



平面传感器阵列测试振动角速度算法研究

赵天贺, 汪伟, 寇博晨, 沈晨晖, 孙中兴

(陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

摘要: 针对平面加速度传感器阵列测量空间内高频复杂六自由度振动的新方案, 提出一种将多种算法融合的组合算法。由于新方案中加速度计的安装位置在一个平面内, 直接解算不能得到完整的振动参数, 因此结合积分法、开方法进行设计, 并最终得到完整的角速度解算数据。通过分析传感器输出方程中数据的内在联系, 将解算数据不断更新迭代, 保持解算数据的实时性和精确性。其在较长时间的仿真过程中误差始终保持在 10^{-4} 量级, 同时解决积分法的误差积累问题和开方法的符号误判问题。组合算法的设计, 可保证平面内配置加速度传感器阵列进行振动测试的可行性。

关键词: 振动测试; 传感器阵列; 角速度组合算法; 误差分析

文献标志码: A **文章编号:** 1674-5124(2018)06-0105-04

Research on measurement of vibration angular velocity of planar sensor array

ZHAO Tianhe, WANG Wei, KOU Bochen, SHEN Chenhui, SUN Zhongxing

(Shijianzhuang campus of the Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Based on the new algorithm for measuring six degree of freedom vibration in high-frequency space of a planar accelerometer array, a combination algorithm integrating several algorithms is presented. As the installation position of velocimeter in the new scheme is in the same plane and complete vibration parameters cannot be obtained through direct calculation, integral method and extraction method are combined for design and finally complete angular velocity calculation data is obtained. Through the analysis of internal relation of data in sensor output equation and continuous iterative update of data, the real-time property and the accuracy of the data are maintained. In the process of long time simulation, the error is always kept in the order of 10^{-4} , and the problem of error accumulation of integral method and the problem of symbol misjudgement in the extraction method are solved. The design of the combined algorithm ensures the feasibility of setting of an acceleration sensor array in the plane for carrying out vibration test.

Keywords: vibration test; sensors array; angular velocity combination algorithm; error accumulation

0 引言

现代武器装备发展迅速, 为了提升飞机、坦克、

火炮等的使用性能, 使其在复杂战场环境下能够更好地完成任务, 需要对其产生的运动参数进行监控^[1]。

收稿日期: 2017-12-25; 收到修改稿日期: 2018-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51575523)

作者简介: 赵天贺(1993-), 男, 河北保定市人, 硕士研究生, 专业方向为兵器实验理论与技术。

这类运动体运动自由度大、动态范围广，振动状态为较高频率下多维线振动和角振动的耦合^[2]。单维的传感器测试技术、陀螺仪技术、CCD 成像技术等传统振动测试手段很难在该测试环境中得到应用^[3]。加速度传感器阵列可以有效地对该类振动进行监测，解决了工程中对上述运动体进行六自由度参数测试的难题^[4]。

近年来，国内外加速度传感器阵列的配置方案越来越多，典型的传感器配置方案有六加速度、九加速度、十二加速度阵列构型^[5-6]。在工程实现过程中，发现空间配置方案会增大测量设备的体积，本文通过对构型设计的深入研究，设计了一种基于平面的加速度传感器配置方案，解决了测量设备的体积问题。

采用加速度传感器阵列测量六自由度参数，角速度的解算非常关键，其准确度直接影响着最终测量结果的准确性。目前，传统的角速度解算方法有积分法、开方法等。在新的构型当中单一的积分法会随着时间的积累产生严重的发散型误差，单一的开方算法得不到含有符号的解算值，组合的开方法会产生严重的小角度误判现象。本文在对算法进行原理推理和仿真分析的基础上，通过比较其优缺点及分析加速度传感器输出方程，设计了多种角速度融合的组合方法^[7]，可以使角速度的误差满足允许范围，具有较大的实用价值。

1 传感器阵列测试方案

安装配置方式如图 1 所示，O-XYZ 为建立的载体坐标系，在 O-XY 平面内安装 3 个三轴加速度传感器时，分别使传感器的一个敏感轴重合安装于 X 轴或 Y 轴坐标轴，另外两轴垂直于该坐标系。其中 O₁、O₂、O₃ 分别为 3 个三轴加速度传感器在坐标轴上的安装位置。l₁、l₂、l₃ 分别代表 OO₁、OO₂、OO₃ 的距离，A₁、A₂、...、A₉ 代表传感器不同敏感轴方向的编号。

