

火电厂机组煤耗特性曲线拟合算法研究

缙新科, 崔乐乐, 巨圆圆, 郭涛, 张顺

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 火电厂机组的煤耗特性曲线一般是由生产厂家提供的性能参数或通过热力试验数据获得的, 这些曲线长期保持不变, 导致与机组实际运行情况不符。为解决这一问题为目的, 提出了基于遗传算法对火电厂机组的煤耗特性曲线进行拟合的方法。该方法采用二次函数作为目标函数; 设置适当的初始种群数、交叉率和变异率等参数; 对机组的实际煤耗特性曲线进行了拟合。对遗传算法拟合曲线与最小二乘法拟合曲线进行了比较, 结果表明拟合效果前者优于后者, 进一步说明采用该方法进行曲线拟合在一定意义下能最佳逼近已知数据, 实时反映出火电厂机组发电量与煤耗量之间的依赖关系。

关键词: 火电厂; 遗传算法; 煤耗特性曲线; 曲线拟合; 最小二乘法

Study on curve fitting algorithm for thermal power plant units coal consumption

GOU Xin-ke, CUI Le-le, JU Yuan-yuan, GUO Tao, ZHANG Shun

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Coal consumption curve of the thermal power plant is usually obtained from the performance parameters which are provided by the manufacturer or from the thermal test data. These curves remain unchanged for a long time and are incompatible with the actual operation situation of the unit. Therefore, a method of coal consumption curve fitting of the thermal power plant units based on genetic algorithm is proposed. The quadratic function is used as the objective function; appropriate parameters such as initial population size, crossover rate and mutation rate are set; the unit's actual coal consumption curves are fitted. The fitting curve of the proposed method is compared with that of the least squares method. The results indicate that fitting effect of the former is better than that of the latter. It is indicated that the proposed method can best approximate the known data in the curve fitting, and they can real-time reflect the interdependence between unit generation and coal consumption.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61064003).

Key words: thermal power plant; genetic algorithm; coal consumption curve; curve fitting; least squares method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0084-06

0 引言

在中国的电力结构中, 火力发电占到全国总发电量的 75%左右, 所消耗的煤耗能源占到全国总消耗能源的 67%左右^[1]。为实现节能减排, 低碳高效的生产模式, 需要对火电厂的机组进行负荷优化分配^[2-3], 而进行负荷优化分配的关键一步就是对机组煤耗特性曲线的准确拟合。

当前火电厂机组的煤耗特性曲线是由生产厂家提供的性能参数或热力试验获取数据求得的, 而且这些曲线保持长期不变。而机组在实际运行中会受到运行方式、煤质、设备状态、操作员技术水平等

诸多因素的影响, 使得这些曲线与实际运行情况存在较大差异。鉴于这种情况, 需要在实际运行中对煤耗特性曲线进行重新拟合。目前曲线拟合的方法大多数采用最小二乘法^[4-6], 但最小二乘法对于复杂的非线性问题难以有效的解决, 有时拟合出的曲线并不能满足实际应用的要求^[7]。

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[8-11], 是由进化论与遗传学说演变而来的基于选择和自然遗传的全局优化算法, 与最小二乘法相比其优点是不依赖梯度信息, 能够解决工程上复杂的、非线性的优化问题。然而火电厂的数据庞大、非线性强。因此, 本文将此算法运用于火电厂的煤耗特性曲线拟合, 并与最小二乘法进行了比较研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (61064003) 资助

1 遗传算法进行曲线拟合的基本原理

应用遗传算法可以拟合出任意次数或任意形式的曲线,其基本原理就是进行问题优化求解的过程,即将所求问题的解表示为染色体,在执行算法之前随机产生一定数量的染色体(问题的初始解),将这些初始解按照优胜劣汰的原则选出适应度高的个体,淘汰适应度低的个体,将适应度高的个体作为再生个体遗传到下一代,进行交叉、变异等遗传算法操作,形成新的下一代种群,将这个群体继续进行新一轮的进化,直到所得解达到问题的精度要求为止。

