文章编号:1671-8860(2012)03-0278-04　　文献标志码:A

一种新型 9 加速度计无陀螺惯导系统解算方法

覃方君[1]　许江宁[1]　李　安[2]

(1　海军工程大学电气与信息工程学院,武汉市解放大道 717 号,430033)
(2　海军工程大学科研部,武汉市解放大道 717 号,430033)

摘　要:提出了一种新型的 9 加速度计无陀螺惯导系统配置方法,由角速度平方的开方运算求得角速度数值,由角加速度积分求得角速度正负号,两者组合求解角速度,能消除角速度解算时的积分迭代误差。三维的角速度平方、角加速度和线加速度均作为 9 个独立变量参与系统解算,且仅由 9 加速度计输出的线性组合得到,解算简单,计算量小,能避免"除零"错误和耦合误差;同时,加速度计数目是该类解算方法中最少的。仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词:9 加速度计;无陀螺;惯性导航系统;误差

中图法分类号:P227.2

无陀螺惯导系统(gyro-free inertial navigation system, GF-INS)是一种采用全加速度计实现普通惯性导航系统功能的新型导航系统,具有成本低、体积小、可靠性高、动态性能好等一系列优点[1,2]。采用加速度计取代陀螺仪作为测角惯性元件的思想由来已久,由于当时惯性元件制造工艺所限,GF-INS 并未得到实际应用。近年来,随着加速度计制造水平的不断提高,GF-INS 又重新得到了研究人员的重视。文献[3,4]研制成功了 6 加速度计组合的 GF-INS 原理样机,此配置方案中,由于 6 加速度计输出中只能解算出角加速度信息,比普通惯导系统解算需多 1 次积分,因此系统误差随时间发散比较严重。为了提高系统姿态角解算精度,文献[5]提出了 9 加速度计配置方案,能直接解算角速度,从而避免了角速度求解的积分迭代误差,但是此方案解算角速度的平方项时,在分母为零的情况下会产生"除零"错误。文献[6]提出了 12 加速度计方案,也能减少一次角速度解算积分,同时不会产生"除零"错误,但是冗余加速度计数目过多,给系统成本、体积、能耗、可靠性等方面带来一定影响。为了提高 GF-INS 的解算精度,本文提出了一种新型的 9 加速度计 GF-INS,仿真结果表明,采用新的解算方法后,系统误差的发散性受到了显著抑制。

1　9 加速度计无陀螺惯导系统解算新方法

本文提出了一种新型的 9 加速度计 GF-INS,其加速度计安装位置与敏感方向如图 1 所示。

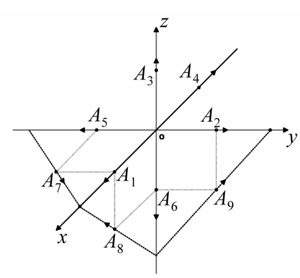

图 1　9 加速度计安装示意图

Fig. 1　Scheme of Installation of 9 Accelerometers

设加速度计 $\boldsymbol{A}_i$ 的安装位置向量为 $\boldsymbol{u}_i$,敏感方向向量 $\boldsymbol{\theta}_i(i=1,2,\cdots,9)$,$l$ 为安装臂长。图 1 中 9 个加速度计的安装位置向量和敏感方向向量分别为:

$$\boldsymbol{u}_1 = l[1\ 0\ 0]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\theta}_1 = [1\ 0\ 0]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{u}_2 = l[0\ 1\ 0]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{\theta}_2 = [0\ 1\ 0]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{u}_3 = l[0\ 0\ 1]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\theta}_3 = [0\ 0\ 1]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{u}_4 = l[-1\ 0\ 0]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\theta}_4 = [-1\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{u}_5 = l[0\ -1\ 0]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\theta}_5 = [0\ -1\ 0]^{\mathrm{T}}$$

