

## 光电跟踪伺服系统的自适应差分进化算法辨识

程 龙<sup>1,2</sup>, 陈 娟<sup>1,3</sup>, 陈茂胜<sup>2</sup>, 徐 婧<sup>2</sup>, 王卫兵<sup>3</sup>, 王挺峰<sup>3</sup>, 郭 劲<sup>3</sup>

(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130033;

2. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 为了获得准确的光电跟踪伺服系统的模型, 采用自适应差分进化算法对光电跟踪伺服系统进行辨识研究, 该算法根据辨识误差平方和自动调整变异、交叉因子。在输入为正弦离散数字信号下辨识系统的离散模型。为了验证算法的有效性, 在频域内与扫频法辨识的一、二阶模型和系统实际输出比较研究。实验结果表明: 在相同正弦离散信号条件下, 辨识输出与系统实际输出基本一致, 与扫频法的 RMSE 相比减小了 20.33%, 二阶模型在高频段偏离系统实际输出稍大些, 一阶系统输出与系统实际输出基本一致。研究表明, 自适应差分进化算法计算量小, 方法简便, 辨识准确, 在光电跟踪伺服控制领域具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 光电跟踪; 伺服系统; 自适应差分进化; 辨识误差 扫频法

**中图分类号:** TP13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0731002

## Adaptive differential evolution algorithm identification of photoelectric tracking servo system

Cheng Long<sup>1,2</sup>, Chen Juan<sup>1,3</sup>, Chen Maosheng<sup>2</sup>, Xu Jing<sup>2</sup>, Wang Weibing<sup>3</sup>, Wang Tingfeng<sup>3</sup>, Guo Jin<sup>3</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130033, China;

2. Changguang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130033, China;

3. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to obtain an accurate model of the photoelectric tracking servo system, the identification using adaptive differential evolution algorithm based on the identification error sum was adopted. The mutation and crossover factor of the algorithm was automatically adjusted. The discrete model of system was identified under the situation of discretely sine digital signal input. Furthermore, the output of the first-order and second-order model using the sweeping frequency method in the frequency domain was compared with the output of the reality to prove the validity of the algorithm. Experimental result shows that under the same discretely sine signal input, the result of the identification is same with the real-life result and reduced about 20.33% in the RMSE compared with the sweeping frequency method. The second-order model has a bigger deviation in the high frequency domain and the first-order

收稿日期: 2015-11-17; 修订日期: 2015-12-19

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM0902-01)

作者简介: 程龙(1989-), 男, 硕士, 主要从事电子学设计、伺服控制技术方面的研究。Email: longcheng201304011@163.com

通讯作者: 陈娟(1961-), 女, 教授, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电跟踪等方面的研究。Email: chenjuan@mail.ccut.edu.cn

model has the same output with the real-life output. The adaptive differential evolution algorithm has a smaller amount of calculation and an accurate identification, besides, this method is simple enough. In summary, this method has a certain value in the engineering application.

**Key words:** photoelectric tracking; servo system; adaptive differential evolution; identification error; sweeping frequency method

## 0 引言

光电跟踪设备是一种精密测量仪器,广泛应用于陆基、海基、空基中对运动目标的实时观测。随着科学技术的发展,对光电跟踪设备伺服控制系统的控制精度要求不断提高。分析被控对象的数学模型,辨识传递函数是设计伺服控制器、仿真、实验的基础。因此,采取简便、有效的辨识方法对光电跟踪伺服系统开环模型的辨识研究有重要意义。

目前,系统辨识常用的传统辨识方法有扫频法<sup>[1-2]</sup>、阶跃响应法<sup>[3]</sup>、脉冲响应法<sup>[4]</sup>等,而随着智能理论的深入研究,出现了遗传算法<sup>[5]</sup>、粒子群法<sup>[6]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[7]</sup>、神经网络法<sup>[8]</sup>、差分进化算法<sup>[9]</sup>等现代智能辨识方法。其中差分进化算法参数少,实现简单,具有自组织、收敛速度快、实现简单等特点。但常规的差分进化算法存在早熟停滞现象,容易使算法收敛停止,为此,参考文献[10]提出自适应差分进化算法(Adaptive Differential Evolution Algorithm, ADE),根据种群适应度自动改变交叉、变异因子。目前,自适应差分进化算法已用于电力系统经济负荷分配<sup>[11]</sup>等方面,均表现出该算法的搜索能力强、收敛速度快等优点。

