网络出版时间：2014-05-06 09:05
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13203/j.whugis20120190.html

DOI:10.13203/j.whugis20120190　**文章编号**:1671-8860(2014)05-0591-05

利用牛顿插值的GPS/INS组合导航惯性动力学模型

李增科[1]　高井祥[2]　王　坚[1]　胡　洪[2]

1　中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室,江苏 徐州,221116
2　中国矿业大学江苏省资源环境信息工程重点实验室,江苏 徐州,221116

摘　要:针对GPS/INS组合导航中INS动力学建模不准确的问题,提出了一种基于牛顿插值的GPS/INS组合导航惯性动力学多阶建模算法。首先,介绍了牛顿插值的计算方法;然后,利用其对惯性系统Gauss-Markov模型进行改进,实现了多阶建模;最后,给出了组合导航详细的动力学模型和观测模型。利用实测数据对算法进行验证,并通过对比不同阶数建模方法寻求牛顿插值的最优建模阶数。结果表明,相比于传统Gauss-Markov过程,基于牛顿插值的GPS/INS组合导航惯性动力学模型能够有效提高组合导航位置精度和姿态精度。与此同时,实验分析表明,4阶牛顿插值建模在实现模型准确性的前提下,降低了模型的复杂性,为牛顿插值建模阶数选取提供了良好的借鉴。

关键词:GPS/INS组合导航;牛顿插值;动力学模型;Gauss-Markov过程

中图法分类号:P228.41　　**文献标志码**:A

GPS/INS组合导航有效地实现了全球定位系统和惯性导航系统的优势互补,可以得到高频、高精度的导航观测值,目前已在导航、测量等领域得到了广泛的应用[1]。将GPS/INS数据通过一定的算法融合形成最优解是组合导航的关键,目前组合导航信息融合普遍采用Kalman滤波。

由于GPS观测值误差不随时间发生累积,所以组合导航信息融合的关键在于通过GPS观测值对INS误差实时修正,因此,GPS观测值精度高低以及INS误差模型的准确性对组合导航结果影响较大。GPS接收机技术相对成熟,其观测值精度可以达到厘米级甚至毫米级[2],完全满足导航的需要,因此,更多的研究集中于INS误差建模方法的优化。文献[3]应用传统的Gauss-Markov过程对陀螺和加速度偏心误差建模进行GPS/GLONASS/INS导航研究;文献[4]通过对MEMS惯性系统的随机误差分析,提出了AR模型建模方法,并将其与Gauss-Markov进行对比;为提高算法效率,陀螺和加速度计误差也被当做随机噪声或有色噪声进行建模[5]。上述算法在模型准确性和算法效率方面互有优劣,但是很难实现两者的兼顾和统一。

本文在Gauss-Markov过程的基础上引入牛顿插值算法,建立了基于牛顿插值的多阶动力学模型,在尽量减少算法复杂度的情况下实现了模型精度的提高,并通过实测实验,将该算法与传统的Gauss-Markov过程建模方法进行了对比,通过不同阶数模型对比寻求牛顿插值的最优建模阶数。

1　基于牛顿插值的动力学模型

1.1　牛顿插值算法

所谓插值就是通过平面上给定的$n+1$个互异点,作一条n次代数曲线$y=P(x)$近似地表示曲线$y=f(x)$。插值方法很多,其中,牛顿插值法可以根据工程精度要求的不同选择不同的节点个数,可逐步构造插值多项式,具有较大的灵活性和较小的运算量,而且易于计算机编程实现。

牛顿等距插值是牛顿插值的一类特殊情况,其表达式为[6]:

$$f(x)=P(t_{k-n+s},n)+R_n(s) \tag{1}$$

收稿日期:2013-02-16

项目来源:国家863计划资助项目(2013AA12A201);国家自然科学基金资助项目(41074010);江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12_0939)。

第一作者:李增科,博士生,研究方向为GPS/INS组合导航。E-mail:zengkeli@yeah.net

其中，$R_n(s)$为插值余项，即牛顿插值的算法误差；$P(t_{k-n+s},n)$为牛顿插值公式，其表达式为：

$$
\begin{aligned}
P(t_{k-n+s},n) &= P(t_{k-n}+s\delta t,n)= \\
&\Delta^1 F_0+\frac{s}{1!}\Delta^2 F_0+\cdots+ \\
&\frac{s(s-1)\cdots(s-n+2)}{n!}\Delta^n F_0
\end{aligned}
\tag{2}
$$

