

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.051

基于改进蚁群算法的风洞试验俯仰机构运动误差优化

郭宗环 谢志江 宋代平 齐凯

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为提高风洞试验俯仰机构的运动精度,减少初始误差,提出了基于改进蚁群算法的俯仰机构运动误差优化分析方法。针对影响俯仰机构运动精度的3个误差源——弧形导轨半径 R 、连杆长度 L 、直线导轨安装位置 y_{oa} ,建立俯仰机构运动误差分析数学模型;推导了可用于分析误差的改进蚁群算法模型,将俯仰机构3个误差源的求解转换为对目标函数优化问题的求解,采用改进算法进行误差优化。对比传统数值方法,改进后的蚁群算法对误差求解精度达到 10^{-5} mm级,有效地避免了结构自身产生的初始误差源对计算结果的影响。

关键词: 俯仰机构; 风洞试验; 运动精度; 初始误差; 蚁群算法; 误差优化

中图分类号: TH16; TH113.2⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)07-0375-07

Error Optimization of Pitching Mechanism Motion in Wind Tunnel Test Based on Improved Ant Colony Algorithm

Guo Zonghuan Xie Zhijiang Song Daiping Qi Kai

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to enhance the motion precision and reduce the initial error of the pitching mechanism which is used in the wind tunnel experiment, a novel error optimizing method was proposed. This new error optimizing approach is based on an improved ant colony algorithm. Firstly, three independent error sources which have influences on the motion precision of pitching mechanism were found and the mathematical models of three error sources including the radius of arc guide rail R , the length of connecting rod L and the installation position of linear guide rail y_{oa} were established, respectively. The effect of each error source with the method of controlling variables was analyzed. Secondly, according to mathematical models of each error source, the mathematical model of three combined errors in the pitching mechanism was established. Based on the derived ant colony algorithm which is used in the error analyzing, the error optimizing problem could be converted to an optimizing problem of multiplied objectives. Finally, compared with results which utilize traditional Newton-Raphson iterative method, the motion accuracy of improved ant colony algorithm was higher, and the accuracy can reach a level of 10^{-5} mm. The compared results could also prove that the improved algorithm has a better global optimizing ability and it could avoid undesired effects of initial error in the structures when adopting the improved algorithm. The correctness and effectiveness of this method were confirmed by simulation with Matlab. In conclusion, the proposed approach was certificated to be effective and applicable in the engineering field.

Key words: pitch mechanism; wind tunnel test; motion precision; original errors; ant colony algorithm; error optimization

收稿日期: 2016-04-07 修回日期: 2016-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1530138)

作者简介: 郭宗环(1988—),男,博士生,主要从事机械创新设计与串并联机器人研究,E-mail: zonghuan208@163.com

通信作者: 谢志江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事机械创新设计、机电一体化及设备故障诊断研究,E-mail: xie@cqu.edu.cn

引言

在对某风洞分离体俯仰机构设计时,考虑机构的运动精度会对风洞捕获轨迹试验^[1]产生重大影响,提出一种直线变圆弧机构(俯仰机构)代替旋转副以实现分离体的俯仰运动。该机构具有良好的运动学特性,响应快;提高其运动精度对提高风洞进行捕获轨迹试验研究能力具有重要的意义。

机构的运动精度取决于测量准确度、给定误差模型和计算精度^[2]。由于结构空间及现有测量条件的限制,现场准确测量俯仰机构的运动误差比较麻烦,且不能准确地辨识由加工制造和安装造成的误差。因此需要采用一种有效的方法来避免初始误差源造成的俯仰机构运动精度低的问题。

谭兴强等^[3]通过对一种6自由度并联机构动平台输出位姿误差的仿真分析,并在风洞试验中嵌入与运动误差仿真相似的运动误差估算程序提高了风洞试验数据的准确性。刘红军等^[4]提出一种摄动法建立机构的误差模型,并通过软件仿真很大程度上提高了机构的静态位姿精度;马晓丽等^[5]采用软件算法对机构的结构参数和运动输入参数等原始误差引起的机构动平台位姿误差作了仿真和定量分析,为并联机器人样机的制造提供了精度设计的依据。RAUF等^[6]依据6个传感器信息对机构误差进行标定,减少了机构的定位误差;陈修龙等^[7]采用一种五自由度并联机器人坐标测量机构来提高测量精度,并通过计算机仿真验证了误差模型的正确性。Tricept805机构通过冗余传感器数据的自标定作为提高精度的一种有效方法^[8];CHANALA等^[9]采用外部几何标定法来降低加工制造误差对运动精度的影响,可以作为机构运动误差标定的一种方法;孙昆鹏^[10]利用虚拟轴机构将驱动杆长、静平台和动平台上6个铰链中心的位置向量作为未知量联立推出方程组,基于这个方程组建立简单的误差模型,但验证出初值的选取对实际的计算精度影响太大,导致最后运动精度不高;孔令富等^[11]通过在双目主动视觉监测平台上的一种视觉空间目标定位算法,来提高机构运动精度;DANEY等^[12]利用数学上的区间运算算法标定并联机构运动,并用试验方法证明其算法的有效性。上述方法均基于建立较为复杂数学模型以及编程计算,存在公式繁杂、计算量大且迭代计算速度慢的缺点。20世纪90年代DORIGO等^[13]提出蚁群算法用于解决旅行商问题(TSP),并取得了较好的试验效果,通过试验证明其优化性能较遗传算法、差分进化算法和粒子群优化算法等传统算法更好,且操作简单,它可以更有效地解决多维和多通

