

# 双电机同步驱动系统控制参数整定研究

郭丽莎<sup>1</sup>, 关立文<sup>1</sup>, 蔡钊勇<sup>1</sup>, 黄克<sup>2</sup>

(1.清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2.电子科技大学 机械电子工程学院, 四川 成都 611731)

**摘 要:**工业发展的要求使得双(多)电机的运用越来越广泛。双电机同轴驱动的系统是一种典型的多通道多控制器系统, 为了获得优良的控制性能, 有必要对其控制器参数的整定进行研究。采用单弹簧-双惯量块模型对系统进行建模后, 首先采用传统遗传算法, 对多通道多控制器系统的控制器参数进行整定; 然后从系统整体性能的角度出发, 利用带精英策略的非支配排序遗传算法对系统控制器参数进行多目标整定。仿真结果表明: 采用双通道联合整定, 可以获得比采用单通道独立整定更好的控制效果; 采用带精英策略的非支配排序遗传算法对多目标和多通道多控制器系统的控制参数整定, 可以使双电机同步驱动系统获得良好的动态和同步性能。

**关键词:**同步控制; PID 整定; 遗传算法; 多目标; NSGA-II

**中图分类号:**TH16; TP27 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3997(2014)11-0001-04

## Research on Control Parameter Tuning of Dual-Motor Synchronous Driving System

GUO Li-sha<sup>1</sup>, GUAN Li-wen<sup>1</sup>, CAI Zhao-yong<sup>1</sup>, HUANG Ke<sup>2</sup>

(1.Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2.School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology, Sichuan Chengdu 611731, China)

**Abstract:** With the rapid development of industry, dual/multi-motor control has been applied extensively. In order to achieve excellent performance, it is necessary to study the tuning of the multi-channel/controller parameters, which is typically used in dual coaxial drive motor system. It modeled the system with single spring and double inertia blocks. And using traditional genetic algorithm, the control parameters of the multi-channel/controller system were tuned. Then considering the overall performance of system, a method to tune control parameters has been proposed using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) for multi-objective system. Simulations show that the method to tune dual-channel together can accomplish better performance than that of single-channel separately. Besides, it also illustrates that the application of NSGA-II allows dual-motor synchronous drive system the satisfying dynamic and synchronization performance in the case of tuning for the multi-objective and multi-channel/controller system.

**Key Words:** Synchronous Control; PID Tuning; Genetic Algorithm; Multi-Objective; NSGA-II

## 1 引言

在自动化生产领域, 单电机驱动方式在远距离、大负载以及多变量控制等场合中, 已难以满足现代工业的发展要求。为节约成本, 提高运行可靠性及稳定性, 保证精度要求, 实现大功率运行, 尤其在三自由度转台、载人离心机吊篮、龙门机床等设备中, 双(多)电机及其同步控制被广泛应用。但是, 采用双(多)电机驱动方式, 除存在单电机控制上的跟踪、抗干扰等问题外, 还存在同步控制问题。双电机同轴驱动的系统是一个典型的两控制通道耦合系统, 其控制问题尤为突出。

比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制具有原理简单、易于应用等优点, 已被广泛应用于各种工业控制中<sup>[1]</sup>。为保证系统控制性能, 必须对 PID 控制的三个参数(比例系数  $K_p$ 、积分时间常数  $T_i$ 、微分时间常数  $T_d$ )进行整定。常用的 PID

参数整定方法<sup>[2]</sup>包括 Ziegler-Nichols(Z-N)经验公式法、临界灵敏度法和 ISTE 最优设定方法等。但是, 在控制系统复杂或者应用在多通道多控制器系统上时, 这些常用的整定方法会受到一定的限制, 整定效果不佳。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种通过初始化种群、选择、变异、交叉等一系列类似于自然界生物进化的过程, 根据判定准则, 最终得到最优结果的方法。许多学者将 GA 应用到 PID 控制器设计上<sup>[3-5]</sup>。GA 的合理运用, 不仅能降低 PID 控制器的设计难度, 而且还能得到全局最优解。

