



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102364311 B

(45) 授权公告日 2014. 07. 09

(21) 申请号 201110255093. 9

(22) 申请日 2011. 08. 31

(73) 专利权人 中国人民解放军军械工程学院  
地址 050000 河北省石家庄市和平东路 97  
号军械工程学院一系

(72) 发明人 汪伟 杨通强 唐力伟 焦健超  
王平 栾军英

(74) 专利代理机构 石家庄科诚专利事务所  
13113

代理人 张红卫

(51) Int. Cl.

G01H 11/06 (2006. 01)

G01P 15/18 (2013. 01)

G01P 15/125 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 2005/0284221 A1, 2005. 12. 29, 全文.

CN 101726294 A, 2010. 06. 09, 全文.

王霞等. 基于 ADAMS 的六自由度机械手的运动仿真分析. 《矿山机械》. 2010, 第 38 卷 (第 8 期), 28-31.

辛秀梅等. 一种三自由度并联机构的运动学标定. 《机械设计与制造》. 2007, (第 7 期), 38-40.

审查员 刘云丽

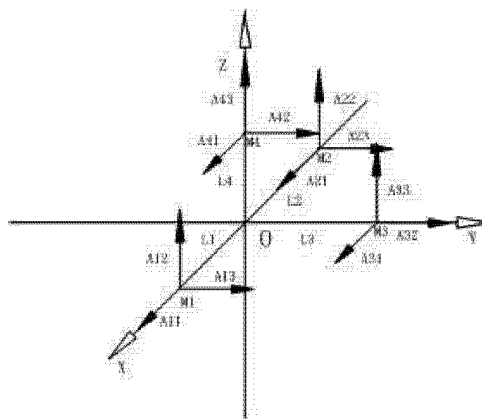
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振动绝对测试方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振动绝对测试方法, 组建包括四只电容式三轴加速度传感器的传感器阵列, 直接测得被测体的不同位置、不同方向的三维加速度后, 再解算出其三维线速度。本发明以大地坐标为参照, 传感器与参照体间无直接连接关系, 属绝对测量, 技术通过测量运动体的振动加速度, 经解算, 得到六维振动参量, 实现六自由度复合振动绝对测试, 具有成本低、动态范围大、反应快、寿命长、可靠性高的特点。本发明适用于对车辆、舰船、飞机等在六个自由度方向上均有振动、振动状态非常复杂的运动体进行六自由度振动的绝对测试。



1. 一种基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振动绝对测试方法,其特征在于它按照以下步骤顺序进行:

(1) 组建电容式加速度传感器阵列

于被测物体上选定测量基准点 0 为坐标中心,构建三维坐标系 0-XYZ,设定沿坐标轴的六个方向 X 正向、X 负向、Y 正向、Y 负向、Z 正向、Z 负向为基准方向;

于坐标轴上选定与 0 点距离为 L 的点 M1、M2、M3、M4,于该四点分别安装电容式三轴加速度传感器,电容式三轴加速度传感器的中心与相应点重合,它们的三轴指向均为 X 正向、Y 正向、Z 正向;

每只电容式三轴加速度传感器的信号输出端与相应的采集仪信号输入端相接,采集仪的信号输出端与计算机 USB 接口相连接,其中采集仪用于将电容式三轴加速度传感器通过多通道测试系统同步触发测试得到的加速度电压信号转化为数字信号,而计算机通过其数据处理模块将由采集仪输入的数字信号进行数据处理,解算出被测体的三维线位移;

(2) 测量

接通电容式三轴加速度传感器的电源,它们测得的加速度电压信号传递至采集仪并由采集仪转化为数字信号后,输入计算机;

(3) 由计算机内的数据处理模块执行解算

数据处理模块的解算方法按照如下步骤进行:

设  $L=1m$ ,电容式三轴加速度传感器各轴的测试结果分别为  $A_{ij}$ ,其中  $i=1, 2, 3, 4$ ,表示传感器编号; $j=1, 2, 3$ ,表示传感器 X、Y、Z 三轴,则

①某时刻被测体相对于载体坐标系的沿三坐标轴方向的线加速度由式 I 得出:

$$\begin{cases} \ddot{R}_x = (A_{11} + A_{21})/2 \\ \ddot{R}_y = (A_{13} + A_{23})/2 \\ \ddot{R}_z = (A_{12} + A_{22})/2 \end{cases} \quad \text{式 I}$$

式 I 中  $\ddot{R}_i (i=x, y, z)$  为沿三个坐标轴的线加速度;

②某时刻被测体相对于载体坐标系的沿三坐标轴方向的角加速度与角速度乘积由式 II 得出,为:

$$\begin{cases} \omega_x \omega_y = (A_{13} + 2A_{31} - A_{11} - A_{21} - A_{23})/4 \\ \omega_y \omega_z = (A_{42} + A_{33} - \ddot{R}_y - \ddot{R}_z)/2 \\ \omega_x \omega_z = (A_{12} + A_{41} - \ddot{R}_z - \ddot{R}_x)/2 \\ \dot{\omega}_x = (A_{33} - A_{42} - \ddot{R}_z + \ddot{R}_y)/2 \\ \dot{\omega}_y = (A_{41} - A_{12} - \ddot{R}_x + \ddot{R}_z)/2 \\ \dot{\omega}_z = (A_{13} - 2A_{31} - A_{23} + A_{11} + A_{21})/4 \end{cases} \quad \text{式 II}$$