道的优化问题,但是也存在收敛速度慢、容易陷入局部最优等缺点。本文通过分析俯仰机构运动过程影响运动精度的3个初始误差源,利用权和方法,把多元非线性的强大搜索能力和一种误差优化模型结合起来对俯仰机构的运动误差进行分析,使用改进蚁群算法对该机构俯仰运动误差进行优化,并与数值迭代法计算结果进行对比分析。

1 俯仰机构运动误差分析

俯仰机构结构如图1所示,主要由驱动丝杠伺服电机、直线导轨滑块、丝杠螺母、弧形导轨滑块、驱动连杆、直线滑块安装座等构成。

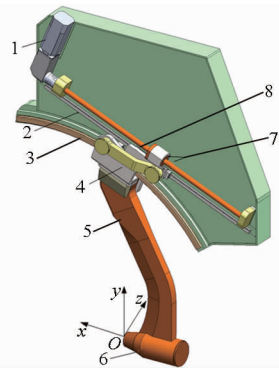


图1 俯仰机构模型

Fig. 1 Model of pitching mechanism

1. 伺服电机 2. 直线导轨 3. 弧形导轨 4. 驱动连杆 5. 尾部部件 6. 滚转机构 7. 丝杠螺母 8. 直线滑块安装座

该机构的工作原理:伺服电机驱动丝杠的旋转运动转换为螺母沿丝杠直线运动,螺母连接驱动连杆带动直线滑块沿着直线导轨运动,驱动连杆带动安装在弧形滑块上的尾部部件以及滚转机构沿弧形导轨以滚转机构末端为圆心转动,最终使得外挂物(母机)以坐标系原点 O 为圆心,绕 z 轴旋转运动,即为俯仰运动角 α 。俯仰机构运动过程中对运动精度影响最大的主要几何参数包括弧形导轨半径 R 、连杆长度 L 以及直线导轨安装位置 y_{oa} ,其中, y_{oa} 的下标 a 表示直线导轨滑块 A 的初始位置。设俯仰机构3个主要误差分别取为 ΔR 、 ΔL 、 Δy_{oa} 。

图2所示 A 、 B 为俯仰角 $\alpha = 0^\circ$ 时直线滑块、弧形滑块位置, AB 为驱动连杆长度 L 。 A' 、 B' 为俯仰角 α 转动任意位置时直线滑块、弧形滑块位置。

取弧形导轨转动中心为原点 O 建立绝对坐标系 Oxy ,以 A 为原点建立局部坐标系 $O\xi\eta$, A 在 Oxy 坐标为 (x_{oa}, y_{oa}) 。取直线滑块运动位移为 S ,则弧形导轨半径取为 $R + \Delta R$ 、驱动连杆长度取为 $L + \Delta L$;取 OB 与 y 轴夹角为 ϕ , $\angle BOB'$ 为俯仰角 α , A' 在 $O\xi\eta$ 坐标为 $(S, 0)$, A' 在 Oxy 坐标为

$$\mathbf{L}_{OA'} = T\mathbf{L}_{AA'} + \mathbf{L}_{OA} \quad (1)$$

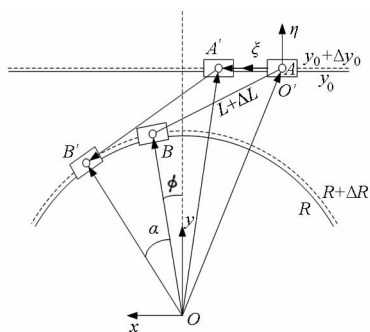


图 2 俯仰机构运动简图

Fig. 2 Motion diagram of pitching mechanism

其中

$$T = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$

式中 T ——局部坐标系 $O\xi\eta$ 对绝对坐标系 Oxy 方向余弦矩阵

$L_{OA'}$ ——点 O 到点 A' 的矢量

L_{OA} ——点 O 到点 A 的矢量

$L_{AA'}$ ——点 A 到点 A' 的矢量

由图 2 知绝对坐标系与局部坐标系夹角 $\phi =$

0° , 化简 $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则 A' 在 Oxy 坐标为 $(x_{oa} + S, y_{oa} +$

