

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.11.010

含间隙曲柄滑块机构自适应鲁棒控制研究*

薛邵文^{1,2}, 林乃昌^{1,2*}

(1. 泸州职业技术学院 机械工程学院, 四川 泸州 646005;

2. 四川省泸州市智能制造重点实验室, 四川 泸州 646005)

摘要:针对曲柄滑块机构间隙引起的系统稳定性、精度和可靠性降低的问题,运用改进的 PSO 算法对含间隙曲柄滑块机构进行了辨识,并就间隙所产生的误差,应用自适应鲁棒控制器进行了补偿。首先,对惯性因子采用非线性递减的方式、局部最优值采用加权平均的方式,对传统的 PSO 算法进行了改进;然后,分别运用传统的 PSO 算法和改进的 PSO 算法,对含间隙曲柄滑块机构进行了辨识;最后,针对曲柄滑块机构间隙产生的误差,设计出自适应鲁棒控制器进行了补偿。研究表明:相比传统的 PSO 算法,应用改进的 PSO 算法对系统辨识所建立的模型具有更高的准确性;设计的自适应鲁棒控制器控制的信号跟踪精度平均提高了 51% 左右。

关键词:间隙;曲柄滑块机构;改进粒子群优化算法;参数辨识;鲁棒控制

中图分类号:TH112;TP273.2

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)11-1317-06

Adaptive robust control of crank-slider mechanism with clearance

XUE Shao-wen^{1,2}, LIN Nai-chang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Luzhou Vocational and Technical College, Luzhou 646005, China;

2. Luzhou Key Laboratory of Intelligent Manufacturing, Sichuan Province, Luzhou 646005, China)

Abstract: Aiming at the problems of the decrease of system stability, accuracy and reliability caused by the clearance of the crank slider mechanism, the improved PSO algorithm was used to identify the crank-slider mechanism with clearance, and an adaptive robust controller was used to compensate for the error generated by the clearance. First, the traditional PSO algorithm was improved from the inertia factor using a nonlinear decreasing method and the local optimal value was a weighted average method. Then, the traditional PSO algorithm and the improved PSO algorithm were respectively used to identify the crank slider mechanism with clearance. Finally, an adaptive robust controller was designed to compensate for the errors caused by the clearance of the crank slider mechanism. The results indicate that, compared with the traditional PSO algorithm, the improved PSO algorithm has higher accuracy for the model established by system identification, and the signal tracking accuracy of the designed adaptive robust controller is increased by about 51% on average.

Key words: clearance; crank-slider mechanism; improved particles swarm optimization (PSO) algorithm; parameter identification; robust control

0 引言

在机械装备运动副中,间隙的存在在所难免。由于过大或者过小的间隙都会引起运动系统接触的碰撞,从

而也会引起系统稳定性、精度和可靠性的降低,甚至使得系统失效或降低其使用寿命^[1-2]。因此,运动副中存在间隙问题带来的负面影响需要加以研究和解决。

目前,有关运动副中间隙问题的研究重点主要聚焦于含间隙系统建模以及误差补偿方面^[3-6]。李研彪

收稿日期:2020-03-24

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(19C1594);泸州市智能制造重点实验室基金资助项目(2020K-2018)

作者简介:薛邵文(1986-),男,甘肃张掖人,硕士研究生,讲师,主要从事机电系统控制及自动化方面的研究。E-mail:945174808@qq.com

通信联系人:林乃昌,男,工学博士,高级工程师,副教授。E-mail:nchlin@126.com

等^[7]采用牛顿-欧拉法,并结合拉格朗日乘子建立了含间隙空间并联机构的动力学模型,但该模型计算量庞大,搭建模型过程复杂;郭嘉楠等^[8]针对机构中旋转铰的结构特点,建立了一种兼顾能量损失和粗糙接触面动力学特性的碰撞模型,因为建模当中需要忽略一些有关间隙方面的参数,使得该模型不能很好地反应机构的实际运动情况;宿月文等^[9]针对多体系统,提出了一种基于查找表的间隙球铰接触区域检索和磨损预测方法,但是这种方法要基于先验知识,存在一定的主观性;孙东阳^[10]利用非线性弹簧阻尼模型,建立了谐波齿轮传动的含间隙机构的接触碰撞动力学模型,但该模型不便于参数的辨识;陈渭等^[11]提出了一种求解含间隙曲柄滑块机构副反力的静态间隙杆算法,但此种算法建立的模型存在随机性,不够准确。