9 个传感器相对于载体坐标系原点的位置坐标矩阵 **r** 和敏感方向坐标矩阵 **θ** 为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} l_1 & l_1 & l_1 & 0 & 0 & 0 & -l_3 & -l_3 & -l_3 \\ 0 & 0 & 0 & l_2 & l_2 & l_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据运动学方程可以得到基于线加速度计捷联惯导系统上任意加速度计的输出^[8-10]为

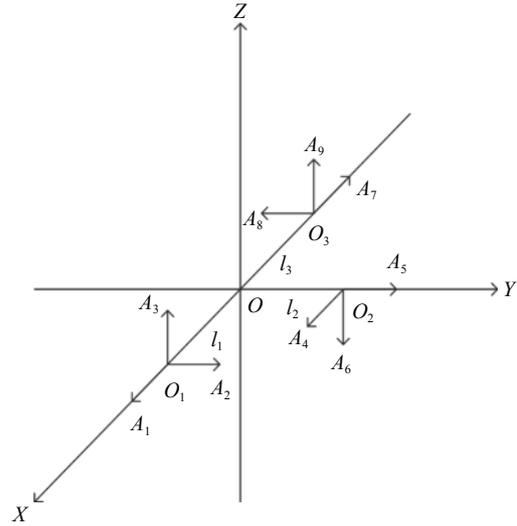


图 1 平面加速度计阵列安装示意图

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_1^T \boldsymbol{\Omega}^2 \mathbf{r}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\theta}_N^T \boldsymbol{\Omega}^2 \mathbf{r}_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中：**f**——加速度传感器上测量到的加速度信号；
J——构型矩阵；
 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ ——载体坐标系的角加速度；
 $\boldsymbol{\Omega}$ —— $\boldsymbol{\omega}$ 的反对称矩阵；
A——载体坐标系 3 个坐标轴方向上的线加速度。

其中：

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}^T$$

$$\boldsymbol{\Omega}^2 = \begin{bmatrix} -\omega_x^2 - \omega_y^2 & \omega_x \omega_y & \omega_x \omega_z \\ \omega_x \omega_y & -\omega_x^2 - \omega_z^2 & \omega_x \omega_y \\ \omega_x \omega_z & \omega_y \omega_z & -\omega_x^2 - \omega_y^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} = [\mathbf{J}_1^T \quad \mathbf{J}_2^T]$$

$$\mathbf{J}_2 = \boldsymbol{\theta}$$

$$\mathbf{r} = [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad r_4 \quad r_5 \quad r_6 \quad r_7 \quad r_8 \quad r_9]$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \theta_6 \quad \theta_7 \quad \theta_8 \quad \theta_9]$$

$$\mathbf{J}_1 = [r_1 \times \theta_1 \quad r_2 \times \theta_2 \quad \cdots \quad r_9 \times \theta_9] \quad (3)$$

将式 (2) 完全展开可以得到关于载体坐标系的角速度、角加速度和线加速度等变量，与 9 个加速度传感器在其敏感方向上加速度信号的方程组为

$$\begin{cases} f_1 = A_x - l_1(\omega_y^2 + \omega_z^2) \\ f_2 = A_y + l_1(\dot{\omega}_z + \omega_x \omega_y) \\ f_3 = A_z - l_1(\dot{\omega}_y - \omega_x \omega_z) \\ f_4 = A_x + l_2(\omega_x \omega_y - \dot{\omega}_z) \\ f_5 = A_y - l_2(\omega_x^2 + \omega_z^2) \\ f_6 = -A_z - l_2(\dot{\omega}_x + \omega_y \omega_z) \\ f_7 = -A_x - l_3(\omega_y^2 + \omega_z^2) \\ f_8 = -A_y + l_3(\dot{\omega}_z + \omega_x \omega_y) \\ f_9 = A_z - l_3(\dot{\omega}_y - \omega_x \omega_z) \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)可以解算得到表征六自由度的相关参数的相互关系表达式为