文中尝试采用自适应差分进化算法对基于直流力矩电机为动力输出的光电跟踪伺服开环系统进行辨识,将输出的辨识误差平方和作为自适应度函数自动调整交叉因子和变异因子,最终进行大量实验研究获得系统的一阶、二阶模型并与扫频法对光电跟踪伺服系统辨识结果进行对比,获得了较好的效果。

## 1 光电跟踪伺服系统建模

可以得到系统的传递函数如公式(1):

$$G(s) = \frac{n(s)}{U(s)} = \frac{K}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (1)$$

式中: $n(s)$ 、 $U(s)$ 分别为系统输出、输入; $K$ 为系统固有放大倍数; $T_m$ 为电机机械时间常数; $T_e$ 为电机电

气时间常数。利用双线性变换  $s = \frac{2}{T_s} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ( $T_s$  为采样时间)将公式(1)离散化得到:

$$G(z) = \frac{n(z)}{U(z)} = \frac{a_0 z^2 + a_1 z + a_2}{z^2 + b_1 z + b_2} \quad (2)$$

根据实际需要将公式(2)变换为差分方程:

$$n(k) = \sum_{i=1}^t a_i w(k-i) + \sum_{i=0}^t b_i U(k-i) \quad (3)$$

式中: $n(k)$ 、 $U(k)$ 分别为系统的输出和输入; $t=2$ 为系统模型的阶次。其中: $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 为待辨识参数,下面采用自适应差分进化算法对其进行辨识。

## 2 自适应差分进化算法辨识原理

差分进化是一种类似于遗传算法但性能更优越的算法,它采用实数编码,在变异步骤上采用差分策略,算法的优化速度和全局优化能力有较大提高。但差分进化算法的进化参数为固定值,不能随着优化过程的发展而自适应调整<sup>[11-12]</sup>。为提高算法的快速性和避免早熟现象,文中提出一种变异、交叉因子随着自适应函数值(辨识误差平方和)自动调整的自适应差分进化算法。该算法主要包括以下 4 个步骤。

### (1) 生成初始种群

$x = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ b_1 \ b_2]$  在  $n=5$  维空间里随机产生满足约束条件的  $M$  个个体,实施措施如下,其中  $x_{ij}^U$  和  $x_{ij}^L$  为第  $j$  个染色体的上界和下界,  $rand_{ij}(0,1)$  为  $[0,1]$  之间的随机小数。

$$x_{ij}(0) = rand_{ij}(0,1)(x_{ij}^U - x_{ij}^L) + x_{ij}^L \quad (4)$$

### (2) 自适应变异操作

变异操作如下,其中  $p_1, p_2$  为随机整数,表示个体在种群中的序号,  $x_{p1j}(t)$  的辨识误差平方和小于  $x_{p2j}(t)$ ,  $x_{br}(t)$  为当前代中种群中最优的个体。

$$h_{ij}(t+1) = x_{br}(t) + F(x_{p1j}(t) - x_{p2j}(t)) \quad (5)$$

从公式(5)中可知  $\Delta = x_{p1j}(t) - x_{p2j}(t)$  相当于差分扰动项,对  $x_{br}(t)$  个体进行改进,让种群中产生更多的优

良个体,增加全局最优解的搜索能力。如果较小,代表  $x_{pij}(t)$  和  $x_{p2j}(t)$  在全局搜索空间中距离较近,这时  $F$  取值应该大一些,增加  $\Delta$  对  $x_{bi}(t)$  的改进。相反,如果  $\Delta$  较大,采用相反机理  $F$  应小一些。 $F$  应该根据种群中  $x_{pij}(t)$  和  $x_{p2j}(t)$  相对位置(相对位置由辨识误差平方和确定)来自适应改变,动态改变全局的搜索能力。公式(6)为文中提出的  $F$  的自适应策略:

$$F_i = F_l + (F_u - F_l) \frac{f_{pij} - f_{bi}}{f_{p2j} - f_{bi}} \quad (6)$$

式中:  $f_{bi}$ ,  $f_{pij}$  和  $f_{p2j}$  为  $x_{bi}(t)$ ,  $x_{pij}(t)$  和  $x_{p2j}(t)$  辨识误差平方和;  $F_l$  为  $F_i$  的下限;  $F_u$  为  $F_i$  的上限。

