

基于蒙特卡洛法的模型送进机构可靠性分析

薛全兴^{1,2} 徐志刚¹ 韩伟^{1,2} 张安申^{1,2} 杨原青^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110179; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘要: 为提高风洞模型送进机构误差精度及精度可靠度, 提出了一种同时考虑各个 D-H 关节参数随机误差影响的误差精度可靠度的蒙特卡洛分析方法。首先为模型送进机构建立了 D-H 坐标系, 在此基础上求解了送进机构的运动学方程。然后建立了机构的静态误差模型和机构精度可靠度模型。最后基于该方法研究了关节参数对机构精度误差可靠度的影响。结果表明, 基于蒙特卡洛法的机构精度可靠度分析方法能够准确判定对精度可靠度影响较大的变量, 为机构的加工、制造和装配提供指导依据。对模型送进机构的进一步研究具有理论价值和工程意义, 并对其它类似机构精度可靠度分析具有一定的借鉴意义。

关键词: 精度可靠度; 可靠度; 优化设计; 蒙特卡洛算法

中图分类号: TH12; TG65 文献标识码: A

Reliability Analysis of Model Feeding Mechanism Based on Monte Carlo Method

XUE Quan-xing^{1,2}, XU Zhi-gang¹, HAN Wei^{1,2}, ZHANG An-shen^{1,2}, YANG Yuan-qing^{1,2}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110179, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to improve the precision and reliability of the mechanism for feeding the wind tunnel model, a Monte Carlo analysis method was proposed to consider the influence of the random error of each D-H joint parameter. First, the D-H coordinate system was established for the model feeding mechanism. On this basis, the kinematic equation of the feeding mechanism was solved. Then the static error model and the mechanism accuracy model of the mechanism were established. Finally, based on this method, the influence of joint parameters on the reliability of the mechanism accuracy error was studied. The results show that the Monte Carlo method-based mechanism accuracy reliability analysis method can accurately determine the variables that have a great influence on the accuracy and reliability, and provide guidance for the processing, manufacturing and assembly of the mechanism. The further study of the model feeding mechanism has theoretical value and engineering significance, and has certain reference significance for the accuracy reliability analysis of other similar institutions.

Key words: precision reliability; reliability; optimization design; monte carlo algorithm

0 引言

超速风洞试验结果是评价高性能飞行器性能的重要依据。模型送进机构作为风洞试验重要的执行机构, 其自身运动的精度及可靠性对试验的结果影响巨大^[1]。

风洞模型送进机构是一个典型的四自由度串联机构, 机构性能对送进结果影响较大。机器人性能高低主要由精度决定^[2]。目前, 机器人末端执行器位姿的静态精度误差分析多半是在机器人各杆件参数误差及各关节变量已知的前提下, 探索机器人末端执行器的位置误差与姿态误差的变化规律^[3]。如徐卫良等^[4]采用误差概率分析的蒙特卡洛法, 将伺服定位误差、连杆参数误差作为误差源, 分析了 6 自由度机器人手部位姿误差, 验证了蒙特卡洛法位姿误差概率值的正确性。张秀珩等^[5]利用误差源间的几何关系建立了机器人误

差模型。在一确定的误差数值下对末端误差进行了研究。但大都以单一变量为研究对象, 如李志宏等^[6]研究了 6 自由度机械臂各连杆参数误差对末端位姿误差和位姿可靠性的影响, 但只是考虑单个因素作用下的结果。费晓光^[7]利用矩阵法建立串联机器人末端位姿误差模型, 通过设定确定误差值研究杆长和移动关节误差对末端位姿影响程度。该方法只能产生某一确定误差值的末端位姿, 不具有代表性, 不能体现误差分布的特征和可靠度, 计算结果对实际工程应用参考价值较小。

机器人的误差是多个变量共同作用的结果, 在运动过程中误差具有随机性, 单个变量确定误差值下的研究不能准确反映机构的性能, 为了更加准确的反映模型送进机构的精度及可靠性, 提出了一种同时考虑各个关节参数随机误差影响下的静态误差精度可靠度的蒙特卡洛分析方法。以误差精度可靠度为评判依

