

遗传算法在直流伺服系统摩擦补偿中的应用

焦竹青, 屈百达, 徐保国

(江南大学通信与控制工程学院, 214122, 无锡)

摘要: 针对直流伺服系统中存在的摩擦干扰问题, 提出了一种基于遗传算法(GA)进行摩擦补偿的设计方案. 首先根据直流伺服系统的摩擦特性建立摩擦模型, 再将摩擦补偿引入直流伺服系统的反馈控制结构中, 获取伺服电机的位置误差. 采用遗传算法对摩擦补偿模型进行系统辨识, 使摩擦补偿量在数值上不断地逼近实际的摩擦干扰, 并利用摩擦补偿量来抵消摩擦给伺服系统带来的影响, 遗传算法中目标函数的选择考虑了系统在过渡过程和稳态时的控制要求. 经过参数优化得出的摩擦补偿模型, 弥补了以往直流伺服系统受摩擦干扰影响动、静态性能较差的缺陷, 从而保证了伺服电机具有较高的跟踪精度. 仿真结果表明, 该方案与无摩擦补偿情况相比, 直流伺服电机转速响应的调节时间缩短了 0.12 s, 稳态误差降低了 1%, 系统具备较强的抗摩擦干扰能力和参数鲁棒性.

关键词: 直流伺服系统; 遗传算法; 摩擦补偿

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)08-0944-05

Application of Genetic Algorithm to Friction Compensation in Direct Current Servo Systems

Jiao Zhuqing, Qu Baida, Xu Baoguo

(School of Communication and Control Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Focusing on the problem of the friction disturbances in direct current (DC) servo system, a scheme of friction compensation with genetic algorithm (GA) is proposed. A friction model is established according to the friction characteristics of a DC servo system; then, the friction compensation is introduced to the feedback control structure of DC servo system to calculate the position error of the servo motor. Genetic algorithm is adopted to identify the friction compensation model, and to make the quantity of friction compensation approximates to the practical friction disturbance unceasingly, so that the influence of friction on the servo system is eliminated. Moreover, the objective function of genetic algorithm is selected according to the control demands in the transition process and steady state of the system. The friction compensation model obtained from optimized parameters compensates the low dynamic and static performance of the previous DC servo systems due to friction disturbance, and ensures that the servo motor has higher track precision. Simulation results demonstrate that, compared to the case without friction compensation, the adjusting time of rotating speed response of the DC servo motor is decreased by 0.12 s, and the static error is lowered by 1%, meanwhile the system has better restraint ability against friction disturbance and parameter robustness.

Keywords: direct current servo system; genetic algorithm; friction compensation

当前, 直流伺服系统已在高精度机床伺服系统和随动跟踪系统中得到了广泛应用^[1-3]. 但是, 在伺

服系统中,摩擦干扰通常具有较强的非线性,这不仅使系统在位置伺服方式时产生死区或极限环,引起稳态误差,而且会使系统在速度伺服时产生爬行、振荡现象^[3].为了提高直流伺服系统的位置控制精度和改善系统的低速性能,必须对摩擦现象进行有效的克服.因为任务不同、模型不同,相应的摩擦补偿方法多种多样^[2-5].文献[3]利用小脑模型(CAMC)神经网络对电动伺服机构进行摩擦补偿,由于神经网络自身存在收敛速度慢、动态性能差的特点,难以达到理想的补偿效果.文献[4]引入鲁棒补偿项对建模前有界的低速摩擦进行补偿,然而为了提高精度而采用的高反馈增益往往会受到硬件设备的限制.

遗传算法(GA)依靠模仿自然界生物进化的搜索机制,在全局解空间中并行搜索最优解,具有收敛速度快、适合在线学习等优点^[6-7],可以用来解决直流伺服系统中的模型参数辨识问题^[7-8].本文从实用角度出发,以消除直流伺服系统摩擦干扰为目标,给出一种新的基于遗传算法的学习控制策略,将摩擦补偿引入直流伺服系统的反馈控制结构中.采用遗传算法对摩擦补偿模型进行在线系统辨识,并根据伺服系统的控制要求为遗传算法选择相应的目标函数,使补偿模型逼近于直流电机的摩擦干扰,从而有效提高伺服系统的稳定性和跟踪精度,同时增强其抗摩擦干扰能力和参数鲁棒性.