其中，$\nabla^m F_0=\sum_{j=0}^{m-1}(-1)^{m-1-j}C_{m-1}^i f_{k-n+j}$为插值算子。

令$s=n$，即利用前n个时刻的函数值对当前时刻的函数值进行插值，k时刻函数f的牛顿插值为：

$$
f_k=P(t_{k-n+s},n)=\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{f}_{(k-n:k-1)}=\sum_{i=1}^{n}J_{n-i+1}f_{k-i}
\tag{3}
$$

其中，$J_g=\sum_{i=g-1}^{n-1}(-1)^{i-g+1}C_i^{g-1}C_n^i$；$\boldsymbol{f}_{(k-n:k-1)}=[f_{(k-n)}\quad f_{(k-n+1)}\quad\cdots\quad f_{(k-1)}]^{\mathrm{T}}$为前$n$个时刻的函数值；$\boldsymbol{J}=[J_1\quad J_2\quad\cdots\quad J_n]$为前$n$个时刻函数值的插值算法系数。

牛顿向后插值的系数矩阵$\boldsymbol{J}$和前n个时刻的函数值没有关系，只和系数的位置有关，因此，在等间距插值过程中可以提前计算系数矩阵$\boldsymbol{J}$。表1是$1\leqslant n\leqslant 5$的系数矩阵$\boldsymbol{J}$的值[7]。

表1 系数矩阵 $\boldsymbol{J}$

Tab.1 Matrix of Coefficient $\boldsymbol{J}$

	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
J_1	1	−1	1	−1	1
J_2	—	2	−3	4	−5
J_3	—	—	3	−6	10
J_4	—	—	—	4	−10
J_5	—	—	—	—	5

在插值计算过程中，并不是插值多项式的次数越高，精度越好。当次数较高时，数值常常不稳定[8]，而且会增加算法的复杂度，因此，建模过程中需要对不同的建模阶数对比优化。

1.2 惯性系统模型

惯性系统包括加速度计和陀螺仪，由于两者的误差特点较为复杂，所以，在GPS/INS组合导航系统中，通常将加速度计和陀螺仪的误差认为是高斯白噪声，或者认为两者的误差近似满足Gauss-Markov过程，即将k时刻的加速度计和陀螺仪状态误差和$k-1$时刻的状态误差相联系。但是在实际情况中，k时刻的状态误差可能和之前的多个时刻的状态误差有关系，因此，借助牛顿等距插值对加速度计和陀螺仪误差的Gauss-Markov过程进行改进。以陀螺仪误差为例，传统的Gauss-Markov过程为：

$$
\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}=\begin{bmatrix}-\tau_{\omega X} & 0 & 0\\ 0 & -\tau_{\omega Y} & 0\\ 0 & 0 & -\tau_{\omega Z}\end{bmatrix}\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{u}_{\varepsilon}=\boldsymbol{\beta}_{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{u}
\tag{4}
$$

其中，$\boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_{\omega X}\quad \varepsilon_{\omega Y}\quad \varepsilon_{\omega Z}]^{\mathrm{T}}$为INS陀螺仪$X$、$Y$、$Z$三轴误差；$(\tau_{\omega X}\quad \tau_{\omega Y}\quad \tau_{\omega Z})$为陀螺仪误差Gauss-Markov过程时间常数。

对微分方程离散化，只保留一阶项，即

$$
\boldsymbol{\varepsilon}_k=(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\beta})\boldsymbol{\varepsilon}_{k-1}+\boldsymbol{u}
\tag{5}
$$

从式(5)可以看出，k时刻的陀螺仪状态误差和$k-1$时刻的状态误差相联系，而忽略了之前时刻的状态值，对式(4)引入牛顿等距插值算法，建立陀螺仪误差动力学模型：

$$
\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\approx\sum_{i=1}^{n}J_{n-i+1}\boldsymbol{\beta}_{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}_{k-i}+\boldsymbol{u}_{\varepsilon}
\tag{6}
$$