收稿日期: 2018 - 04 - 20; 修回日期: 2018 - 06 - 30

作者简介: 薛全兴(1993—), 男, 河南周口人, 东北大学硕士研究生, 研究方向为自动化装备技术 (E-mail) 1041619423@qq.com。

据 对影响精度的各影响因素随机取值,对机构误差进行分析。通过分析发现该方法可以准确找出对位置误差和姿态误差影响因素较大的关节参数,通过合理控制特定关节参数误差范围,可以提高模型送进机构的静态误差精度可靠度,为装配制造过程提供理论依据。

1 模型送进机构的设计及运动学描述

1.1 模型送进机构的整体设计及其工作原理

模型送进机构是风洞试验的关键执行设备,其功能为实现试验模型的快速送进、姿态调整和定位等,其运动指标会直接影响到风洞中模型的空间位置和测试结果准确性。本文模型送进机构为一个 4 自由度串联结构,可以实现 X 向、Y 向两个直线位移运动和俯仰、偏航两个回转运动,具体结构如图 1 所示。

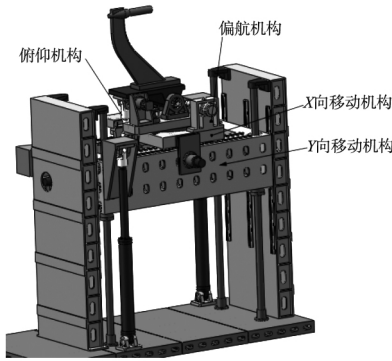


图 1 进给机构三维模型

模型送进机构主要由 X 方向移动机构、Y 方向移动机构、俯仰机构和偏航机构组成,俯仰和偏航运动由直线运动控制实现。其工作原理为:上位机根据目标姿态预先规划四轴同步运动轨迹,控制系统按照轨迹数据给液压系统发送控制指令,各自由度液压缸在伺服阀控作用下开始运动,位移传感器、直线光栅尺和编码器实时测量各自由度运动位移/角位移信息,通过双闭环反馈将控制量信息反馈至伺服阀控系统,确保模型运动位置和姿态准确。

1.2 模型送进机构运动学描述

串联机器人运动学研究常采用 D-H 坐标法建立坐标系。连杆采用关节转角 θ_i 、连杆偏距 d_i 、连杆转角 α_i 和连杆尺寸 a_i 四个参数来描述。相邻连杆坐标系的变换可由这 4 个参数来确定。第 i 杆的坐标系相对第 $i-1$ 杆坐标系的相对位姿由式(1)表示。

$${}^{i-1}T = Rot(x_{i-1}, \alpha_i) Trans(x_{i-1}, d_i) Rot(z_i, \theta_i) Trans(z_i, a_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 c 、 s 分别表示 \cos 和 \sin 。

通过计算相邻连杆变换矩阵,末端坐标系相对基坐标系的变换矩阵可表示为:

$${}^0T_N = {}^0T_1 T_2 \dots T_{N-1} T_N = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

D-H 坐标系下的串联机器人姿态的描述方式常用的有欧拉角和框架角。其表示形式分别为式(3)、式

(4):

$$\begin{aligned} \beta &= \text{Atan2}(\sqrt{n_z^2 + o_z^2}, a_z) \\ \alpha &= \text{Atan2}(a_y/s\beta, a_x/s\beta) \\ \gamma &= \text{Atan2}(o_z/s\beta, -n_z/s\beta) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \text{Atan2}(-n_z, \sqrt{n_x^2 + n_y^2}) \\ \alpha &= \text{Atan2}(n_y/c\beta, n_x/c\beta) \\ \gamma &= \text{Atan2}(o_z/c\beta, a_x/c\beta) \end{aligned} \quad (4)$$