$$\begin{cases} A_x = \frac{l_3 f_1 - l_1 f_3}{l_1 + l_3} \\ A_y = \frac{l_3 f_2 - l_1 f_8}{l_1 + l_3} \\ A_z = \frac{l_3 f_3 - l_1 f_9}{l_1 + l_3} \\ \omega_y^2 + \omega_z^2 = -\frac{f_1 + f_7}{l_1 + l_3} \\ \omega_y^2 - \omega_x^2 = \frac{l_3(f_2 - f_5) - l_1(f_5 + f_8) + l_2(f_1 + f_7)}{l_2(l_1 + l_3)} \\ \omega_x^2 + \omega_z^2 = \frac{l_3(f_2 - f_5) - l_1(f_5 + f_8)}{l_2(l_1 + l_3)} \\ \dot{\omega}_z = \frac{l_3(f_1 - f_4) - l_1(f_4 - f_7)}{2l_2(l_1 + l_3)} - \frac{f_2 + f_8}{l_1 + l_3} \\ \omega_x \omega_y = \frac{l_3(f_1 - f_4) - l_1(f_4 - f_7)}{2l_2(l_1 + l_3)} + \frac{l_3 f_9 - l_1 f_8}{l_2(l_1 + l_3)} \end{cases} \quad (5)$$

2 角速度解算方法的设计

应用式(5)解算得到的角速度平方项、Z轴的角加速度以及角速度的乘积项,可以应用积分法、开方法和组合算法求解3个坐标轴的角速度。

2.1 积分法

在载体坐标系初始时刻角速度值已知的情况下,根据式(5)通过直接积分解算3个坐标系的角速度。设置坐标系角速度初始值为 $\omega_x(0)$ 、 $\omega_y(0)$ 、 $\omega_z(0)$,在采样周期 Δt 较短时,近似认为采样时刻距下一采样时刻时间间隔内角速度均匀变化。已知Z轴角加速度 $\dot{\omega}_z$ 的情况下,可以采用直接积分的算法求得 $\omega_z(t)$,如下所示:

$$\begin{cases} \omega_x(t) = \omega_x(t-1) + \dot{\omega}_x(t)\Delta t \\ \omega_y(t) = \omega_y(t-1) + \dot{\omega}_y(t)\Delta t \\ \omega_z(t) = \omega_z(t-1) + \dot{\omega}_z(t)\Delta t \\ t = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

将解算的 $\omega_z(t)$ 、 $\omega_x(0)$ 、 $\omega_y(0)$ 代入式(4)获得 $\dot{\omega}_x$ 、 $\dot{\omega}_y$,直接积分求得 $\omega_x(t)$ 、 $\omega_y(t)$,解算值作为 $\omega_x(0)$ 、 $\omega_y(0)$,循环计算^[11]。应用该算法进行角速度解算,误差来源于将两采样点之间的角加速度值认为是恒定值,并且积分法造成误差随时间的延长不断积累,通过提高采样频率可以在很大程度上降低此类误差。由于其不可避免性,在长时间振动参数的测量过程中容易产生较大误差。

2.2 开方法

根据式(5)中的平方项可以求得 $|\omega_x|$ 、 $|\omega_y|$ 、 $|\omega_z|$,但无法直接得到3个坐标轴角速度绝对值的符号。应用积分法解算的 $\omega_x(t)$ 、 $\omega_y(t)$ 、 $\omega_z(t)$ 作为开方法中角速度绝对值的符号 $\text{sign}(\omega_x(t))$ 、 $\text{sign}(\omega_y(t))$ 、 $\text{sign}(\omega_z(t))$,求解开方法的解算角速度表达式为

$$\begin{cases} \omega_x(t) = \text{sign}(\omega_x(t)) \times |\omega_x(t)| \\ \omega_y(t) = \text{sign}(\omega_y(t)) \times |\omega_y(t)| \\ \omega_z(t) = \text{sign}(\omega_z(t)) \times |\omega_z(t)| \\ t = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

应用开方法进行角速度的解算过程中,解算数值不随时间积累,避免了较大误差的产生,但其应用的是积分法解算值的符号,仍然存在符号误判的现象,随着时间的积累,符号误判对结果的影响持续增大。