许多工程应用中, 经常涉及到在多个设计目标下完成相关设计和优化问题, 这就是多目标优化问题(Multi-Objective Optimization Problem, MOP)。MOP 定义为在一组约束条件下, 极小化或极大化多个不同的目标函数。自 Schaffer 将 GA 与 MOP 结合以来,

来稿日期: 2014-05-14

基金项目: 国家重大科技专项课题(2012ZX04008041)

作者简介: 郭丽莎, (1989-), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要研究方向: 先进制造装备及控制;

关立文, (1972-), 男, 黑龙江人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 先进制造装备及控制

研究者针对 MOP 提出了很多经典的多目标遗传算法<sup>[9]</sup>。目前,解决 MOP 的方法分为非 Pareto 支配法和 Pareto 支配法两类。非 Pareto 支配法原理简单、搜寻快速、易于实现,如加权求和法、等式约束法、向量评估遗传算法(Vector Evaluated Genetic Algorithm, VEGA)和最小最大法等;而 Pareto 支配法能够得到一最优解集,如 MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)、SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2)、NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)等。其中,NSGA-II 应用成熟,不仅采取了多种算法改进措施,而且避免主观设定算法参数,具备出色的寻优能力。

以双电机同轴驱动控制系统这一两控制通道耦合的复杂系统为研究对象,运用 GA、VEGA 和 NSGA-II 分别对双电机同步驱动系统的控制参数进行整定。首先,采用单弹簧-双惯量块模型建立系统的数学模型;然后,采用 VEGA 对双通道多控制器参数进行整定,并以动态性能评价指标为依据,与单通道控制器的 GA 参数整定结果进行对比分析;最后,采用 NSGA-II 在不考虑和考虑系统同步性能的情况下,分别对系统进行多目标参数整定,并对整定结果进行比较分析。

## 2 双电机同步驱动系统的数学建模

以载人离心机吊篮中框为控制对象,其结构,如图 1 所示。载人离心机吊篮中框的控制特点表现为大负载、大跨距。为此,在建立系统模型时,需要考虑比刚体模型更符合实际情况的柔性模型。由于单弹簧-双惯量块模型<sup>[10]</sup>比单惯量块模型包含更多的负载信息,从而建立系统数学模型,如图 2 所示。

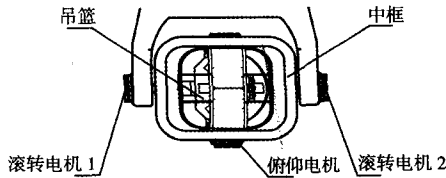


图 1 载人离心机吊篮结构示意图

Fig.1 Structure of Human Centrifuge Basket

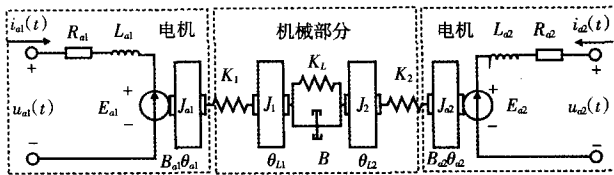


图 2 系统模型框图

Fig.2 Block Diagram of System

电机、传动轴和负载等是系统的主要控制对象。电机定子电压方程、电磁感应关系方程、电磁转矩方程、电机和负载力矩平衡方程和负载动力学平衡方程分别如式(1)~式(5)所示。

$$u_{ai}(t) = R_{ai} i_{ai}(t) + L_{ai} \frac{di_{ai}(t)}{dt} + E_{ai}(t) \quad (1)$$

$$E_{ai}(t) = k_e \dot{\theta}_{ai}(t) \quad (2)$$

$$T_{ai}(t) = K_t i_{ai}(t) \quad (3)$$

$$T_{ai}(t) - K_l(\theta_{ai} - \theta_{li}) - B_{ai} \dot{\theta}_{ai} = J_{ai} \ddot{\theta}_{ai} \quad (4)$$

$$K_l(\theta_{a1} - \theta_{l1}) - K_L(\theta_{l1} - \theta_{l2}) - B(\dot{\theta}_{l1} - \dot{\theta}_{l2}) = J_1 \ddot{\theta}_{l1} \quad (5)$$

$$K_2(\theta_{a2} - \theta_{l2}) + K_L(\theta_{l1} - \theta_{l2}) + B(\dot{\theta}_{l1} - \dot{\theta}_{l2}) = J_2 \ddot{\theta}_{l2}$$