式 II 中,  $\omega_i (i=x, y, z)$  为三个坐标轴方向的角速度,  $\dot{\omega}_i (i=x, y, z)$  为绕三个坐标轴的角加速度;

③被测体的角速度,由式 III 可知:

$$\omega_{ik} = \omega_{i(k-1)} + \omega_{ik} \Delta t, \text{ 时间点 } k=1, 2, \dots, n, \dots; i=x, y, z \quad \text{式 III}$$

④以 0-XYZ 坐标系初始位置状态为初始坐标系,任意时刻 0-XYZ 的位置状态为载体坐标系,设  $Q=[q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  为某一采样时刻的载体坐标系相对于初始坐标系的旋转四元数表示,列写四元数微分方程

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad \text{式 IV}$$

使用龙格库塔法解算式 IV,可得第 k 个采样时刻的四元数  $Q_k$ ,代表某时刻载体坐标系相对初始坐标系转动的状态;

⑤通过与载体坐标系三次旋转的坐标变换矩阵比较,将四元数结果代入式 V,求出第 k 采样时刻相对初始坐标系的三维转角为:

$$\begin{cases} \varphi_k = \arctan \frac{q_{3k} - q_{2k}}{q_{0k} - q_{1k}} + \arctan \frac{q_{2k} + q_{3k}}{q_{0k} + q_{1k}} \\ \theta_k = \arcsin 2(q_{0k}q_{1k} + q_{2k}q_{3k}) \\ \phi_k = \arctan \frac{q_{3k} + q_{2k}}{q_{0k} + q_{1k}} - \arctan \frac{q_{3k} - q_{2k}}{q_{0k} - q_{1k}} \end{cases} \quad \text{式 V}$$

式 V 中,  $\varphi_k$ 、 $\theta_k$ 、 $\phi_k$  分别是第 k 采样时刻载体系相对初始坐标系的偏航角、俯仰角以及滚转角;

⑥以初始载体坐标系为参考系解算三维线位移,

a. 首先如式 VI 以 X 向为例,已知初始线速度  $\dot{R}_{x0}$  的情况下对线加速度积分得相对目前时刻的载体坐标系三维线速度  $\dot{R}_{xk}$ 、 $\dot{R}_{yk}$ 、 $\dot{R}_{zk}$ ,

$$\dot{R}_{xk} = \dot{R}_{x(k-1)} + \ddot{R}_{xk} \Delta t \quad \text{式 VI}$$

b. 如式 VI 通过坐标旋转矩阵转换得当前时刻相对初始载体坐标系 0-XYZ 的线速度  $\dot{R}_{Xk}$ 、 $\dot{R}_{Yk}$ 、 $\dot{R}_{Zk}$ ,

$$\begin{cases} \dot{R}_{Xk} = T_k \begin{bmatrix} \dot{R}_{xk} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ \dot{R}_{Yk} = T_k \begin{bmatrix} 0 & \dot{R}_{yk} & 0 \end{bmatrix}^T \\ \dot{R}_{Zk} = T_k \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dot{R}_{zk} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad \text{式 VII}$$

$$\text{其中, } T_k = \begin{bmatrix} q_{0k}^2 + q_{1k}^2 - q_{2k}^2 - q_{3k}^2 & 2(q_{1k}q_{2k} - q_{0k}q_{3k}) & 2(q_{1k}q_{3k} + q_{0k}q_{2k}) \\ 2(q_{1k}q_{2k} + q_{0k}q_{3k}) & q_{0k}^2 - q_{1k}^2 + q_{2k}^2 - q_{3k}^2 & 2(q_{2k}q_{3k} - q_{0k}q_{1k}) \\ 2(q_{1k}q_{3k} - q_{0k}q_{2k}) & 2(q_{2k}q_{3k} + q_{0k}q_{1k}) & q_{0k}^2 - q_{1k}^2 - q_{2k}^2 + q_{3k}^2 \end{bmatrix};$$

c. 再在已知  $R_{x0}$ 、 $R_{y0}$ 、 $R_{z0}=0$  的情况下,经式 VIII 进行积分,得到相对初始坐标系的三维

线位移  $R_{Xk}$ 、 $R_{Yk}$ 、 $R_{Zk}$ ，

$$R_{jk} = R_{j(k-1)} + \dot{R}_{jk} \Delta T \quad \text{式 VIII}$$

式 VIII 中  $j=X, Y, Z$ 。

## 基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振动绝对测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于振动测量领域,具体地说是一种基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振动绝对测试方法。

