导引头稳定平台指向误差建模与参数标定

赵 明1,2,白 杨1,刘 慧1,朱明超1,宣 明1,贾宏光1

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为提高两轴双框架导引头稳定平台的视轴指向精度 提出了一种稳定平台误差建模与参数标定的方法。根据导引头稳定平台的光机结构特点 应用局部指数积(POE)公式建立了稳定平台的运动学模型与指向误差模型。并通过对机械结构的误差分析 将旋转轴偏差归结于框架的初始姿态误差 简化了指向误差模型。针对稳定平台误差参数标定问题 提出了一种基于最小二乘法的改进遗传算法。首先 将最小二乘法产生的次优解作为遗传算法的初始种群 并对一般遗传算法进行改进。然后 对优化的遗传算法进行数值仿真 得到满足要求的最优解。仿真结果表明:该算法具有收敛速度快、鲁棒性好等优点。

关键词:导引头稳定平台; 指数积公式; 指向误差; 遗传算法; 参数标定

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)S2-0374-06

Pointing error modeling and parameter calibration for seeker stabilized platform

Zhao Ming^{1,2},Bai Yang¹ , Liu Hui¹, Zhu Mingchao¹, Xuan Ming¹, Jia Hongguang¹

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve LOS pointing precision of seeker stabilized platform, the modeling of pointing error and parameter calibration methods were researched. Based on the opto-mechanical structure feature of seeker stabilized platform, the kinematic model and the pointing error model of the system were established by local POE formula. Because of attributing the kinematic errors to the initial pose error by analyzing the error sources of structure, the pointing error model was significantly simplified. An improving genetic algorithm based on least square method was proposed to implement the parameter calibration of seeker stabilized platform. Firstly, the suboptimal parameter of the least square algorithm was regarded as the initial population of optimized genetic algorithm. Then, the improving genetic algorithm was used to calculate and simulate to obtain the optimal parameter. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm has fast convergence speeds and good robustness.

Key words: seeker stabilized platform; POE formula; pointing error; GA; parameter calibration

0 引言

导引头是现代精确制导系统的重要组成部分,其主要作用是完成对目标的自主搜索、识别、跟踪与测量。由于导引头安装在导弹前端,视线的稳定在一定程度上受弹体扰动的影响。为了实现可靠、高精度的目标跟踪,必须采用稳定平台来隔离弹体扰动[1-2]。在稳定跟踪平台的整个控制回路中,脱靶量是最主要的反馈信号,其精度影响整个控制系统的稳定水平。由机构加工、装配的准确度和调校精度引起的各轴系间的几何误差,严重影响导引头稳定平台的视轴准确指向^[3],并且视轴指向误差是影响脱靶量精度的最主要因素^[4]。为改善平台的指向精度与系统的整体性能,需要对平台几何误差参数进行标定。

参数标定的基础是建立由几何误差参数组成的准确的数学模型。稳定平台指向误差的建模方法主要有球谐函数法、坐标变换法和基本参数法等。其中球谐函数法是从数学的角度来描述稳定平台的指向误差,该方法精度高,但模型参数较多且不具物理意义,模型稳定性差质。坐标变换法能够得到完整的误差模型,但是该模型过于复杂,并且采用蒙特卡罗法来对各误差因素进行分析、分配和综合,不能得到指向误差的补偿模型倾。基本参数法模型是基于具有物理意义几何误差而建立的,因此模型比较稳定,但基本参数模型为一阶模型,其修正精度不高行。

文中根据导引头光学稳定平台的光机结构与 工作特性,将结构误差归结于各轴系误差。采用局 部指数积方法^[8]建立了导引头光学稳定平台的运 动学方程,通过对运动学方程的线性化得到误差 标定模型。最后,利用改进的遗传算法对稳定平台 的几何误差参数进行求解。仿真结果表明:建立的 误差标定模型是正确的,提出的标定算法有较高 的精度。

1 导引头运动学建模

导引头光学稳定平台安装在导弹头部,平台基 座固连在弹体上。由于受体积与重量的限制,稳定 平台采用俯仰-偏航双框架结构,可以作俯仰与偏 航运动。导引头结构示意图如图1所示,由基座(弹体)、偏航框架、俯仰框架与光学系统组成。方位框架通过轴承与基座(弹体)相连,俯仰框架通过轴承与方位框架相连,光学系统与俯仰框架刚性连接。

