

12-13-2019

Design of IMU Dynamic Coefficient Calibration Based on Reduced Space Search Algorithm

Hongyan Yan

Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201100, China;

Zhang Yu

Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201100, China;

Weihua Zhu

Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201100, China;

Shi Ming

Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201100, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design of IMU Dynamic Coefficient Calibration Based on Reduced Space Search Algorithm

Abstract

Abstract: In order to improve the dynamic error coefficient speed of the calibration strapdown inertial group, a dynamic error model is established in the inertial navigation system. The Kalman filter is used to reflect the observation degree of the error term to determine the objective function of the optimal algorithm. The penalty function for *the reduced space search algorithm is improved by genetic algorithm*. At the end, it not only *gets rid of the interference of the local pseudo-optimal solution*, but also *improves the recognition speed* when it is close to the optimal solution. Compared with the solution length of the conjugate gradient method, *the efficiency of the improved reduced space search algorithm for dynamic coefficient identification* is verified, and the problem that the dynamic error of the strapdown inertial group cannot be quickly compensated is effectively solved.

Keywords

strapdown inertial navigation systems, conjugate gradient algorithm, subtractive space search algorithm, dynamic error calibration

Authors

Hongyan Yan, Zhang Yu, Weihua Zhu, Shi Ming, and Yexin Zhang

Recommended Citation

Yan Hongyan, Zhang Yu, Zhu Weihua, Shi Ming, Zhang Yexin. Design of IMU Dynamic Coefficient Calibration Based on Reduced Space Search Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2485-2491.

基于减空间搜索算法的 IMU 动态系数标定设计

闫宏雁, 张宇, 朱伟华, 史明, 张业鑫

(上海机电工程研究所, 上海 201100)

摘要: 为提高标定捷联惯组动态误差系数的速度, 提出在惯性导航系统中建立动力学误差模型, 利用卡尔曼滤波反映误差项的观测度, 确定最优算法的目标函数。针对减空间搜索算法的罚函数采用遗传算法进行分析改进, 在末端时, 既摆脱了局部伪最优解对结果的干扰, 又在接近最优解时提高辨识速度。与共轭梯度法的求解时长进行比较, 验证了改进减空间搜索算法对动态系数标识的高效性, 有效解决捷联惯组动态误差无法快速补偿的问题。

关键词: 捷联式惯性导航系统; 共轭梯度算法; 减空间搜索法; 动态误差标定

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 11-2485-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0338

Design of IMU Dynamic Coefficient Calibration Based on Reduced Space Search Algorithm

Yan Hongyan, Zhang Yu, Zhu Weihua, Shi Ming, Zhang Yexin

(Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201100, China)

Abstract: In order to improve the dynamic error coefficient speed of the calibration strapdown inertial group, a dynamic error model is established in the inertial navigation system. The Kalman filter is used to reflect the observation degree of the error term to determine the objective function of the optimal algorithm. The penalty function for the reduced space search algorithm is improved by genetic algorithm. At the end, it not only gets rid of the interference of the local pseudo-optimal solution, but also improves the recognition speed when it is close to the optimal solution. Compared with the solution length of the conjugate gradient method, the efficiency of the improved reduced space search algorithm for dynamic coefficient identification is verified, and the problem that the dynamic error of the strapdown inertial group cannot be quickly compensated is effectively solved.

Keywords: strapdown inertial navigation systems; conjugate gradient algorithm; subtractive space search algorithm; dynamic error calibration

引言

在国防领域中, 对于飞行器远程目标跟踪性能的要求和导航设备误差精度的要求非常之高。其中捷联式惯性导航系统在飞行器精确打击中起到决

定性因素, 尤其在小型化高速发展的今天占有更为重要的位置。如何评价捷联惯导的好坏是业界较为关注的问题, 其中惯性元件测量精度就成为首要关心的问题^[1], 对于 IMU 误差模型的研究尤为重要。但目前对于惯性元件的动态误差研究仍是当前学术界研究的短板, 但在实际的工程应用上, 这一部分对于整体 IMU 的影响又很大, 为此如何识别与辨识随时间变化的 IMU 误差成为研究的焦点。

