i \Delta f)$ 和 $B_z(i \Delta f)$ 为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的角加速度功率谱密度值，

$X(i \Delta f)$ 、 $Y(i \Delta f)$ 和 $Z(i \Delta f)$ 为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的 FFT 函数；

$\bar{X}(i\Delta f)$ 、 $\bar{Y}(i\Delta f)$ 和 $\bar{Z}(i\Delta f)$ 依次为与 $X(i \Delta f)$ 、 $Y(i \Delta f)$ 和 $Z(i \Delta f)$ 的共轭复数；

(5.2) 根据步骤 (5.1) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_x(i \Delta f)$ 、 $B_y(i \Delta f)$ 和 $B_z(i \Delta f)$ ，由公式

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_x(i\Delta f)} \\ \ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_y(i\Delta f)} \\ \ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_z(i\Delta f)} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角加速度均方根

值 $\ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ ；

其中： $\ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个

轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角加速度均方根值；

(5.3) 根据步骤 (5.1) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_x(i \Delta f)$ 、 $B_y(i \Delta f)$ 和 $B_z(i \Delta f)$ ，由公式

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_x^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \\ \dot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_y^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \\ \dot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_z^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角速度均方根值

$\dot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\dot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\dot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ ；

其中： $\dot{\theta}_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\dot{\theta}_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\dot{\theta}_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角速度均方根值；

(5.4) 根据步骤 (5.1) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_X(i \Delta f)$ 、 $B_Y(i \Delta f)$ 和 $B_Z(i \Delta f)$ ，由公式

$$\left. \begin{aligned} \theta_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_X^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \\ \theta_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Y^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \\ \theta_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Z^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角位移均方根值 $\theta_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\theta_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\theta_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ ；

其中： $\theta_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\theta_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\theta_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角位移均方根值。

一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种航天应用的高精度角振动方法,特别是一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法。

背景技术

[0002] 角振动测量与控制是实现卫星高精度姿态指向及光学遥感载荷高分辨率成像的前提与基础。角振动幅值过大时将可能对光学遥感卫星的相机调制传递函数(MTF)、图像分辨率、图像几何变形和地理位置测定等带来明显影响。

[0003] 目前可以用于直接测量角振动的常用方法是利用陀螺、星敏感器和角速度传感器,目前光纤陀螺的测量精度可以达到 $0.05''/s$,星敏感器差分估计航天器的角速度,测量精度能够达到 $0.01^\circ/s$ 。目前这两者的主要测量频带为低频段,一般低于 10Hz 。虽然近年来,激光陀螺和光纤陀螺取得了较快的发展,测量频带可达 500Hz ,但是产品的成熟度还不够。

[0004] 角速度或位移传感器是基于等离子体特性的磁流体(magneto_hydro_dynamic, MHD)动力学理论的角速度传感器,其研究始于上世纪六七十年代。世界上成功应用的产品主要有美国ATA公司的ARS系列。传感器输出信号可以通过电路或软件处理为角加速度、角速度或角位移数据。其中ARS-12型传感器是最灵敏的惯性角振动传感器,噪声当量角好于 $35\text{nrad}(0.007\text{arcsec})$,带宽 $1\sim 1000\text{Hz}$ 。日本在其先进陆地观测卫星(ALOS)采用了角位移传感器(ADS)进行了角位移测量。其ADS传感器采用了基于磁流体动力学原理的宽频角速率传感器(Angular Rate Sensor, ARS)。它使用三只ARS-12G角速率传感器、以及可选的电源/信号调理和温度测量电路构成Dynapak 12或Dynapak 14传感器包。能够测量 $2\text{Hz}\sim 500\text{Hz}$ 内的角位移变化,据称其在 500Hz 处的测量精度达到了 $0.01\text{arcsec}(\text{rms})$ 。但由于ARS是基于角速率测量原理的传感器,因此,只能通过对时域采集的角速率等间隔离散数据实时作数值积分得到角位移。

[0005] 在国内,目前主要通过传统的姿态传感器测量卫星在轨的姿态角速度等参数,还没有经历飞行验证的宽频段测量角振动的成熟产品。而姿态传感器受其原理所限,只能进行低频段测量($< 10\text{Hz}$),无法满足测量要求。