(3) 自适应交叉操作

交叉操作是为了增加群体的多样性,操作如下,其中  $randl_{ij}$  为  $[0, 1]$  之间的随机小数。

$$v_{ij}(t+1) = \begin{cases} h_{ij}(t+1), & randl_{ij} \leq CR \\ x_{ij}(t), & randl_{ij} > CR \end{cases} \quad (7)$$

从公式(7)中可知交叉因子  $CR$  越大,对种群的改变越大,对自适应度好的个体破坏也大;相反,如果  $CR$  越小不易产生新的个体,搜索过程也较慢,甚至停滞不前。针对该情况,文中提出根据自适应度(辨识误差平方和)自动调整  $CR$  的大小,  $CR$  自适应控制策略如公式(8):

$$CR_i = \begin{cases} CR_l + (CR_u - CR_l) \frac{f_i - \hat{f}}{f_{max} - \hat{f}} & f_i > \hat{f} \\ CR_l, & f_i \leq \hat{f} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $f_i$  为第  $i$  个个体的自适应度值;  $f_{max}$  为当前种群中最大的自适应度值;  $\hat{f}$  为当前种群中最优的个体自适应度值;  $CR_l$  和  $CR_u$  分别为  $CR$  的下限和上限。

(4) 选择操作

为了确定  $x_i(t)$  是否成为下一代的成员,实验向量  $v_i(t+1)$  和目标向量  $x_i(t)$  对评价函数进行比较:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t+1), & f(v_{i1}(t+1), \dots, v_{im}(t+1)) < \\ & f(x_{i1}(t), \dots, x_{im}(t)) \\ x_{ij}(t), & f(v_{i1}(t+1), \dots, v_{im}(t+1)) \geq \\ & f(x_{i1}(t), \dots, x_{im}(t)) \end{cases} \quad (9)$$

通常自适应差分进化算法达到辨识精度或迭代次数自动停止,输出最优结果。而文中为了提高辨识精度,采用达到最大迭代次数为停止条件。通过以上步骤即辨识出参数  $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2$ 。

### 3 实验方案及结果分析

#### 3.1 实验方案

图 1 为某型号的光电跟踪系统实验平台,其中机械平台和直流力矩电机直接耦合,伺服系统控制器为 PC104,编码器为 800Hz 24 位绝对式编码器。该次实验输入的电压信号为  $4000 \sin(\omega t/f_s)$ ,  $\omega=20 \text{ rad/s}$ ,  $f_s=800 \text{ Hz}$ 。

系统输出速度为编码器输出角度码值差分处理后得到的码值。将电压、速度离散信号遍历公式(3),得到  $n(k)$  与系统真实输出相减为辨识误差,辨识误差平方和为 ADE 算法的自适应度函数值,通过大量的实验验证最终选取 ADE 算法样本个数  $M=50$ ,最大迭代次数  $G=100$ ,交叉因子  $F \in [0.1, 0.9]$ ,变异因子  $CR \in [0, 1]$  时,数据收敛速度快,辨识精度高。算法流程图如图 2 所示。

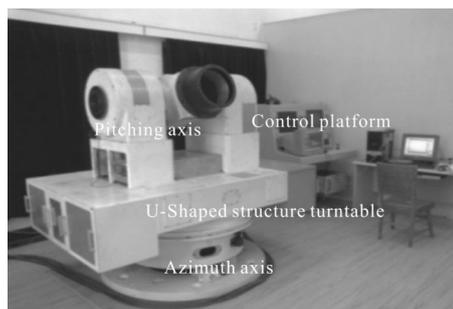


图 1 光电跟踪系统实验平台

Fig.1 Experimental platform of photoelectric tracking system

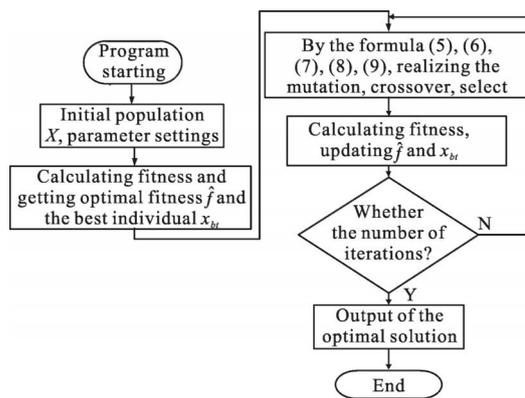


图 2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flowchart

#### 3.2 实验结果及分析

进行大量实验,最终模型参数  $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2$  辨识结果如图 3 所示。