根据 D-H 坐标法,把模型送进机构底部中心作为基坐标原点,模型送进机构的坐标系和各运动参数分布如图 2 所示。

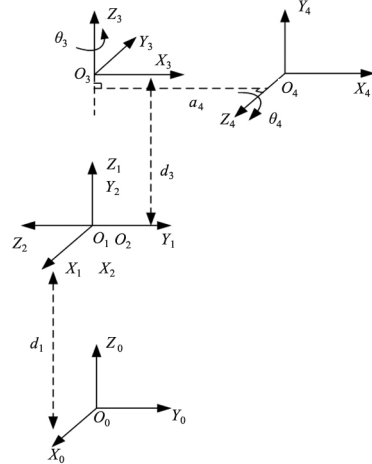


图 2 模型送进机构 D-H 坐标系及参数分布图

由机构运动形式和连杆长度可知各运动参数,如表 1 所示。

表 1 4 自由度机构 D-H 参数

i	a	α	d	θ
1	0	0	d_1	0
2	0	$\pi/2$	d_2	0
3	0	$-\pi/2$	d_3	θ_3
4	d_4	$\pi/2$	0	θ_4

由式(2)计算可得出:

$${}^0T = \begin{bmatrix} c\theta_3 c\theta_4 & -c\theta_3 s\theta_4 & s\theta_3 & a_4 c\theta_3 \\ s\theta_3 c\theta_4 & -s\theta_3 s\theta_4 & -c\theta_3 & a_4 s\theta_3 - d_2 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & d_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(3)~式(5)可以求出模型送进机构在任意关节参数下的位姿 P_0 。

2 串联机器人末端执行器位姿误差模型建立与计算

串联机器人末端执行器的位置与姿态精度影响因素^[8]是多方面的,主要有:

- (1) 环境因素引起的误差;
- (2) 机构制造和装配时产生的误差;
- (3) 内部控制、坐标系变换产生的误差;
- (4) 运动产生的误差。

串联机器人末端执行器的位姿误差与各连杆运动参数误差之间的关系由函数确定。末端执行器在该姿态下的误差阵^[9] ΔT 为:

$$\Delta T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial T}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial T}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial T}{\partial a_i} \Delta a_i + \frac{\partial T}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i \right) \quad (6)$$

式中, $\frac{\partial T}{\partial \theta_i}$, $\frac{\partial T}{\partial d_i}$, $\frac{\partial T}{\partial a_i}$, $\frac{\partial T}{\partial \alpha_i}$ 分别为连杆转角、连杆尺寸、连杆

偏距、关节转角的误差传递矩阵。总位置误差为:

$$\Delta r = \sqrt{\Delta p_x^2 + \Delta p_y^2 + \Delta p_z^2} \quad (7)$$

机构的位姿误差为:

$$\Delta r = \left[\frac{\partial p_x}{\partial V_{ij}} \quad \frac{\partial p_y}{\partial V_{ij}} \quad \frac{\partial p_z}{\partial V_{ij}} \right]^T \cdot [V_{ij}] \quad (8)$$

$$\Delta \varphi = \left[\frac{\partial \alpha}{\partial V_{ij}} \quad \frac{\partial \beta}{\partial V_{ij}} \quad \frac{\partial \gamma}{\partial V_{ij}} \right]^T \cdot [V_{ij}] \quad (9)$$

其中, V_{ij} 代表各连杆关节变量和机构参数 θ_i 、 d_i 、 α_i 、 a_i 。

3 串联机器人位置误差与姿态误差可靠度分析

蒙特卡洛法^[10]是一种利用随机数统计实验研究的方法,将所得统计的特征值作为所求问题的数值解。本文主要模拟和分析造成静态误差的几何参数误差。由于几何参数误差的随机性,导致末端执行器的位置误差与姿态误差也伴随有随机性。为得到末端位姿误差的抽样值,将误差的随机抽样值带入建立的位姿误差模型,用末端位姿误差抽样值小于误差半径的概率作为位姿精度可靠度,进而评估位姿误差。

位置误差公式:

$$\Delta r = r_i - r_c \quad (14)$$

姿态误差:

$$\begin{aligned} \Delta \alpha_i &= \alpha_i - \alpha_c \\ \Delta \beta_i &= \beta_i - \beta_c \\ \Delta \gamma_i &= \gamma_i - \gamma_c \end{aligned} \quad (15)$$

精度误差可靠度可表示为:

$$\begin{aligned} P(C|\Delta r_i| < R) &= \lambda_p / \lambda \\ P(C|\Delta \phi_i| < T) &= \lambda_{\phi_i} / \lambda \end{aligned} \quad (16)$$

式中, r_i 、 α_i 、 β_i 、 γ_i 为实际坐标值, r_c 、 α_c 、 β_c 、 γ_c 为理想坐标值。 λ 为样本数量, λ_p 、 λ_{ϕ} 为位姿误差小于误差半径样本数, R 为位置误差半径, T 为姿态误差半径。