发明内容

[0006] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供了一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法。

[0007] 本发明的技术解决方案是:

[0008] 一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法,步骤如下:

[0009] (1) 在被测对象上选定一个安装平面并且确定坐标系,该平面能够代表被测对象的角振动特征,坐标系的原点、X轴和Y轴均位于该安装平面内,被测对象滚动轴方向为X轴,俯仰轴方向为Y轴,Z轴与X轴、Y轴成右手坐标系,所述被测对象是指卫星或者星上有

效载荷；

[0010] (2) 在安装平面上选择矩形区域，在矩形四个顶角分别安装四个线加速度计，其中第一线加速度计为三轴线加速度计；第二和第三线加速度计为两轴线加速度计，第二线加速度计的两个轴向分别指向 Y 向和 Z 向，第三线加速度计的两个轴向分别指向 X 向和 Z 向；第四线加速度计为单轴加速度计，其轴向指向 Z 向，所述矩形区域的边与 X 轴、Y 轴平行；

[0011] (3) 采集 4 个线加速度计的时域数据，在星上经过放大和滤波处理后，下载到地面；

[0012] (4) 通过公式
$$\left. \begin{array}{l} \ddot{\theta}_{1x} = \frac{c_z - a_z}{La} \\ \ddot{\theta}_{1y} = \frac{b_z - a_z}{Lb} \\ \ddot{\theta}_{1z} = \frac{c_x - a_x}{La} \end{array} \right\} \text{和} \left. \begin{array}{l} \ddot{\theta}_{2x} = \frac{d_z - b_z}{La} \\ \ddot{\theta}_{2y} = \frac{d_z - c_z}{Lb} \\ \ddot{\theta}_{2z} = \frac{b_y - a_y}{La} \end{array} \right\} \text{计算得到两组被测对象绕 X}$$

轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度 $\ddot{\theta}_{1x}$ 、 $\ddot{\theta}_{1y}$ 、 $\ddot{\theta}_{1z}$ 与 $\ddot{\theta}_{2x}$ 、 $\ddot{\theta}_{2y}$ 、 $\ddot{\theta}_{2z}$ ，之后再通过公式

$$\left. \begin{array}{l} \ddot{\theta}_x = \frac{\ddot{\theta}_{1x} + \ddot{\theta}_{2x}}{2} \\ \ddot{\theta}_y = \frac{\ddot{\theta}_{1y} + \ddot{\theta}_{2y}}{2} \\ \ddot{\theta}_z = \frac{\ddot{\theta}_{1z} + \ddot{\theta}_{2z}}{2} \end{array} \right\} \text{求其平均值得到} \ddot{\theta}_x、\ddot{\theta}_y \text{和} \ddot{\theta}_z，$$

[0013] 式中： a_x 、 a_y 、 a_z 分别为第一线加速度计的 X 向、Y 向、Z 向加速度， b_y 、 b_z 分别为第二线加速度计的 Y 向、Z 向加速度， c_x 、 c_z 分别为第三线加速度计的 X 向、Z 向加速度， d_z 为第四线加速度计的 Z 向加速度； La 、 Lb 分别为四个线加速度计组成的矩形沿 Y 轴和 X 轴的边长；

[0014] (5) 根据步骤 (4) 中得到的 $\ddot{\theta}_x$ 、 $\ddot{\theta}_y$ 和 $\ddot{\theta}_z$ 计算振动角加速度均方根值、振动角速度均方根值和振动角位移均方根值，即完成了三轴角振动的测量。

[0015] 所述步骤 (5) 中根据 $\ddot{\theta}_x$ 、 $\ddot{\theta}_y$ 和 $\ddot{\theta}_z$ 计算振动角加速度均方根值、振动角速度均方根值和振动角位移均方根值，按照如下步骤进行：

[0016] (5.1) 通过公式
$$\left. \begin{array}{l} B_x(i\Delta f) = \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{X}(i\Delta f) \cdot X(i\Delta f)} \\ B_y(i\Delta f) = \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{Y}(i\Delta f) \cdot Y(i\Delta f)} \\ B_z(i\Delta f) = \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{Z}(i\Delta f) \cdot Z(i\Delta f)} \end{array} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2 \text{ 计算被测对}$$