通过以上的分析表明,尽管针对含间隙系统建模所进行的研究已有很多,但是这些建模方法大都存在计算繁杂、模型搭建过程复杂、系统模型精度不高等特点。而目前针对间隙带的误差补偿的相关研究还很少。

针对以上问题,笔者以实际的曲柄滑块机构为研究对象,在确定系统中间隙存在的位置之后,结合改进的 PSO 算法进行系统辨识,建立含间隙曲柄滑块机构模型,并运用自适应鲁棒控制器,对间隙产生的误差进行补偿。

1 PSO 算法及改进

1.1 PSO 算法

粒子群优化(PSO)算法是由美国的 KENNEDY 和 EBERHART 依据 Boid 模型而提出的一种基于群智能的并行全局优化算法^[12]。该算法将所有潜在解搜索空间处于 D 维空间中,假设粒子群中有 N 个粒子,每个粒子的位置和空间状态分别用向量 $X_i(t)$ 和 $V_i(t)$ 表示;第 i 个粒子搜索到的最优位置记作 $Pbest_i(t)$,而当前搜索到的最优位置可由 $Gbest(t)$ 来计算。

第 i 个粒子的速度和位置可以根据以下两式来进行更新:

$$v_i^D(t+1) = wv_i^D(t) + k_1r_1[p_i^D(t) - x_i^D(t)] + k_2r_2[pbest_i(t) - x_i^D(t)] \quad (1)$$

$$x_i^D(t+1) = x_i^D(t) + v_i^D(t+1) \quad (2)$$

式中: k_1, k_2 —学习因子, $k_1, k_2 \in [0, 2]$; w —非负惯性因子, $w \in [0, 1]$; r_1, r_2 —非负常数; v_i^D — $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 。

1.2 改进的 PSO 算法

1.2.1 惯性因子 w 的改进

为了增强算法的全局和局部最优值的搜索能力,SHI 等^[13]研究了惯性因子 w 的线性调整方法,即在迭

代过程中线性减小惯性权重值,如下式所示:

$$w = w_{\text{end}} + (w_{\text{start}} - w_{\text{end}}) \left(\frac{t_{\text{max}} - t}{t_{\text{max}}} \right) \quad (3)$$

式中: t —当前迭代次数; t_{max} —最大迭代次数; w_{start} —初始惯性因子; w_{end} —最大迭代次数时的惯性因子。

SHI 等^[14]发现当 $w_{\text{start}} = 0.95, w_{\text{end}} = 0.4$ 时, PSO 算法的性能最好。但是,惯性因子并非一成不变,需要按照优化对象自己的特点,进行某种线性或是非线性减小,然而使用线性减小的惯性因子存在“早熟”收敛和收敛精度比较低的问题。为了避免该问题出现,需要寻找一条和优化对象相适应的惯性因子。

在寻优初期,为增加算法的全局搜索能力,惯性因子应随种群多样性的增加而增加;在寻优后期,为了增加算法的局部搜索能力,惯性因子则应随种群多样性的减少而递减^[15]。

按照以上原则,此处的惯性因子 w 不再是线性递减,而是采用非线性递减方式来进行设置,即:

$$w = w_{\text{max}} + \frac{(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})}{t_{\text{max}}^2} \times t^2 + \frac{2(w_{\text{min}} - w_{\text{max}})}{t_{\text{max}}} \times t \quad (4)$$

式中: w_{min} —惯性因子最小值; w_{max} —惯性因子最大值。

1.2.2 局部最优值 $p_i^D(t)$ 加权平均

在随机搜索的后期,传统的 PSO 算法中,由于存在粒子逐步趋向同一化的问题,使得粒子的搜索范围受到了限制。为了打破这一限制,扩大搜索范围,笔者采用了对局部最优值 $p_i^D(t)$ 加权平均的方式,让每个粒子从其他粒子那里获取更多的有效信息,增加搜索范围。