式(6)左右两边分别为连续过程和离散过程，所以用约等于进行连接。当n取值不同时，可利用当前时刻之前的多个状态值进行建模，式(6)用离散化公式表示为：

$$
\boldsymbol{\varepsilon}=(\boldsymbol{I}+J_n\boldsymbol{\beta}_{\varepsilon})\boldsymbol{\varepsilon}_{k-1}+\sum_{i=2}^{n}J_{n-i+1}\boldsymbol{\beta}_{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}_{k-i}+\boldsymbol{u}_{\varepsilon}
\tag{7}
$$

结合表1，从式(7)中可以看出，当$n=1$时，引入牛顿插值的系统模型和Gauss-Markov过程是等价的；当$n>1$时，新建模型将k时刻的状态值和$k-1$、$k-2$、…、$k-n$时刻的状态值相联系，一方面，增加了多时刻的动力学模型，使模型的可靠性更高，除此之外，对当前时刻的状态值起到了平滑作用，降低了误差的影响作用。

2 GPS/INS组合导航模型

2.1 动力学模型

GPS/INS组合导航动力学模型的构建基于INS误差方程[9]：

$$
\begin{aligned}
\delta\dot{\boldsymbol{r}} &= -\boldsymbol{\omega}_{en}\times\delta\boldsymbol{r}+\delta\boldsymbol{v}\\
\delta\dot{\boldsymbol{v}} &= -(\boldsymbol{\omega}_{ie}+\boldsymbol{\omega}_{in})\times\delta\boldsymbol{v}-\delta\boldsymbol{\psi}\times\boldsymbol{f}+\nabla\\
\delta\dot{\boldsymbol{\psi}} &= -\boldsymbol{\omega}_{in}\times\delta\boldsymbol{\psi}+\boldsymbol{\varepsilon}
\end{aligned}
\tag{8}
$$

其中，$\delta\boldsymbol{r}$、$\delta\boldsymbol{v}$和$\delta\boldsymbol{\psi}$分别是位置、速度和方向误差向量；$\boldsymbol{\omega}_{en}$是导航坐标系相对于地球坐标系的旋转角速度矢量；$\boldsymbol{\omega}_{ie}$是地理坐标系相对于惯性坐标系的旋转角速度矢量；$\boldsymbol{\omega}_{in}$是导航坐标系相对于惯性坐标系的旋转角速度矢量；$\boldsymbol{f}$加速度计测量的比力矢量；加速度误差向量∇和陀螺误差向量$\boldsymbol{\varepsilon}$模型表达式为：

$$\dot{\nabla} = \sum_{i=1}^{n} J_{n-i+1}\boldsymbol{\beta}_{\nabla}\ \nabla_{k-i} + \boldsymbol{u}_{\nabla} \tag{9}$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \sum_{i=1}^{n} J_{n-i+1}\boldsymbol{\beta}_{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}_{k-i} + \boldsymbol{u}_{\varepsilon} \tag{10}$$

其中,$\boldsymbol{u}_{\nabla}$ 和 $\boldsymbol{u}_{\varepsilon}$ 是高斯白噪声向量。

综合以上各式,INS 误差转移方程表达式为[10]:

$$\begin{cases} \delta\dot{\boldsymbol{r}} = -\boldsymbol{\omega}_{en} \times \delta\boldsymbol{r} + \delta\boldsymbol{v} \\ \delta\dot{\boldsymbol{v}} = -(\boldsymbol{\omega}_{ie} + \boldsymbol{\omega}_{in}) \times \delta\boldsymbol{v} - \delta\boldsymbol{\psi} \times \boldsymbol{f} + \nabla \\ \delta\dot{\boldsymbol{\psi}} = -\boldsymbol{\omega}_{in} \times \delta\boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\varepsilon} \\ \dot{\nabla} = \sum_{i=1}^{n} J_{n-i+1}\boldsymbol{\beta}_{\nabla}\ \nabla_{k-i} + \boldsymbol{u}_{\nabla} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \sum_{i=1}^{n} J_{n-i+1}\boldsymbol{\beta}_{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}_{k-i} + \boldsymbol{u}_{\varepsilon} \end{cases} \tag{11}$$

写成矩阵形式为:

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{u} \tag{12}$$

其中,$\boldsymbol{X}$ 为误差状态向量,$\boldsymbol{X} = [\delta\boldsymbol{r} \quad \delta\boldsymbol{v} \quad \delta\boldsymbol{\psi} \quad \nabla \quad \boldsymbol{\varepsilon}]^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{F}$ 为系统状态转移矩阵;$\boldsymbol{u}$ 为状态过程噪声向量。可以看出,当加速度计和陀螺仪误差牛顿插值建模选取的项数不同时,状态向量 $\boldsymbol{X}$ 中的∇和 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的阶数也随之不同。

2.2　观测模型

组合导航数据融合采用松耦合方式,取 GPS 和 INS 输出的位置和速度之差作为观测值,构造观测量[11-12]:

$$Z_r(t) = r_{\mathrm{GPS}}(t) - r_{\mathrm{INS}}(t) = r_{\mathrm{GPS}}(t) - \left(r_{\mathrm{INS}}(0) + \int_0^t v_{\mathrm{INS}}(0)\mathrm{d}t + \int_0^t\int_0^t \alpha(t)\mathrm{d}t\right) \tag{13}$$

$$Z_v(t) = v_{\mathrm{GPS}}(t) - v_{\mathrm{INS}}(t) = v_{\mathrm{GPS}}(t) - \left(v_{\mathrm{INS}}(0) + \int_0^t \alpha(t)\mathrm{d}t\right) \tag{14}$$

式中,$Z_r(t)$是位置观测量;$Z_v(t)$是速度观测量;$r_{\mathrm{GPS}}(t)$是 GPS 的位置观测值;$r_{\mathrm{INS}}(t)$是 INS 的位置计算值;$v_{\mathrm{GPS}}(t)$是 GPS 的速度观测值;$v_{\mathrm{INS}}(t)$是 INS 的速度计算值;$r_{\mathrm{INS}}(0)$、$v_{\mathrm{INS}}(0)$是 INS 的初始位置和速度;$\alpha(t)$是 *INS* 所测得的加速度。则 Kalman 的量测方程为[13]:

$$\boldsymbol{Z}_k = \begin{bmatrix} Z_r(t) \\ Z_v(t) \end{bmatrix} = \boldsymbol{B}_k\boldsymbol{X} + \begin{bmatrix} \nu_r \\ \nu_v \end{bmatrix} \tag{15}$$

式中,$\boldsymbol{B}_k$ 为观测矩阵;ν 为观测噪声,满足高斯白噪声特性。

3　实例分析

为对 Gauss-Markov 模型和引入牛顿插值的新建模型进行比较,并验证加速度计和陀螺仪不同建模阶数对 GPS/INS 组合导航的影响,本文进行了车载实测实验。实验区域位于中国矿业大学南湖校区和云龙湖景区(见图 1)。实验采用 2 台 LAICA-GPS 接收机和 1 台惯性测量系统,1 台 GPS 接收机作为静止参考基站,另 1 台 GPS 接收机和惯性测量系统一起安置在运动车辆内(GPS 天线安装在车顶)。实验采用 SPAN-CPT 惯性测量单元,表 1 是惯性测量单元性能参数。INS 数据采集频率为 100 Hz,GPS 数据采样周期为 1 s。采用 GPS 的位置和速度观测值进行组合导航时,初始方差取 10 m^2 和 0.01 m^2/s^2。

表 2　SPAN-CPT 技术参数

Tab. 2　SPAN-CPT's Technical Data

	陀螺	加速度计
偏心	20 °/h	4×10^{-3}
尺度因子	$1\ 500\times10^{-6}$	800×10^{-6}
随机游走	$0.035\ °/\sqrt{\mathrm{h}}$	$60\times10^{-3}\mathrm{g}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$

为了说明引入牛顿插值的新建模型的有效性,分别采用 4 种方案进行导航解算。

① 方案 1,惯性(加速度计和陀螺仪)误差状态量动力学模型采用 Gauss-Markov 建模;② 方案 2,惯性误差状态量动力学模型采用二阶牛顿插值建模;③ 方案 3,惯性误差状态量动力学模型采用 4 阶牛顿插值建模;④ 方案 4,惯性误差状态量动力学模型采用 5 阶牛顿插值建模。