$\Delta y_{oa})$, B 在 Oxy 坐标为 $((R + \Delta R) \sin\phi, (R + \Delta R) \cos\phi)$, 则 B' 点在 Oxy 坐标为 $((R + \Delta R) \sin(\phi + \alpha), (R + \Delta R) \cos(\phi + \alpha))$, 根据封闭矢量法建立矢量方程组

$$\begin{cases} L_{OA} + L_{AB} = L_{OB} \\ L_{OA'} + L_{A'B'} = L_{OB'} \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_{AB} 、 $L_{A'B'}$ 、 L_{OB} 、 $L_{OB'}$ ——各点间的矢量化简得

$$\begin{cases} (L + \Delta L)^2 = [(R + \Delta R) \sin\phi - x_{oa}]^2 + [(R + \Delta R) \cos\phi - (y_{oa} + \Delta y_{oa})]^2 \\ (L + \Delta L)^2 = [(R + \Delta R) \sin(\phi + \alpha) - (x_{oa} + S)]^2 + [(R + \Delta R) \cos(\phi + \alpha) - (y_{oa} + \Delta y_{oa})]^2 \end{cases} \quad (3)$$

解得俯仰角 α 与直线滑块位移 S 关系式为

$$\begin{cases} x_{oa} = (R + \Delta R) \sin\phi - \sqrt{(L + \Delta L)^2 - [(R + \Delta R) \cos\phi - y_{oa}]^2} \\ \alpha = \arcsin \frac{(R + \Delta R)^2 + (y_{oa} + \Delta y_{oa})^2 + (x_{oa} + S)^2 - (L + \Delta L)^2}{2(R + \Delta R) \sqrt{(x_{oa} + S)^2 + (y_{oa} + \Delta y_{oa})^2}} - \arcsin \frac{y_{oa} + \Delta y_{oa}}{\sqrt{(x_{oa} + S)^2 + (y_{oa} + \Delta y_{oa})^2}} - \phi \end{cases} \quad (4)$$

式(4)为俯仰机构运动误差模型,表明俯仰机构运动精度与 R 、 L 、 y_{oa} 产生的误差源有关,可采用控制变量法分析各个误差源对俯仰角 α 精度的影响。分别取弧形导轨半径误差 $\Delta R = 0.5 \text{ mm}$, 驱动

连杆长度误差 $\Delta L = 0.5 \text{ mm}$, 直线导轨安装位置误差 $\Delta y_{oa} = 0.5 \text{ mm}$ 。根据实际俯仰机构运动规律计算,可得到俯仰角 α 误差。

如图 3 所示,得到 3 个误差源对俯仰机构运动调节产生不同程度的影响,在实际工程应用中需要避开其对机构的影响以达到提高机构运动精度要求。

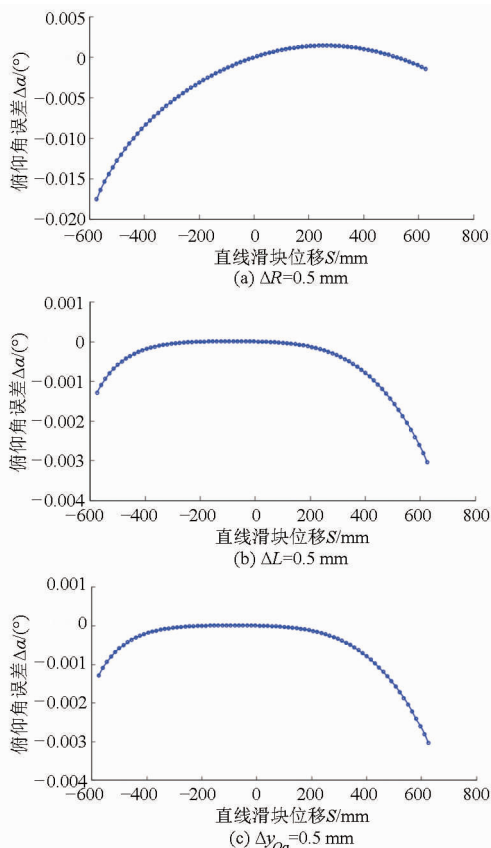


图 3 俯仰运动角误差变化曲线

Fig. 3 Error of movement of pitch angle

2 算法求解分析

2.1 分析模型建立

俯仰机构运动误差分析的基本思想是利用误差源可见性,构建实测参数与机构误差模型之间的函数,对各误差源进行识别,将识别结果对控制程序运动学模型参数进行修正,最终达到减小初始误差对俯仰机构运动精度影响的目的。