3.1 各关节参数对模型送进系统静态位姿影响分析

初始状态下模型送进系统各关节参数如表 2 所示。

表 2 模型送进系统连杆及关节参数

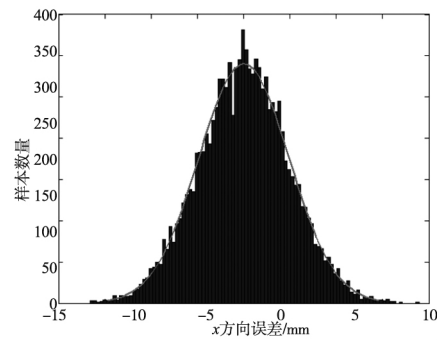
关节 i	θ_i (均值)	d_i (均值)	a_{i-1} (均值)	α_{i-1} (均值)
	弧度	mm	mm	弧度
1	0	0	0	0
2	0	0	0	$\pi/2$
3	$\pi/2$	892	0	$-\pi/2$
4	0	0	50	$\pi/2$

为了计算误差,假设各关节变量均服从正态分布^[4],设定各运动变量 θ_i 、 d_i 、 α_{i-1} 、 a_{i-1} 的均值如表 2 所示,标准差分别为 0.1° 、 0.05mm 、 0.1° 、 0.05mm 。现设定目标位置姿态时各变量值为 $d_1 = 1500$ 、 $d_2 = 500$ 、 $\theta_3 = 100^\circ$ 、 $\theta_4 = 10^\circ$ 。对模型运动到目标姿态时末端执行器的位姿精度可靠性进行研究。对四种关节变量随机取样 10000 次,将数据带入式(1)、式(2)、式(8)计算出机构从初始位置运动至目标位置时位姿误差。表 3 所示为末端执行器的位置理想值和抽样计算所得的样本统计特征。

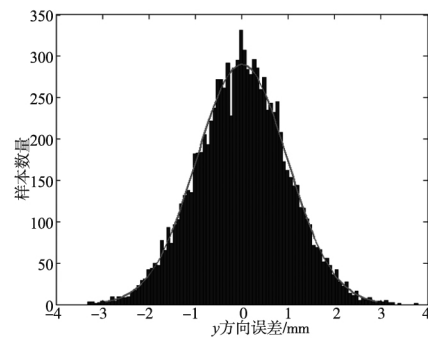
表 3 末端执行器位置误差理想值和样本统计特征

位置方向误差	理想值	样本均值	样本标准差	最小值	最大值
		位置 (mm)			
Δx	0	0.0196	2.1809	-10.5818	9.0815
Δy	0	0.0044	0.9771	-3.3215	3.7856
Δz	0	0.0126	2.1726	-9.4957	8.0444
Δp	0	2.9067	1.4716	-8.3410	7.9886

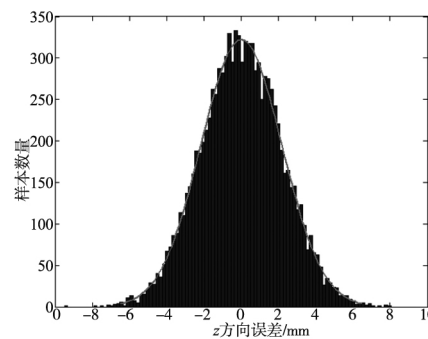
对计算得出的位置误差做频率图,如图 3 所示,均符合正态分布。



(a) x 方向位置误差



(b) y 方向位置误差



(c) z 方向位置误差

图 3 方向位置误差直方图

同理,设定各运动变量 θ_i 、 d_i 、 α_i 、 a_i 的均值标准差分别为 0.5° 、 0.05mm 、 0.5° 、 0.05mm ,从初始位置运动至目标位置时,末端执行器的姿态理想值与抽样计算所得的样本统计特征值如表 4 所示。