1 直流伺服系统摩擦模型

传统的摩擦补偿主要有两种方法:一种是只考虑摩擦的线性部分,即只补偿库仑摩擦力和黏性摩擦力;另一种方法是将摩擦当作外部扰动处理,用扰动观测器估计补偿.前一种方法没有考虑静摩擦力的影响,后一种方法的局限性在于扰动观测器基于线性系统理论.随着控制精度要求的提高,这两种方法都很难达到满意的效果.

伺服电机的输入电流和输出转速有滞环非线性特性,根据电机控制经验和大量模拟试验,可采用考虑静摩擦力、库仑摩擦力和黏性摩擦力的摩擦模型近似描述该特性^[9]

$$M_f(n) = \begin{cases} M_c \operatorname{sgn}[n(t)] + M_v(n), & n \neq 0 \\ \begin{cases} u(t), & |u(t)| < M_s \\ M_s, & |u(t)| \geq M_s \end{cases} & n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为直流电机转速; $u(t)$ 为电机的控制输入; $M_f(n)$ 为瞬时的总摩擦量; M_s 为静摩擦量; M_c 为库仑摩擦量; $M_v = \sigma n$ 为黏性摩擦量,其中 σ 为黏性摩擦系数.

本文采用的摩擦干扰简化模型如图1所示.

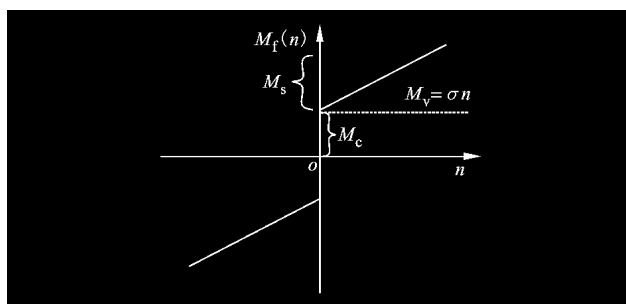


图1 摩擦模型

2 摩擦补偿控制原理

2.1 直流伺服电机数学模型

考虑直流伺服系统的实际情况,忽略直流电机的电枢电感,被控对象的微分方程简化为

$$T_m \frac{dn(t)}{dt} + n(t) = \frac{U_c(t) - U_f(t)}{C_e} \quad (2)$$

式中: T_m 为伺服系统机电时间系数; U_c 为电机的控制电压; U_f 为摩擦对控制电压的扰动量,与式(1)中的 $M_f(n)$ 相对应; C_e 为电机的电动势系数.

直流电机从控制电压到转速的传递函数模型为

$$\frac{n(s)}{U_c(s)} = \frac{1/C_e}{(T_m s + 1)} \quad (3)$$

电机从控制电压到角位移的传递函数模型为

$$\frac{\theta_m(s)}{U_c(s)} = \frac{1/C_e}{(T_m s + 1)s} \quad (4)$$

式中: $\theta_m(s)$ 为电机的机械角位移.

机电时间系数

$$T_m = \frac{R_a J}{R_a C_f + C_m C_e} \quad (5)$$

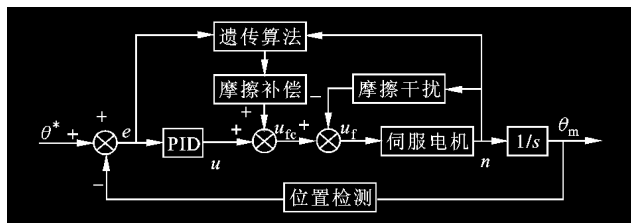
式中: R_a 为电枢电阻; J 为转动惯量; C_m 为直流电机转矩系数; C_f 为黏滞摩擦系数.

2.2 摩擦补偿控制系统

由于在实际的直流伺服系统中,对电机的摩擦环节建立精确的数学模型非常困难^[3-4],因此本文提出了一种基于遗传算法的摩擦补偿模型参数辨识方法,直流伺服系统反馈控制结构如图2所示.