分析得到俯仰运动误差模型中存在 3 个误差源: ΔR 、 ΔL 、 Δy_{oa} 。测量一组数据只有一个运动学方程,至少需进行 3 次测量才足以确定出各误差源的值。在实际工程运用中,通常选取大量的位置点进行测量,以减弱测量误差对分析结果的影响。俯仰机构误差分析的数学模型为

$$\begin{aligned} (L + \Delta L)^2 = & [(R + \Delta R) \sin(\phi + \alpha_i) - (x_{oa} + S_i)]^2 + \\ & [(R + \Delta R) \cos(\phi + \alpha_i) - (y_{oa} + \Delta y_{oa})]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

式(5)是一个包含俯仰机构位姿测量信息、驱动信息、几何参数以及误差源的非线性超越方程组,而俯仰机构的误差参数识别问题可以归结为非线性超越方程组求解问题,可以转换为非线性模型参数优化问题,针对这一问题,对该非线性超越方程组采用改进蚁群算法进行精确求解。

将式(5)简化为

$$\begin{aligned} & [(R + \Delta R) \sin(\phi + \alpha_i) - (x_{o_a} + S_i)]^2 + \\ & [(R + \Delta R) \cos(\phi + \alpha_i) - (y_{o_a} + \Delta y_{o_a})]^2 - \\ & (L + \Delta L)^2 = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (6)$$

针对非线性超越方程组转换为求解多目标优化问题等同于求解式(5)的最小值,则

$$\begin{aligned} F_i(\Delta R, \Delta L, \Delta y_{o_a}) = & [(R + \Delta R) \sin(\phi + \alpha_i) - (x_{o_a} + S_i)]^2 + \\ & [(R + \Delta R) \cos(\phi + \alpha_i) - (y_{o_a} + \Delta y_{o_a})]^2 - \\ & (L + \Delta L)^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (7)$$

权和法可以将多目标优化问题转换为所有目标的加权和的标量问题,即

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i F_i(x)^2 \quad (8)$$

式中 ω_i ——权重系数

将式(7)代入式(8)中,可得俯仰机构误差参数识别的数学优化模型

$$\min f(\Delta R, \Delta L, \Delta y_{o_a}) = \sum_{i=1}^3 \omega_i F_i(\Delta R, \Delta L, \Delta y_{o_a})^2 \quad (9)$$

2.2 基本蚁群算法求解

根据蚁群在寻找食物过程中所体现出来的寻优能力,基本蚁群算法由信息素更新法则和状态转移规则组成。 t 时刻蚂蚁 k 从 i 位置移动到 j 位置概率为

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{R \in \lambda_k} \tau_{iR}^\alpha(t) \eta_{iR}^\beta(t)} & (j \in \lambda_k) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (10)$$

式中 τ_{ij} —— i, j 位置之间的信息素强度

η_{ij} ——能见度系数,即从 i 位置到 j 位置启发度,在移动过程中不变

λ_k ——蚂蚁 k 下一步运动位置

α, β ——蚂蚁运动时累积的信息和启发信息对蚂蚁行走路径的重要程度系数

经过规定时间,随着路径信息素强度发生变化,蚂蚁完成一次循环移动,各蚂蚁的路径信息更新规则为

$$\tau_{ij}(t+1) = \kappa \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t+1) \quad (11)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) \quad (12)$$

式中 $\Delta \tau_{ij}(t, t+1)$ ——在该次循环中 (i, j) 位置上的信息素增加量

$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1)$ ——蚂蚁 k 在时刻 $(t, t+1)$ 留在 (i, j) 位置上的信息素量,其值取决于蚂蚁的优劣程度