具体的做法是将所有的局部最优值 $p_i^D(t)$ 与其目标函数值 $f(X_i)$ 进行加权平均,即:

$$\text{最大化: } p_{\text{ina}} = \sum_{i,D=1}^N \frac{f(X_i)}{\sum_{i,D=1}^N f(X_i)} p_i^D(t) \quad (5)$$

$$\text{最小化: } p_{\text{ina}} = \sum_{i,D=1}^N \frac{M - f(X_i)}{\sum_{i,D=1}^N (M - f(X_i))} p_i^D(t) \quad (6)$$

式中: M —较大的正数。

M 为所有 $f(X_i)$ 中最大的修正,此处 M 取为:

$$M = \max(f(X_i)) \times 1.01 + 0.01 \quad (7)$$

2 改进的 PSO 算法对含间隙曲柄滑块机构参数辨识

2.1 含间隙曲柄滑块机构的参数辨识原理

含间隙曲柄滑块机构的参数辨识就是仅仅知道含

间隙系统的输入和输出,按照一定的准则在一类曲柄滑块机构模型中,选择一个与含间隙系统数据拟合得最好的模型,使得在辨识过程中通过不断调用改进的 PSO 辨识算法进行参数修正,当误差函数的最小值满足要求时,此时的参数就是最优辨识系统的参数。

参数辨识原理图如图 1 所示。

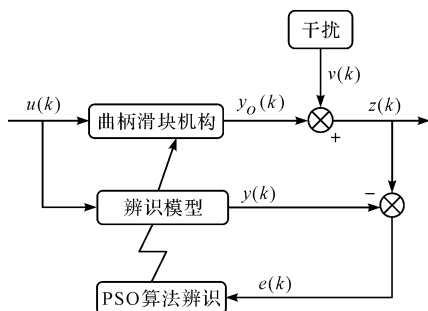


图 1 参数辨识原理图

$u(k)$ —输入信号; $y_o(k)$ —未加干扰信号输出; $v(k)$ —干扰信号; $z(k)$ —加入干扰信号后系统输出; $y(k)$ —辨识模型输出; $e(k)$ —误差信号

2.2 辨识模型参数的思路

理想曲柄滑块(忽略 O 、 A 和 B 3 处间隙)示意图如图 2 所示。

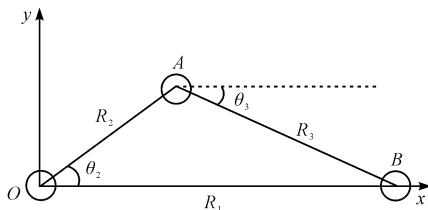


图 2 含间隙曲柄滑块机构示意图

θ_2 —曲柄转角; θ_3 —连杆转角; R_2 —曲柄长度; R_3 —连杆长度; R_1 —滑块位移

该理想机构的矢量方程式为:

$$R_2 + R_3 = R_1 \quad (8)$$

将该矢量方程分别在 X 轴和 Y 轴上进行分解,可得:

$$R_2 \cos \theta_2 + R_3 \cos \theta_3 = R_1 \quad (9)$$

$$R_2 \sin \theta_2 + R_3 \sin \theta_3 = 0 \quad (10)$$

图 2 中, O 、 A 和 B 3 点代表实际曲柄滑块机构中存在的间隙位置,由于间隙的存在运用传统的方法建立含间隙曲柄滑块机构的模型就过于复杂,也不利于实际应用,因此,为了建立更加准确的模型,降低建模难度,同时兼顾收敛速度,笔者采用改进的 PSO 算法来对该机构参数进行辨识。

在机构运行过程中,将 O 、 A 和 B 3 处的间隙分解到连杆和曲柄,则连杆和曲柄的长度就是以时间为变

量的函数,通过相应的传感器进行测量,就可以得到曲柄和连杆长度随时间的变化规律,最后运用式(9,10)即可推导出滑块位移 R_1 的变化规律,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \cos \theta_3 \\ \sin \theta_2 & \sin \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此,为得到 R_2 和 R_3 的变化规律,就需要运用传感器测量曲柄转角 θ_2 和连杆转角 θ_3 的数据。