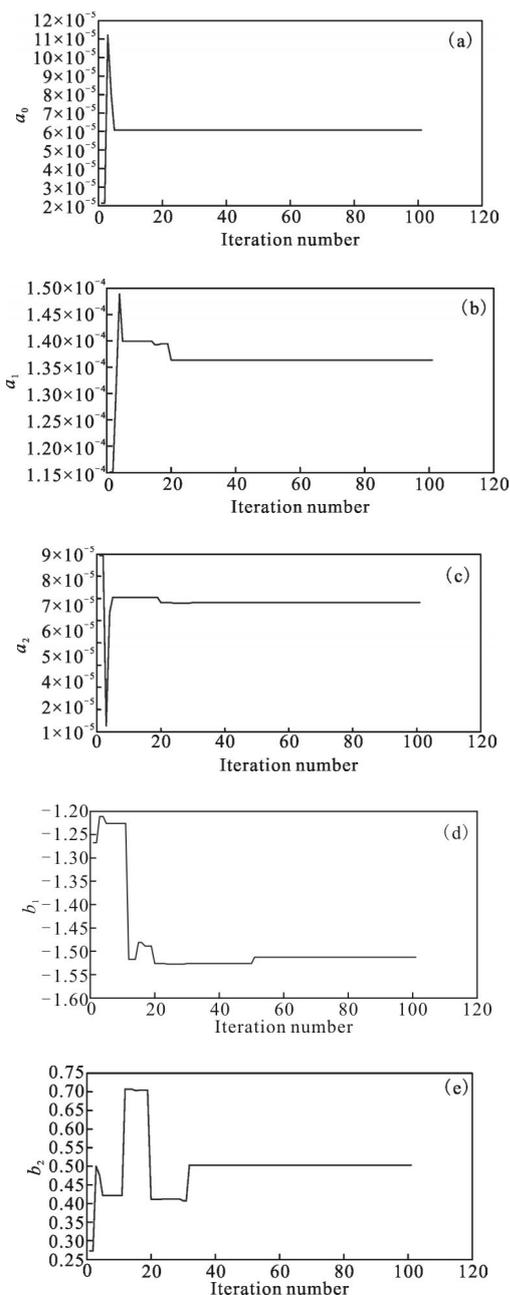


图 3 ADE 算法辨识结果

Fig.3 Identification results of ADE algorithm

由图 3 参数的收敛结果可得出自适应差分优化算法辨识的离散系统模型为公式(10),将公式(10)转换为公式(11)的形式。

$$G(z) = \frac{(0.000\ 068\ 19z^2 + 0.000\ 136\ 38z + 0.000\ 068\ 19)}{(z^2 - 1.502\ 7z + 0.503\ 4)} \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{1.175}{(0.868\ 8s + 1)(0.001\ 936s + 1)} \quad (11)$$

将相同的正弦数字信号输入公式(10)得到的结

果与系统实际输出(速度对应的码值)的对比结果如图 4 所示。

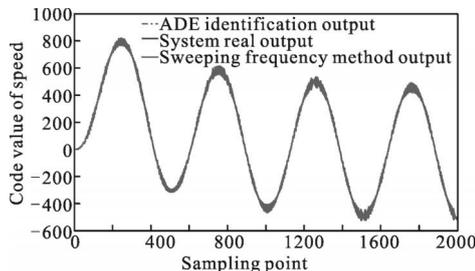


图 4 ADE 算法、扫频法辨识输出与系统实际输出对比图

Fig.4 Identification output of ADE algorithm and sweeping frequency method comparing with system real output

为了进一步说明算法的有效性,文中采用扫频法对系统进行辨识,输入  $w$  从 0.1~450 rad/s,得到系统的幅频特性如图 5 所示。在  $w=190$  rad/s 时,系统出现了谐振,谐振环节文中不重点研究,因此采用最小二乘法对从 0.1~180 rad/s 的数据进行拟合,得到的传递函数  $G'(s)$ 为公式(12),将公式(12)进行双线性变转为公式(13),将相同的正弦数字信号输入公式(13)中,得到的输出结果与系统实际输出对比如图 4 所示,两种算法的辨识误差对比如图 6 所示,两种算法码值辨识误差的 RMSE 分别为 0.976 6 和 1.210 2,计算出 ADE 算法 RMSE 值比扫频法的减小了 20.33%。