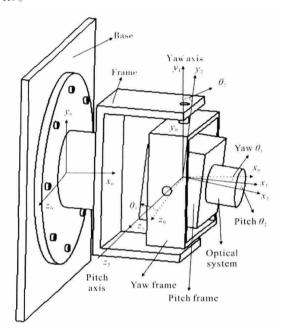


图 1 导引头结构示意图与框架坐标系

Fig.1 Structural diagram of seeker and coordinate system for gimbal

1.1 局部指数积模型

任意两相邻框架间的姿态关系为:

$$R_{i-1,i}(\theta_i) = R_{i-1,i}(0) e^{\hat{\omega}_i \theta_i}$$
(1)

式中: $R_{i-1,i}(0) \in SO(3)$ (特殊正交群)表示框架 i 相对于框架 i-1 的初始姿态; $\hat{\omega}_i \in SO(3)$ 为 $\in SO(3)$ 的李代数,定义为:

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}_{i} = \begin{bmatrix} 1 & -\boldsymbol{\omega}_{iz} & \boldsymbol{\omega}_{iy} \\ \boldsymbol{\omega}_{iz} & 0 & -\boldsymbol{\omega}_{ix} \\ -\boldsymbol{\omega}_{iy} & \boldsymbol{\omega}_{iy} & 0 \end{bmatrix}$$
 (2)

式中: $\hat{\omega}_i = [\omega_{ix}, \omega_{iy}, \omega_{iz}]^T$ 为描述在坐标系 i 的旋转轴线单位矢量; $e^{\hat{\omega}_i \theta_i} \in SO(3)$ 为绕轴 ω_i 旋转 θ_i 的旋转矩阵。根据 Rodrigues 公式^[9]可得:

$$e^{\hat{\omega}_i \theta_i} = I + \hat{\omega}_i \sin \theta_i + \hat{\omega}_i (1 - \cos \theta_i) \tag{3}$$

1.2 运动学建模

导引头的运动学关系可以看作偏航轴与俯仰轴 组成的运动学链。 在偏航、俯仰轴线的交点建立如图 1 所示的 3 个坐标系。其中, $o-x_0y_0z_0$ 为弹体坐标系; $o-x_1y_1z_1$ 为偏航坐标系,与偏航框架固联, oy_1 轴与偏航轴重合; $o-x_2y_2z_2$ 为偏航坐标系(视轴坐标系),与偏航框架固联, oz_2 轴与偏航轴重合。

将局部指数积公式(1)应用于图 1 所示的各运动框架,可得视轴坐标系相对于弹体坐标系的姿态 $R_{0.2}$,即导引头的正运动学方程

$$R_{0,2} = R_{0,1} R_{1,2} = R_{0,1}(0) e^{\hat{\omega}_1 \theta_1} R_{1,2}(0) e^{\hat{\omega}_2 \theta_2}$$
(4)

式中: $R_{0,1}$ 与 $R_{1,2}$ 为偏航框(俯仰框)相对于弹体(偏航框)的姿态; $R_{0,1}(0)$ 与 $R_{1,2}(0)$ 为在初始位置($\theta_1 = \theta_2 = 0$)时,偏航框(俯仰框)相对于弹体(偏航框)的姿态; θ_1 与 θ_2 分别为偏航角与俯仰角。

2 误差模型

考虑运动学方程(公式(4)), 视轴坐标系的姿态 $R_{0.2}$ 可看作 R(0), ω 和 θ 的函数:

$$R_{0,2} = f(R(0), \omega, \theta) \tag{5}$$

式中:
$$R(0) = [R_{01}^{\mathsf{T}}(0), R_{12}^{\mathsf{T}}(0)]^{\mathsf{T}}; \omega = [\omega_{1}^{\mathsf{T}}, \omega_{2}^{\mathsf{T}}]^{\mathsf{T}}; \theta = [\theta_{1}^{\mathsf{T}}, \theta_{2}^{\mathsf{T}}]^{\mathsf{T}}$$