图 1　车辆测试轨迹

Fig. 1　Vehicular Test trajectory

图 2(a)~2(c)为 4 种解算方案在 N、E、D 三个方向的误差序列图,由于位置误差较小,从经纬度误差角度不便于观察,因此,把位置误差转换到 N、E、D 坐标系中,其中,两台接收机解算的 RTK 值作为参考值。解算初始阶段,误差序列图呈现振荡趋势,是由于初始参数的选取没有达到最优造成的。从整个实验过程来看,方案 2~4 采用牛顿插值的惯性误差状态量动力学模型建模,导航结果要优于采用 Gauss-Markov 建模的方案 1,采用高阶(4 阶和 5 阶)牛顿插值建模方案的导航精度优于低阶(二阶)牛顿插值建模方案。

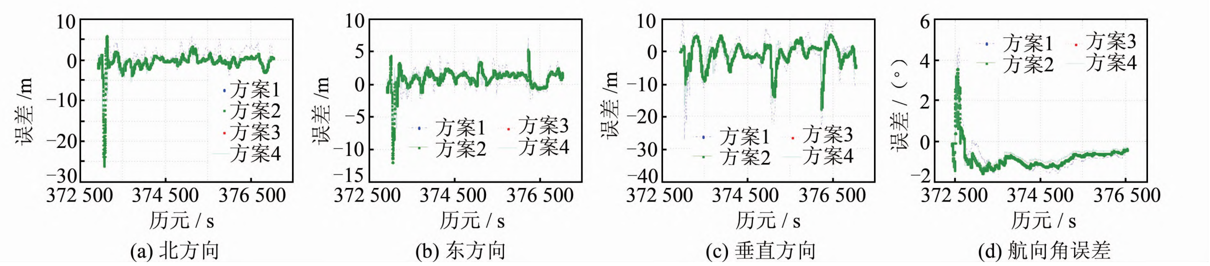

图2 方向误差与航向角误差

Fig. 2 Direction and Heading Angle Errors of Different Schemes

图2(d)给出了4种解算方案下航向角误差,可以看出,采用牛顿插值的惯性误差状态量动力学模型建模不但提高直接可测参数的精度,而且提高了间接可测参数(航向角)的估计精度,从均方差角度分析,相对于方案1(1.157°),方案2、方案3和方案4的RMS误差降低至0.974°、0.867°和0.862°。

4种方案的详细导航精度评价结果列见表3。对比表3中4种方案在N、E、D三个方向的精度可知,通过牛顿插值建模的方法提高了组合导航精度,说明基于牛顿插值所建的动力学模型更加精确。与此同时,当将牛顿插值建模的阶数从二阶提高到4阶,组合导航精度也随之提高。但是,将4阶牛顿插值建模提高到5阶,组合导航精度提高不明显,部分方向导航精度还略有下降,说明采用牛顿插值建模的方法建立动力学模型时,建模阶数越多并不一定会获得越优的结果。当建模阶数达到4阶之后,继续提高牛顿插值建模阶数不能有效提高导航精度,反而会增加算法的复杂性,因此,组合导航动力学模型采用牛顿插值建模时选取4阶建模较为合适。

表3 位置精度比较/m

Tab. 3 Position Precision Comparison/m

RMS	N	E	D
方案1	2.117	1.684	5.945
方案2	1.179	1.438	3.921
方案3	1.142	1.514	3.838
方案4	1.139	1.518	3.843

4 结 语

本文分析了惯性系统中陀螺和加速度计的模型特点,在原有Gauss-Markov过程的基础上引入了牛顿插值算法,建立了更加准确的GPS/INS组合导航高阶动力学模型,通过车载实验对牛顿插值高阶建模方法进行了优化,验证了建模阶数和导航精度之间的关系。基于牛顿插值的GPS/INS组合导航惯性动力学模型构建方法在不大幅增加模型复杂度的基础上,对惯性系统模型进行了更加准确的数学描述。车载实验证明,与Gauss-Markov模型相比,本文算法能够有效提高导航过程位置和姿态信息的精度,在建模阶数选取较小(4阶)的情况下即可获取较好的导航效果。

参 考 文 献

[1] Hasan A M, Samsudin K, Ramli A R, et al. A Review of Navigation Systems (Integration and Algorithms)[J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2009, 3(2): 943-959