κ ——残留信息素浓度,设置 $\kappa < 1$

2.3 改进蚁群算法求解

基本蚁群算法存在局部最优以及收敛速度慢的问题^[14],针对本文求解目标函数的优化是连续域优化的问题,因此需要一种适用于连续域内的蚁群算法。史恩秀等^[15]通过全局路径规划仿真试验验证了蚁群算法最佳匹配参数组的准确性。文献[16]提出蚁群智能优化算法,但是存在搜索时间长、容易出现停滞现象等缺点;刘建华等^[17]提出一种在蚁群算法搜索过程中加入针对具体问题的人工势场局部搜索寻优算法,收敛速度提高近1倍。申铨京等^[18]采用信息素挥发因子自适应调整机制调节算法有效地解决了连续域内蚁群算法收敛速度慢并容易陷入局部最优的问题,增强了算法的全局寻优能力。DERO等^[19]提出一种可用于连续域内求解的蚁群算法,该方法结合信息素传递以及直接交流2种方式来指导蚁群的寻优;吴小勇等^[20]提出采用改进蚁群算法对3-PPR并联机构位置正解进行求解,提高了正解精度,并解决了算法局部最优问题。文献[21-22]也提出几种用于连续域内的蚁群算法。基于前人的研究,本文提出一种相对简单的改进蚁群算法,基本方案如下:

首先根据俯仰机构机械加工精度以及安装精度要求,取3个误差源的约束空间为: $\Delta R_{\min} < \Delta R < \Delta R_{\max}$, $\Delta L_{\min} < \Delta L < \Delta L_{\max}$, $\Delta y_{o_{a\min}} < \Delta y_{o_a} < \Delta y_{o_{a\max}}$ 。其次采用随机分布的方法将蚂蚁分布在可行域中来获得蚂蚁的初始位置,计算蚂蚁初始位置时信息素的值并从中选择记录最优值。蚂蚁根据转移概率作全局搜索或局部搜索,每移动一次后即更新信息素值,如此往复循环,达到迭代终止条件即可获得最优解。

在各变量的可行域内,采用随机分布的方式确定蚁群的初始位置。

算法步骤具体如下:

(1)在各变量的可行域内随机分布确定出蚁群初始位置。

(2)根据目标函数确定信息素值 τ

$$\tau = -f(\alpha, \beta, z) \quad (13)$$

主要是求目标函数最小值,由于其增减性与目标函数相反,即求信息素的最大值。 $f(\Delta R, \Delta L, \Delta y_{0a})$ 正向接近于 0 时,信息素值便负向无限接近于 0,导致信息素的浓度不方便评判,故采用平均信息素值 τ_{mean} 进行衡量。

$$\tau_{mean} = \text{mean}(-f(\alpha, \beta, z)) \quad (14)$$

式中 $\text{mean}()$ ——平均值函数

(3) 确定蚁群初始位置时信息素值,从中记录最优值 τ_{best} 并计算平均信息素值 τ_{mean} 的大小。

(4) 蚁群进行全局搜索或者局部搜索,搜索方式基于蚁群转移概率

$$P_{i,j} = \frac{|\tau_{i,j}| - |\tau_{best}|}{|\tau_{i,j}|} \quad (15)$$

式中 i ——蚁群移动次数

j ——蚂蚁序号

τ_{best} ——上次移动后蚁群信息素最优值

$\tau_{i,j}$ ——第 i 次蚁群移动后第 j 只蚂蚁对应的信息素值

(5) 判断蚂蚁在完成每次搜索后,重新计算该蚂蚁对应的信息素值:如果 $\tau_{i,j}^{new} > \tau_{i,j}^{old}$,则更新该蚂蚁的信息素值;如果 $\tau_{i,j}^{new} \leq \tau_{i,j}^{old}$,则该蚂蚁信息素值不变。

(6) 蚁群移动每完成一次,便对每只蚂蚁的信息素值进行更新

$$\tau_{i+1,j} = \kappa \tau_{i,j}^{old} + \tau_{i,j}^{new} \quad (16)$$

(7) 反复迭代计算,当出现迭代次数 n 小于最大循环次数,跳至步骤(4),否则结束循环,输出最终解。

3 实际算例优化分析

为了验证改进蚁群算法的俯仰运动误差分析是否满足精度要求,本文进行了算例试验。根据风洞现场试验要求,实际俯仰机构如图 4 所示。考虑到

机械加工精度以及装配精度,给出 3 个误差源的精度要求范围: $-1.0 \text{ mm} < \Delta R < 1.0 \text{ mm}$, $-1.0 \text{ mm} < \Delta L < 1.0 \text{ mm}$, $-1.0 \text{ mm} < \Delta y_{0a} < 1.0 \text{ mm}$ 。