影响稳定平台视轴指向精度的因素很多,主要包括轴系的垂直度误差与编码器零位误差。轴系垂直度误差包括由加工、装配误差与轴承间隙引起的框架初始姿态误差 dR(0)与旋转轴偏差 $d\omega$;编码器零位误差是由编码器零位与框架机械零位不重合引起的转角误差 $d\theta$ 。

线性化公式(5)可得视轴指向误差模型:

$$dR_{0,2} = \frac{\partial f}{\partial R(0)} dR(0) + \frac{\partial f}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial f}{\partial \theta} d\theta$$
 (6)

误差修正的目标是基于视轴坐标系的实测姿态辨识误差参数 dR(0), $d\omega$ 和 $d\theta$ 的最优值。计算误差模型(公式(6)), 需要对 14 个误差分量进行辨识, 极大地增加了算法的复杂性和解的冗余性。而且, 直接辨识 $d\theta$ 非常困难, 有可能出现数值问题。根据局部指数积公式的局部坐标系任意性和误差源分析, 可将旋转轴的倾斜角误差 $d\theta$ 计入初始姿态误差 dR(0)中,所以误差模型可简化为:

$$dR_{0,2} = \frac{\partial f}{\partial R(0)} dR(0) + \frac{\partial f}{\partial \theta} d\theta \tag{7}$$

2.1 初始姿态误差分析

设 R_{i-1}^{a} 为坐标系 i 相对坐标系 i-1 的实际初始

姿态,则 R_{i-1}^a 与 $R_{i-1}(0)$ 有如下关系:

$$R_{i-1,i}^{a}(0) = R_{i-1,i}(0) + dR_{i-1,i}(0)$$
 (8)

此外, $R_{i-1,i}^a(0)$ 可由 $R_{i-1,i}(0)$ 经微小变换 $Rot(\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i)^{[10]}$ 得到,即:

$$R_{i-1,i}^{a}(0) = R_{i-1,i}(0) Rot(\delta x_{i}, \delta y_{i}, \delta z_{i})$$
 (9)

式中: δx_i , δy_i , δz_i 表示绕坐标 i-1 系的 x,y,z轴的微小转角。

$$Rot(\delta x_{i}, \delta y_{i}, \delta z_{i}) = \begin{bmatrix} 1 & -\delta z_{i} & \delta y_{i} \\ \delta z_{i} & 1 & -\delta x_{i} \\ -\delta y_{i} & \delta x_{i} & 1 \end{bmatrix}$$
(10)

由公式(8)、(9)和(10)可得:

 $dR_{i-1,i}(0)=R_{i-1,i}(0)[Rot(\delta x_i,\delta y_i,\delta z_i)-I_{3x3}]=R_{i-1,i}(0)\hat{\Delta}_i$ (11) 式中: $\hat{\Delta}_i$ 为转轴 ω_{i-1} 与 ω_i 的倾角误差,可由映射 $\hat{\Delta}_i$ \rightarrow $\Delta_i=(\delta x_i,\delta y_i,\delta z_i)^{\mathrm{T}}$ 确定。

$$\hat{\Delta}_{i} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z_{i} & \delta y_{i} \\ \delta z_{i} & 0 & -\delta x_{i} \\ -\delta y_{i} & \delta x_{i} & 0 \end{bmatrix}$$
(12)

2.2 视轴指向误差分析

根据公式(8)与(9),视轴的实际姿态可表述为:

$$R_{0,2}^{a} = R_{0,2} + dR_{0,2} = R_{0,2} Rot(\delta x_{0,2}, \delta y_{0,2}, \delta z_{0,2})$$
 (13) 由公式(13)可得视轴指向误差:

$$\mathrm{d}R_{0,2} = R_{0,2} [Rot(\delta x_{0,2}, \delta y_{0,2}, \delta z_{0,2}) - I_{3\times 3}] = R_{0,2} \hat{\Delta}_{0,2} \quad (14)$$

式中: $\hat{\Delta}_{0}$,为总倾角误差。

$$\hat{\Delta}_{0,2} = R_{0,2}^{-1} dR_{0,2} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z_{0,2} & \delta y_{0,2} \\ \delta z_{0,2} & 0 & -\delta x_{0,2} \\ -\delta y_{0,2} & \delta x_{0,2} & 0 \end{bmatrix}$$
(15)