### 背景技术

[0002] 随着科技的进步,车辆、舰船、飞机等运动体的振动日益受到人们的关注。如机(车)载设备设计中振动激励谱的需求等。该类运动体运动自由度大,动态范围广,在六个自由度方向上均有振动,振动状态非常复杂,以上特点对相应的测试技术提出了更高的要求。因此,现有的测试手段相对上述运动体而言存在以下的问题:

[0003] ①由于测试的目标物体在大范围内运动,使得难以将传感器同时与目标物体和静止参照体相连,也就无法进行相对测试,只能采用绝对测试手段;

[0004] ②振动自由度多的特点,决定了不能使用单维振动测试方法,只能采用多维测试方法。既有线振动又有角振动的特点进一步增加了测试难度。综合以上特点,该测试技术属六自由度复合振动位移绝对测试范畴;

[0005] ③当前的振动测试方法,按被测量量的不同可分为单维线振动测试、多维线振动测试、单维角振动测试几种。其中:

[0006] a. 单维线振动的测试,既有使用拉线式位移传感器、拉杆式位移传感器、电感式位移传感器等多种相对测试方法;也有基于加速度测量的振动位移传感器测量方法(属绝对测量技术)。

[0007] b. 多维线振动的测量方式为多轴振动加速度传感器测试法。

[0008] c. 角振动的测量,为光电编码器法需将光电编码器同时与被测体和参照体相连,因此只能单维测试,且为相对测量。理论上可以用陀螺测试角振动,但因为陀螺对振动非常敏感,在振动状态下极易产生漂移,影响测量精确度,未见相应应用报道。

[0009] 总之,当前有单纯线振动测试技术,可以实现绝对测试;也有单纯的角振动测试技术,只能进行相对测试。

[0010] 加速度传感器阵列可以有效地对于此类复合振动状态进行绝对测试。传统的加速度传感器阵列方案,多利用六个或九个单轴加速度传感器相互正交进行安装。在实际应用中存在引入多个安装误差,使系统对于空间大小的要求过于严格,增加计算量等问题,其具体表现为:正交性难以保证,每个传感器均会引入安装位置与方向的误差,通过解算累积会对最终结果造成较大影响;当测量空间较狭小时,由于每个单轴传感器占用一定体积,会造成安装位置互相干涉,甚至无法完成测试任务;结构复杂,由于无法将同一坐标轴上的单轴传感器安装于一点,引入了与传感器个数相等的位置变量,在利用积分算法进行角速度解算时,位置变量过多使趋势项逐渐增大,对测试效果产生较大影响。

### 发明内容

[0011] 本发明要解决的技术问题,是提供一种基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振

动绝对测试方法,被测目标物体在运动过程中既有线振动又有角振动,为线角耦合振动测试技术,以大地坐标为参照,传感器与参照体间无直接连接关系,属绝对测量,技术通过测量运动体的不同位置、不同方向的加速度,经解算,得到六维振动参量,实现六自由度复合振动绝对测试。本发明所提供的测试方法,成本低,动态范围大、反应快、寿命长、可靠性高,并且有效地避免了前文提到的单轴传感器阵列方案中的不足。

[0012] 为解决上述技术问题,本发明所采用的技术方案是:

[0013] 一种基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振动绝对测试方法,按照以下步骤顺序进行:

[0014] (1) 组建电容式加速度传感器阵列

[0015] 于被测物体上选定测量基准点 0 为坐标中心,构建三维坐标系 0-XYZ,设定沿坐标轴的六个方向 X 正向、X 负向、Y 正向、Y 负向、Z 正向、Z 负向为基准方向;

[0016] 于坐标轴上选定与 0 点距离为 L 的点 M1、M2、M3、M4,于该四点分别安装电容式三轴加速度传感器,电容式三轴加速度传感器的中心与相应点重合,它们的三轴指向均为 X 正向、Y 正向、Z 正向;

[0017] 每只电容式三轴加速度传感器的信号输出端与采集仪信号输入端相接,采集仪的信号输出端与计算机的 USB 接口相连接,其中采集仪用于将电容式三轴加速度传感器通过多通道测试系统同步触发测试得到的加速度电压信号转化为数字信号,而计算机通过其数据处理模块将由采集仪输入的数字信号转进行数据处理,解算出被测体的三维线位移。

[0018] (2) 测量

[0019] 接通电容式三轴加速度传感器的电源,它们测得的加速度电压信号传递至采集仪并由采集仪转化为数字信号后,传递至计算机进行数据处理;

[0020] (3) 由计算机内的数据处理模块执行解算

[0021] 数据处理模块的解算方法按照如下步骤进行:

[0022] 设  $L=1m$ , 电容式三轴加速度传感器各轴的测试结果分别为  $A_{ij}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ , 表示传感器编号;  $j=1, 2, 3$ , 表示传感器三轴), 则