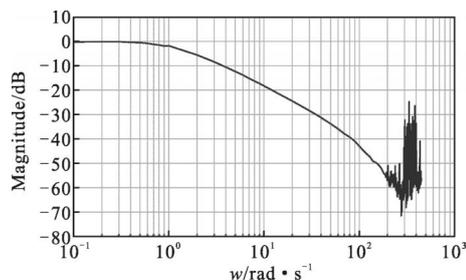


图 5 测量开环幅频特性

Fig.5 Measuring the open loop amplitude-frequency characteristic

从图 4 可知,两种算法的输出与系统真实输出基本一致,对比图 6 及 RMSE 可知,在相同正弦数字信号下 ADE 算法的辨识精度比扫频法的高。

$$G'(s) = \frac{1.001}{(0.786s + 1)(0.015\ 91s + 1)} \quad (12)$$

$$G'(z) = \frac{(0.000\ 030\ 06z^2 + 0.000\ 060\ 12z + 0.000\ 030\ 06)}{z^2 - 1.923z + 0.922\ 9} \quad (13)$$

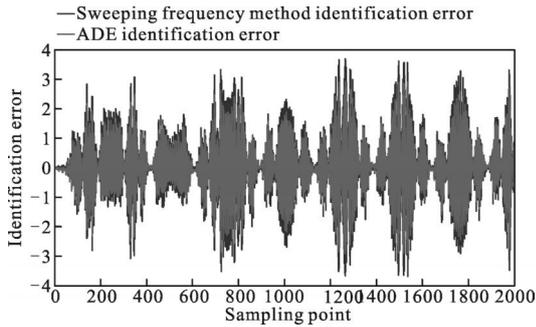


图 6 辨识误差对比图

Fig.6 Comparison chart of identification error

根据对数幅频特性定义分别求出公式(13)与公式(11)在  $\omega$  从 0.1~180 rad/s 内的对数幅值比, 与系统实际输出幅值比对比如图 7 所示, 辨识误差如图 8 所示, 两种算法的 RMSE 如表 1 所示。

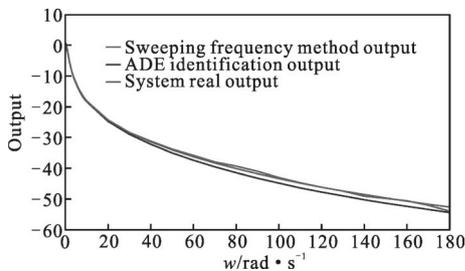


图 7 二阶辨识模型对数幅值比对比图

Fig.7 Comparison of logarithmic amplitude ratio of the second-order identification model

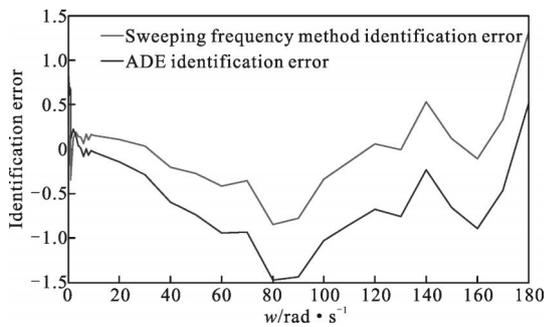


图 8 二阶辨识模型对数幅值比辨识误差对比图

Fig.8 Comparison of logarithmic amplitude ratio identification error of the second-order identification model

**表 1 ADE 算法与扫频法辨识误差 RMSE 值对比**  
**Tab.1 Comparison of RMSE value of ADE algorithm and sweeping frequency method**

Identification method	ADE	Sweeping frequency method
RMSE value of second-order	0.703 7	0.369 1
RMSE value of first-order	0.415 3	0.400 6

从图 7 可知在低频段内两种算法的输出与系统真实输出基本一致, 在高频度内 ADE 偏离系统真实输出稍大些, 但整体趋势与系统真实输出一致。从图 8 可知在低频段内两者辨识误差接近, 高频段内相差较大。从表 1 RMSE 对比结果可得出, 扫频法在整个频域内辨识效果较好。