2.3 参数辨识所需实验数据的测量

参数辨识所需的实验平台如图 3 所示。



图 3 实验平台

笔者依据图 3 中搭建的实验平台,进行所需数据 θ_2 和 θ_3 的测量。

实验平台中的相关参数如表 1 所示。

表 1 实验平台参数

名称	参数 / 单位	数值
曲柄	R_2/mm	36.72
连杆	R_3/mm	244.16
轴销半径	r/mm	4
轴销与轴套的中心距	e/mm	0.1
曲柄质量	m_1/kg	0.32
连杆质量	m_2/kg	0.175
滑块质量	m_3/kg	0.895
曲柄转动惯量	$J_1/\text{kg} \cdot \text{mm}^2$	1 187.5
连杆转动惯量	$J_2/\text{kg} \cdot \text{mm}^2$	4 749.2
滑块与槽间摩擦因数	f_1	0.04
轴销与轴套摩擦系数	f	0.005

传感器用于采集曲柄转角、连杆倾角和滑块位移的输入信号,采集频率为 0.005 s,时间为 60 s,曲柄转速为 5 r/min,输出电压值为 0.3 V^[16]。

最后在实验平台调试成功后,笔者开始进行实测,并保存相应的实验数据。

所测得的实验数据是传感器的输出电压信号,所以必须要转换成 θ_2 和 θ_3 的角度,即:

$$\theta_3 = \pi(0.25V - 0.625) \quad (12)$$

式中: V —倾角传感器的输出电压值。

转换角度后,可以分别得到曲柄转角 θ_2 、连杆转角 θ_3 、滑块位移 R_1 与时间之间的关系。

2.4 含间隙曲柄滑块机构参数辨识过程

含间隙曲柄滑块机构的参数辨识步骤如下:

(1) 获取曲柄转角 θ_2 、连杆转角 θ_3 、滑块位移 R_1 这 3 组数据量,根据采集测得的 12 000 组数据分别计算出 θ_2 和 θ_3 的正弦值和余弦值,作为样本;

(2) 在辨识所需数据选取结束后,执行改进的 PSO 算法。SHI^[17] 认为一般种群规模 M 取 50 较好;模型的粒子维数 $D = 2$ (求解的未知数个数),学习因子取 $k_1 = k_2 = 2$ 时,寻优能力最好。

最大迭代次数 $t_{\max} = 200$, $w_{\max} = 0.6$, $w_{\min} = 0.4$, 适应度函数 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \frac{1}{E} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n C[y_i - f(u_i, \theta)]^2} \quad (13)$$

式中: y_i — 采样数据输出; $f(u_i, \theta)$ — 辨识参数的输出; C — 大于 0 的常数; u_i, θ — 待辨识系统的输入参数; E — 目标函数。

在这里, E 和 $f(x)$ 互为倒数,误差越小则适应值越大,反映了该粒子性能越好,反之越差;

(3) 将初始化的粒子个体代入式(5 ~ 7, 13) 中,计算出适应度值,并通过比较得到局部最优解 $Pbest_i(t)$ 和全局最优解 $Gbest_i(t)$;

(4) 按照适应度值的高低对粒子个体进行排序,并根据式(1, 2) 来更新个体粒子的速度和位置;

(5) 依据更新后的粒子位置,计算适应度函数 $f(x)$ 的值;当第 k 代和 $k+1$ 代的适应度函数 $f(x) < 5 \times 10^{-4}$, $E < 10^{-6}$ 时,停止搜索,此时函数收敛;

(6) 否则,返回步骤(3),循环更新,进行下一次迭代,直到达到需求的精度或种群最大迭代次数,算法结束;如此即可得到模型参数辨识后,曲柄长度 R_2 和连杆长度 R_3 的最优参数。