[0023] ①某时刻被测体相对于载体坐标系的沿三坐标轴方向的线加速度为:

$$[0024] \begin{cases} \ddot{R}_x = (A_{11} + A_{21})/2 \\ \ddot{R}_y = (A_{13} + A_{23})/2 \\ \ddot{R}_z = (A_{12} + A_{22})/2 \end{cases} \quad (1)$$

[0025] 式(1)中,  $\ddot{R}_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为沿三个坐标轴的线加速度;

[0026] ②某时刻被测体相对于载体坐标系的沿三坐标轴方向的角加速度与角速度乘积为:

$$[0027] \quad \begin{cases} \omega_x \omega_y = (A_{13} + 2A_{31} - A_{11} - A_{21} - A_{23})/4 \\ \omega_y \omega_z = (A_{42} + A_{33} - \ddot{R}_y - \ddot{R}_z)/2 \\ \omega_x \omega_z = (A_{12} + A_{41} - \ddot{R}_z - \ddot{R}_x)/2 \\ \omega_x = (A_{33} - A_{42} - \ddot{R}_z + \ddot{R}_y)/2 \\ \omega_y = (A_{41} - A_{12} - \ddot{R}_x + \ddot{R}_z)/2 \\ \omega_z = (A_{13} - 2A_{31} - A_{23} + A_{11} + A_{21})/4 \end{cases} \quad (2)$$

[0028] 式(2)中,  $\omega_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为三个坐标轴方向的角速度,  $\dot{\omega}_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为绕三个坐标轴的角加速度。

[0029] ③进一步地, 被测体的角速度为:

$$[0030] \quad \omega_{ik} = \omega_{i(k-1)} + \dot{\omega}_{ik} \Delta t, \text{ 时间点 } k=1, 2, \dots, n, \dots; i=x, y, z \quad (3)$$

[0031] ④以 0-XYZ 坐标系初始位置状态为初始坐标系, 任意时刻 0-XYZ 的位置状态为载体坐标系, 设  $Q=[q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  为某一采样时刻的载体坐标系相对于初始坐标系的旋转四元数表示, 列写四元数微分方程

$$[0032] \quad \dot{Q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0033] 使用龙格库塔法解算方程(4), 可得第  $k$  个采样时刻的四元数  $Q_k$ , 代表某时刻载体坐标系相对初始坐标系转动的状态。

[0034] ⑤通过与载体坐标系三次旋转的坐标变换矩阵比较, 将四元数结果代入式(5)便可求出第  $k$  采样时刻相对初始坐标系的三维转角

[0035]

$$\begin{cases} \varphi_k = \arctan \frac{q_{3k} - q_{2k}}{q_{0k} - q_{1k}} + \arctan \frac{q_{2k} + q_{3k}}{q_{0k} + q_{1k}} \\ \theta_k = \arcsin 2(q_{0k} q_{1k} + q_{2k} q_{3k}) \\ \phi_k = \arctan \frac{q_{3k} + q_{2k}}{q_{0k} + q_{1k}} - \arctan \frac{q_{3k} - q_{2k}}{q_{0k} - q_{1k}} \end{cases} \quad (5)$$

[0036] 式(5)中,  $\varphi_k$ 、 $\theta_k$ 、 $\phi_k$  分别是第  $k$  采样时刻载体系相对初始坐标系的偏航角、俯仰角以及滚转角。

[0037] ⑥以初始载体坐标系为参考系解算三维线位移,

[0038] a. 首先如式(6)以 X 向为例, 已知初始线速度  $\dot{R}_{x0}$  的情况下对线加速度积分得相对目前时刻的载体坐标系三维线速度  $\dot{R}_{xk}$ 、 $\dot{R}_{yk}$ 、 $\dot{R}_{zk}$ ,

$$[0039] \quad \dot{R}_{xk} = \dot{R}_{x(k-1)} + \ddot{R}_{xk} \Delta t \quad (6)$$

[0040] b. 如式(7)通过坐标旋转矩阵转换得当前时刻相对初始载体坐标系 0-XYZ 的线速

度  $R_{Xk}$ 、 $R_{Yk}$ 、 $R_{Zk}$ ,

$$[0041] \quad \begin{cases} R_{Xk} = T_k \begin{bmatrix} R_{xk} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ R_{Yk} = T_k \begin{bmatrix} 0 & R_{yk} & 0 \end{bmatrix}^T \\ R_{Zk} = T_k \begin{bmatrix} 0 & 0 & R_{zk} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (7)$$

$$[0042] \quad \text{其中, } T_k = \begin{bmatrix} q_{0k}^2 + q_{1k}^2 - q_{2k}^2 - q_{3k}^2 & 2(q_{1k}q_{2k} - q_{0k}q_{3k}) & 2(q_{1k}q_{3k} + q_{0k}q_{2k}) \\ 2(q_{1k}q_{2k} + q_{0k}q_{3k}) & q_{0k}^2 - q_{1k}^2 + q_{2k}^2 - q_{3k}^2 & 2(q_{2k}q_{3k} - q_{0k}q_{1k}) \\ 2(q_{1k}q_{3k} - q_{0k}q_{2k}) & 2(q_{2k}q_{3k} + q_{0k}q_{1k}) & q_{0k}^2 - q_{1k}^2 - q_{2k}^2 + q_{3k}^2 \end{bmatrix}.$$