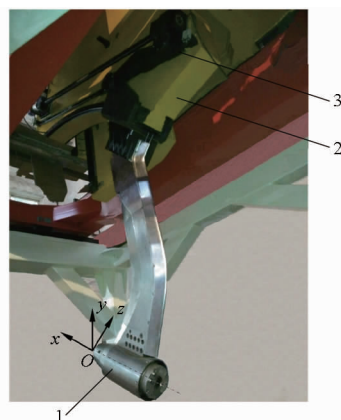


图 4 俯仰机构

Fig. 4 Pitching mechanism

1. 滚转机构 2. 俯仰底座 3. 驱动部件

以取弧形导轨半径误差 $\Delta R = 0.8 \text{ mm}$ 、驱动连杆长度误差 $\Delta L = -0.4 \text{ mm}$ 、直线导轨位置安装误差 $\Delta y_{0a} = -0.7 \text{ mm}$ 为例,验证改进蚁群算法对俯仰机构误差优化的有效性,分别在俯仰角 α 为 -25° 、 -20° 、 -15° 、 -10° 、 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 时测量得到相应的 S 求解结果如图 5 所示。误差源在其他目标位置时求解计算结果如表 1 所示,根据式(4)便可得到对应的 S 。

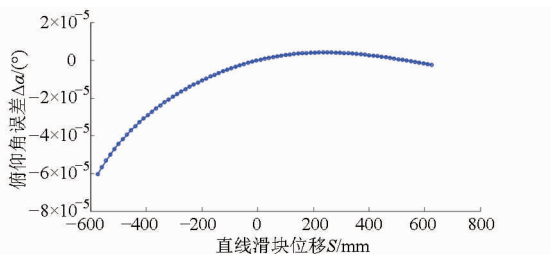


图 5 优化后俯仰角 α 误差变化曲线

Fig. 5 Error of pitching angle α after optimization

表 1 改进蚁群算法计算结果

Tab. 1 Results of improved ant colony algorithm

ΔR			ΔL			Δy_{0a}		
目标值	计算值	绝对误差	目标值	计算值	绝对误差	目标值	计算值	绝对误差
-1.0	-1.000 01	1×10^{-5}	-1.0	-1.000 02	2.0×10^{-5}	-1.0	-0.999 85	1.5×10^{-5}
-0.5	-0.500 03	6×10^{-5}	-0.5	-0.499 85	3.0×10^{-4}	-0.5	-0.500 02	4.0×10^{-5}
0	0.000 03	3×10^{-5}	0	0.000 04	4.0×10^{-5}	0	0.000 00	0
0.5	0.500 00	0	0.5	0.499 86	2.8×10^{-4}	0.5	0.500 01	2.0×10^{-5}
1.0	0.999 98	2×10^{-5}	1.0	1.000 04	4.0×10^{-5}	1.0	0.999 99	1.0×10^{-5}

俯仰机构误差分析的问题可以转换为寻找立方体(图 6)中的最小值,为了观察方便,将立方体图剖开,并将颜色淡化,将蚁群随机分布在如图 7 所示的区域中。

采用改进蚁群算法计算,所有蚂蚁聚集在 $f(\Delta R, \Delta L, \Delta y_{0a})$ 最小值处,且不受局部最小值影响,如图 8、9 所示。

如图 10 所示,该算法的收敛速度可从信息素以

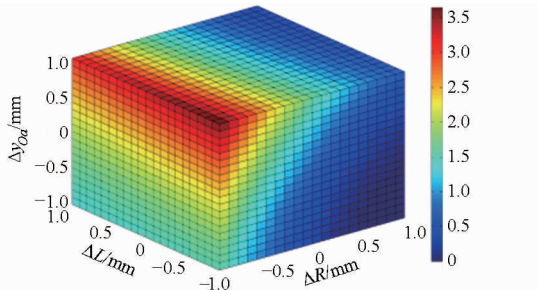


图6 目标函数值域

Fig.6 Range of objective function

及平均信息素值的变化看出。计算可得,目标函数取最小值时,弧形导轨半径误差 $\Delta R = 0.8003$ mm,驱动连杆长度误差 $\Delta L = -0.3996$ mm,直线导轨位置安装误差 $\Delta y_{Oa} = -0.6997$ mm,计算精度满足要求。而传统 Newton - Raphson 迭代法受初值影响,相同目标位置时其计算结果如表2所示。