IMU 动态误差系数可以作为辨识的依据, 在



收稿日期: 2019-05-29 修回日期: 2019-07-18;
作者简介: 闫宏雁(1992-), 男, 黑龙江, 硕士生, 研究方向为仿真控制; 张宇(1985-), 男, 黑龙江, 硕士生, 高工, 研究方向为仿真控制; 朱伟华(1972-), 男, 上海, 本科生, 研究员, 研究方向为仿真控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 2485 •

惯组工作过程中可以对动态误差进行补偿。结合惯组的工作特性，首先要对误差模型进行优化和改进。因陀螺仪和加速计的结构性差异，动态系数需要分别进行标定。陀螺仪的误差有零偏误差、角速率噪声(随机游走)。加速度计的误差包括人工误差、比例误差。针对两种被测设备的动态误差系数分别进行标定，由于问题求解的精度不同，求解速度不同，进而选择误差标定的方法也存在差异。

本文的主要目的是标定惯导元件的动态误差系数。为满足标定要求，采用同心双轴转台来标定惯性装置，进行测试模拟角运动。通过不同算法模拟出的轨迹，可以获取标定函数的最大可观性误差，后再对其进行高精度校准。将采用基于遗传算法的罚函数优化的减空间搜索算法快速辨识出 IMU 的动态误差系数，并进行标定。同时满足末端制导对稳定回路动态性能指标的高要求，提高惯导系统的精度，减少微机械惯组在特定状态下的动态误差。

1 标定误差模型的建立

1.1 捷联式惯性导航系统的误差模型建立

针对一个捷联式导航系统，因组成不同，故而需要分开建立动态误差模型。典型的惯性测量单元需要在互为正交的 3 个坐标轴上，陀螺仪和加速度计稳定安装在轴上，在惯性导航空间中可以用其测量惯性测量单元的线性加速度、角速度，由此测算出系统的姿态、角度、速度和位置。若要提高导航系统精度，就要进行误差补偿。为确定补偿和实际运动间的先行关系，需要对 IMU 中的加速度计、陀螺仪进行精确的误差标定。捷联式惯性导航系统的误差模型可根据系统的运动姿态下的位置误差、角度误差和角速度误差构建得出。陀螺仪的 ψ 角姿态误差动态模型如式(1)所示， ε_g^b 角速度输出误差模型如式(2)所示。

$$\dot{\psi}^n = C_b^n \varepsilon_g^b - \omega_m^n \times \psi^n + \eta_a \quad (1)$$

$$\varepsilon_g^b = B_g + M_g \omega_{ib}^b + A_g g^b \quad (2)$$

式(2)表示了三轴陀螺仪在惯性坐标系下整体的角速率误差。其中装置的 3 项偏移系数分别为 $b_{g1} b_{g2} b_{g3}$ ， M_g 中含有 9 项误差矩阵系数，加速度 g 也含有 9 项矩阵系数。故上述建立的陀螺仪导航姿态误差模型中与陀螺仪相关的系数共有 21 个。

式(3)表示加速度计的 δr^i 加速度动态误差模型，其中 ε_a 表示加速度计的输出误差角速度， δr 表示为加速度计的位置误差：

$$\delta r^i = C_n^i (\delta \dot{r}^n + 2\Omega_{in}^n \delta r^n + \dot{\Omega}_{in}^n \delta r^n + \Omega_{in}^n \Omega_{in}^n \delta r^n) \quad (3)$$

$$\varepsilon_a^b = B_a + M_a g^b + L_a \quad (4)$$

式(4)表示了加速度计整体的角速度输出误差。 B_a 中含有 3 项加速度计误差系数， M_a 中包含 9 项比例因子和误差角系数，杠臂因子也含有 9 项矩阵系数。故上述建立的加速度计导航动态误差模型中与加速度计相关的系数共有 21 个。