2.5 辨识结果分析

将参数辨识后的曲柄长度 R_2 和连杆长度 R_3 代入式(11) 中,得到滑块位移 R_1 的变化规律。

采用改进的 PSO 参数辨识输出结果和实测结果对比如图 4 所示。

由图 4 可以看出,采用改进的 PSO 所辨识的滑块位移 R_3 仿真结果与实测的曲柄滑块机构的运动轨迹的变化趋势基本是一致的。但是在滑块的最远和最近位置附近误差偏大,计算得到的误差的均方差为 0.314 026 mm,处于合理范围之内。

为验证改进的 PSO 算法以显示其优势性,笔者同时采用传统的 PSO 算法对含间隙曲柄滑块机构进行辨识,传统的 PSO 算法中的局部最优值的搜索方法采

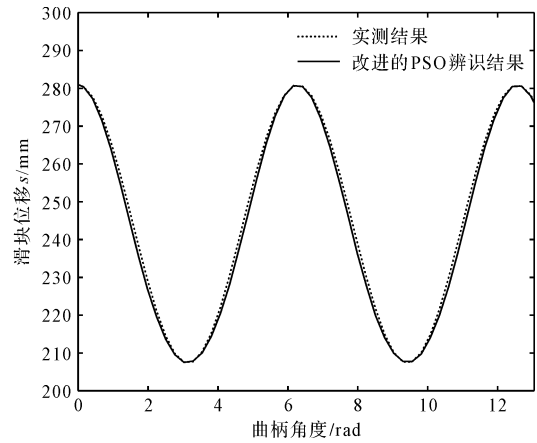


图 4 辨识结果和实测结果对比

用传统方式进行搜寻,惯性因子 w 采用式(3) 设置,除此之外,其他参数都与改进的 PSO 算法保持一致。

采用两种辨识方法所得到的对比结果如表 2 所示。

表 2 两种算法对比

辨识算法	均值	方差	迭代次数
传统算法	0.024 7	0.008 9	125 次(收敛)
改进算法	0.007 6	0.002 1	60 次(收敛)

由表 2 可知:两种 PSO 算法辨识模型产生的误差都相对较少,尤其是采用改进的 PSO 算法迭代快,收敛速度明显优于传统的 PSO 算法。

因此,与采用传统的 PSO 算法相比,采用的改进的 PSO 算法对含间隙曲柄滑块机构进行辨识,其精度更高,模型也更为可靠。

3 含间隙曲柄滑块机构的自适应鲁棒控制

3.1 自适应鲁棒控制器的设计

结合含间隙曲柄滑块机构的参数辨识线性化的特点^[18],系统可以表示为:

$$\dot{x} = f(x) + MW(x) + G(x)(u + F(x, t)) \quad (14)$$

式中: x — 状态变量; u — 控制变量; $f(x)$ — 充分光滑的向量场; M — 矩阵 $\in R^{n \times n}$; $G(x) = g_1(x), \dots, g_m(x)$; $W(x)$ — 系统在结构 M 下的不确定性; $F(x, t)$ — 系统的不确定性输入。

定理 1 对于如式(14) 所示的系统,假设存在正定矩阵 $P = P^T$, $Q = Q^T$, $X > 0$ 和矩阵 K ,可以使得:

$$P(A + BK) + (A + BK)^T P + \frac{1}{X} PP + XN^T N + Q < 0 \quad (15)$$

则自适应鲁棒控制律为:

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_d)(\hat{\theta} + u_1) - Ks + u_2 \quad (16)$$

式中: q —滑块的位移; $\dot{q}$ —滑块的速度; q_d —期望的滑块位移; $\dot{q}_d$ —期望的滑块速度; $\ddot{q}_d$ —期望的滑块加速度; $\Lambda = \text{diag}[\lambda_1 \cdots \lambda_n] > 0$; $K = \text{diag}[K_1 \cdots K_n] > 0$; $\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda \tilde{q}$; $\ddot{q}_r = \ddot{q}_d - \Lambda \dot{\tilde{q}}$; $\tilde{q} = q - q_d$; τ —力矩; $Y(\cdot)$ —含间隙曲柄滑块机构的回归矩阵; $\hat{\theta}$ —待辨识参数值。