利用遗传算法不依赖于被控对象数学模型、适合在线学习的特点,将转角误差 e 和电机转速 n 作为遗传算法的辨识输入参数,进行对摩擦补偿模型的在线自适应学习.通过辨识得到摩擦补偿的相关参数,进而建立相应的摩擦补偿模型,用于补偿摩擦给伺服系统带来的干扰.

由图2可以看出,系统以位置误差和摩擦干扰



θ^* 为参考位移; e 为伺服电机的转角误差; u 为电机的控制输入;
 u_{ic} 为经过遗传算法辨识得到的摩擦补偿模型; u_f 为摩擦环节
 对控制输入 u 的扰动量; θ_m 为电机的机械角位移

图2 摩擦补偿系统控制结构框图

作为补偿模型的参数辨识依据,实际上是一个利用摩擦补偿量 u_{ic} 来抵消摩擦干扰 u_f 对伺服系统控制量 u 影响的过程。尽管摩擦补偿参数的初值是根据摩擦环节的标称模型^[10]设定的,但是系统的输出却是电机的真实转速及转角的位移。在实际的直流伺服系统中,利用位置检测装置可以将电机转角的变化情况及时反馈到控制器和参数辨识过程中,使摩擦补偿模型不断逼近电机的摩擦干扰,同时实现电机对参考位移的有效跟踪。

3 遗传算法应用

3.1 算法原理

遗传算法将优胜劣汰、适者生存的生物进化原理引入优化参数形成的编码串种群中,按所选择的适应度函数通过复制、交叉及变异操作对各个体进行筛选,使适应度高的个体被保留下来,组成新的种群。新的种群既继承了上一代的信息,又优于上一代。这样周而复始,种群中各个体的适应度不断提高,直至满足一定的条件为止。

该算法演算简单,鲁棒性强,是一种不需要任何初始信息便可以寻求全局最优解的高效精确的优化组合算法。由于算法结构开放,并且易于与问题结合,因此将其应用于摩擦补偿模型的优化设计是切实可行的^[8]。

3.2 参数辨识过程

在控制系统的在线学习方面,遗传算法被众多的使用者证明是一种有效的优化策略^[11-12]。遗传算法应用于摩擦补偿模型的参数辨识方法按以下几步进行。

(1) 编码方案:采用实数编码方式。用2个长度为10位的二进制编码串来分别表示摩擦补偿模型的辨识参数 K_1 、 K_2 ,再把2个子串连接成一个完整的染色体,从而构成种群中的个体。

(2) 参数选择:遗传算法中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择是影响遗传算法行为和性能的关键,直接影响算法的收敛性,参照 Schaffer 的研究结果, P_c 和 P_m 的取值范围分别为 $0.75 \sim 0.95$ 和 $0.005 \sim 0.01$ 。种群规模 n_p 则由计算的复杂程度决定,一般取 $20 \sim 30$ 。

(3) 初始种群形成:先按经验选取一组待辨识参数,然后再以这组参数为中心向左右两边扩展,形成一个范围缩小了的种群搜索空间;初始种群则由计算机赋值,先生成 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数,然后规定产生的随机数在 $0 \sim 0.5$ 之间代表 0,在 $0.5 \sim 1$ 之间代表 1。

(4) 适应度函数设计与改进:为了获得更好的控制效果,可以将控制量、误差和超调量作为约束条件,目标函数 G 确定后,适应度函数取 $F=1/G$,最优参数就是在满足约束的条件下,使 F 值最大的某一个体。

(5) 操作过程:对编码后的初始参数进行选择、交叉、变异等进化操作。根据适应度函数值的大小,采用最优保存与重新生成个体策略,当个体的平均适应度与当前种群最大适应度的比例达到一定范围时,保留最优个体而重新生成其余个体。前者使整个进化过程始终向着最优化的方向前进,后者一定程度上克服了遗传搜索中的早熟现象^[6]。