式中:  $i=1, 2$ ;  $u_{ai}(t)$ —电枢输入电压;  $i_{ai}(t)$ —电枢电流;  $E_{ai}(t)$ —电枢反电势;  $\theta_{ai}(t)$ —电机侧输出角位移;  $\theta_{li}(t)$ —负载侧角位移;  $T_{ai}(t)$ —电机输出转矩;  $B_{ai}$ —电机等效粘性摩擦系数;  $B$ —负载等效粘性摩擦系数。

根据 Mesarovic 理论<sup>[9]</sup>,系统 V 规范形式模型,如图 3 所示。此系统为一双通道耦合系统。其中,  $G_{ij}$  为主通道( $i=j=1, 2$ )或者耦合通道( $i \neq j=1, 2$ )的传递函数。电流环在本系统中对用户不开放,位置环和速度环参数为待整定参数。控制器均采用 PI 控制方法。整个控制系统的模型,如图 4 所示。此系统为一双通道多控制器控制系统,其中,  $\theta^*(t)$  为指令信号,相关控制参数,如表 1 所示。

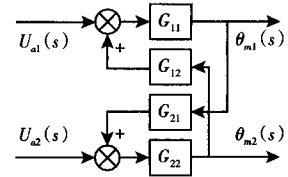


图 3 系统 V 规范形式等效简图

Fig.3 V-Norm Block Diagram of System

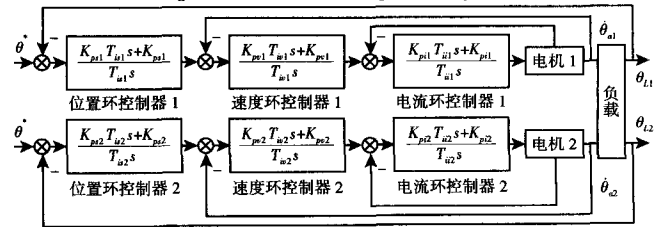


图 4 系统控制模型

Fig.4 Control Model of System

表 1 系统相关控制参数

Tab.1 Control Parameters of System

变量	含义	电机 1	电机 2	单位
$K_{p1}$	位置环比例系数	待定	待定	$s^{-1}$
$T_{i1}$	位置环积分时间常数	待定	待定	s
$K_{p2}$	速度环比例系数	待定	待定	$N \cdot m \cdot min$
$T_{i2}$	速度环积分时间常数	待定	待定	s
$K_{i1}$	电流环比例系数	29.71	30.57	$V \cdot A^{-1}$
$T_{i1}$	电流环积分时间常数	0.0011	0.0011	s
$R_a$	电机绕组电阻	6.27	6.20	Ohm
$L_a$	电机绕组电感	0.0066	0.0068	H
$k_e$	电机反电势常数	1.432	1.432	$V \cdot s \cdot rad^{-1}$
$k_t$	电机力矩常数	1.65	1.65	$N \cdot m \cdot A^{-1}$
$J_a$	电机转动惯量	$7.2 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$kg \cdot m^2$
$J$	负载转动惯量	0.0954		$kg \cdot m^2$
$K_l$	传动轴刚度	11628		$N \cdot m \cdot rad^{-1}$
$K_L$	负载刚度	59371		$N \cdot m \cdot rad^{-1}$

## 3 基于遗传算法的 PID 参数整定

在实际应用中,由于机械联接以及软硬件的限制,无法对两通道的控制器参数同时整定。采用 GA 离线整定的方法,可以克服传统方法不能同时整定多通道多控制器参数的缺点,保证在保留原有机械结构的基础上,对两通道上的所有控制器参数同时进行整定。