综上所述，微机械惯组在工作中包含安装误差、非线性误差等 42 项系数。为保证较长工作下准确的动态补偿。需要去除静态误差和其他无关项，进而确定动态系数。

1.2 捷联式惯性导航系统动态误差模型的建立

根据捷联式导航系统中陀螺仪的导航姿态误差模型式(2)和加速度计的导航动态误差模型式(4)，不难获得微机械惯组的动态误差模型。选择白噪声为系统输入，则惯组的动态模型可由如式(5)~(6)来表示。其中 $F(t)$ 表示惯导系统的动力学表达式， $H(t)$ 为惯性空间范围内的测量表示， $x(t)$ 惯组动态误差的状态表达式， $z(t)$ 为测量表达式， $\omega(t)$ 为过程噪声， $v(t)$ 为测量噪声^[3]。

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + \omega(t) \quad (5)$$

$$z(t) = H(t)x(t) + v(t) \quad (6)$$

惯导系统的状态向量如式(7)所示。其中 $\delta r(t)$ 为位置表达式， $\psi(t)$ 为姿态表达式， $\delta v(t)$ 则为速度误差表达式， c 表示 1×42 的装置误差标定系数。

$$x(t) = [\delta r(t) \quad \delta v(t) \quad \psi(t) \quad c]^T \quad (7)$$

根据式(7)表示的状态向量, 可以得到如式(8)所示的捷联式导航系统动力学矩阵块, 进而可以看出在平台指标特定的情况下, 矩阵块 $F(t)$ 是线性的。整个状态方程利用白噪声驱动, $H(t)$ 可以表示为一个如式(9)所示的常数矩阵:

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_c \delta \dot{v}^n \\ 0 & 0 & D_\psi \dot{\psi}^n & D_c \dot{\psi}^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$H(t) = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.3 应用卡尔曼滤波标定动态误差

基于卡尔曼滤波方法, 对惯导系统动态误差模型的状态方程进行观测, 可得出两个用于最优标定的方程式如式(10)~(11)表示。系统模型在连续状态量估计下的卡尔曼滤波方程, 以及捷联式导航系统中的误差协方差方程

$$\dot{\hat{x}}(t) = P(t)H^T(t)R^{-1}(t)(z(t) + F(t)\hat{x}(t) - H(t)\hat{x}(t)) \quad (10)$$

$$\dot{P}(t) = F(t)P(t) + P(t)F^T(t) + Q(t) - P(t)H^T(t)R^{-1}(t)H(t)P(t) \quad (11)$$

为确保参数标定的准确性, 在其可观测性最好时, 在搜索的末端时刻 t_a 保证误差方差足够小。协方差矩阵 P 的迹来表示标定的准确性, 问题优化就是将 P 的迹最小化, 结果如式(12)所示:

$$Cost = tr\{P(t_a)\} \quad (12)$$

由式(8)可看出, 该惯导系统误差模型中 $F(t)$ 由转台的速率和扭矩共同作用决定。选择控制系统的输入量为转台内外环的加速度 α_ϕ , α_θ , 可得出该控制系统的状态微分方程如式(13)所示, 并有如下关系限制: $|\alpha_\phi(t)| \leq \ddot{\phi}_{max}$, $|\alpha_\theta(t)| \leq \ddot{\theta}_{max}$, $|\omega_\phi(t)| \leq \dot{\phi}_{max}$ 其中 $\ddot{\phi}_{max}$, $\ddot{\theta}_{max}$ 表示驱动台的方位轴和俯仰轴所获得的角加速度的最大值, $\dot{\phi}_{max}$, $\dot{\theta}_{max}$ 表示驱动台的方位轴和俯仰轴角所获得的角速度的最大值。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\omega}_\phi \\ \dot{\omega}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \omega_\phi \\ \omega_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_\phi \\ \alpha_\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

由方程式(13)与方程式(11)可得出完整的系统差分方程。 α_ϕ 和 α_θ 作为表达式的输入, 而捷联惯导系统动态误差模型输出为协方差矩阵。

2 减空间搜索算法设计与分析

2.1 减空间搜索算法

减空间搜索算法仿照了人类搜寻行为, 进而设计出模型, 该算法用于解决多维空间中求最优解的问题。其基本原理为: 已知目标函数, 通过对切割的用于求解最优解的区域范围进行优化分组和效率排序, 筛选后补解, 高效完成最佳结果的检索。