收稿日期:2012-01-05。

项目来源:微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室基金资助项目(201001)。

$$\boldsymbol{u}_6 = l[0\ 0\ -1]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\theta}_6 = [0\ 0\ -1]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{u}_7 = l[1\ -1\ 0]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\theta}_7 = [1\ 1\ 0]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{u}_8 = l[1\ 0\ -1]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\theta}_8 = [1\ 0\ 1]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{u}_9 = l[0\ 1\ -1]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\theta}_9 = [0\ 1\ 1]^{\mathrm{T}}$$

$\boldsymbol{A}_i$ 的输出方程为(不失一般性,没有考虑重力影响)：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_1\\\boldsymbol{A}_2\\\boldsymbol{A}_3\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_1^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{\theta}_2^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{\theta}_3^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{R}} + \begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{u}_1\\\boldsymbol{\theta}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{u}_2\\\boldsymbol{\theta}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{u}_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{R}}_x\\\ddot{\boldsymbol{R}}_y\\\ddot{\boldsymbol{R}}_z\end{bmatrix} - l\begin{bmatrix}\omega_y^2+\omega_z^2\\\omega_x^2+\omega_z^2\\\omega_x^2+\omega_y^2\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_4\\\boldsymbol{A}_5\\\boldsymbol{A}_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_4^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{\theta}_5^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{\theta}_6^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{R}} + \begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_4^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{u}_4\\\boldsymbol{\theta}_5^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{u}_5\\\boldsymbol{\theta}_6^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{u}_6\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{R}}_x\\\ddot{\boldsymbol{R}}_y\\\ddot{\boldsymbol{R}}_z\end{bmatrix} - l\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}_y^2+\boldsymbol{\omega}_z^2\\\boldsymbol{\omega}_x^2+\boldsymbol{\omega}_z^2\\\boldsymbol{\omega}_x^2+\boldsymbol{\omega}_y^2\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中各参数意义参见文献[3,4]。

由式(1)、(2)可求得：

$$\begin{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{R}}_x\\\ddot{\boldsymbol{R}}_y\\\ddot{\boldsymbol{R}}_z\end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_1-\boldsymbol{A}_4\\\boldsymbol{A}_2-\boldsymbol{A}_5\\\boldsymbol{A}_3-\boldsymbol{A}_6\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}_x^2\\\boldsymbol{\omega}_y^2\\\boldsymbol{\omega}_z^2\end{bmatrix} = \frac{1}{4l}\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_1-\boldsymbol{A}_2-\boldsymbol{A}_3+\boldsymbol{A}_4-\boldsymbol{A}_5-\boldsymbol{A}_6\\-A_1+\boldsymbol{A}_2-\boldsymbol{A}_3-\boldsymbol{A}_4+\boldsymbol{A}_5-\boldsymbol{A}_6\\-A_1-\boldsymbol{A}_2+\boldsymbol{A}_3-\boldsymbol{A}_4-\boldsymbol{A}_5+\boldsymbol{A}_6\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_7\\\boldsymbol{A}_8\\\boldsymbol{A}_9\end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1&1&0\\1&0&1\\0&1&1\end{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{R}} + \frac{l}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}0&0&2\\0&-2&0\\2&0&0\end{bmatrix}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \frac{l}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}_x^2-\boldsymbol{\omega}_y^2\\\boldsymbol{\omega}_x^2-\boldsymbol{\omega}_z^2\\\boldsymbol{\omega}_y^2-\boldsymbol{\omega}_z^2\end{bmatrix} \tag{5}$$

将式(3)、(4)代入式(5)可解得：

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{\omega}}_x\\\dot{\boldsymbol{\omega}}_y\\\dot{\boldsymbol{\omega}}_z\end{bmatrix} = \frac{-1}{2l}\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_2-\boldsymbol{A}_6-\sqrt{2}\boldsymbol{A}_9\\-\boldsymbol{A}_1+\boldsymbol{A}_6+\sqrt{2}\boldsymbol{A}_8\\\boldsymbol{A}_1-\boldsymbol{A}_5-\sqrt{2}\boldsymbol{A}_7\end{bmatrix} \tag{6}$$