双电机同步驱动系统控制器参数的整定,必须考虑系统的同步性能。文献<sup>[9-10]</sup>指出获得良好同步控制精度的同时,必须保证

电机获得较好的跟踪性能。可见,双电机同步驱动系统的控制参数整定是一个MOP。VEGA 是解决 MOP 一种常用的方法。实际上,VEGA 借助了遗传算法的平行性,是一种加权形式的多目标优化方法。基于 Pareto 最优解的多目标遗传算法,能给出解决存在矛盾的多个目标函数的一组可供选择的最优解集,使得决策者在开始时不必根据经验来选取目标函数的权重,而可以在优化后在一组不相互支配的最优解中寻找偏爱解<sup>[9]</sup>。GA 目标函数的选取关系到控制系统参数整定的效果,以系统阶跃响应为基础来确定目标函数的方法应用较广。式(6)定义了以单电机动态性能为基础的目标函数;式(7)定义了以两电机同步性能为基础的目标函数。

$$J_i=w_{1i} \int_0^T e_i^2(t)dt+w_{2i}t_{pi}+w_{3i}\sigma_{pi}, i=1,2 \tag{6}$$

$$J=\int_0^T |e(t)|dt \tag{7}$$

式中: $w_{ji}(i=1,2,j=1,2,3)$ —加权值,根据经验以及控制目标来选取; $e_i(t)$ 、 $e(t)$ — $t$ 时刻单电机跟踪误差和系统不同步误差; $t_{pi}$ 、 $\sigma_{pi}$ —单电机阶跃响应的上升时间和超调量。

采用调整时间、不同步最大相对误差和时间与误差绝对值积分指标(Integral Time Absolute Time,ITAE)对系统控制参数整定后的结果进行评价。ITAE 指标的表达式如式(8)。

$$J_{ITAE,i}=\int_0^T t|e_i(t)|dt, i=1,2 \tag{8}$$

4 PID 多目标参数整定结果

4.1 基于传统 GA 的参数整定结果

初始化参数后,首先采用 GA 以式(6)为目标函数对控制器参数进行单通道独立整定,并将整定后的参数带入整个系统进行单位阶跃响应仿真(减速比为 10,下同),结果如图 5 所示。然后采用 VEGA 以式(6)为目标函数对控制器参数进行两目标双通道联合整定,其单位阶跃响应结果,如图 6 所示。

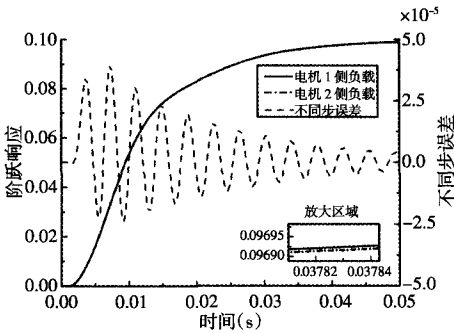


图 5 单通道整定参数后的阶跃响应曲线

Fig.5 Step Response of Tuning with Single-Channel Separately

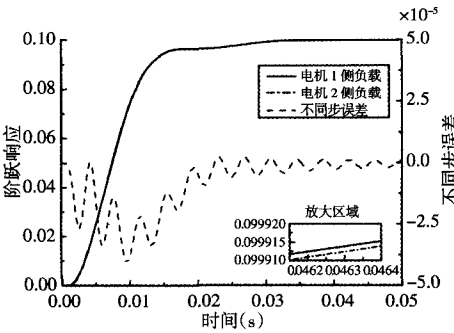


图 6 双通道整定参数后的阶跃响应曲线

Fig.6 Step Response of Tuning with Dual-Channel Together

从仿真结果看出:单通道独立整定控制参数的方法虽然使各电机独自运行获得了良好的动态性能,但是联合运行时,各电机的动态性能较差;两目标双通道整定的方法可以使系统获得较好的动态和同步性能。相比单通道整定结果,双通道整定后,系统不同步误差的微量增大(3.632%)换来了各电机阶跃响应调整时间的大幅缩小和 ITAE 的明显下降(52.44~60.51)%,如表 2 所示。