先根据已知目标函数, 在多维坐标系中任意设置起始点, 将其作为目标基准点, 并比较检验基准点的匹配度。以匹配度高的基准点为中心, 在其周围确定空间区域边界, 得出新空间区域。为优化空间搜索, 需要将搜寻空间分割成两块, 将更好的待取解为一部分, 剩下的区间为一部分。然后需要去掉边缘区域, 完善后补解区, 再次选取两个基准点。反复进行以上步骤, 会逐渐缩小范围在一个区域, 进而可以求得目标函数下的最优解。

由此可以看出, 对于已知目标函数求最优解, 最需要解决的是区域分割和选取的问题。图 1 表示在二维空间中, 进行区域选择进而求最优解的问题。图 1(a)表示开始时确定区域 1 为最优解的空间范围, 其中 A 点即为最优解。在图 1(b)的区域中, 随机选则若干个劣于点 A 基准点, 此时就要调整搜索区域, 进行缩小并减少, 在点 A 周围设置了新的区域范围。图 1(c)表示如果在点 B 周围有优于点 A 的基准点, 此时就需要扩大搜寻区域来求该问题的最优解。图 1(d)则表示无法找到新的最优解, 则在同区域 A 等大的空间中, 以较佳解 C 为起始来规整新的检索范围。基于以上求最优解的方式, 非常容易找到极佳解为原点的范围边界, 但在

此方式下选取的是局部次佳解^[5]。

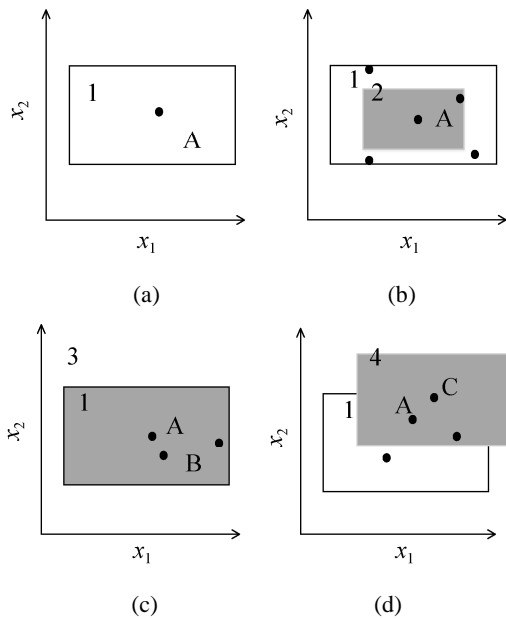


图1 在二维问题中搜索区域的划分

Fig. 1 Division of search areas in two-dimensional problems

2.2 基于遗传算法的罚函数优化

传统的减空间搜索算法具有局限性,在反复的缩减、扩大、重新选定搜索范围的过程中,很容易找不到最优解,而反复限制在较优解的局部空间中。若要完成局部空间到全局空间的转换,需要应用遗传算法进行罚函数的优化,可以在应用中取得较好的效果^[4]。

一组或多组变量进行随机变化完成了遗传算法的具体变异过程。其他概率的变化取决于一个随机概率。可以通过遗传因子来将一个搜索条件的状态进行改变;如果超过限制条件则可以对多个状态进行因子突变;当突变代价远高于废弃待选时,需对待选值进行重新选取,同时对所有参数进行因子突变。应用迭代法反复进行若干次,即可得出最优解。上述过程简要描写了优化后减空间搜索算法的基本思想,具体操作如图2。若设有 N 个随机变量,如式(14)所示。

$$\begin{aligned} \text{minimize: } & f(X), \\ X \in & [X_{\min 1}, X_{\max 1}] \times [X_{\min 2}, X_{\max 2}] \times \cdots \times \\ & [X_{\min N}, X_{\max N}] \end{aligned} \quad (14)$$