2.3 误差模型

将公式(11)代入公式(7),可得:

$$dR_{0,2} = \sum_{i=1}^{2} (R_{0,i-1}R_{i-1,i}(0)\hat{\Delta}_{i}e^{\hat{\omega}_{i}\theta_{i}}R_{i,2} + R_{0,i}\hat{\omega}_{i}R_{i,2}d\theta_{i}) \quad (16)$$

由公式(11)、(15)和(16),可得:

$$\hat{\Delta}_{0,2} = \sum_{i=1}^{2} \left(R_{i-2}^{-1} e^{-\hat{\omega}_{i} \theta_{i}} \hat{\Delta}_{i} e^{\hat{\omega}_{i} \theta_{i}} R_{i,2} + R_{i,2}^{-1} \hat{\omega}_{i} R_{i,2} d\theta_{i} \right)$$
(17)

由 $(R\hat{\omega}R^{-1})^*=R\omega$,可得:

$$\Delta_{0,2} = \sum_{i=1}^{2} (R_{i-2}^{-1} e^{-\hat{\omega}_i \theta_i} \Delta_i + R_{i-2}^{-1} \omega_i d\theta_i)$$
 (18)

由公式(8)和(15),可得:

$$\hat{\Delta}_{0,2} = R_{0,2}^{-1} (R_{0,2}^a - R_{0,2}) = R_{0,2}^{-1} R_{0,2}^a - I_{3\times 3}$$
 (19)

由矩阵对数运算规则可知:

$$\log(R_{0,2}^{-1}R_{0,2}^{a}) = R_{0,2}^{-1}R_{0,2}^{a} - I_{3\times 3} - \frac{(R_{0,2}^{-1}R_{0,2}^{a} - I_{3\times 3})^{2}}{2} + \frac{(R_{0,2}^{-1}R_{$$

$$\frac{\left(R_{0,2}^{-1}R_{0,2}^{a}-I_{3\times 3}\right)^{3}}{3}-\cdots \tag{20}$$

忽略高次项可得:

$$\hat{\Delta}_{0,2} \approx \log(R_{0,2}^{-1} R_{0,2}^{a}) \tag{21}$$

因为对数与指数互为逆映射,所以 $\log(R_{0,2}^{-1}R_{0,2}^{a})$ $\in SO(3)$,可由 3×1 向量 $\log(R_{0,2}^{-1}R_{0,2}^{a})$ 确定,由公式 (18)和(21)可得:

$$\log(R_{0,2}^{-1}R_{0,2}^{a}) = \sum_{i=1}^{2} (R_{i-2}^{-1}e^{-\hat{\omega}_{i}\theta_{i}}\Delta_{i} + R_{i,2}^{-1}\omega_{i}d\theta_{i})$$
 (22)

公式(22)可改写为:

$$y = Hx$$
 (23)

式中: $y = \log (R_{0,2}^{-1} R_{0,2}^{a})^* \in R^{3 \times 1}; H = [R_{1,2}^{-1} e^{-\hat{\omega}_1 \theta_1}, e^{-\hat{\omega}_2 \theta_{2 m}}, R_{1,2}^{-1}]$ $\omega_1 \omega_2 = R^{3 \times 8}; x = [\Delta_1^T, \Delta_2^T, d\theta_1, d\theta_2]^T \in R^{8 \times 1}$ 。其中,x 为要辨识的误差参数, $R_{0,2}^{-1}$,H 和 $R_{0,2}^{a}$ 可由标称模型或实际测量得到。

导引头误差参数的辨识过程需要比较视轴的 实测姿态和标称姿态。然而实测姿态点仅仅是框 架工作空间的一个子集,为了更精确地辨识误差 参数,应尽可能增加实测工作点。假设有 *m* 个测量 点,则有:

$$y = \overline{H}x$$
 (24)

 $\overrightarrow{\text{TV}} + \overrightarrow{y} = [y_1^{\mathsf{T}}, y_2^{\mathsf{T}}, \cdots y_m^{\mathsf{T}}]^{\mathsf{T}} \in R^{3mod}; \overrightarrow{H} = [H_1^{\mathsf{T}}, H_2^{\mathsf{T}}, \cdots H_m^{\mathsf{T}}]^{\mathsf{T}} \in R^{3mod}; x = [\Delta_1^{\mathsf{T}}, \Delta_2^{\mathsf{T}}, d\theta_1, d\theta_2]^{\mathsf{T}} \in R^{8d}_{\circ}$