遗传算法进行曲线拟合主要包括编码、产生初始群体、计算各个体适应度、复制、交叉、变异等步骤。遗传算法具体流程如图 1 所示^[12-14]。

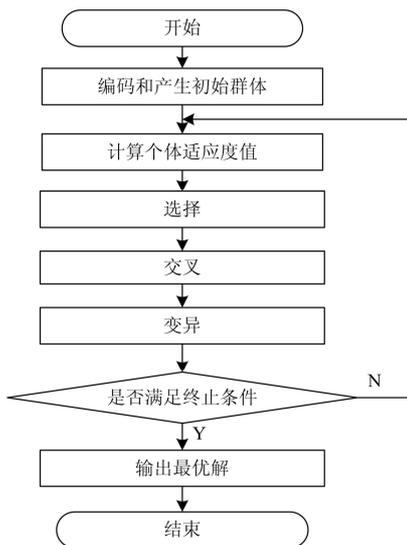


图 1 遗传算法流程图

Fig. 1 Flow diagram of genetic algorithm

2 基于遗传算法的火电厂机组煤耗特性曲线拟合

对某火电厂 4×328.5 MW 的发电机组进行煤耗曲线拟合,各台机组的运行能耗数据如表 1 所示^[15]。在工程实际中,通常二次曲线就可以满足精度要求,因此本文目标函数拟定为如下二次函数:

$$F = x_1 + x_2 \cdot P + x_3 \cdot P^2, \text{ 其中 } x_1、x_2、x_3 \text{ 为待估计参数。}$$

对 1# 机组编写目标函数,并以文件名 ga-curfit.m 保存到 Matlab 的目录文件下。

```
function y=ga_curfit(x)
```

```
xd=[189.85 217.59 220.00 240.00 250.00 260.00  
271.86 280.00 290.00 300.00 310.00 315.00
```

```
320.00];  
yd=[90.00 95.00 96.00 104.00 105.00 111.00 112.00  
116.00 114.00 123.00 122.00 126.00 130.00];  
n=length(xd);  
F=0;  
for i=1:n  
F=F+(yd(i)-(x(:,1)+x(:,2).*xd(i)+x(:,3).*xd(i)^2)).^2)/n;  
End
```