象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度，

[0017] 其中， i 为功率谱密度值的序号， N 为采样总数；

[0018] Δf 为频率间隔,

[0019] $B_x(i \Delta f)$ 、 $B_y(i \Delta f)$ 和 $B_z(i \Delta f)$ 为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的角加速度功率谱密度值,

[0020] $X(i \Delta f)$ 、 $Y(i \Delta f)$ 和 $Z(i \Delta f)$ 为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的 FFT 函数;

[0021] $\bar{X}(i\Delta f)$ 、 $\bar{Y}(i\Delta f)$ 和 $\bar{Z}(i\Delta f)$ 依次为与 $X(i \Delta f)$ 、 $Y(i \Delta f)$ 和 $Z(i \Delta f)$ 的共轭复数;

[0022] (5.2) 根据步骤 (5.1) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_x(i \Delta f)$ 、 $B_y(i \Delta f)$ 和 $B_z(i \Delta f)$, 由公式

$$[0023] \left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_x(i\Delta f)} \\ \ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_y(i\Delta f)} \\ \ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_z(i\Delta f)} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

[0024] 计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角加速度均

方根值 $\ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$;

[0025] 其中: $\ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴

三个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角加速度均方根值;

[0026] (5.3) 根据步骤 (5.1) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_x(i \Delta f)$ 、 $B_y(i \Delta f)$ 和 $B_z(i \Delta f)$, 由公式

$$[0027] \left. \begin{aligned} \dot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_x^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \\ \dot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_y^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \\ \dot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_z^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

[0028] 计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角速度均方

根值 $\dot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\dot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\dot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 。

[0029] 其中： $\dot{\theta}_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\dot{\theta}_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\dot{\theta}_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴

三个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角速度均方根值；

[0030] (5.4) 根据步骤 (5.1) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_X(i \Delta f)$ 、 $B_Y(i \Delta f)$ 和 $B_Z(i \Delta f)$ ，由公式

$$\left. \begin{aligned}
 \theta_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_X^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \\
 \theta_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Y^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \\
 \theta_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Z^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}}
 \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

[0032] 计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角位移均方根值 $\theta_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\theta_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\theta_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 。

[0033] 其中： $\theta_{X_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\theta_{Y_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\theta_{Z_RMS}|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角位移均方根值。

[0034] 本发明与现有技术相比的优点在于：

[0035] (1) 相对采用陀螺、星敏感器和角速度传感器等角振动直接测量手段，线加速度计技术更为简单、成熟，并已经在工业领域广泛应用，仅需要对测量数据进行一系列数据处理即可得到角振动数据；

[0036] (2) 本发明所用的线加速度计采用共面布局，所有加速度计均布置在一个平面上，安装的距离精度和平行度通过平面加工即可保证，对卫星要求较低；

[0037] (3) 本发明仅需要四个线加速度计共 8 个通道的加速度数据，即可获得两组角振动数据，通过求平均值的方式得到角振动数据，提高了角振动测量的准确性，且数据量较少，在对地传输时占用卫星资源较少。

[0038] (4) 本发明获取角加速度时域数据采用差分的方式能够消除环境噪声的影响，在后续通过 FFT 变换获取角加速度频域数据，先后通过两次积分获得振动角速度数据和角位移数据，频谱泄露少。

附图说明

[0039] 图 1 是本发明加速度计共面安装布局图。

[0040] 图 2 是本发明采用加速度计共面安装进行角振动测量的系统组成图。

[0041] 图 3 是本发明方法流程图。

具体实施方式

[0042] 下面结合附图对本发明做进一步说明。

[0043] 本发明提供了一种利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法，星载线加速

度计就是具有空间环境适应性的、进行线性振动加速度测量的、具有一定测量精度的传感器。三轴角振动测量的方法包括了加速度计在卫星或有效载荷上的空间布局实现方法、以及采用线加速度计进行角振动计算的实现方法,本发明利用星载线加速度计进行三轴角振动测量的方法,规定了传感器在星上的构型布局实现方式,解决了传感器复杂构型布局实现方式的不便。采用本方法,既降低了传感器对卫星安装平面的要求和卫星资源的占用,又使得传感器安装精度更加容易保证,实现方式更为简单。