表 4 末端执行器理想姿态误差与样本统计特征

姿态误差	理想值	样本均值	样本标准差	最小值	最大值
$X-Y-Z$ 固定角坐标系 (弧度)					
$\Delta \alpha$	0	-0.000907	0.056563	-0.2221	0.2124
$\Delta \beta$	0	-0.000052	0.012244	-0.0417	0.0552
$\Delta \gamma$	0	0.000386	0.046588	-0.1757	0.2024
$X-Y-Z$ 欧拉角坐标系 (弧度)					
$\Delta \alpha$	0	0.000182	0.022962	-0.0898	0.0876
$\Delta \beta$	0	-0.000115	0.015131	-0.0553	0.0522
$\Delta \gamma$	0	-0.000082	0.017005	-0.0768	0.0692

以 $X-Y-Z$ 框架角为例,其 $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 、 $\Delta \gamma$ 频率分布如图 4 所示。

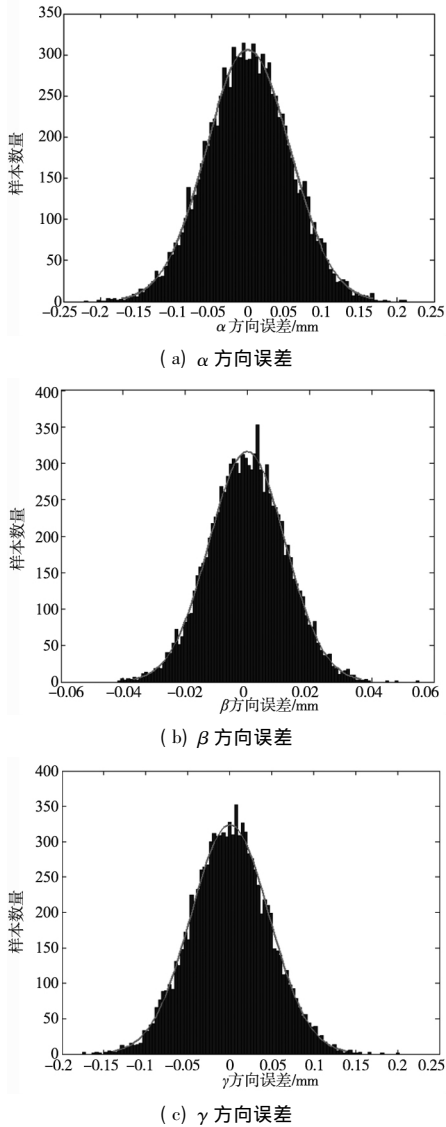


图 4 姿态误差直方图

设定末端执行器的位置误差半径为 2mm ,姿态误差半径分别为 0.05°。则末端执行器的位置可靠度和姿态(以固定坐标系为例)可靠度为为:

$$P(|\Delta r_i| < R) = 0.6432$$

$$P(|\Delta \phi_i| < T) = 0.6239 \quad 0.8978 \quad 0.7199$$

为了方便观察关节参数对误差可靠度的影响程度,取变量 $\theta_i, d_i, \alpha_i, a_i$ 的均值不变,标准差都缩小 5 倍,观察其对位姿可靠度的影响程度。其结果如表 5、表 6 所示。

表 5 末端执行器位置可靠度

标准差	理想值	X 方向可靠度	Y 方向可靠度	Z 方向可靠度
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.1$	1	0.6461	0.9580	0.6432
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.1$				
$\sigma_{a_i} = 0.01 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.1$				
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.1$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.02$				
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.1$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.1$				
$\sigma_{d_i} = 0.01 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.1$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.1$				
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.02$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.1$				
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.1$				

表 6 末端执行器姿态可靠度

标准差	理想值	α角可靠度	β角可靠度	γ角可靠度
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.5$	1	0.6239	0.8978	0.7199
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.5$				
$\sigma_{a_i} = 0.01 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.5$				
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.5$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.1$				
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.1$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.5$				
$\sigma_{d_i} = 0.01 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.5$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.5$				
$\sigma_{d_i} = 0.01 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.5$				
$\sigma_{a_i} = 0.05 \quad \sigma_{\alpha_i} = 0.1$				
$\sigma_{d_i} = 0.05 \quad \sigma_{\theta_i} = 0.1$				

由表 5、表 6 可知,关节变量标准差都缩小 5 倍时,送进机构的关节转角 θ_i 和连杆转角 α_i 对位置误差和姿态误差可靠性影响程度较大,可靠度有明显提高。为了提高精度与可靠度,在装配时应保证各运动杆件轴线的平行度和垂直度,并使用精度较高的电机以减小回转运动过程中的传递误差,这些措施可以保证精度可靠度。