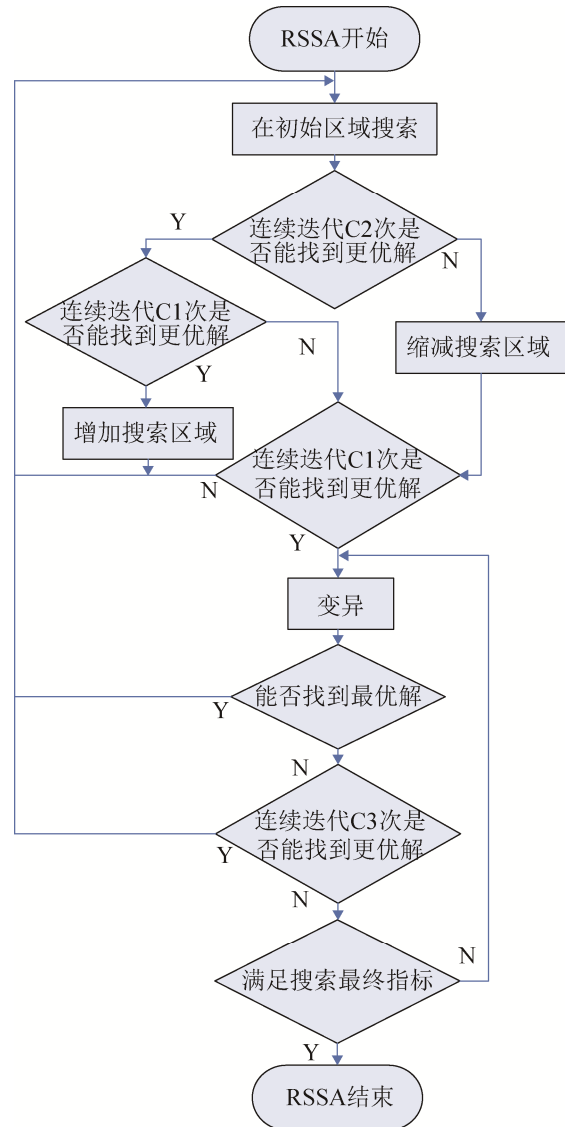


图2 减空间搜索算法流程图

Fig. 2 Flow chart of subtracted space search algorithms

减空间基于遗传算法的搜索过程可分如下步骤进行:

step 1: 在目标空间范围中选择一个随机点 $Xa(x_1, x_2, \dots, x_N)$, 设置原点检索边界, 该区域的解 $X_{nice} = Xa$ 。且 $n=0$, n 代表割裂检索范围的计数值。

step 2: 在目前所划分的检索边界内, 抽样选择一定量待取解用 Xb 来表示。当 $f(Xb) < f(X_{nice})$ 时, 则 $X_{nice} = Xa$ 。

step 3: 根据随机概率 K ($0 < K < 1$), 来缩小减少现有的搜索空间。当满足 $K = 1/2$ 时, X_{best} 就

是当前空间下的中心点, $Y_{\max i}$ 和 $Y_{\min i}$ 则分别第 i 个变量的上下界。

为避免重新进行搜寻区域的划定, 可以定义新的搜寻区域的下边界和上边界如式(15)~(16)所示。

$$Y_{\min i} = \max(X_{\min i}, X_{\text{nice}}(i) - K^n L(i)) \quad (15)$$

$$Y_{\max i} = \max(X_{\max i}, X_{\text{nice}}(i) + K^n L(i)) \quad (16)$$

在新划分的搜索区域中, 随机选取若干个后补点 Xb , 当满足 $f(Xb) < f(X_{\text{nice}})$ 时, 则 $X_{\text{nice}} = Xb$ 。

step 4: 当 n 与 m 的值相同时, 除目标问题的求解精度这一限制条件外, m 的取值还必须参照随机概率 K 的具体取值。若 $K=0.5$, 则 m 可取 15~30 区间内。

step 5: 迭代初始区域, 在新的搜索区域下反复进行第 2~4 步工作, 求出最优解。如果无法得到最优解即可选择满足问题精度要求的较优解。实际的工程中, 需要反复进行上述步骤进行迭代计算, 直到没有新的 X_{nice} 点产生^[8]。

step 6: 在初始搜索的区域中会出现一个随机的概率数, 然后采用一个变异过程处理变量 X_{nice} , 而后会产生候补解 X' 。在多维空间内进行变量的随机选取, 维数不同可设变量为 $x_i (1 < i < N)$, x_i 随变异过程其值也不断变化。重复进行第 2~5 步, 求得最小值。

step 7: 当 $f(X') < f(X_{\text{nice}})$ 时, 令 $X_{\text{nice}} = X'$, $n = 0$ 。若不满足条件则返回执行 step 2。

step 8: 满足问题下的最小值、迭代次数最大值其中的一项, 即完成了对整个问题的求解。

不存在所有约束条件时, 使用遗传算法的罚函数优化后的减空间这一搜索算法, 可以求解设定问题的最优解。若衡量时间, 一次设置循环能力最大值 15, 120, 平均分配输入量, 设定最佳解获取的误差比小于 $1e-6$ 。