(6) 终止条件:当遗传搜索收敛时,若大多数个体的适应度收敛于某一值附近时,即认为达到终止条件,此时所得参数为符合控制目标的一组优化解。

遗传算法在该系统中的工作过程实际上是一个在线寻优过程。在线寻优的目的是使遗传算法的目标函数 G 最小,经过参数辨识与优化,产生满足该条件要求的摩擦补偿模型。参数的辨识过程可以由计算机编程实现,程序设计流程如图3所示。

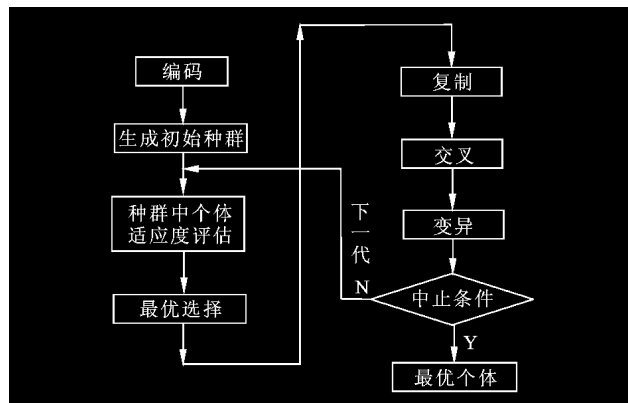
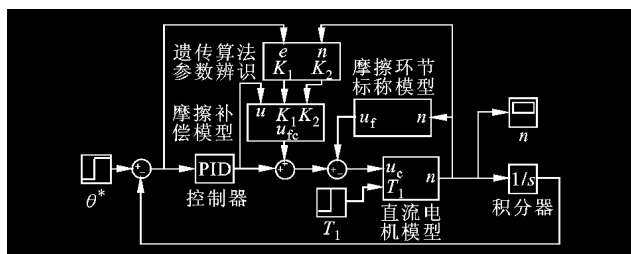


图3 遗传算法在线优化参数的流程图

4 仿真实验

在 MATLAB 环境中建立直流伺服系统的 Simulink 仿真模型,并根据遗传算法编写相关函数,进行摩擦补偿过程的仿真实验.伺服系统摩擦补偿控制的仿真结构如图 4 所示.



K_1 、 K_2 为摩擦补偿模型的辨识参数; T_1 为电机负载转矩

图 4 直流伺服系统摩擦补偿方案仿真结构图

为了获得满意的过渡过程动态特性,采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标函数.为了防止控制能量过大,在目标函数中加入控制器输出量的平方项,采用下式作为参数选取的目标函数

$$G = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t)) dt \quad (6)$$

式中: $e(t)$ 为系统误差; ω_1 和 ω_2 为权值.

为了避免超调,采用惩罚功能.系统一旦产生超调($e(t) < 0$),就将超调量作为目标函数的一项,此时目标函数为

$$G = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t) + \omega_3 |e(t)|) dt, \quad e(t) < 0 \quad (7)$$

式中: ω_3 为权值,且 $\omega_3 \gg \omega_1$.

为满足遗传寻优的要求,经过大量仿真试验,选择 $N=30$ 个初始种群作为样本,交叉概率 $P_c=0.85$,变异概率 $P_m=0.10-[1:1:N] \times (0.01)/N$,设外加在控制器输出上的摩擦补偿模型为

$$u_{fc} = \begin{cases} K_1 \operatorname{sgn}[n(t)] + K_2, & n \neq 0 \\ \begin{cases} u(t), & |u(t)| < M_s \\ M_s, & |u(t)| \geq M_s \end{cases}, & n = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:辨识参数 K_1 、 K_2 的范围取 $0 \sim 2.0$,它们的初值分别取 $K_1=0.3$, $K_2=1.5$,同时 $K_1=0.3$, $K_2=1.5$ 也作为摩擦环节标称模型的系数.权值 $\omega_1=0.999$, $\omega_2=0.001$, $\omega_3=10$;采样周期 $T=0.001$ s;在摩擦环节 u_f 中,静摩擦量 $M_s=0.054$,库仑摩擦量 $M_c=0.05$,黏性摩擦系数 $\sigma=0.001$.