[0043] c. 再在已知  $R_{X0}$ 、 $R_{Y0}$ 、 $R_{Z0}=0$  的情况下, 如式(8)积分得到相对初始坐标系的三维线位移  $R_{Xk}$ 、 $R_{Yk}$ 、 $R_{Zk}$ ,

$$[0044] \quad R_{jk} = R_{j(k-1)} + R_{jk} \Delta T \quad (8)$$

[0045] 式(8)中  $j=X, Y, Z$ 。

[0046] 由于采用了上述的技术方案, 本发明与现有技术相比, 所取得的技术进步在于:

[0047] (1) 传感器阵列测试方法可以完成对线振动、角振动耦合的复杂振动的六自由度绝对测试, 解决了该类振动无法测试的难题;

[0048] (2) 与单轴传感器阵列方案相比, 三轴传感器方案有效地减少了误差干扰、降低了对空间大小的要求、减小了计算量, 计算过程由计算机自动执行并将最终计算结果于显示器上显示输出, 成功地简化了方案。

[0049] (3) 采用电容式加速度传感器, 适用的测量频率范围较广。

[0050] 总之, 本发明的测试方法以大地坐标为参照, 传感器与参照体间无直接连接关系, 属绝对测量技术, 通过测量运动体的不同位置、不同方向的加速度, 经解算得到六维振动参量, 实现六自由度复合振动绝对测试, 具有成本低、动态范围大、反应快、寿命长、可靠性高的特点。

[0051] 本发明适用于对车辆、舰船、飞机等在六个自由度方向上均有振动、振动状态非常复杂的运动体进行六自由度振动绝对测试。

[0052] 本发明下面将结合说明书附图与具体实施例作进一步详细说明。

#### 附图说明

[0053] 图 1 是本发明实施例中四只电容式三轴加速度传感器的分布关系示意图;

[0054] 图 2—图 4 分别是本发明实施例的三维线位移  $R_{Xk}$ 、 $R_{Yk}$ 、 $R_{Zk}$  与时间的关系曲线。

#### 具体实施方式

[0055] 实施例

[0056] 一种基于三轴加速度传感器阵列的六自由度振动绝对测试方法, 实际应用于对运动体振动台进行六自由度振动的绝对测试。



[0057] 该测试方法按照以下步骤顺序进行：

[0058] (1) 组建电容式加速度传感器阵列

[0059] 于振动台上选定测量基准点 O 为坐标中心，构建三维坐标系 O-XYZ，设定沿坐标轴的六个方向 X 正向、X 负向、Y 正向、Y 负向、Z 正向、Z 负向为基准方向。

[0060] 于 X 正向、X 负向、Y 正向、Z 正向上各选定与 O 点距离为 1 米的点 M1、M2、M3、M4。于上述四处点分别安装电容式三轴加速度传感器，电容式三轴加速度传感器的中心与相应点重合，如图 1 所示，点 M1、M2、M3、M4 也分别表示电容式三轴加速度传感器，它们的三轴指向均为 X 正向、Y 正向、Z 正向。

[0061] 电容式三轴加速度传感器 M1、M2、M3、M4 的信号输出端分别与相应的采集仪的信号输入端相接，采集仪的信号输出端汇总起来以 USB 接口的形式与计算机相连接，从而完成电容式加速度传感器阵列的组建。其中，

[0062] 采集仪 ---- 用于提供传感器供电电源并将电容式三轴加速度传感器通过多通道测试系统同步触发测试得到的加速度电压信号转化为数字信号；

[0063] 计算机 ---- 通过其数据处理模块将由采集仪输入的数字信号转进行数据处理，解算出被测体的三维线位移。

[0064] (2) 测量

[0065] 接通电容式三轴加速度传感器的电源，它们测得的加速度电压信号分别传递至相应的采集仪并由采集仪转化为数字信号后，输入计算机；

[0066] (3) 由计算机内的数据处理模块自动执行解算

[0067] 数据处理模块的解算过程按照如下步骤进行：

[0068] 用  $i=1, 2, 3, 4$ ，表示传感器编号；用  $j=1, 2, 3$ ，表示传感器三轴。

[0069] 计时起始时刻，电容式三轴加速度传感器各轴的测试结果为  $A_{ij}$ 。

[0070] ① 计时起始时刻相对于载体坐标系的沿三坐标轴方向的线加速为：

[0071]  $R_x = (A_{11} + A_{21})$ ； $R_y = (A_{13} + A_{23})$ ； $R_z = (A_{12} + A_{22})$