以上结果表明,该闭环系统是渐进稳定的。

其中, u_1 和 u_2 分别为:

$$u_1 = -\frac{\rho_1^2 Y^T s}{\rho_1 \|Y^T s\| + \varepsilon_1}, u_2 = -\frac{\rho_2^2 s}{\rho_2 \|s\| + \varepsilon_2} \quad (17)$$

式中: $s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q}$; ρ_1, ρ_2 —参数辨识误差 $\tilde{\theta}$ 与外界干扰力矩 τ_d 的上界; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ —大于 0 的常数。

鲁棒控制器模块的输入输出关系可以表示为:

$$\dot{\hat{\theta}} = f_2(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, q, \dot{q}) \quad (18)$$

根据式(16-18),笔者在 MATLAB 中编写了相应的 M-Function 函数文件,嵌入到 Simulink 系统子模块中;并根据笔者所进行实验的曲柄滑块机构的具体参数,可以计算出曲柄滑块机构的标称值: $\theta_0 = [\theta_2, \theta_3] = [6.53, 2.17]$;滑块的期望轨迹为 $q_d = 36.72\cos(6.53t) + 244.16\cos(2.17t)$;滑块的初始速度为 0 rad/s,初始位置为 1 rad。

自适应鲁棒控制器的参数设置为: $K = \text{diag}(30, 30)$, $\Lambda = \text{diag}(4, 4)$, $\rho_1 = 6$, $\rho_2 = 10$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ 。

笔者组建的含间隙曲柄滑块机构自适应鲁棒控制系统仿真框图,如图 5 所示。

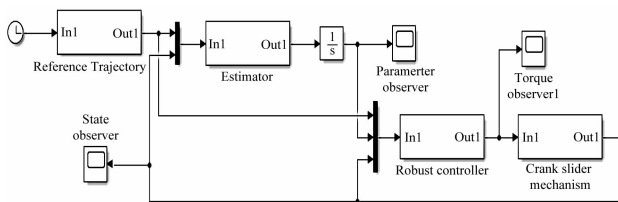


图 5 自适应鲁棒控制仿真平台

为了更好地验证控制器的鲁棒性,笔者在含间隙曲柄滑块机构系统的输入力矩中,加入如下式所示的干扰方波干扰信号,即:

$$\tau_d = \begin{cases} 6 & 0 \leq t < \pi \\ 0 & \pi \leq t < 2\pi \end{cases} \quad (19)$$

3.2 控制结果及分析

通过自适应鲁棒控制后,含间隙曲柄滑块机构的控制效果如图 6 所示。

从图 6 可以看出:

由于自适应鲁棒控制器的加入,使得含间隙曲柄滑块机构系统的误差显著降低,收敛速度更快,最大误

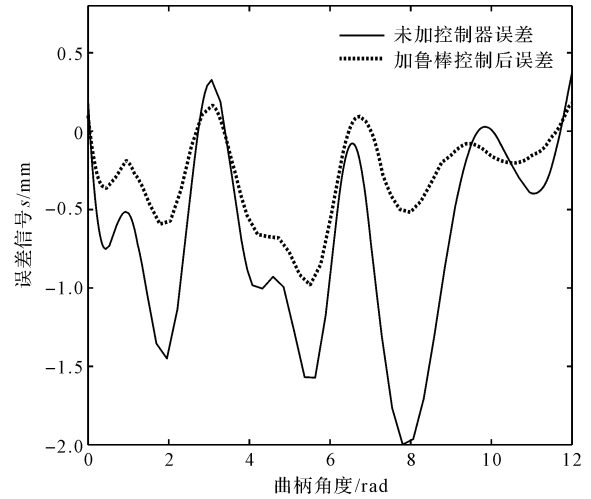


图 6 控制效果对比图

差由原来的 2 mm 降低为 0.98 mm;控制的信号跟踪精度平均提高了 51% 左右,有助于系统稳定性的有效提高。

以上结果表明,笔者设计的自适应鲁棒控制器对提高含间隙曲柄滑块机构系统的精度是有效的。

4 结束语

针对曲柄滑块机构间隙引起的系统稳定性、精度和可靠性降低的问题,笔者运用改进的 PSO 算法对含间隙曲柄滑块机构进行了辨识,并就间隙所产生的误差,应用自适应鲁棒控制器进行了补偿。