[0044] 如图 3 所示,步骤如下:

[0045] (1) 在被测对象上选定一个安装平面并且确定坐标系,该平面能够代表被测对象的角振动特征,坐标系的原点、X 轴和 Y 轴均位于该安装平面内,被测对象滚动轴方向为 X 轴,俯仰轴方向为 Y 轴,Z 轴与 X 轴、Y 轴成右手坐标系,所述被测对象是指卫星或者星上有效载荷;

[0046] (2) 在安装平面上选择矩形区域,在矩形四个顶角分别安装四个线加速度计,如图 1 所示,其中第一线加速度计为三轴线加速度计;第二和第三线加速度计为两轴线加速度计,第二线加速度计的两个轴向分别指向 Y 向和 Z 向,第三线加速度计的两个轴向分别指向 X 向和 Z 向;第四线加速度计为单轴加速度计,其轴向指向 Z 向,所述矩形区域的边与 X 轴、Y 轴平行;

[0047] (3) 如图 2 所示,采集 4 个线加速度计的时域数据,在星上经过放大和滤波处理后,下传到地面;

[0048] (4) 通过公式
$$\left. \begin{array}{l} \ddot{\theta}_{1x} = \frac{c_z - a_z}{La} \\ \ddot{\theta}_{1y} = \frac{b_z - a_z}{Lb} \\ \ddot{\theta}_{1z} = \frac{c_x - a_x}{La} \end{array} \right\} \text{和} \left. \begin{array}{l} \ddot{\theta}_{2x} = \frac{d_z - b_z}{La} \\ \ddot{\theta}_{2y} = \frac{d_z - c_z}{Lb} \\ \ddot{\theta}_{2z} = \frac{b_y - a_y}{La} \end{array} \right\} \text{计算得到两组被测对象绕 X}$$

轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度 $\ddot{\theta}_{1x}$ 、 $\ddot{\theta}_{1y}$ 、 $\ddot{\theta}_{1z}$ 与 $\ddot{\theta}_{2x}$ 、 $\ddot{\theta}_{2y}$ 、 $\ddot{\theta}_{2z}$,之后再通过公式

$$\left. \begin{array}{l} \ddot{\theta}_x = \frac{\ddot{\theta}_{1x} + \ddot{\theta}_{2x}}{2} \\ \ddot{\theta}_y = \frac{\ddot{\theta}_{1y} + \ddot{\theta}_{2y}}{2} \\ \ddot{\theta}_z = \frac{\ddot{\theta}_{1z} + \ddot{\theta}_{2z}}{2} \end{array} \right\} \text{求其平均值得到} \ddot{\theta}_x、\ddot{\theta}_y \text{和} \ddot{\theta}_z,$$

[0049] 式中: a_x 、 a_y 、 a_z 分别为第一线加速度计的 X 向、Y 向、Z 向加速度, b_y 、 b_z 分别为第二线加速度计的 Y 向、Z 向加速度, c_x 、 c_z 分别为第三线加速度计的 X 向、Z 向加速度, d_z 为第四线加速度计的 Z 向加速度; La 、 Lb 分别为四个线加速度计组成的矩形沿 Y 轴和 X 轴的边长;

[0050] (5) 根据步骤 (4) 中得到的 $\ddot{\theta}_x$ 、 $\ddot{\theta}_y$ 和 $\ddot{\theta}_z$ 计算振动角加速度均方根值、振动角速度均

方根值和振动角位移均方根值,即完成了三轴角振动的测量。

[0051] 具体按照如下步骤进行:

$$[0052] \quad \left. \begin{aligned} B_X(i\Delta f) &= \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{X}(i\Delta f) \cdot X(i\Delta f)} \\ B_Y(i\Delta f) &= \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{Y}(i\Delta f) \cdot Y(i\Delta f)} \\ B_Z(i\Delta f) &= \sqrt{\frac{2h}{N} \bar{Z}(i\Delta f) \cdot Z(i\Delta f)} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2 \text{ 计算被测对象}$$

绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度,

[0053] 其中, i 为功率谱密度值的序号, N 为采样总数;

[0054] Δf 为频率间隔,

[0055] $B_X(i\Delta f)$ 、 $B_Y(i\Delta f)$ 和 $B_Z(i\Delta f)$ 为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i\Delta f$ 处的角加速度功率谱密度值,

[0056] $X(i\Delta f)$ 、 $Y(i\Delta f)$ 和 $Z(i\Delta f)$ 为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i\Delta f$ 处的 FFT 函数;

[0057] $\bar{X}(i\Delta f)$ 、 $\bar{Y}(i\Delta f)$ 和 $\bar{Z}(i\Delta f)$ 依次为与 $X(i\Delta f)$ 、 $Y(i\Delta f)$ 和 $Z(i\Delta f)$ 的共轭复数;

[0058] (b) 根据步骤 (a) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_X(i\Delta f)$ 、 $B_Y(i\Delta f)$ 和 $B_Z(i\Delta f)$, 由公式

$$[0059] \quad \left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_X(i\Delta f)} \\ \ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_Y(i\Delta f)} \\ \ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} B_Z(i\Delta f)} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

[0060] 计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i\Delta f$ 处的振动角加速度均

方根值 $\ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$;

[0061] 其中: $\ddot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\ddot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\ddot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴

三个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角加速度均方根值;

[0062] (c) 根据步骤 (a) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_X(i\Delta f)$ 、 $B_Y(i\Delta f)$ 和 $B_Z(i\Delta f)$, 由公式

$$[0063] \quad \left. \begin{aligned} \dot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_X^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \\ \dot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Y^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \\ \dot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Z^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^2}} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

[0064] 计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角速度均方

根值 $\dot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\dot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\dot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 。

[0065] 其中： $\dot{\theta}_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\dot{\theta}_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\dot{\theta}_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三

个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角速度均方根值；

[0066] (d) 根据步骤 (a) 中计算得到的被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的振动角加速度功率谱密度 $B_X(i \Delta f)$ 、 $B_Y(i \Delta f)$ 和 $B_Z(i \Delta f)$ ，由公式

$$[0067] \quad \left. \begin{aligned} \theta_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_X^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \\ \theta_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Y^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \\ \theta_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]} &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\Delta f \sum_{i=f_1/\Delta f}^{f_2/\Delta f} \frac{B_Z^2(i\Delta f)}{(i\Delta f)^4}} \end{aligned} \right\} i = 0, 1, 2, \dots, N/2$$

[0068] 计算被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向的频率在 $f = i \Delta f$ 处的振动角位移均方

根值 $\theta_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\theta_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\theta_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 。

[0069] 其中： $\theta_{X_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 、 $\theta_{Y_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 和 $\theta_{Z_RMS} \Big|_{[f_1, f_2]}$ 依次为被测对象绕 X 轴、Y 轴、Z 轴三个轴向频率区间为 $[f_1, f_2]$ 的振动角位移均方根值。