由公式(24)可得:

$$x = (\overline{H}^{\mathsf{T}}\overline{H})^{-1}\overline{H}^{\mathsf{T}}y \tag{25}$$

当框架处于奇异形位,即矩阵 $H^{\mathsf{T}}H$ 奇异时,无法不用的逆。为保证算法能顺利通过奇异形位,将公式

(25)改写为:

$$x = (\overline{H}^{\mathrm{T}}\overline{H} + \lambda I)^{-1}\overline{H}^{\mathrm{T}}\overline{y} \tag{26}$$

其中 $,\lambda$ 可选择一小常量,或根据框架的可操作度自适应变化。

3 标定算法

虽然最小二乘法的收敛速度快,但是当算法收敛至某一程度时几乎停滞不前^[11]。因此,将由最小二乘法所得的次优解作为改进遗传算法的初始种群。

3.1 初始种群选择

由最小二乘法求得公式(25)的解 x_i ,且满足 $||y_i||$ < 0.001(i=1,2,…)。将次优解 x_i 作为遗传算法的初始种群,较优的初始种群有利于提高收敛速度。

3.2 适应度计算

设 $R_{0,2}^{a,(j)}(j=1,2,\cdots m)$ 为第 j 次测量的稳定平台姿态,由公式(13)、(4)、(16)可知在第 t 代个体 x_i^t 的标定姿态 $R_{0,2}^{t,(j)}=R_{0,2}^{(j)}+\mathrm{d}R_{0,2}^{(j)}$,标定残差记为: $\delta R^{(j)}=R_{0,2}^{a,(j)}-(R_{0,2}^{(j)}+\mathrm{d}R_{0,2}^{(j)})$ 。优化目标函数为: $\kappa=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^m\left|\left|\delta R^{(j)}\right|\right|$,定义适应度函数为 $\alpha=\frac{1}{1+\kappa}$ 。适应度 α 越大,则目标函数 κ 值越小。

3.3 编码

因二进制编码会产生量化误差,文中选择浮点数编码。将各误差参数联合编码为一个染色体个体,每个参数直接映射到基因范围内的一个浮点数。浮点数编码的计算精度高,因此,改善了计算复杂性,从而提高了运算效率。

3.4 选择算子

选择运算采用轮盘赌的策略和最优保存策略。 个体被选中的概率 P_i 与个体适应度 α_i 关系如下:

$$P_i = \alpha_i / \sum_{i=1}^k \alpha_i \tag{27}$$

采用两次最优保存策略: 当前群体在进行完交 叉操作后,找出其中适应度最大的个体,让其直接进 入下一代而不发生变异在其余个体进行完变异操作 后。再用前一代中的最佳个体替换掉当前代中适应 度最小个体,使得适应度最好的个体可以保留到下 一代群体中。确保算法能够收敛于最优点。

3.5 交叉算子

采取随机配对策略将群体中的 K 个个体以随机的方式组成 [K/2] 对配对个体组,分别在两个个体之间进行交叉运算。文中采用浮点数编码,因此选择算数交叉算子。交叉运算关系如下:

$$\begin{cases} x_A^{t+1} = \lambda x_B^t + (1-\lambda)x_A^t \\ x_B^{t+1} = \lambda x_A^t + (1-\lambda)x_B^t \end{cases}$$
 (28)

式中:λ取为一常量进行均匀算数交叉。

3.6 变异算子

由于通过最小二乘法得到遗传算法的较优初始 群体,并采用最优保留策略保证了优良个体在交叉 过程中不被破坏掉。因此,选取高斯变异,用于改进 遗传算法对重点搜索区域的局部搜索能力。