1# 机组拟合结果如图 2 所示。

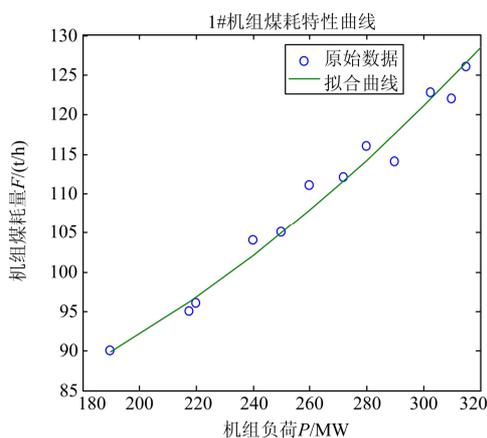


图 2 1# 机组煤耗特性曲线

Fig. 2 1# unit coal consumption characteristic curve

采用同样的方法可以拟合出其他三台机组的煤耗特性曲线,拟合结果如图 3~图 5 所示。

采用遗传算法拟合出的各台机组的煤耗特性曲线方程分别为

$$F_1 = 0.000285792906471322P_1^2 + 0.152295463223784P_1 + 49.7469230797674$$

$$F_2 = 0.000471686919621979P_2^2 + 0.175779299648337P_2 + 43.0063408707241$$

$$F_3 = 0.000502891284569065P_3^2 + 0.184153363892838P_3 + 52.6593691773213$$

$$F_4 = 0.00101282244303650P_4^2 - 0.0599965442023200P_4 + 83.1580882142092$$

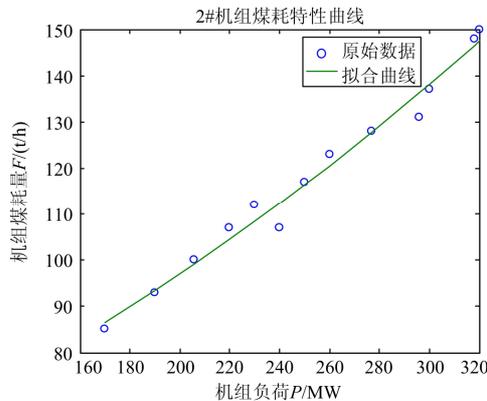


图 3 2# 机组煤耗特性曲线

Fig. 3 2# unit coal consumption characteristic curve

表 1 机组负荷-能耗表

Table 1 Unit load-energy consumption table

1#机组		2#机组		3#机组		4#机组	
机组负荷/ MW	机组煤耗量/ (t/h)	机组负荷/ MW	机组煤耗量/ (t/h)	机组负荷/ MW	机组煤耗量/ (t/h)	机组负荷/ MW	机组煤耗量/ (t/h)
189.85	90.00	170.00	85.00	174.00	101.62	163.70	103.00
217.59	95.00	190.00	93.00	192.92	107.96	192.96	108.00
220.00	96.00	205.92	100.00	210.83	113.02	208.15	111.00
240.00	104.00	220.00	107.00	220.00	114.00	222.96	120.00
250.00	105.00	230.00	112.00	222.92	120.00	232.22	126.00
260.00	111.00	240.00	107.00	245.00	128.14	244.81	128.00
271.86	112.00	250.00	117.00	253.39	125.46	252.96	130.00
280.00	116.00	260.00	123.00	277.08	147.91	260.00	137.00
290.00	114.00	277.00	128.00	290.83	153.02	271.10	145.00
300.00	123.00	296.00	131.00	300.00	156.05	284.07	151.00
310.00	122.00	300.00	137.00	312.08	158.00	300.00	156.00
315.00	126.00	318.00	148.00	320.00	159.00	315.00	160.00
320.00	130.00	320.00	150.00	325.00	164.31	320.00	169.20

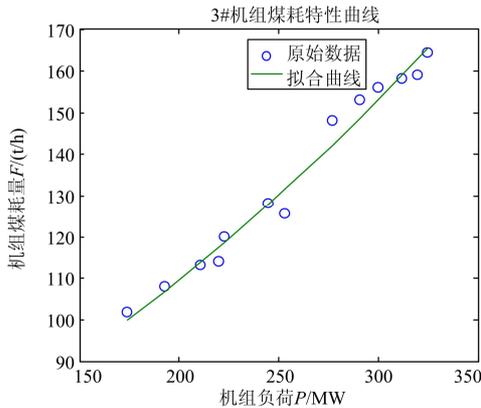


图 4 3#机组煤耗特性曲线
Fig. 4 3# unit coal consumption characteristic curve

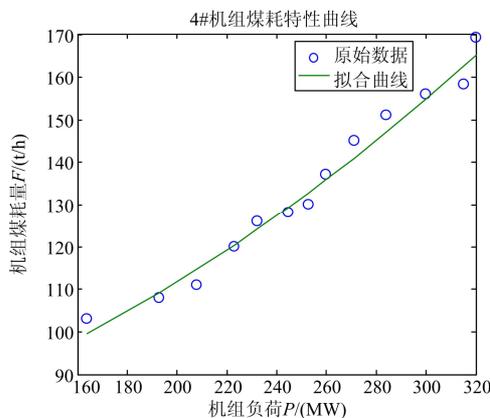


图 5 4#机组煤耗特性曲线
Fig. 5 4# unit coal consumption characteristic curve

3 基于最小二乘法的火电厂机组煤耗特性曲线拟合

为了便于比较, 给出最小二乘法拟合曲线的方法和结果。

设 $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n$ 为 $C[a, b]$ 上线性无关的函数集合, 令 $\Phi = span\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$ 。设 $f(x)$ 为在 $m+1$ 个节点 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b$ 上给定的离散函数, 最小二乘法为求 $s^* \in \Phi$, 使得 $\sum_{j=0}^m \rho(x_j)[f(x_j) - s^*(x_j)]^2 =$

$$\min_{s \in \Phi} \sum_{j=0}^m \rho(x_j)[f(x_j) - s(x_j)]^2$$

其中, $\rho(x)$ 为 $[a, b]$ 上的权函数。

那么称 $s^*(x)$ 为函数 $f(x)$ 在 $m+1$ 个节点上的最小二乘解, 也称为最小二乘拟合。

根据以上原理用二次多项式表示的机组能耗特性曲线为

$$F = mP^2 + tP + k \tag{1}$$

式中: F 为机组供电煤耗量 (t/h); P 为机组发电功率 (MW); m, t, k 为能耗特性参数。

采用最小二乘法确定二项式系数 m, t, k , 设有 n 个实验的离散数据点 (F_i, P_i) 。

$$\text{令 } J = \sum_{i=1}^n (mP_i^2 + tP_i + k - F_i)^2, \text{ 要使 } J \text{ 最小,}$$

则令

$$\frac{\partial J}{\partial m} = \sum_{i=1}^n 2P_i^2(mP_i^2 + tP_i + k - F_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial J}{\partial t} = \sum_{i=1}^n 2P_i(mP_i^2 + tP_i + k - F_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial J}{\partial k} = \sum_{i=1}^n 2(mP_i^2 + tP_i + k - F_i) = 0 \quad (4)$$

整理得

$$\left(\sum_{i=1}^n P_i^4\right)m + \left(\sum_{i=1}^n P_i^3\right)t + \left(\sum_{i=1}^n P_i^2\right)k = \sum_{i=1}^n (F_i P_i^2) \quad (5)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n P_i^3\right)m + \left(\sum_{i=1}^n P_i^2\right)t + \left(\sum_{i=1}^n P_i\right)k = \sum_{i=1}^n (F_i P_i) \quad (6)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n P_i^2\right)m + \left(\sum_{i=1}^n P_i\right)t + nk = \sum_{i=1}^n F_i \quad (7)$$