[2] Yan Wei, Ou Jikun, Yuan Yunbin, et al. Research on Network Augmented Real-Time Prexise Point Positioning Algorithm with Broadcast Ephemeris [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 190-1 193(闫伟,欧吉坤,袁运斌,等. 利用广播星历和区域参考网实现实时精密单点定位算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 1 190-1 193)

[3] Antonio A, Mark P, Giovanni P. Benefits of Combined GPS/GLONASS with Low-Cost MEMS IMUs for Vehicular Urban Navigation[J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 5 134-5 158

[4] Minha P. Error Analysis and Stochastic Modeling of MEMS based Inertial Sensors for Land Vehicle Navigation Applications[D]. Calgary: The University of Calgary, 2004

[5] Niu Zhongxing, Xie Yi, Wen Guochun. Modeling Method of Error Models for Integrated Navigation System[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(SA): 1 101-1 103(牛中兴,谢轶,文国春. 组合导航系统误差模型建模方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(SA): 1 101-1 103)

[6] Zebo Z, Bofeng L, Yunzhong S. A Window-Recursive Approach for GNSS Kinematic Navigation Using Pseudorange and Doppler Measurements[J].

The Journal of Navigation, 2013, 66(2): 1-19

[7] Gong Manman, Chen Qian, Gu Guohua, et al. FPGA-Based Realization of Second-Order Newton Interpolation of Infrared Image[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(12): 723-726(龚曼曼,陈钱,顾国华,等. 基于 FPGA 的红外图像二阶牛顿插值算法的实现[J]. 红外技术,2010,32(12):723-726)

[8] Zebo Z, Yunzhong S, Bofeng L. A Windowing-recursive Approach for GPS Real-Time Kinematic Positioning[J]. *GPS Solution*, 2010, 14(4): 365-373

[9] Titterton D H, Weston J L. Strapdown Inertial Navigation Technology(Second Edition)[M]. Bodmin: MPG Books Ltd., 2004

[10] Songlai H, Jinling W. Integrated GPS/INS Navigation System with Dual-Rate Kalman Filter[J]. *GPS Solution*, 2012, 16(3):389-404

[11] Li Zengke, Wang Jian, Gao Jingxiang. The Apply of Precise Point Positioning in GPS/INS Integrated Navigation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(1): 48-51(李增科,王坚,高井祥. 精密单点定位在 GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2013,38(1):48-51

[12] Wu Fumei, Nie Jianliang, He Zhengbin. Classified Adaptive Filtering to GPS/INS Integrated Navigation Based on Predicted Residual and Selecting weight Filtering[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 261-264(吴富梅,聂建亮,何正斌. 利用预测残差和选权滤波构造的分类因子在 GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37(3):261-264)

[13] Antonio A. GNSS/INS Integration Methods[D]. Calgary: The University of Calgary, 2010

Inertial Dynamic Model of GPS/INS Integrated Navigation Based on Newton Interpolation

LI Zengke[1] *GAO Jingxiang*[2] *WANG Jian*[1] *HU Hong*[2]

1 Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: In GPS/INS integrated navigation, the low precision of the INS dynamic model reduces navigation accuracy. Based on Newton interpolation, a multi-order dynamic model algorithm for GPS/INS integrated navigation is proposed. First, the detail algorithm of Newton interpolation is introduced. Based on this a Gauss-Markov model of the inertial system is modified to realize the multi-order model. The design formulas of the observation and dynamical models are presented. Finally, an actual calculation was performed to test the validity of new algorithm. The results of the experiment indicate that when compared with the Gauss-Markov model, the inertial dynamic model for GPS/INS integrated navigation based on Newton interpolation can improve the position and attitude precision effectively. At the same time, an analysis of the experiment shows that a 4-order Newton interpolation model not only enhances model precision, but also reduces model complexity, which provides a good reference for order selection in the Newton interpolation model.

Key words: GPS/INS integrated navigation; Newton interpolation; dynamic model; Gauss-Markov process

First author: LI Zengke, PhD candidate, specializes in the GPS/INS integrated navigation. E-mail: zengkeli@yeah.net

Foundation support: The National 863 Program of China, No. 2013AA12A201; the National Natural Science Foundation of China, No. 41074010; the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, No. SZBF2011-6-B35; the Graduate Student Research and Innovation Program in Jiangsu Province, No. CXZZ12_0939.