3.2 各关节对静态位姿误差及可靠度影响

由表 5、表 6 可知,α 主要影响 X 方向位置误差,θ 主要影响 Y、Z 方向位置误差以及 α、β、γ 角度误差。为确定具体关节对位姿影响程度,取对位姿影响较大的 α、θ,改变其分散性,将 θ_{1-5} 或 α_{1-5} 标准差分别减小 5 倍,探究标准差的变化末端执行器位姿可靠度的影响。

表 7 关节转角 θ 对 X 向精度可靠度影响

标准差	理想值	X 方向可靠度
$\theta_{1-5} = 0.1$	1	0.6461
$\theta_1 = 0.02$	1	1
$\theta_2 = 0.02$	1	0.7933
$\theta_3 = 0.02$	1	0.6433
$\theta_4 = 0.02$	1	0.6407

表 8 连杆转角 α 对 Y 向、Z 向精度可靠度影响

标准差	理想值	Y 方向可靠度	Z 方向可靠度
$\alpha_{1-5} = 0.1$	1	0.9580	0.6432
$\alpha_1 = 0.02$	1	1	0.7961
$\alpha_2 = 0.02$	1	0.9599	0.7946
$\alpha_3 = 0.02$	1	0.9606	0.6464
$\alpha_4 = 0.02$	1	0.9614	0.6454

表 9 关节转角 θ 对姿态精度可靠度影响

标准差	理想值	α角可靠度	β角可靠度	γ角可靠度
$\theta_{1-5} = 0.5$	1	0.6239	0.8978	0.7199
$\theta_1 = 0.1$	1	0.6243	0.8929	0.7264
$\theta_2 = 0.1$	1	0.6155	0.8961	0.7171
$\theta_3 = 0.1$	1	0.6416	0.9323	0.8449
$\theta_4 = 0.1$	1	0.6987	0.9353	0.7543

综合表 7、表 8、表 9 位置和姿态误差可知,关节转角 θ_1 对 X 方向误差影响较大,连杆转角 α_1 对 Y 方向、Z 方向位置误差影响较大。关节转角 θ_3 、 θ_4 对姿态误差影响较大。

(下转第 142 页)

通过计算结果对比可知,两种混合算法得出的目标函数值比 GA 得出的目标函数值优,证明了混合算法的广泛适用性。

表 4 算法结果对比

算法类型	最优目标值	最优适应度	产生代数	迭代次数
遗传算法	54081.1	1.8491×10^{-5}	50	232
两阶段算法	48220.4	2.0738×10^{-5}	125	232
嵌套混合算法	47669.1	2.0978×10^{-5}	3	232

5 结论

将运筹学软件 WinQSB 产生的设备布局方案作为嵌套混合算法和两阶段算法的初始染色体,分别用两种混合算法对实例进行运算,结果显示混合算法得到的结果有了显著的改进,针对更大规模的实例也有不错的优化效果。同样地,在解决其他车间问题时(如车间调度),也可以采用运筹学软件(如 WinQSB、LIN-GO)自带求解模块科学快速的求出初始可行解,再通过混合算法寻求最优解,以提升算法的运行效率。

[参考文献]

[1] 张毕西,周艳,刘鑫. 离散生产系统车间设施布置优化[J]. 工业工程,2004,7(2):8-11.
 [2] 王定益,王丽亚. 一种改进遗传算法在生产车间设备布局中的应用[J]. 计算机工程与应用,2005,41(14):190-192.
 [3] 郭源源,王谦,梁峰. 基于粒子群优化算法的车间布局设计[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(11):2476-2484.
 [4] Turanoğlu B, Akkaya G. A new hybrid heuristic algorithm based on bacterial foraging optimization for the dynamic facility layout problem[J]. Expert Systems with Applications, DOI: 10.1016/j.eswa.2018.01.011.