3 减空间搜索算法应用

3.1 应用共轭梯度法求取最优轨迹

转台的轨迹用来标定的微机械惯性系统, 通常采用包括 3 个比例因子运动和一个的杆臂因子

运动, 其中 3 个不同的角速率应用在对应的比例因子运动中。这样复杂的操作需要校准非线性比例因子, 将引入大规模的计算量。如果对协方差矩阵差分方程积分时, 将会极大地简化计算^[9]。

当转台高速转动时, 较好的过程噪声方差和非线性比例因子标定结果不受计算误差所影响, 可以较好的展示不同算法的差异性。运用共轭梯度法求取的最优轨迹, 对误差项改善情况如表 1 所示。

表 1 共轭梯度法标定误差项下改善情况

Tab. 1 Improvement for calibration error of conjugate gradient method

标定项目	减少的比例 /%
比例因子	17
ω^2	50
ω^3	45
失准角 1	40
失准角 2	34
杆臂因子 1	58
杆臂因子 2	21
杆臂因子 3	56

3.2 应用减空间搜索算法求取最优轨迹

对于微机械惯性系统来说, 获得一个最好的标定轨迹需要很多次数的轨迹试验, 几次的最优轨迹均代表目标函数对应初值的最小值, 为了让除了两个陀螺仪的比例因子, ω^2 和 ω^3 这 3 项外的其余项达到更高的可观测度。选择一个能让这些项拥有更高可观测度的初始轨迹, 是我们需要思考的问题。失准角生成结果给出在表 2, 尽管标定不确定项时, 最优轨迹比参考轨迹的标定协方差要小很多, 但改善的效果没有环形激光陀螺仪惯性系统的效果好。

采用减空间搜索算法相比于共轭梯度算法轨迹能产生更为精确的标定系数。标定的每一个误差项平均降低的百分比在表 2 中显示。其中标定项的精度改善区间均在 20%~60%之间。失准角和杆臂因子随时间变化在图 3 中有所展示。

不难发现这些图表明几个标定项在同时减小。

通过减空间搜索算法产生的最优轨迹为了达到更高的标定精度,采用的是同时增加多个误差项的辨识度,而不是改变单一误差项的辨识度。避免局部次佳解的干扰影响,提高了最优轨迹的置信度。

微机械惯性系统应用减空间搜索算法计算出的最优轨迹能有效提升标定精度约 15%~60%。

为验证减空间算法的高效性,我们采用不同算法所得轨迹与减空间搜索算法所得最优轨迹进行计算对比,如图 4 所示依次为采用梯度法、共轭梯度法、遗传算法、改进的减空间算法与减空间算法所得目标函数的加速区间和收敛速度。在稳定值比中对改进减空间搜索算法所得最优轨迹明显高于其他轨迹一个数量级,如表 3 所示通过最优轨迹将

显著提高系统辨识 IMU 动态误差系数的速度,帮助惯组尽快降低动态误差的干扰,进而提高惯导系统的输出精度。

表 2 减空间搜索算法标定误差项改善情况
Tab. 2 Improvement of calibration error terms in subtracted space search algorithms /%