[0072] ② 该时刻振动台相对于载体坐标系的沿三坐标轴方向的角加速度与角速度乘积如下：

$$[0073] \begin{cases} \omega_x \omega_y = (A_{13} + 2A_{21} - A_{11} - A_{21} - A_{23})/4 \\ \omega_x \omega_z = (A_{12} + A_{23} - \ddot{R}_y - \ddot{R}_z)/2 \\ \omega_y \omega_z = (A_{12} + A_{21} - \ddot{R}_x - \ddot{R}_z)/2 \\ \dot{\omega}_x = (A_{13} - A_{21} - \ddot{R}_x + \ddot{R}_y)/2 \\ \dot{\omega}_y = (A_{11} - A_{21} - \ddot{R}_x + \ddot{R}_z)/2 \\ \dot{\omega}_z = (A_{13} - 2A_{21} - A_{23} + A_{11} + A_{21})/4 \end{cases}$$

[0074]  $\omega_i (i=x, y, z)$  为三个坐标轴方向的角速度， $\dot{\omega}_i (i=x, y, z)$  为绕三个坐标轴的角加速度。

[0075] ③ 被测轮船在不同时间点  $k (k=1, 2, 3 \dots n)$  时的角速度如下：

[0076]  $\omega_{ik} = \omega_{i(k-1)} + \dot{\omega}_{ik} \Delta t \quad (i=X, Y, Z)$ ，

[0077] ④ 以 O-XYZ 坐标系初始位置状态为初始坐标系，任意时刻 O-XYZ 的位置状态为载

体坐标系, 设  $Q=[q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  为某一采样时刻的载体坐标系相对于初始坐标系的旋转四元数表示, 列写四元数微分方程

$$[0078] \quad \dot{Q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad \text{式 IV}$$

[0079] 使用龙格库塔法解算式 IV, 可得第  $k$  个采样时刻的四元数  $Q_k$ , 代表某时刻载体坐标系相对初始坐标系转动的状态;

[0080] ⑤通过与载体坐标系三次旋转的坐标变换矩阵比较, 将四元数结果代入式 V, 求出第  $k$  采样时刻相对初始坐标系的三维转角为:

$$[0081] \quad \begin{cases} \varphi_k = \arctan \frac{q_{3k} - q_{2k}}{q_{0k} - q_{1k}} + \arctan \frac{q_{2k} + q_{3k}}{q_{0k} + q_{1k}} \\ \theta_k = \arcsin 2(q_{0k}q_{1k} + q_{2k}q_{3k}) \\ \phi_k = \arctan \frac{q_{3k} + q_{2k}}{q_{0k} + q_{1k}} - \arctan \frac{q_{3k} - q_{2k}}{q_{0k} - q_{1k}} \end{cases} \quad \text{式 V}$$

[0082] 式 V 中,  $\varphi_k$ 、 $\theta_k$ 、 $\phi_k$  分别是第  $k$  采样时刻载体坐标系相对初始坐标系的偏航角、俯仰角以及滚转角;

[0083] ⑥以初始载体坐标系为参考系解算三维线位移,

[0084] a. 首先如式 VI 以 X 向为例, 已知初始线速度  $\dot{R}_{x0}$  的情况下对线加速度积分得相对目前时刻的载体坐标系三维线速度  $\dot{R}_{xk}$ 、 $\dot{R}_{yk}$ 、 $\dot{R}_{zk}$ ,

$$[0085] \quad \dot{R}_{xk} = \dot{R}_{x(k-1)} + \ddot{R}_{xk} \Delta t \quad \text{式 VI}$$

[0086] b. 如式 VI 通过坐标旋转矩阵转换得当前时刻相对初始载体坐标系 O-XYZ 的线速度  $\dot{R}_{Xk}$ 、 $\dot{R}_{Yk}$ 、 $\dot{R}_{Zk}$ ,

$$[0087] \quad \begin{cases} \dot{R}_{Xk} = T_k \begin{bmatrix} \dot{R}_{xk} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ \dot{R}_{Yk} = T_k \begin{bmatrix} 0 & \dot{R}_{yk} & 0 \end{bmatrix}^T \\ \dot{R}_{Zk} = T_k \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dot{R}_{zk} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad \text{式 VII}$$

$$[0088] \quad \text{其中, } T_k = \begin{bmatrix} q_{0k}^2 + q_{1k}^2 - q_{2k}^2 - q_{3k}^2 & 2(q_{1k}q_{2k} - q_{0k}q_{3k}) & 2(q_{1k}q_{3k} + q_{0k}q_{2k}) \\ 2(q_{1k}q_{2k} + q_{0k}q_{3k}) & q_{0k}^2 - q_{1k}^2 + q_{2k}^2 - q_{3k}^2 & 2(q_{2k}q_{3k} - q_{0k}q_{1k}) \\ 2(q_{1k}q_{3k} - q_{0k}q_{2k}) & 2(q_{2k}q_{3k} + q_{0k}q_{1k}) & q_{0k}^2 - q_{1k}^2 - q_{2k}^2 + q_{3k}^2 \end{bmatrix}。$$