综上分析, 造成这种原因主要是因为扫频法的辨识结果是对整个频域内的数据进行拟合统计得出, 而 ADE 是根据  $\omega=20$  rad/s 的正弦信号进行辨识研究, 因此在整个频域内, 辨识误差稍大一些。另外, 由于噪声干扰等原因导致 ADE 算法辨识的模型 (公式(11))中的  $1/0.001\ 936$  rad/s (约为 500 rad/s) 远大于公式(12)中的  $1/0.015\ 91$  (约为 60 rad/s), 导致  $60$  rad/s <  $\omega < 500$  rad/s, 使公式(11)中的高频项几乎不起作用。

为了避免噪声对 ADE 算法高频项的影响, 文中分别用 ADE 算法和扫频法辨识系统一阶模型, 辨识结果为公式(14)、(15), 两种算法辨识一阶模型的对数幅值比对比图、辨识误差对比图、RMSE 分别如图 9、图 10 和表 1 所示。

从图 9 的对比结果可以看出, 两种算法的辨识输出与系统真实输出基本一致, 从图 10 的对比结果可以看出, 扫频法的辨识精度优于 ADE 算

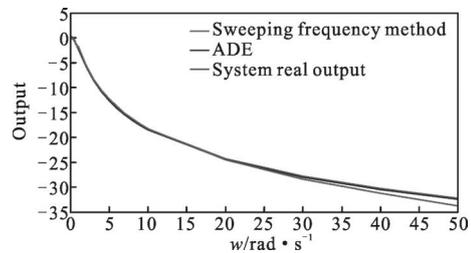


图 9 一阶辨识模型对数幅值比对比图

Fig.9 Comparison of logarithmic amplitude ratio of the first-order identification model

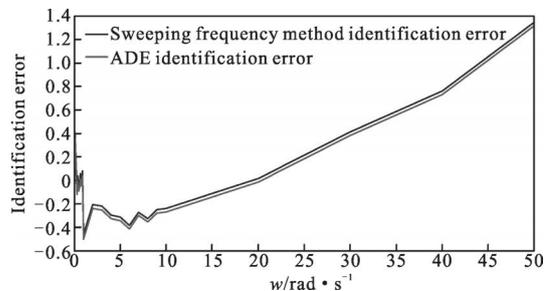


图 10 一阶辨识模型对数幅值比辨识误差对比图

Fig.10 Comparison of logarithmic amplitude ratio identification error of the first-order model

法,但从 RMSE 的对比中可以看出,扫频法的 RMSE 比 ADE 算法减小了 0.03,两种算法辨识精度相差不大。

从以上二阶、一阶模型的分析中可知,由于 ADE 根据  $w=20 \text{ rad/s}$  的正弦信号进行辨识研究,而  $1/T_e$  往往大于  $20 \text{ rad/s}$ ;另外由于编码器差分获得速度信号时会引入高频噪声,这两点是导致 ADE 算法辨识二阶模型在高频段辨识误差较大的主要原因。一阶模型辨识误差与扫频法辨识误差相近,从两种算法 RMSE 对比中可得出辨识精度相近。在工程应用上由于  $T_m$  远大于  $T_e$ ,往往将  $\frac{1}{T_e s+1}$  项舍弃或者设置相应的控制器进行修正,仍能达到控制指标。针对 ADE 算法辨识的一阶、二阶模型在工程应用中仍然可采取工程上的方法处理。从输入信号角度分析可以得出,ADE 算法的输入信号频率为  $20 \text{ rad/s}$  的正弦离散信号,而扫频法的输入信号为频率  $0.1\sim 450 \text{ rad/s}$  的正弦离散信号。从两种算法的原理分析可知,自适应差分进化算法参数少,计算量小,而扫频法用最小二乘拟合时需要大量的数据和计算。上述实验及结果分析表明 ADE 算法简便,计算量小,易于实现,有一定的应用价值。