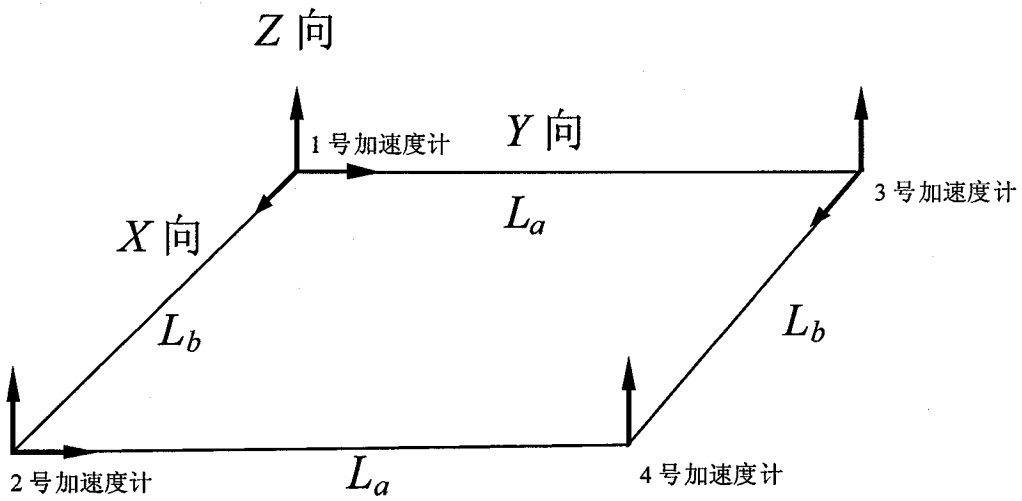


图 1

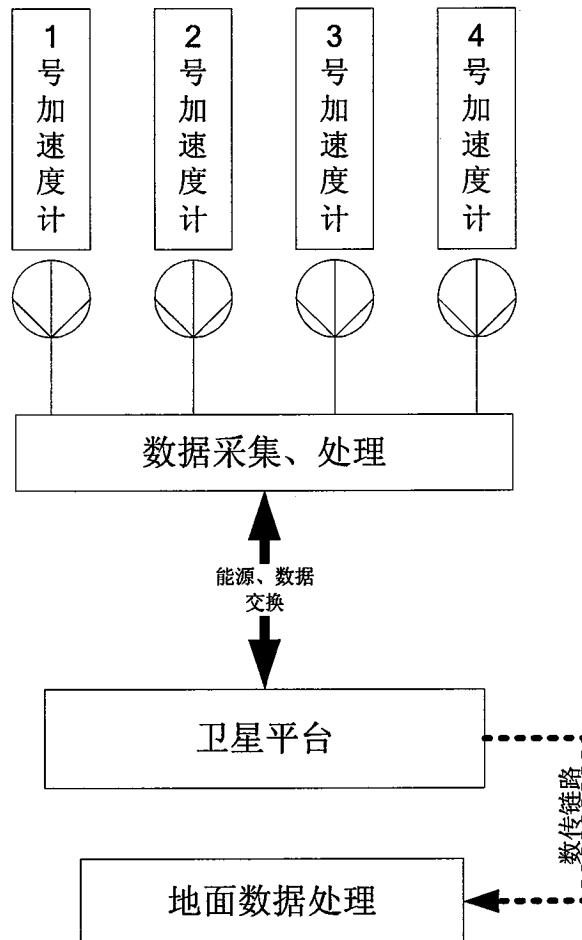


图 2

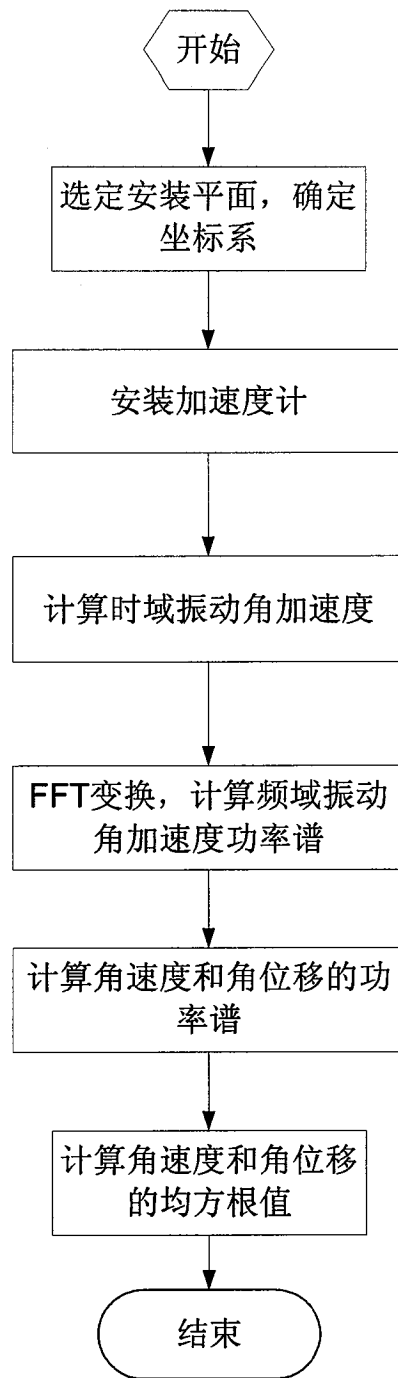


图 3