[0089] c. 再在已知  $R_{x0}$ 、 $R_{y0}$ 、 $R_{z0}=0$  的情况下, 经式 VIII 进行积分, 得到相对初始坐标系的三维线位移  $R_{Xk}$ 、 $R_{Yk}$ 、 $R_{Zk}$ ,

$$[0090] \quad R_{jk} = R_{j(k-1)} + \dot{R}_{jk} \Delta T \quad \text{式 VIII}$$

[0091] 式 VIII 中  $j=X, Y, Z$ 。

[0092] 由计算机显示器显示的本实施例的三维线位移  $R_{Xk}$ 、 $R_{Yk}$  与  $R_{Zk}$  的具体测量数据。实测位移与时间的关系如图 2-4 所示。

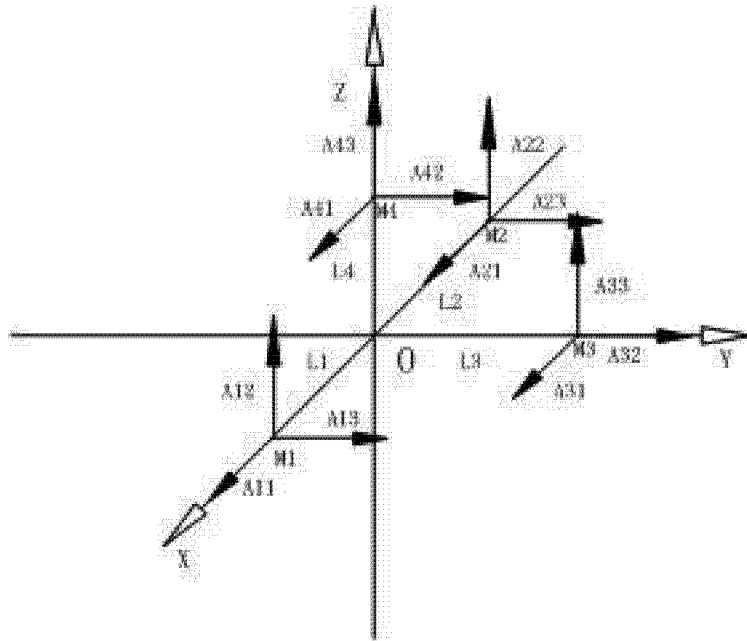


图 1

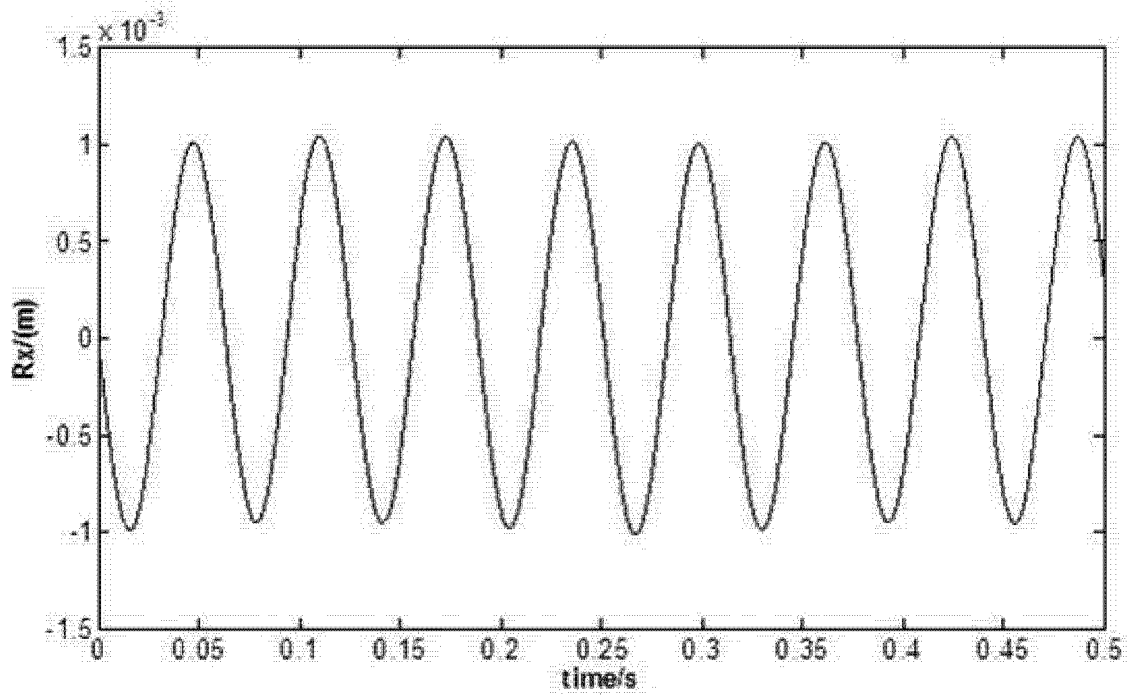


图 2

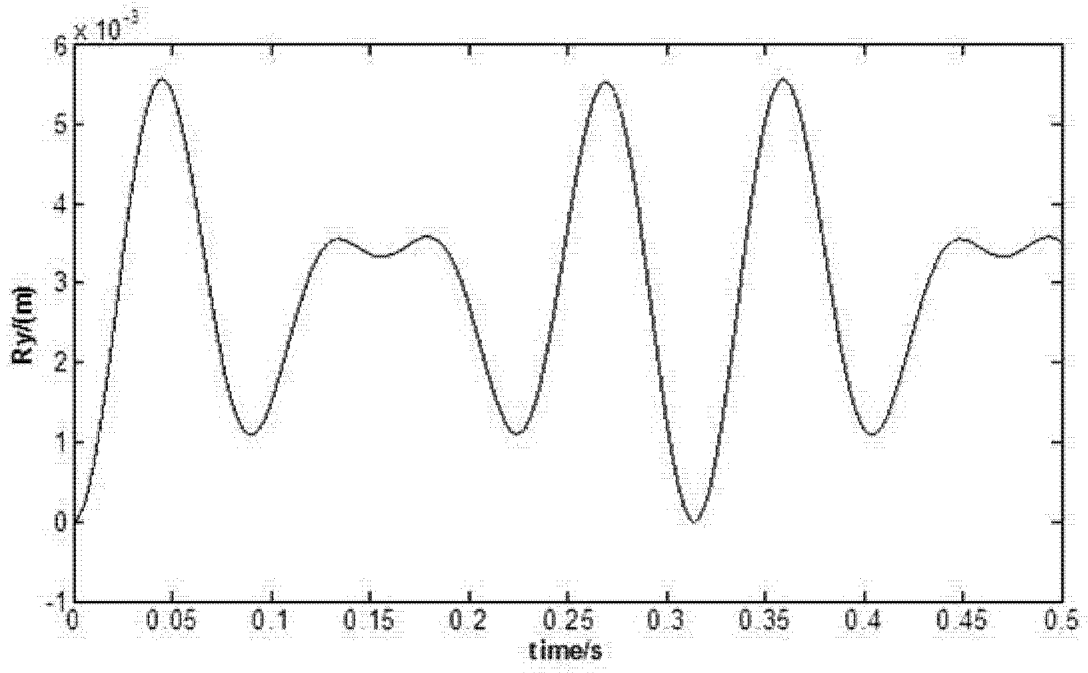


图 3

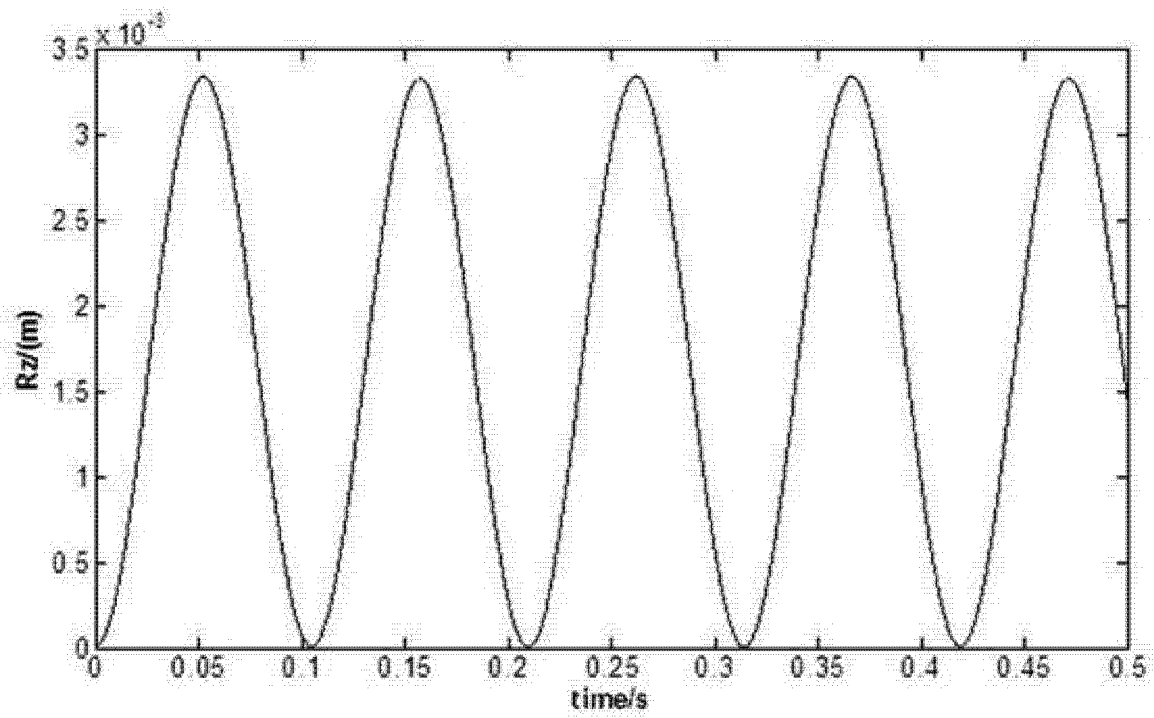


图 4