求解上述线性方程组即可求出机组煤耗特性参数 m, t, k 。

采用最小二乘法拟合的结果分别如图 6~图 9 所示。

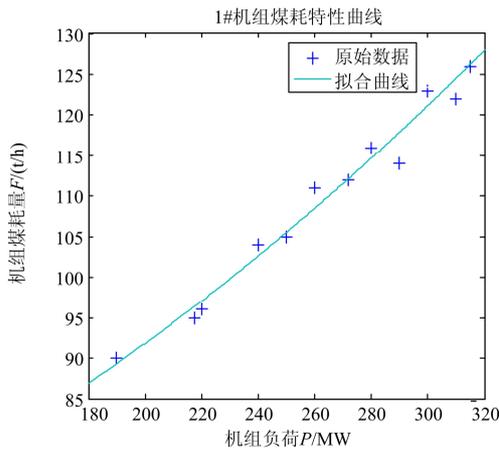


图 6 1#机组煤耗特性曲线

Fig. 6 1# unit coal consumption characteristic curve

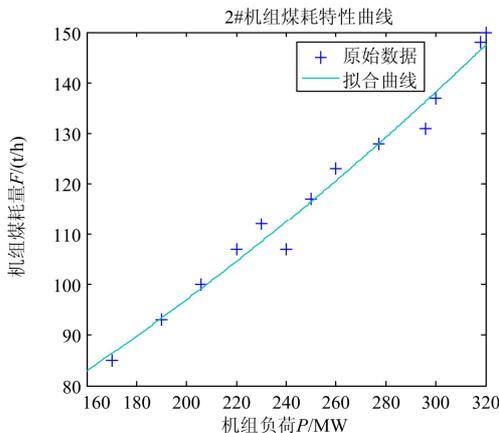


图 7 2#机组煤耗特性曲线

Fig. 7 2# unit coal consumption characteristic curve

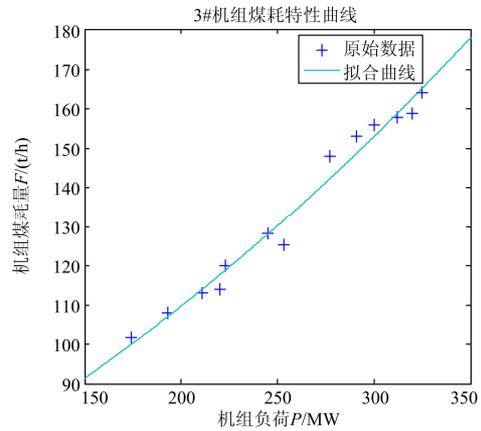


图 8 3#机组煤耗特性曲线

Fig. 8 3# unit coal consumption characteristic curve

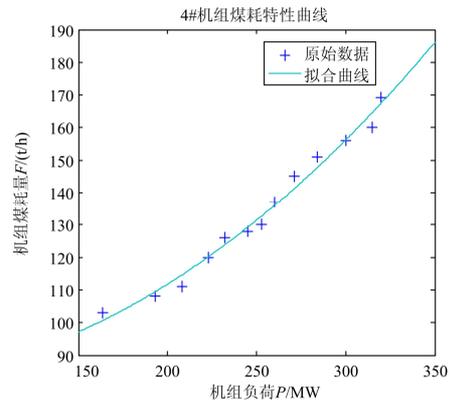


图 9 4#机组煤耗特性曲线

Fig. 9 4# unit coal consumption characteristic curve

用最小二乘法拟合出的各台机组的煤耗特性曲线方程分别为

$$F_1 = 0.00058024101861P_1^2 + 0.00488999810271P_1 + 67.81118406745974$$

$$F_2 = 0.0004332771431P_2^2 + 0.19523379092699P_2 + 40.62061826123973$$

$$F_3 = 0.0004136575969P_3^2 + 0.22857182978488P_3 + 47.30730098461958$$

$$F_4 = 0.00102118730423P_4^2 - 0.06561283911416P_4 + 84.01621840672190$$

4 拟合误差分析

曲线拟合的好坏通过 SSE (误差平方和) 评判, 两种算法的误差平方和如表 2 所示。

表 2 误差平方和

Table 2 Sum of squared errors

	1#机组	2#机组	3#机组	4#机组
SSE1/(t/h) ²	43.17	95.30	134.25	83.88
SSE2/(t/h) ²	44.88	95.32	134.90	83.82