2.3 组合算法

通过对多种解算方法的分析与比较,针对平面加速度阵列构型设计了一种积分法、开方法相结合的组合算法进行角速度的解算^[12],应用开方法中获得的 $\omega_z(t)$ 为组合算法的Z轴角速度解算值。根据无陀螺捷联惯导系统相关对准技术设置X轴、Y轴初始角速度^[13]为 $\omega_x(0)$ 、 $\omega_y(0)$,将其代入式(4),获得 $\dot{\omega}_x(0)$ 、 $\dot{\omega}_y(0)$,应用 $\omega_x(0)$ 、 $\omega_y(0)$ 、 $\dot{\omega}_x(0)$ 、 $\dot{\omega}_y(0)$ 进行积分运算,并将积分值符号作为 $|\omega_x|$ 、 $|\omega_y|$ 的符号,并将其乘积作为角速度解算值。组合算法通过对初始值的不断更新,避免了积分法误差随时间而不断积累的问题,又通过开方法持续获得精确的角速度绝对值,二者相结合可以获得精确且不随时间积累的角速度结算值。

3 仿真分析

为了验证针对平面构型设计的角速度解算算法的可行性,搭建模型对其进行比较和分析。在仿真中取采样频率为1 kHz,采样时间为1 000 s,加速度传感器常值误差为0.000 1 g,随机噪声的均方差为0.001 g。

角速度参数设置为

$$\begin{cases} \omega_x = 5 \sin(100t) \\ \omega_y = 5 \cos(80t) \\ \omega_z = 5 \sin(60t) \end{cases} \quad (8)$$

线加速度参数设置为

$$\begin{cases} A_x = 600 \cos(60t) \\ A_y = 800 \cos(80t) \\ A_z = 1000 \cos(100t) \end{cases} \quad (9)$$

对3种算法进行仿真,并分别对其X轴、Y轴角速度误差进行分析,如图2~图4所示。

从图2可以看出,积分法解算的角速度误差随时间不断积累发散。当测试时间较短时,误差较小,但一旦时间增长,其误差呈指数形式增长。由此可见,该算法不可应用于平面加速度传感器阵列的姿态解算当中。