由式(3)可知,载体线加速度仅是加速度计输出的线性组合,而与角速度或角加速度无关,其优点是消除了角速度或角加速度耦合误差,可直接两次积分得到载体位置信息。此外,采用作差法求取线加速度,可消除加速度计常值漂移的影响,有利于提高解算精度。

由式(4)开平方可得到角速度的数值绝对值,再由式(6)积分后可确定角速度的正负号,两者组合即可完全确定载体角速度。因此,在解算角速度时,避免了从角加速度直接积分求得角速度,消除了积分迭代误差,可有效抑制加速度计误差随时间发散。

由式(3)、(4)、(6)可知,线加速度、角速度平方以及角加速度均是加速度计输出的线性组合,解算简单,计算量小,解算过程不包含除法运算,不会产生“除零”。

把角速度平方项 $\boldsymbol{\omega}_x^2$、$\boldsymbol{\omega}_y^2$、$\boldsymbol{\omega}_z^2$,角加速度 $\dot{\boldsymbol{\omega}}_x$、$\dot{\boldsymbol{\omega}}_y$、$\dot{\boldsymbol{\omega}}_z$ 和线加速度 $\ddot{\boldsymbol{R}}_x$、$\ddot{\boldsymbol{R}}_y$、$\ddot{\boldsymbol{R}}_z$ 作为 9 个独立量参与系统解算,9 个加速度计是同类解算方法中加速度计数目最少的。

9 加速度计 GF-INS 整个解算过程如图 2 所示。该系统解算的主要特点有：

1) 直接从角速度平方项开平方解算载体的角速度的绝对值,再由角加速度积分后决定角速度的正负性,通过两者组合求解角速度,从而使求解载体姿态和位置的积分次数分别减少 1 次,系统误差的发散性受到显著抑制。

2) 求解过程中不包含角加速度或角速度项,可避免耦合误差。

3) 角速度平方项、角加速度、线加速度均由加速度计输出的线性组合直接求得,不含除法运算,不会产生“除零”错误,解算简单,计算量小。

4) 把角速度平方项 $\omega_x{}^2$、$\omega_y{}^2$、$\omega_z{}^2$,角加速度 $\dot{\omega}_x$、$\dot{\omega}_y$、$\dot{\omega}_z$ 和线加速度 $\ddot{\boldsymbol{R}}_x$、$\ddot{\boldsymbol{R}}_y$、$\ddot{\boldsymbol{R}}_z$ 作为 9 个独立量参与系统解算,9 个加速度计是该类解算方法中加速度计数目最少的。

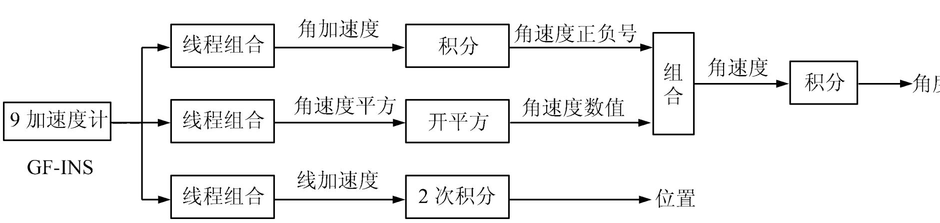

图 2　9 加速度计 GF-INS 解算基本过程

Fig. 2　BasicCalculation Procedure of 9-GFINS

2 仿真及分析

针对载体经典圆周运动，对文献[3,4]的6加速度计GF-INS和本文的9加速度计GF-INS进行了对比仿真。仿真条件为：① 载体质心在XOY平面以$\rho=0.01\ \text{rad/s}^2$转速逆时针作半径$r=10$ m的逆时针加速圆周线运动；② 载体绕X、Y、Z轴以角速度为$[\boldsymbol{\omega}_x\ \ \boldsymbol{\omega}_y\ \ \boldsymbol{\omega}_z]^{\mathrm{T}}=[2\ \ 2\ \ 2]^{\mathrm{T}}$ rad/s的匀速角运动；③ 加速度计安装长度$l=10$ cm；④ 加速度计的常值漂移误差为$1.5\times10^{-5}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$，随机漂移为有限频带白噪声，功率谱密度(方差)等于$2\times10^{-10}(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})^2$；⑤ 仿真时间$t=60$ s，计算步长$\Delta t=0.01$ s。