当达到预定的迭代次数 t 或种群中出现低于目标函数阀值 ε 时,遗传算法停止。适应度最大的个体所对应的参数值为误差参数标定值。

4 仿真数据

为验证改进遗传算法的有效性和收敛速度,对 文中提出的运动学模型与误差模型进行数值仿真。 由图 1 建立的坐标系可知,理论运动学参数为:

$$\omega_1 = [0,1,0]^T$$
 $\omega_2 = [0,0,01]^T$

根据稳定平台各零件的加工精度,由误差理论可估计偏航与俯仰轴的初始姿态误差角 $^{[4]}$ 为: Δ_1 = $[0.9,0.2,1.2]^{\text{T}}\times q$, Δ_2 = $[0.9,1.4,0.3]^{\text{T}}\times q$,q= 2.91×10^{-4} ,为分与弧度转换因子。受导引头体积的限制,所选编码器精度为分级,根据编码器的安装方式可估算编码器的零位误差为: $\mathrm{d}\theta_1$ = $\mathrm{d}\theta_2$ = $1.2\times q$ 。由公式(4)可得视轴的实测姿态。

基于 Matlab7.0 平台,随机抽取 50 组可测姿态,对改进的标定算法进行仿真测试。改进的标定算法的相关参数为:种群规模 N=50,交叉概率 $P_c=0.85$, $\lambda=0.65$,变异概率 $P_m=0.08$,设定阀值 $\varepsilon=10^{-5}$,最大迭代次数 t=500。求的标定结果如表 1 所示。

表 1 系统各项误差标定结果
Tab.1 Results of parameter calibration

Parameter	δ <i>x</i> /(′)	δy/(')	δz/(')	dθ/(')
Yaw axis	0.9006	0.1894	1.2000	1.204 2
Pitch axis	0.949 1	1.4158	0.4154	1.0947

在导引头工作空间内,随机选取 4 组框架角 θ ,分别计算视轴的理论姿态 $R_{0,2}$ 、实测姿态 $R_{0,2}^a$ 、标定资态 $R_{0,2}^c$ 与标定残差 $\sigma = \left|\left|R_{0,2}^a - R_{0,2}^c\right|\right|$,结果如表 2 所示。

图 2 为最小二乘法、改进 GA 的收敛速度与计

表 2 标定后姿态对比

Tab.2 Comparison of Poses After calibration

•				
θ	$R_{0,2}$	$R_{0,2}^a$	$R^{^c}_{_{0,2}}$	σ
$\begin{bmatrix} 0.2578, 0.1257 \end{bmatrix}^{T}$	$\begin{bmatrix} 0.954\ 6 & -0.120\ 6 & 0.272\ 3 \\ 0.125\ 3 & 0.992\ 1 & 0 \\ -0.270\ 1 & 0.034\ 1 & 0.962\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.954 \ 3 & -0.121 \ 3 & 0.273 \ 1 \\ 0.126 \ 2 & 0.992 \ 0 & -0.000 \ 4 \\ -0.270 \ 8 & 0.034 \ 9 & 0.962 \ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.954 \ 3 & -0.121 \ 3 & 0.273 \ 1 \\ 0.126 \ 2 & 0.992 \ 0 & -0.000 \ 4 \\ -0.270 \ 8 & 0.034 \ 9 & 0.962 \ 0 \end{bmatrix}$	2.238 8×10 ⁻⁶
$\begin{bmatrix} 0.0977, -0.3194 \end{bmatrix}^{^{\mathrm{T}}}$	$\left[\begin{array}{cccc} 0.9449 & 0.3125 & 0.0976 \\ -0.3140 & 0.9494 & 0 \\ 0.0801 & -0.0036 & 0.9968 \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 0.945 \ 1 & 0.311 \ 7 & 0.098 \ 4 \\ -0.313 \ 2 & 0.949 \ 7 & -0.000 \ 5 \\ -0.063 \ 6 & -0.030 \ 3 & 0.995 \ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.945 \ 1 & 0.311 \ 7 & 0.098 \ 4 \\ -0.313 \ 2 & 0.949 \ 7 & -0.000 \ 5 \\ -0.063 \ 6 & -0.030 \ 3 & 0.995 \ 1 \end{bmatrix}$	3.145 6×10 ⁻⁶
[-0.0803,0.0447]	$\left[\begin{array}{cccc} 0.9958 & -0.0445 & -0.0802 \\ 0.0447 & 0.9990 & 0 \\ 0.0801 & -0.0036 & 0.9968 \end{array}\right]$	$\begin{bmatrix} 0.995 \ 8 & -0.534 \ 5 & -0.079 \ 4 \\ 0.045 \ 4 & 0.999 \ 0 & -0.000 \ 6 \\ 0.079 \ 0 & -0.003 \ 0 & 0.996 \ 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.995 & -0.534 & 5 & -0.079 & 4 \\ 0.045 & 4 & 0.999 & 0 & -0.000 & 6 \\ 0.079 & 0 & -0.003 & 0 & 0.996 & 8 \end{bmatrix}$	1.033 6×10 ⁻⁶
[-0.2723,-0.1300]	$\left[\begin{array}{cccc} 0.655 & 0 & 0.124 & 9 & -0.268 & 9 \\ -0.129 & 7 & 0.991 & 6 & 0 \\ 0.266 & 6 & 0.034 & 9 & 0.963 & 2 \end{array} \right]$		$\begin{bmatrix} 0.955 \ 4 & 0.124 \ 1 & -0.268 \ 1 \\ -0.129 \ 0 & 0.991 \ 6 & -0.000 \ 6 \\ 0.265 \ 8 & 0.035 \ 2 & 0.963 \ 4 \end{bmatrix}$	2.163 1×10 ⁻⁶