标定项目	减少的比例
比例因子	19
ω^2	57
ω^3	50
失准角 1	45
失准角 2	42
杆臂因子 1	62
杆臂因子 2	28
杆臂因子 3	59

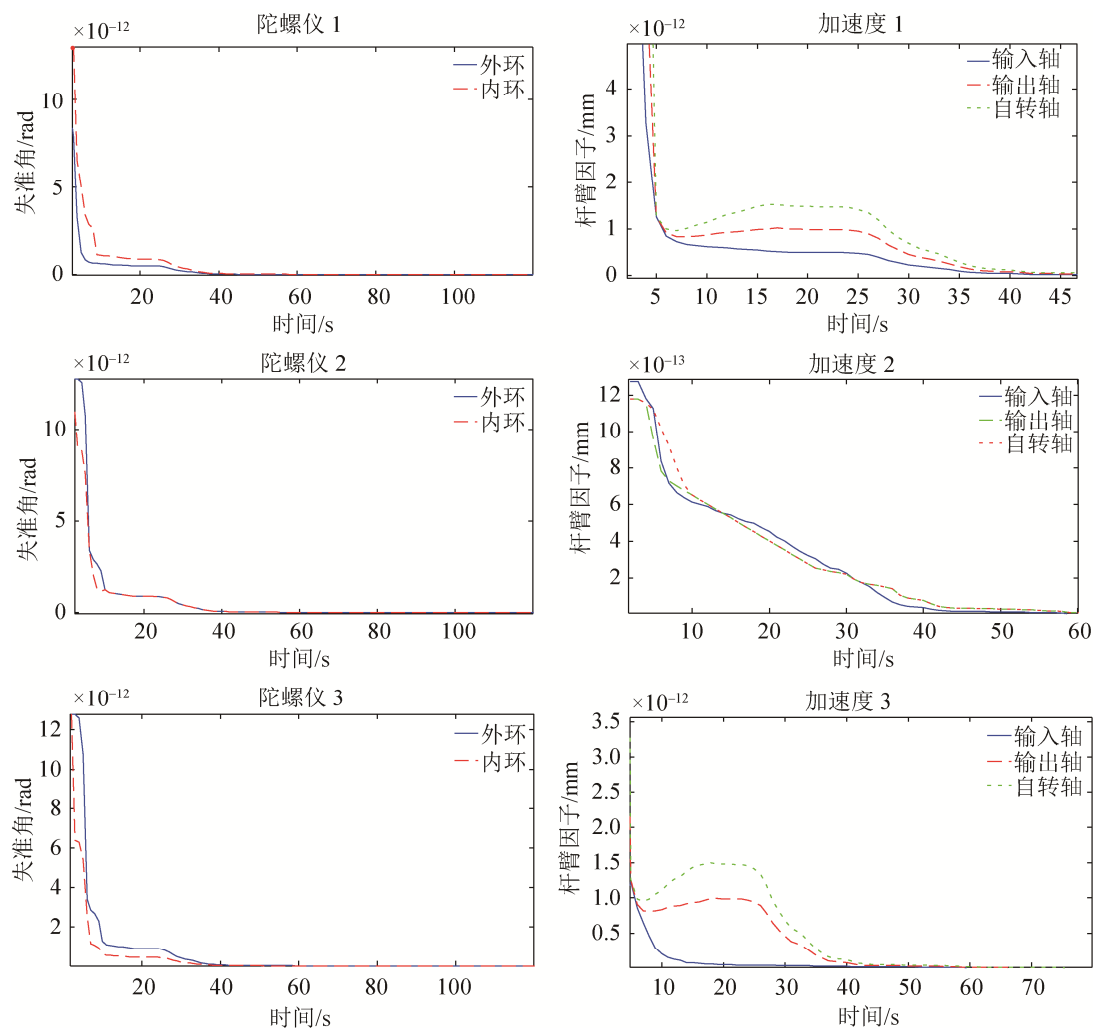


图 3 减空间搜索算法最优轨迹中加速度计和陀螺仪失准角随时间变化图

Fig. 3 Time-varying diagrams of optimal trajectory accelerometer and gyroscope misalignment angle based on subtractive space search algorithm

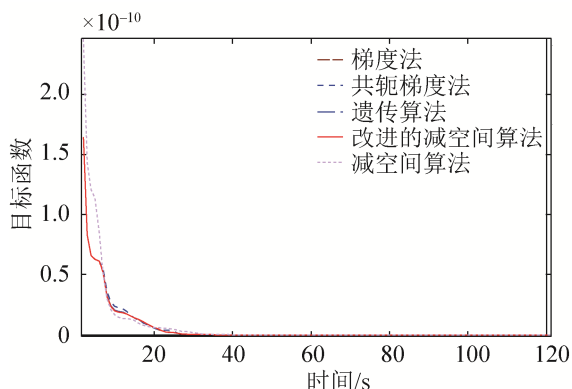


图 4 减空间算法最优轨迹下目标函数值随时间变化图
Fig. 4 Time-varying graph of objective function value for optimal trajectory of reduced space algorithm