仿真求得姿态角误差、位置误差实验数据如表1、2所示(精度提高率定义为$\left(1-\left|\dfrac{\text{GF-INS}_{9\text{加速度计}}\text{误差}}{\text{GF-INS}_{6\text{加速度计}}\text{误差}}\right|\right)\times100\%$)。姿态角误差、位置误差、载体轨迹分别如图3、4所示。

表1 姿态角误差(仿真时刻60 s处)/(°)

Tab.1 Attitude Errors(t=60 s)/(°)

系统类型	X轴向角误差	Y轴向角误差	Z轴向角误差
6加速度计	−0.534	−2.584	−1.875
9加速度计	0.017	−0.077	0.062
精度提高	96.82%	97.02%	96.69%

表2 位置误差(仿真时刻60 s处)/m

Tab.2 Position Errors(t=60 s)/m

系统类型	X轴向位置误差	Y轴向位置误差
6加速度计	−103.201	104.337
9加速度计	10.372	12.683
精度提高	89.95%	87.84%

由此可见：① 在完全相同的仿真条件下，9加速度计GF-INS在姿态和位置解算时均优于6加速度计GF-INS，并且随着时间增长，优势更加明显。在仿真时间$t=60$ s时，姿态角精度提高了95%以上，位置精度提高了85%以上，这说明9加速度计GF-INS解算方法的可行性和有效性；② 由于9加速度计GF-INS在求解角度时减少了一次积分，因此，在白噪声随机信号作用下，角误差曲线的光滑性不如6加速度计GF-INS，但是整体变化趋势更为平缓；③ 两种解算方法均随时间发散，只是发散的速度不同而已，这说明解算方法不能从根本上消除误差，只能在一定程度上抑制误差发散速度，如要获得长期解算精度，GF-INS必须与其他导航方式组合使用[7,8]。