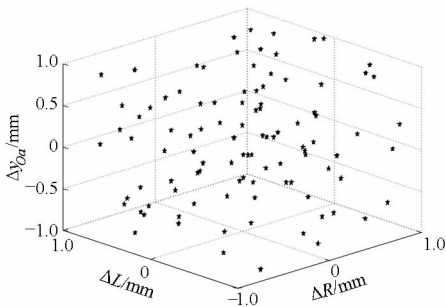


图7 蚂蚁初始位置分布图

Fig.7 Initial position distributions of ants

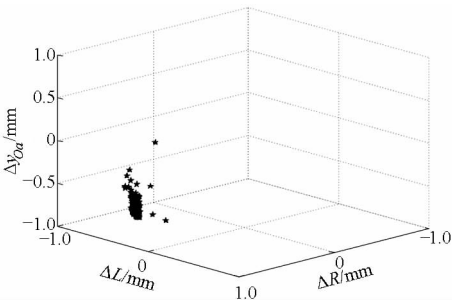


图8 蚂蚁运动200次位置分布图

Fig.8 Ants' position distribution after 200 movements

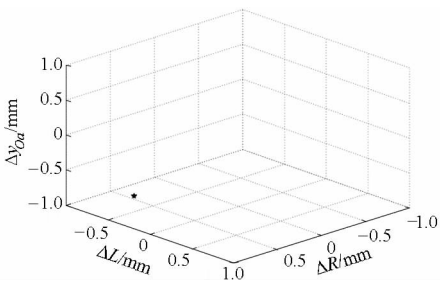


图9 蚂蚁运动400次位置分布图

Fig.9 Ants' position distribution after 400 movements

对比表1、2得到,Newton - Raphson 数值迭代法计算容易受初值的影响,初始值的不同使得计算结果偏差很大;采用改进蚁群算法,可有效地避免初始

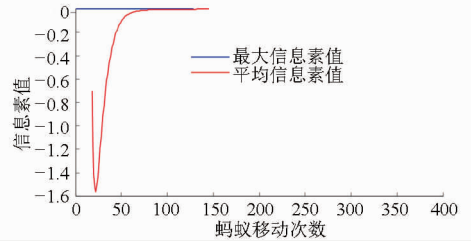


图10 最大信息素值和平均信息素值

Fig.10 Maximum value and average value of pheromone

表2 Newton - Raphson 法计算结果

Tab.2 Results of Newton - Raphson method mm

参数	ΔR	ΔL	Δy_{Oa}
初始值	-1.0	-1.0	-1.0
	-0.5	-0.5	-0.5
	0	0	0
	0.5	0.5	0.5
	1.0	1.0	1.0
计算值	-1.1134	-1.3132	-1.5380
	-0.4427	-0.6290	-0.7250
	0.1432	0.1562	0.2032
	0.4425	0.6342	0.4286
	0.8892	1.2520	0.3520
绝对误差	0.1134	0.3132	0.5380
	0.1146	0.2580	0.4500
	0.1432	0.1562	0.2032
	0.1150	0.1342	0.1428
	0.1202	0.2520	0.3520

值对计算结果的影响,从而得到更为精确的计算解。最终将识别出的误差源引入运动学方程中进行修正,得到优化后的俯仰角误差如图5所示。与图11相比,优化后俯仰角的误差明显降低,有效地减小了初始误差对机构运动精度的影响。

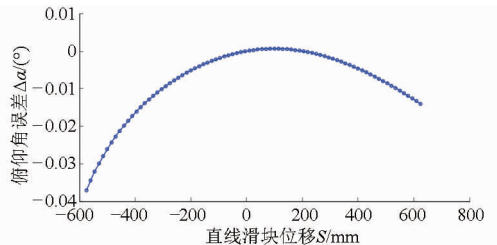


图11 优化前俯仰角 α 误差变化曲线

Fig.11 Error of pitching angle α before optimization

4 结论

(1) 针对3个初始误差源对俯仰机构运动的影响,运用封闭矢量法构建出俯仰机构的误差数学模型,并分析了3个初始误差源对机构运动精度的影响,推导了基于改进蚁群算法的误差参数分析模型。