表 3 微机械惯性系统不同轨迹下目标函数值

Tab. 3 Target function values of micro-mechanical inertial system for different trajectories

标定项目	减少的比例
梯度法	3.924268e-15
共轭梯度法	3.921651e-15
遗传算法	3.862371e-15
改进减空间	5.751253e-14
减空间算法	7.524662e-14

4 结论

在低频、大过载下惯组的动态误差将严重影响测量精度,故进行捷联惯导系统的动态误差补偿是降低误差干扰的一种有效方法。为了确定动态误差和惯组之间的关系,需要在导航系统中及时对惯组进行误差系数的标定。本文介绍惯组动态误差对输出的干扰,利用卡尔曼滤波和惯组的动态误差表达式,建立搜索算法的检索标准。改进和优化减空间搜索算法,以满足末端制导对稳定回路动态指标高的要求。相比于经典算法,优化的算法在检索逼近最佳解时,具有较好的快速性,同时也解决了易受局部次佳解干扰的问题。通过仿真验证,改进的减空间搜索算法将提高辨识速度一个数量级。引入遗传因子对动态系数进行标定,具备快速消减惯组动态误差的能力,提高惯组在特定工况下的置信度。

参考文献:

[1] 王磊, 胡学东, 关英, 等. 低成本微惯性组件的复合标定与智能滤波方法[J]. 火箭与制导学报, 2018, 38(2):

85-89.

Wang Lei, Hu Xuedong, Guan Ying, et al. Composite calibration and intelligent filtering method for low-cost micro-inertial components[J]. Journal of Projectiles, Archery and Guidance, 2018, 38(2): 85-89.

[2] 于治远. 高动态环境下微惯性组件的复合标定与对准方法研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2018.

Yu Zhiyuan. Research on composite calibration and alignment method of micro-inertial components in high dynamic environment [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2018.

[3] 田源, 宋蔚阳, 方海红, 等. 全捷联导引头的惯性视线角速度解耦方法及精度分析[J]. 测试技术学报, 2019, 33(1): 15-19.

Tian Yuan, Song Weiyang, Fang Haihong, et al. Inertial line-of-sight angular velocity decoupling method and accuracy analysis of full strapdown seeker[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(1): 15-19.

[4] 张怀, 许林英. 空间有限条件下博弈搜索算法的优化[J]. 电子测量技术, 2007, 30(8): 26-29.

Zhang Huai, Xu Linying. Optimization of Game Search Algorithm under Space Finite Condition[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(8): 26-29.

[5] 杨斌, 聂在平, 夏耀先, 等. 基于改进共轭梯度法的前馈网络快速监督学习算法[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1845-1847.

Yang Bin, Nie Zaiping, Xia Yaoxian, et al. Fast Supervised Learning Algorithm for Feedforward Networks Based on Improved Conjugate Gradient Method[J]. Chinese Journal of Electronics, 2002, 30(12): 1845-1847.

[6] 张世铮. 基于位移 Hermite 分裂的图像恢复算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2019, 57(1): 103-110.

Zhang Shizhen. Image Restoration Algorithm Based on Displacement Hermite Splitting[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2019, 57(1): 103-110.

[7] 刘勇, 陈本军, 程跃兵, 等. 基于 IMU 模块的行人航向角误差修正算法[J]. 电子设计工程, 2019, 27(2): 86-90.

Liu Yong, Chen Benjun, Cheng Yuebing, et al. Pedestrian heading angle error correction algorithm based on IMU module[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(2): 86-90.

[8] 谢瑞煜, 赵建军, 蒋涛. 基于蒙特卡洛法的武器系统标定误差分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(1): 136-140.

Xie Ruiyu, Zhao Jianjun, Jiang Tao. Calibration error analysis of weapon system based on Monte Carlo method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(1): 136-140.