表 2 传统 GA 参数整定后的控制结果  
Tab.2 Results of Tuning with Traditional GA

性能评价指标	单通道整定(电机 1/2)	双通道整定(电机 1/2)
调整时间	0.03270s/0.03270s	0.01555s/0.01555s
ITAE	0.2447/0.2448	0.09676/0.09666
不同步最大误差	3.937×10 <sup>-2</sup> %	4.08×10 <sup>-2</sup> %

与此同时,在仿真过程中发现:

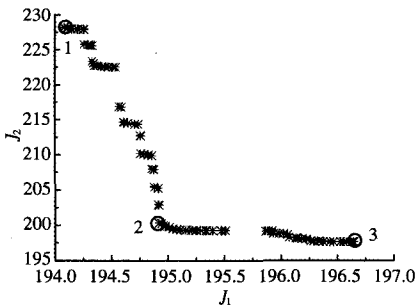
(1)两目标双通道控制参数整定过程的收敛性较差,不易得到最优解;

(2)单通道整定结果的不同步误差小于双通道,但双通道整定结果的单电机动态性能优于单通道。

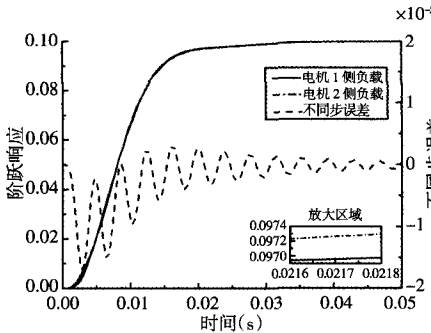
因此,有必要对电机动态性能和同步性能的关系以及多目标控制器的参数整定做进一步研究。

4.2 基于 NSGA-II 的参数整定结果

初始化参数后,首先采用 NSGA-II 以式(6)为目标函数对控制器参数进行两目标联合整定,结果如图 7 所示。然后采用 NSGA-II 以式(6)~式(7)为目标函数对控制器参数进行三目标联合整定,结果如图 8 所示。



(a)种群分布

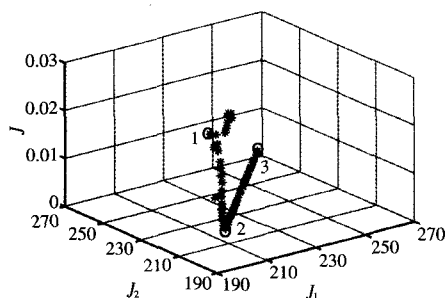


(b)阶跃响应曲线

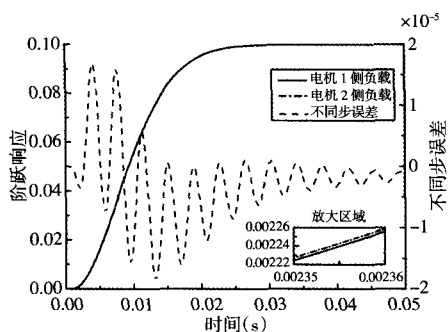
图 7 NSGA-II 两目标整定参数后的结果

Fig.7 Results of Tuning with NSGA-II for Two-Objective Optimization

从图 7(a)看出,实现两电机动态性能最优的过程存在一定的矛盾:当电机 1 的动态性能优时,电机 2 较差;当电机 2 的动态性能优时,电机 1 较差。同时,只考虑电机动态性能的参数整定方法,不能兼顾系统的同步性能。根据图 7(a)选择符合需要的偏爱解:电机 1 的动态性能变化范围偏小,电机 2 偏大;相比点 1 到点 2,在点 2 到点 3 之间,电机 2 的动态性能没有明显变化,则选点 2 作为偏爱解。相应的单位阶跃响应,如图 7(b)所示,阶跃响应性能指标,如表 3 所示。尽管各电机的动态性能和同步性能相比于上一节的优化结果没有提高,但是基于 NSGA-II 的参数整定过程,稳定性好、收敛效果令人满意。