实验电机各项参数设定为:转矩系数 $C_m=0.222$ N·m/A;电动势系数 $C_e=0.023$ N·m/A;

摩擦系数 $C_f=2.2 \times 10^{-4}$;电枢电阻 $R_a=2.32$ Ω;转动惯量 $J=1.1 \times 10^{-6}$ kg·m²;启动负载转矩 $T_1=1$ N·m. PID 控制器各项参数设定为: $K_p=10.99$; $K_i=0$; $K_d=0.020$. 电机参考转速 $n^*=1000$ r/min.

经过 50 次迭代进化,获得的优化参数 $K_1=0.2845$, $K_2=1.5002$. 摩擦补偿模型系统辨识的最终结果为目标函数最优指标 $G_{\text{best}}=1.13663 \times 10^5$. 目标函数 G 的优化过程如图 5 所示. 采用遗传算法进行摩擦补偿后的电机转速曲线和无摩擦补偿情况下的电机转速曲线分别如图 6 和图 7 所示.

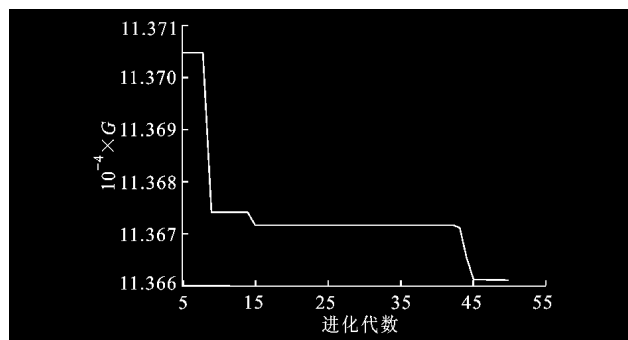


图 5 目标函数优化过程

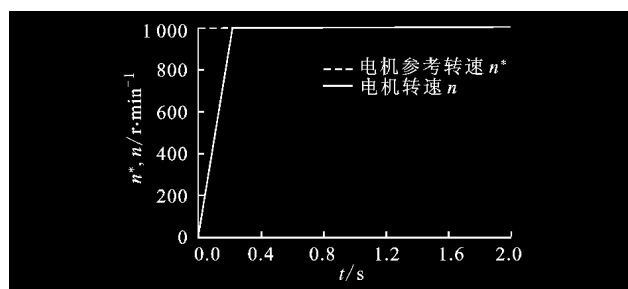


图 6 直流电机转速响应曲线

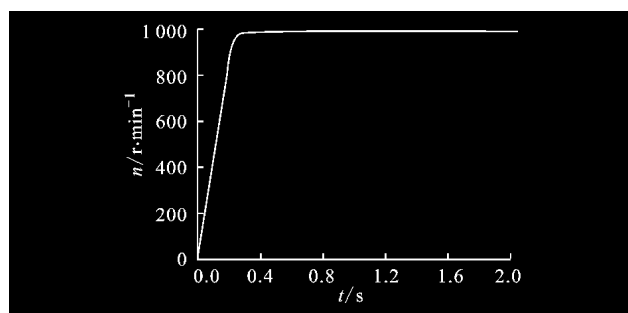


图 7 无摩擦补偿时的电机转速响应曲线

通过对仿真结果分析比较可以看出,在摩擦补偿情况下,电机转速曲线有如下特性:

- (1) 极好的平滑曲线;
- (2) 良好的瞬时响应性能,包括上升时间 $t_r=0.22$ s,超调量 $\sigma_n < 1\%$,调节时间 $t_s=0.24$ s;
- (3) 较好的稳态响应性能,稳态误差为 0.4% ;

(4) 良好的抗摩擦干扰性能;

(5) 较好的鲁棒性,包括一定的相角稳定性裕度 $\gamma=80.5^\circ$ 和参数不敏感性.

(6) 与无摩擦补偿情况相比,调节时间缩短了 0.12 s,稳态误差降低了 1%,伺服电机的随动跟踪性能(即伺服能力)明显提高,满足系统要求.