主要研究结论如下:

(1) 与传统的 PSO 算法相比,在对含间隙曲柄滑块机构参数进行系统辨识的仿真实验中,采用改进的 PSO 算法可以有效地加速迭代过程,提高对系统辨识的精度,对参数辨识所建立的模型和实测结果的误差处于合理范围之内;应用改进的 PSO 算法进行系统辨识比传统的复杂机理法建模更易实现,对工程实际中具有较强的应用价值,也为复杂的机电系统的建模提供了新思路;

(2) 所提出的自适应鲁棒控制器对间隙带来的误差补偿方法使得误差显著降低,收敛速度更快,控制的信号跟踪精度平均提高了 51% 左右,为复杂的非线性含间隙系统的误差补偿提供了新的方法。

参考文献 (References):

- [1] SALAHSHOOR E, EBRAHIMI S, ZHANG Y. Fr-equency analysis of a typical planar flexible multibody system with joint clearances [J]. *Mechanism and M-achine Theory*, 2018(126):429-456.
- [2] 徐 乔,刘凤武. 运动副间隙对曲柄滑块机构运动特性的

- 影响[J]. 机电工程技术, 2017, 46(4): 91-95.
- [3] AMIRI A, DARDEL M, DANIALI H M. Effects of passive vibration absorbers on the mechanisms having clearance joints[J]. **Multibody Sys-tem Dynamics**, 2019, 47(4): 1032-1037.
- [4] QIAN M B, QIN Z, YAN S Z, et al. A comprehensive method for the contact detection of a translational clearance joint and dynamic response after its application in a crank-slider mechanism[J]. **Mechani-sm and Machine Theory**, 2020(145): 274-281.
- [5] ERSIN D, DELICE D, IKER L, et al. Analysis and robust position control of an electromechanical con-trol actuation system[J]. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, 2020, 42(3): 628-640.
- [6] CHEN Y, SUN Y, YANG D. Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance[J]. **Journal of Mechanical Science and T-echnology**, 2017, 31(1): 75-85.
- [7] 李研彪,徐涛涛,郑航,等. 含球面副间隙的空间并联机构动态特性[J]. 浙江大学学报:工学版, 2020, 54(2): 348-356.
- [8] 郭嘉楠,何鹏,刘占生,等. 粗糙接触面旋转铰间隙碰撞动力学建模与仿真[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 132-139.
- [9] 宿月文,陈渭,阮冬. 间隙球铰接触区域快速检索及磨损问题高效求解方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 41-48.
- [10] 孙东阳,陈国平,王铁成. 谐波齿轮传动的含间隙机构的动力学分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 160-164, 183.
- [11] 陈渭,于如飞,李培. 曲柄滑块机构间隙副反力的静态间隙杆简化算法[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(1): 15-18.
- [12] CCAIG W, REYNOLDS J R. Ortaldo. Natural killer activity: the definition of a function rather than a cell type[J]. **Trends in Immunology**, 1987, 8(6): 172-174.
- [13] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. The sixth international symposium on Micro Machine and Human Science. Japan: [s. n.], 1995.
- [14] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization[C]. Proceedings of World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, America: [s. n.], 2000.
- [15] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimization[C]. IEEE. International Conference on Evolutionary Computation, America: [s. n.], 1998.
- [16] 曾庆生,王湘江,唐小欢. 基于参数辨识法的含间隙曲柄滑块机构模型研究[J]. 机械传动, 2017, 41(7): 126-129, 159.
- [17] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[C]. IEEE. Int. Conf on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 2001.
- [18] BERGHUIS H, ROBBERS H, NIJMEIJERS H. Experiment comparison of parameter estimation methods in adaptive robot control[J]. **Automatica**, 1995, 31(9): 1275-1285.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

薛邵文,林乃昌. 含间隙曲柄滑块机构自适应鲁棒控制研究[J]. 机电工程, 2020, 37(11): 1317-1322.

XUE Shao-wen, LIN Nai-chang. Adaptive robust control of crank-slider mechanism with clearance[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(11): 1317-1322.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>