(a)种群分布



(b)阶跃响应曲线

图 8 NSGA-II 三目标整定参数后的结果  
Fig.8 Results of Tuning with NSGA-II for  
Three-Objective Optimization

表 3 NSGA-II 多目标参数整定后的控制结果  
Tab.3 Results of Tuning with NSGA-II  
for Multi-Objective Optimization

性能评价指标	两目标整定(电机 1/2)	三目标整定(电机 1/2)
调整时间	0.0178s/0.0175s	0.0198s/0.0198s
ITAE	0.1093/0.1079	0.1302/0.1301
不同步最大误差	1.687%	$1.850 \times 10^{-2}\%$

从图 8(a)看出,实现电机 1 和电机 2 动态性能最优过程的矛盾体现在两电机同步性能的实现上:动态性能越好,同步性能越差,且其变化越剧烈。这也进一步说明,电机的动态性能与同步性能相互矛盾,不能同时达到最优。根据图 8(a)选择符合需要的偏爱解:相比点 1 到点 2,在点 2 到点 3 之间,两电机的同步性能没有明显变化,随着两电机动态性能的提升,同步性能有所下降。考虑到系统的整体性能,选点 2 作为偏爱解。相应的单位阶跃响应,如图 8(b)所示,阶跃响应性能指标,如表 3 所示。与不考虑同

步性能相比,考虑同步性能指标的多目标遗传算法,在电机动态性能有小幅下降(11.24~20.57)%的情况下,获得了同步性能显著提高(98.90%)的良好效果。

## 5 结论

在理论建模和控制仿真的基础上,利用 GA 和 VEGA 对两通道多控制器系统进行参数整定,仿真结果表明:与单通道整定相比,多通道控制参数联合整定的方法可以获得良好的整体性能。针对两电机动态性能以及动态性能与同步性能间的矛盾性,利用 NSGA-II 整定控制器参数,仿真分析证明,此方法在一定程度上改善了系统控制效果,为双电机同步驱动系统控制参数整定提供了一定的理论基础。

## 参考文献

- [1] Sturm K J, Hgglund T. The future of PID control[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(11): 1163-1175.
- [2] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. (Tao Yong-hua. New-Type PID Control and Application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998.)
- [3] Michalewicz Z, Janikow C Z, Krawczyk J B. A modified genetic algorithm for optimal control problems[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1992, 23(12): 83-94.
- [4] Lin C L, Jan H Y, Shieh N C. GA-based multiobjective PID control for a linear brushless DC motor[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2003, 8(1): 56-65.
- [5] 邓华昌, 方康玲, 梁开. 一种混合遗传算法在 PID 参数优化中的应用[J]. 机械设计与制造, 2009(7): 89-91. (Deng Hua-chang, Fang Kang-ling, Liang Kai. The application of mixture genetic algorithm in the PID parameter optimization[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(7): 89-91.)
- [6] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (Lei De-ming, Yan Xin-ping. Multivariable Intelligent Optimal Algorithms and Application[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [7] 陶建峰, 王旭勇, 刘成良. 负载变形敏感双马达同步驱动系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1574-1578. (Tao Jian-feng, Wang Xu-yong, Liu Cheng-liang. Modeling and simulation of load deformation sensitive dual hydraulic motor synchronizing driving system[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1574-1578.)
- [8] 刘晨晖. 多变量过程控制系统解耦理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (Liu Chen-hui. Decoupling Theory of Multivariable Process Control System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1984.)
- [9] Payette K. The virtual shaft control algorithm for synchronized motion control[C]. Proceedings of the 1998 American Control Conference, 1998 (5): 3008-3012.
- [10] Hsieh M F, Yao W S, Chiang C R. Modeling and synchronous control of a single-axis stage driven by dual mechanically-coupled parallel ball screws[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(9-10): 933-943.