算精度的对比曲线。由图 2 可知,最小二乘法经过10次迭代,误差从 7.22 迅速收敛至 2.05×10⁻⁴,但误差

计算至 9.97×10⁻⁵ 后几乎停滞不前;文中提出的遗传算法,经过近 300 次得迭代寻优计算便获得最优解。

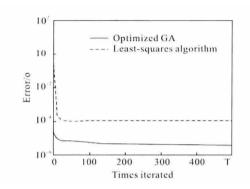


图 2 算法收敛速度与计算精度对比曲线

Fig.2 Comparison of algorithms in convergence speeds and accuracy

5 结 论

提出了一种基于局部 POE 公式的导引头稳定平台运动学建模方法。运动学模型相对于误差参数线性化,得到误差模型。结合最小二乘法收敛速度快与遗传算法计算精度高的特点,改进了参数标定算法。仿真结果表明,文中提出的建模方法正确;参数标定方法在搜索效率与收敛速度方面有明显提高。为导引头的精确控制奠定了基础。

参考文献:

- [1] Russell T R. Strapdown stabilization for imaging seekers[C] //Proceedings of the AIAA SDIO 2nd Annual Interceptor Technology Conference, Albuquerque, NM, 1993.
- [2] Zhu Mingchao, Wang Tao, Jia Hongguang, et al. Seeker kinematic analysis and calibration based on POE formula[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (8): 1556-1562. (in Chinese) 朱明超,王涛,贾宏光,等.基于指数积公式的导引头运动学分析与标定[J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (8): 1556-1562.
- [3] Li Yan. A study on error modeling & evaluation of electrooptical stabilization /tracking equipment [D]. Changsha:

- National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese) 李岩. 光电稳定跟踪装置误差建模与评价问题研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2007.
- [4] Wang Tao, Zhu Mingchao, Yin Shengli, et al. Analysis of LOS pointing error derived from precision of shafting in stabilization mechanism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2265–2269. (in Chinese)
- [5] Zhao Jinyu, Wang Dexing, Li Wenjun, et al. New method of dynamic correction for the system errors of telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 244–247. (in Chinese)
 - 赵金宇, 王德兴, 李文军, 等. 望远镜系统误差动态修正的一种新方法 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 244-247.
- [6] Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto –electric tracking and measuring device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13 (2): 105–108. (in Chinese)
 - 王家骐, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(2): 105-108.
- [7] Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng. Analysis, modeling and correction of pointing errors for electro-optical detection system[J]. *Acta Aeronautia et Astronautica Sinica*, 2011, 32(11): 2042-2054. (in Chinese) 张智永, 周晓尧, 范大鹏. 光电探测系统指向误差分析、建模与修正[J]. 宇航学报, 2011, 32(11): 2042-2054.
- [8] Okamura K, Park F C. Kinematic calibration and the product of exponential formula[J]. *Robotica*, 1996, 14: 415–421.
- [9] Murray R M, Li Zhexiang, Sastry S S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation [M]. US: CRC Press, 1994.
- [10] Paul R P. Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control[M]. US: MIT Press, 1981.
- [11] Chen I, Yang G, Tan C,et al. Local POE model for robot kinematic calibration [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(11–12): 1215–1239.