从图3开方法仿真曲线可以看出,角速度误差在随着时间积累到10 rad/s后将不再增长。仿真说明开方法虽然解决了单一的积分法的误差积累问

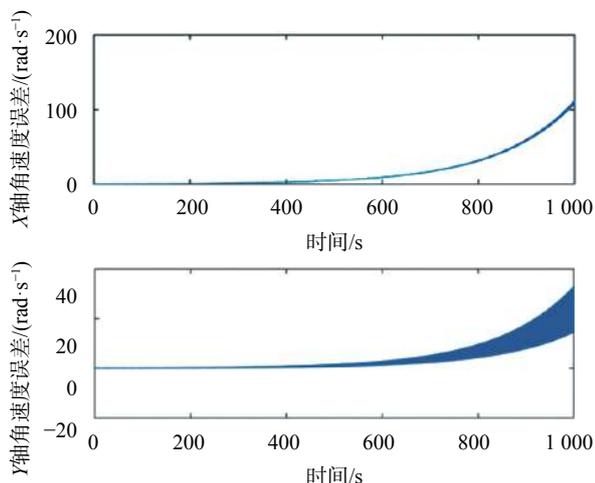


图2 积分法角速度误差

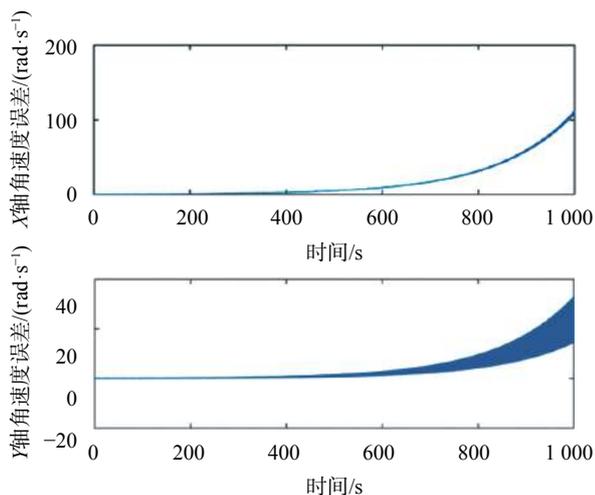


图3 开方法角速度误差

题,但开方法中的积分获取符号成分对其造成的符号误判现象随着时间的延长不断严重,难以获得较真实的角速度解算值。因此结合积分法的开方法也很难应用到新的构型当中。

从图4组合算法仿真可以看出,组合算法解算的角速度误差稳定在 10^{-4} 量级,没有出现误差随时间积累的现象,也不会出现符号误判的现象,且始终保持解算结果的高度精确性,满足误差允许范围。仿真说明组合算法通过对初值的更新,解决了改进开方法的符号误判问题,保证了解算数据的准确性。组合算法的提出,为下一步的姿态解算提供了可靠的初始解算数据,是一种有效的解算方法。

4 结束语

为实现传感器阵列技术在运动体复杂振动测试领域的工程应用,设计实际符合要求的传感器配置方案。该文介绍一种平面传感器阵列,角速度解算

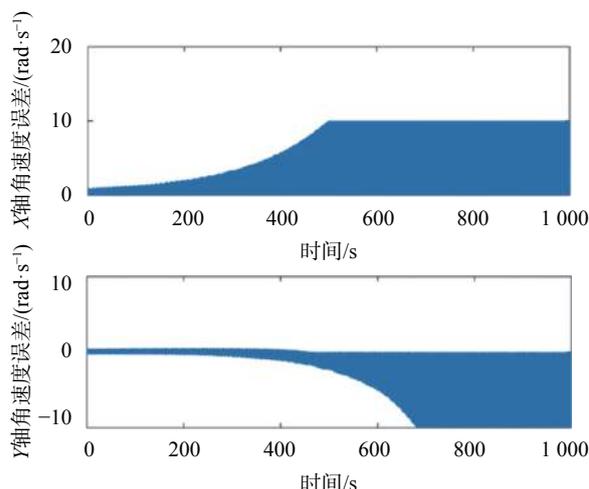


图4 组合算法角速度误差

作为传感器阵列振动测试的关键环节。针对新的构型,通过学习传统解算手段设计3种解算方法,其中积分法误差随时间积累严重,开方法符号误判不可避免。组合算法有效地避免积分算法的误差积累和小、角速度的符号误判问题,在长时间的仿真计算过程中仍然能保持较高准确度,对传感器阵列振动测试技术的工程实现具有一定的意义。

参考文献

- [1] 赵天贺,汪伟.基于MEMS技术的捷联惯导系统现状[J].飞航导弹,2017(10):17-21.
- [2] 汪伟,焦健超,唐力伟,等.基于传感器阵列的振动测试角速度算法研究[J].中国测试,2012,38(4):58-61.
- [3] 焦健超.火控系统观瞄器件复杂振动环境参数测试技术研究[D].石家庄:陆军工程大学石家庄校区,2011.
- [4] 焦健超,汪伟,唐力伟,等.三轴加速度传感器阵列振动测试新方案[J].中国测试,2012,38(3):109-112.
- [5] 杨杰.无陀螺捷联惯导系统加速度计构型研究与误差分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [6] 王东江,杨新民.一种无陀螺捷联惯导的九加速度计测姿方法[J].电子测量技术,2017,40(10):70-74.
- [7] QIN F J, LI A, XU J N. Design of attitude algorithm for 13-accelerometer based inertial navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(6): 637-641.
- [8] 汤传业. SINS/GPS 组合测量中的捷联算法与组合滤波技术研究[D].南京:东南大学,2016.
- [9] 王菲. SINS/GPS 组合导航系统研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [10] 汪伟,歹英杰,陈海龙,等.独立卡尔曼滤波器全加速度计复杂振动角速度解算[J].中国测试,2017,43(5):105-109.
- [11] 陈海龙.基于加速度计阵列的装备六自由度复杂振动测试技术研究[D].石家庄:军械工程学院,2013.
- [12] 李成刚,谢志红,尤晶晶,等.新型无陀螺捷联惯导系统导航方案设计及建模[J].中国惯性技术学报,2015,23(3):303-310.
- [13] 张慧.捷联惯导系统自对准技术研究及仿真[D].太原:中北大学,2016.