$$G_1(s)=\frac{1.0182}{0.8481s+1} \quad (14)$$

$$G_1'(s)=\frac{1.036}{0.8461s+1} \quad (15)$$

## 4 结 论

文中针对光电跟踪伺服控制系统的特点,首先,采用 ADE 算法在正弦离散信号条件下对其进行辨识,并与扫频法辨识的模型和系统实际输出进行对比,ADE 算法的 RMSE 比扫频法减小了 20.33%,其次,为了进一步说明算法的有效性,分别将 ADE 算法和扫频法辨识的二阶、一阶模型与系统实际输出在频域内进行比较,研究结果表明在低频内 ADE 算法辨识的二阶模型输出与系统真实输出基本一致,在高频段偏差稍大些;两种算法辨识的一阶模型与系统实际输出基本一致。通过大量的实验证明该方法能够获得光电跟踪伺服控制系统的模型,且该方法简单,计算量小,便于实现,具有一定的工程应用价值。

## 参 考 文 献:

- [1] Wang Weibing. Research in theory and experiment of control strategies for opto-electronics tracking servo system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)  
王卫兵. 光电跟踪伺服系统控制策略理论与实验研究[D]. 中国科学院大学, 2012.
- [2] Qin Lai'an, Hou Zaihong, Wu Yi. Transfer function identification method and its application in photoelectrical tracking system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2810-2816. (in Chinese)  
秦来安, 侯再红, 吴毅. 光电跟踪架传递函数辨识方法及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2810-2816.
- [3] Ji Qibing, Liu Ziyi. Novel identification method with time delay from step response [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(9): 2168-2172. (in Chinese)  
靳其兵, 刘子宜. 基于阶跃响应的带纯滞后闭环辨识新方法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(9): 2168-2172.
- [4] Li Hesheng, Mao Jianqin, Zhang Futang, et al. An algorithm for impulse response identification based on fixed scale orthogonal wavelet packet transform [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(3): 242-251.
- [5] Zhao Weihu, Zhao Jing, Zhao Shanghong, et al. Scheduling algorithm for data relay satellite optical network based on self-adaptive genetic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1311-1316. (in Chinese)  
赵卫虎, 赵静, 赵尚弘, 等. 自适应遗传算法的数据中继卫星网络资源调度算法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1311-1316.
- [6] Huang Yu, Han Pu, Liu Changliang, et al. An improved quantum particle swarm optimization and its application in system identification[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(20): 114-120. (in Chinese)  
黄宇, 韩璞, 刘长良, 等. 改进量子粒子群算法及其在系统辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(20): 114-120.
- [7] Zhao Xijing, Liu Guangbin, Wang Lixin, et al. Augmented cubature Kalman filter/Kalman filter integrated algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 648-653. (in Chinese)  
赵曦晶, 刘光斌, 汪立新, 等. 扩展容积卡尔曼滤波-卡尔曼滤波组合算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 647-653.

- [8] Li Di, Chen Xiangjian, Xu Zhijun, et al. Type-II fuzzy neural networks with self-organizing recurrent intervals for dynamic time-varying system identification [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1406–1413. (in Chinese)  
李迪, 陈向坚, 徐志军, 等. 自组织递归区间二型模糊神经网络在动态时变系统辨识中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1406–1413.
- [9] Xue Xiaocen, Xiang Wenguo, Lv Jianhong. Thermal process identification based on differential evolution and RBF neural network[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2014, 44(4): 769–774. (in Chinese)  
薛晓岑, 向文国, 吕剑虹. 基于差分进化与 RBF 神经网络的热工过程辨识[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 769–774.
- [10] Yang Weidong, Yao Feng, Zhang Ming. Differential evolution algorithm based on adaptive crossover probability factor and its application [J]. *Information and Control*, 2010, 39(2): 187–193. (in Chinese)  
杨卫东, 姚峰, 张明. 基于自适应交叉概率因子的差分进化算法及其应用[J]. 信息与控制, 2010, 39(2): 187–193.
- [11] Wu Lianghong, Wang Yaonan, Yuan Xiaofang, et al. Fast self-adaptive differential evolution algorithm for power economic load dispatch [J]. *Control and Decision*, 2013, 28(4): 557–562. (in Chinese)  
吴亮红, 王耀南, 袁小芳, 等. 基于快速自适应差分进化算法的电力系统经济负荷分配[J]. 控制与决策, 2013, 28(4): 557–562.
- [12] Cao Xiaotao, Sun Tianyu, Zhao Yunlong, et al. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 739–748. (in Chinese)  
曹小涛, 孙天宇, 赵运隆, 等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 739–748.