(2) 提出一种利用改进蚁群算法,将俯仰机构运动误差分析模型的非线性问题转换为多目标函数寻最优解的问题,与数值迭代法相比,有效地解决了

3个误差源初始值的选取影响计算结果的问题。

(3)将改进蚁群算法得到的各误差参数识别结果代入运动学公式中进行修正并优化分析,得

到优化后俯仰角误差。本方法可以应用在其他复杂并联机构的误差分析求解,具有一定的工程实用价值。

参 考 文 献

- 1 李周复. 风洞特种试验技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2010.
- 2 裴葆青,罗学科,陈五一,等. 6UPS 并联机构静态误差的矢量法标定[J]. 中国机械工程, 2006,17(8): 854-857.
PEI Baoqing, LUO Xueke, CHEN Wuyi, et al. Calibration of a 6UPS parallel machine by vector method[J]. China Mechanical Engineering, 2006,17(8): 854-857. (in Chinese)
- 3 谭兴强,张键,谢志江. 风洞6-PUS 并联支撑机器人运动误差建模与补偿[J]. 农业机械学报,2014,45(4):334-346.
TAN Xingqiang, ZHANG Jian, XIE Zhijiang. Motion error modeling and compensating for 6-PUS parallel robot of wind tunnel support system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):334-346. (in Chinese)
- 4 刘红军,龚民,赵明扬. 一种四自由度并联机构的误差分析及其标定补偿[J]. 机器人, 2005, 27(1): 6-9.
LIU Hongjun, GONG Min, ZHAO Mingyang. Error analysis and calibration of a 4-DOF parallel mechanism[J]. Robot, 2005, 27(1): 6-9. (in Chinese)
- 5 马晓丽,陈艾华,陈晓英,等. 虚拟轴工作台机构的误差分析和补偿[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 123-128.
MA Xiaoli, CHEN Aihua, CHEN Xiaoying, et al. Error analysis and compensation of a parallel mechanism for virtual-axial worktable[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 123-128. (in Chinese)
- 6 RAUF A, RYU J. Fully autonomous calibration of parallel manipulators by imposing position constraint [C] // Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, 2001: 2389-2394.
- 7 陈修龙,赵永生,邓昱. 新型并联机器人坐标测量机误差建模与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(3):477-482.
CHEN Xiulong, ZHAO Yongsheng, DENG Yu. Error modeling and simulation of a novel parallel robot coordinate measuring machine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(3): 477-482. (in Chinese)
- 8 冯志友,王志国,张策,等. Tricept 机器人机构位置正解的序单开链法[J]. 农业机械学报,2008,39(12):174-177.
FENG Zhiyou, WANG Zhiguo, ZHANG Ce, et al. Direct displacement solution of the Tricept robot based on ordered single-opened-chain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(12):174-177. (in Chinese)
- 9 CHANALA H, DUCA E, RAYA P, et al. A new approach for the geometrical calibration of parallel kinematics machines tools based on the machining of a dedicated part[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(7-8): 1151-1163.
- 10 孙昆鹏. 虚拟轴机构误差分析与精度保证研究[D]. 北京:清华大学,2001.
- 11 孔令富,王月明,赵立强. 并联机器人双目主动视觉目标定位的研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(11):2284-2288.
KONG Lingfu, WANG Yueying, ZHAO Liqiang. Space target positioning based on binocular active vision system of parallel robot [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007,13(11): 2284-2288. (in Chinese)
- 12 DANEY D, ANDREFF D, CHABERT G, et al. Interval method for calibration of parallel robots vision-based experiments[J]. Mechanism and Machine Theory,2006,41(7-8):929-944.
- 13 DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 1996, 26(1):29-41.
- 14 刘国光. 基于改进蚁群算法的四杆机构优化设计[J]. 农业机械学报,2006,37(1):149-151.
LIU Guoguang. Optimization design of four bar mechanism base the improved ant colony algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(1):149-151. (in Chinese)
- 15 史恩秀,陈敏敏,李俊,等. 基于蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法研究[J]. 农业机械学报,2014, 45(6):53-57.
SHI Enxiu, CHEN Minmin, LI Jun, et al. Research on method of global path-planning for mobile robot based on ant-colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):53-57. (in Chinese)
- 16 李有梅,王文剑,徐宗本. 关于求解难组合优化问题的蚁群优化 [J]. 计算机科学, 2002, 29(3): 115-118.
LI Youmei, WANG Wenjian, XU Zongben. About ACO algorithm for hard combinatorial optimization problem [J]. Computer Science, 2002, 29(3): 115-118. (in Chinese)
- 17 刘建华,杨建国,刘华平,等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. 农业机械学报,2015,46(9):18-27.
LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):18-27. (in Chinese)
- 18 申铨京,刘阳阳,黄永平,等. 求解 TSP 问题的快速蚁群算法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013,43(1):147-151.
SHEN Xuanjing, LIU Yangyang, HUANG Yongping, et al. Fast ant colony algorithm for solving traveling salesman problem[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition, 2013,43(1): 147-151. (in Chinese)
- 19 DERO J, SIAM P. Continuous interacting ant colony algorithm based on dense heterarchy [J]. Future Generation Computer Systems,2004,20(5): 841-856.
- 20 吴小勇,谢志江,宋代平,等. 基于改进蚁群算法的3-PPR 并联机构位置正解研究[J]. 农业机械学报,2015,46(7):339-344.
WU Xiaoyong, XIE Zhijiang, SONG Daiping, et al. Forward kinematics of 3-PPR parallel mechanism based on improved ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):339-344. (in Chinese)
- 21 LI Y J, WU T J. An adaptive ant colony system algorithm for continuous space optimization problems[J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2003, 4(1):40-46.
- 22 KARABOGA N, KALINLI A, KARABOGA D. Designing digital IIR filters using ant colony optimization algorithm [J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2004,17(2): 301-309.