(上接第 138 页)

为了提高送进机构的位姿可靠性,在装配、制造和选型时应特别关注关节转角 θ_1 、 θ_3 、 θ_4 , 连杆转角 α_1 的误差值。

4 结束语

为准确反映机构静态误差性能,避免以往单个变量、确定误差值下对机构性能研究的局限性。提出了一种同时考虑各个关节参数随机误差影响下的静态误差精度可靠度的蒙特卡洛分析方法。首先为送进系统物理模型建立 D-H 坐标系,在此基础上建立了模型送进机构的运动学方程、静态位姿误差模型及模型精度可靠度模型。最后以可靠度为评价标准,结合蒙特卡洛数值统计模拟法研究了关节各个参数对位置误差和姿态误差的影响程度。发现关节转角 θ_i 和连杆转角 α_i 对位姿误差影响程度较大。通过对对位置误差和姿态误差影响较大的关节参数进行分散性分析,发现关节转角 θ_1 对 X 方向位置误差影响较大,关节转角 θ_3 、 θ_4 对姿态误差影响较大,连杆转角 α_1 对 Y、Z 方向位置误差影响较大。通过合理控制参数误差,可以显著提高机构可靠度。此种方法将多种误差影响因素和误差的随机性纳入分析因素,更准确反映机构精度可靠度及各影响因素的影响程度。为机构的加工、制造、装配

[5] Kang S, Kim M, Chae J. A closed loop based facility layout design using a cuckoo search algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2017, DOI: 10.1016/j.eswa.2017.10.038.
 [6] Tate D M. Unequal Facility Layout Using Genetic Search[J]. Iie Transactions, 1995, 27(4):465-472.
 [7] Paes F G, Pessoa A A, Vidal T. A Hybrid Genetic Algorithm with Decomposition Phases for the Unequal Area Facility Layout Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 256(3):742-756.
 [8] 魏军凯,吴芳,戚峰. 基于遗传算法求解车间设备布局优化问题[J]. 兰州交通大学学报,2011,30(3):75-78.
 [9] 汪一箴,米智伟. SLP 和遗传算法结合在车间设备布局中的应用[J]. 计算机工程与应用,2010,46(5):211-213.
 [10] 俞武扬,方俊俊. 直线型制造单元与设施集成布局方法研究[J]. 工业工程与管理,2016,21(1):102-108.
 [11] 邱胜海,陈曙鼎,王云霞,等. 遗传算法在车间设施布局优化中的应用[J]. 机械设计与制造工程,2017,46(2):80-83.
 [12] 郁磊. MATLAB 智能算法 30 个案例分析. 第 2 版[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.
 [13] 邓兵,林光春. 改进 SLP 和遗传算法结合的车间设备布局优化[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(8):148-151.
 [14] 别文群,缪兴锋,李超锋. 物流运筹学方法求解软件与应用案例[M]. 广州:华南理工大学出版社,2007.
 [15] 曹道友,程家兴. 基于改进的选择算子和交叉算子的遗传算法[J]. 计算机技术与发展,2010,20(2):44-47.

(编辑 李秀敏)

过程提供指导依据,对类似的研究具有理论价值和工程意义,也为以后类似分析提供了参考。

[参考文献]

[1] 张钧. 低速风洞试验模型位姿超声测量技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
 [2] 岁波,都东,陈强,孙振国,等. 基于双目视觉的工业机器人运动轨迹准确度检测[J]. 机械工程学报,2003,39(5):88-91.
 [3] 张晓瑾. 串联机器人位姿精度分析与建模[D]. 沈阳:东北大学,2012.
 [4] 徐卫良. 连杆机构误差分析的统计模拟法[J]. 江苏机械,1986(1):7-11.
 [5] 张秀珩,柳洪义,罗忠. 基于旋量理论的打磨机器人位置精度分析[J]. 机床与液压,2016,44(19):29-33.
 [6] 李志宏,康信勇,赵翼翔,等. 六自由度机械臂位姿误差及可靠性研究[J]. 机床与液压,2017,45(9):14-17.
 [7] 费晓光. 串联机器人位姿误差的综合分析[D]. 长春:吉林大学,2009.
 [8] 徐卫良. 机器人机构误差建模的摄动法[J]. 机器人,1989,3(6):39-44.
 [9] 王鲁平. 串联机器人多误差因素影响下定位精度分析及其误差补偿[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
 [10] 徐卫良,张启先. 机器人误差分析的蒙特卡洛方法[J]. 机器人,1988,2(4):1-6.

(编辑 李秀敏)