5 结 论

针对直流伺服系统中的摩擦干扰问题,将遗传算法应用于摩擦补偿参数优化过程.根据直流伺服系统的摩擦特性,利用遗传算法具有的收敛速度快、适合在线学习等优点,对摩擦补偿模型进行系统辨识,使摩擦补偿模型逼近于直流电机的实际摩擦干扰.按照伺服系统的控制要求选择相应的目标函数,经过仿真实验获得了辨识参数的最优值(即最佳控制性能指标)以及摩擦补偿前后的电机转速响应.仿真结果表明,本文基于遗传算法的直流伺服系统摩擦补偿方案与无摩擦补偿情况相比,不仅能够使直流伺服电机得到快速、稳定的转速响应,而且使系统具备较强的抗干扰能力和参数鲁棒性.仿真结果也证实了该方案应用于真实系统的有效性和可行性.

参考文献:

- [1] 吴小役,李长红,韩峰,等.高性能直流伺服系统控制方法研究[J].电气传动,2005,35(12):32-34.
Wu Xiaoyi, Li Changhong, Han Feng, et al. Control method study for high performance DC servo system [J]. Electric Drive, 2005, 35(12): 32-34.
- [2] 王青伟,刘正华,尔联洁.基于分解控制的转台非线性摩擦补偿控制[J].计算机仿真,2006,23(7):275-279.
Wang Qingwei, Liu Zhenghua, Er Lianjie. Nonlinear friction decomposition control of flight motion simulator [J]. Computer Simulation, 2006, 23(7): 275-279.
- [3] 覃媛媛,王志胜.CAMC神经网络在电动伺服机构摩擦补偿中的应用[J].火力与指挥控制,2005,30(2):100-106.
Qin Yuanyuan, Wang Zhisheng. Application of adaptive CMAC neural network to friction compensation [J]. Fire Control & Command Control, 2005, 30(2): 100-106.
- [4] 刘强,尔联洁,刘金琨.参数不确定机械伺服系统鲁棒非线性摩擦补偿控制[J].自动化学报,2003,29(4):628-631.
Liu Qiang, Er Lianjie, Liu Jinkun. Robust nonlinear friction compensation of mechanical servo system with time variable parameters [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(4): 628-631.
- [5] Liu G. Decomposition-based friction compensation of mechanical systems [J]. Mechatronics, 2002, 37(12): 755-769.
- [6] 王小平,曹立明.遗传算法理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [7] 彭沛夫,林亚平,张桂芳.遗传算法对直流伺服线性定常系统的优化研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2004,27(4):47-50.
Peng Peifu, Lin Yaping, Zhang Guifang. The research on optimization of linearly direct current servo fixed system by genetic algorithm [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2004, 27(4): 47-50.
- [8] 刘强,扈宏杰,刘金琨,等.基于遗传算法的伺服系统摩擦参数辨识研究[J].系统工程与电子技术,2003,25(1):77-79.
Liu Qiang, Hu Hongjie, Liu Jinkun, et al. Research on the parameter identification of friction model for servo systems based on genetic algorithms [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(1): 77-79.
- [9] 王毅,何朕,苏宝库.摩擦模型的 Simulink 仿真[J].电机与控制学报,2004,8(1):60-62.
Wang Yi, He Zhen, Su Baoku. Simulation of the friction model on Simulink [J]. Electric Machines and Control, 2004, 8(1): 60-62.
- [10] Devasia S. Should model-based inverse inputs be used as feed-forward under plant uncertainty [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(11): 1865-1869.
- [11] Hwang Shun-Fa, He Rong-Song. A hybrid real-parameter genetic algorithm for function optimization [J]. Advanced Engineering Informatics, 2006, 20(1): 7-21.
- [12] 王永泉,陈花玲,贺学明.基于遗传算法的静电反馈式微传感器多目标优化[J].西安交通大学学报,2006,40(11):1305-1309.
Wang Yongquan, Chen Hualing, He Xueming. Multi-objective optimization for electrostatic-feedback micro-sensor based on genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(11): 1305-1309.

(编辑 刘杨)