3 结 语

GF-INS虽然具有成本低、体积小、机动性好、可靠性高等一系列优点，但是其误差随时间发

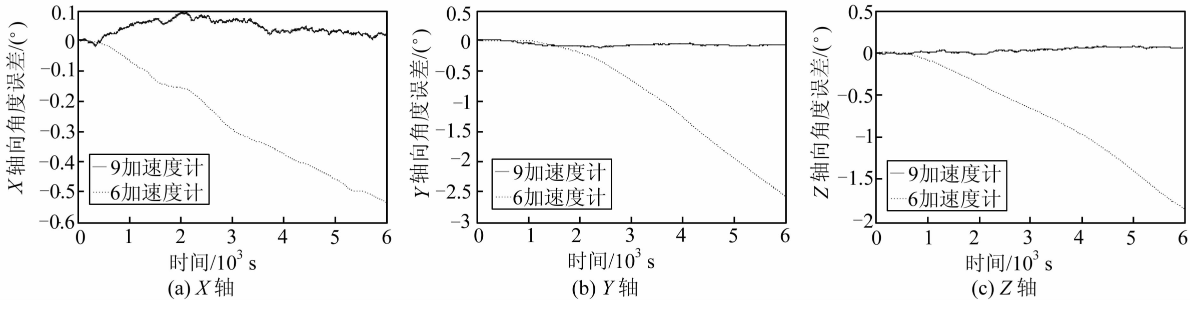

图3 姿态角误差

Fig.3 Attitude Errors

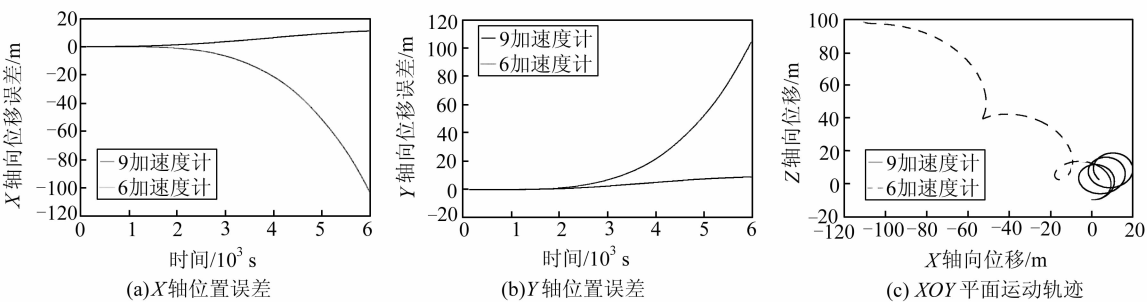

图4 位置误差与载体轨迹

Fig.4 Position Errors and Trajectory

散较严重。该问题直接影响和制约了 GF-INS 的应用和发展。针对此问题,本文通过合理配置 9 加速度计的位置和方向,提出了一种新型 9 加速度计 GF-INS,并进行了数字仿真。

当然,在实际应用中,当载体角运动速度较小时,角速度平方项将很小,甚至无法检测;在有些噪声条件下,角速度平方项的"非负"特性也将不能得到满足,无法进行开平方运算。因此,在某些特定应用背景下,还需要将角速度平方信息和角加速度信息组合使用,组合算法将是进一步研究的重要内容。

参 考 文 献

[1] 曹咏弘,祖静,林祖森. 无陀螺捷联惯导系统综述[J]. 测试技术学报,2004,18(3):270-273

[2] 丁明理,王祁. 无陀螺惯性测量组合研究现状概述[J]. 中国惯性技术学报,2005,13(4):83-88

[3] Tan C W, Park S. Design of Gyroscope-Free Navigation Systems[C]. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Oakland, 2001

[4] Tan C W, Park S. Design of Accelerometer-Based Inertial Navigation Systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005,54(4): 2 520-2 530

[5] 王劲松,王祁,孙圣和. 无陀螺微惯性测量组合的优化算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5):632-635

[6] 汪小娜,王树宗, 朱华兵. 无陀螺捷联惯导系统模型研究[J]. 兵工学报,2006,27(2):288-292

[7] 刘伟,徐海刚,张京娟. 高精度、微小型惯性/GPS 组合导航系统研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010,35(2):160-165

[8] 刘伟,王超,张京娟. 微小型惯性/光学组合导航系统研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010,35(12):1 393-1 396

第一作者简介:覃方君,讲师,博士,主要从事船用惯性技术应用研究。

E-mail:haig2005@125.com

A New Calculative Method for Gyro-Free Inertial Navigation System Using 9 Accelerometers

QIN Fangjun[1]　*XU Jiangning*[1]　*LI An*[2]

(1　Electrical Engineering and Information Engineering College, Naval University of Engineering, 717 Jiefang Road, Wuhan 430033,China)

(2　Office of R&D, Naval University of Engineering, 717 Jiefang Road, Wuhan 430033,China)

Abstract: Errors of gyro free inertial navigation system (GF-INS) using 6 accelerometers grow faster with time comparing with the conventional inertial navigation system (INS), for the reason that it has one more integral operation when calculating the angular velocity. To improve the accuracy of GF-INS, a novel scheme of 9 accelerometers GF-INS is proposed and a new calculative method is discussed, which can eliminate the iterative errors of integral operation for angular velocity calculation and calculate linear acceleration with the difference of outputs of accelerometers only. So the constant biases of Accelerometers and coupling errors from angular movement can been eliminated. This scheme can calculate squares of angular velocity, angular accelerations and linear accelerations with only the linear combination of outputs of 9 Accelerometers ,so the computation is very simple and timesaving. This schome regards three-dimensional squares of angular velocity, angular accelerations and linear acclerations as 9 independent variables,so the 9 accelerometers GF-INS has the least accelerometers. The simulation results show that the divergence of errors is restrained remarkably with the new calculative method.

Key words: 9-Accelerometers; gyro free; inertial navigation system; errors

About the first author: QIN Fangjun, lectuer, Ph.D, majors in inertial technology and application.

E-mail: haig2005@125.com