注: 表中 SSE1 为采用遗传算法所得误差平方和; SSE2 为采用最小二乘法所得误差平方和。

由表中看出, 1#、2#、3#机组采用遗传算法所得误差明显优于最小二乘算法, 4#机组两种方法误差非常接近。表明采用遗传算法拟合的曲线明显比采用最小二乘法拟合的曲线效果更好, 各原始数据点更多的落在曲线上或分布在曲线附近, 更能真实反映机组煤耗量与发电量的关系。

5 结语

实验结果证明, 通过遗传算法进行火电厂的煤耗特性曲线拟合是切实可行的, 从拟合的结果可以看出拟合的曲线能够逼近原始数据点, 能够比较精确地显示出各台发电机组的煤耗运行性能, 很好地预测出各机组的煤耗趋势, 得到较好的非线性拟合效果。但是遗传算法也存在自身的缺点, 易早熟, 遗传算子的无方向性, 每次搜索结果都不固定, 这些问题都有待下一步工作来改进。

参考文献

- [1] 刘建华. 多变煤质条件下火电厂负荷优化分配方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2011.
LIU Jian-hua. Research on optimization methods of load dispatch under the condition of fickle coal in thermal power plant[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.
- [2] 彭显刚, 张聪慧, 王星华. LNG调峰电厂负荷优化分配的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 84-87.
PENG Xian-gang, ZHANG Cong-hui, WANG Xing-hua. Application research of optimal load distribution on LNG power plant[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 84-87.
- [3] 李勇, 王建君, 曹丽华. 基于BP神经网络的火电厂实时负荷优化分配[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 87-92.
LI Yong, WANG Jian-jun, CAO Li-hua. Real time optimal load dispatch of power plant based on back propagation neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 87-92.
- [4] 曹健, 林涛, 徐遐龄. 基于最小二乘法和时频原子变换的谐波/间谐波测量算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 1-7.
CAO Jian, LIN Tao, XU Xia-ling. Monitoring of power system harmonic/inter-harmonics based on least squares algorithm and time frequency transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 1-7.
- [5] 尉建军, 全力, 彭桂雪, 等. 基于最小二乘支持向量机的励磁特性曲线拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 15-17.
WEI Jun-jun, QUAN Li, PENG Gui-xue, et al. Curve fitting of excitation characteristics based on the least squares support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 15-17.
- [6] ROYCHOWDHURY S. Fuzzy curve fitting using least square principles[C] // 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1998, 4: 4022-4027.
- [7] 周争鸣. 基于遗传算法的曲线拟合及应用[J]. 安徽机电学院学报, 2000, 15(3): 1-5.
ZHOU Zheng-ming. The research of curve fitting method based on genetic algorithm[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical & Electrical Engineering, 2000, 15(3): 1-5.
- [8] 武健, 马骁, 侯睿. 基于遗传算法的有源滤波器 LCL 输出滤波器优化设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 159-164.
WU Jian, MA Xiao, HOU Rui. Optimization of APF LCL output filter based on genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 159-164.
- [9] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
MA Xiu-fan, CUI Huan-jun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [10] 王小平. 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.
WANG Xiao-ping. Genetic algorithms—theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [11] 周文越, 吕飞鹏, 李鹤. 基于遗传算法的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 51-55.
ZHOU Wen-yue, Lü Fei-peng, LI He. Method for the combination of power system operation mode based on

- genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 51-55.
- [12] 张敏辉, 赖麟, 孙连海. 基于遗传算法的研究与 Matlab 代码的实现[J]. 四川教育学院学报, 2012, 28(1): 115-117.
ZHANG Min-hui, LAI Lin, SUN Lian-hai. Research on genetic algorithm and realization of Matlab code[J]. Journal of Sichuan College of Education, 2012, 28(1): 115-117.
- [13] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen, LI Xu-wu, et al. Matlab genetic algorithm toolbox and its application[M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2005.
- [14] 李凤婷, 晁勤. 基于 Matlab 与遗传算法的风电容量 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 178-182.
LI Feng-ting, CHAO Qin. Wind power capacity based on Matlab and genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 178-182.
- [15] 赵乐强. 火电厂机组优化组合的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
ZHAO Le-qiang. Reseach on the plant's optimal unit commitment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.

收稿日期: 2013-06-18; 修回日期: 2013-08-30

作者简介:

缙新科 (1967-), 男, 通信作者, 工学硕士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为智能结构及动力系统控制;

崔乐乐 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电厂综合自动化; E-mail: 15002641492@139.com

巨圆圆 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为学习控制理论及应用。