

优化隶属度函数在中储式磨煤机中的应用^①

刘 军, 温 婷

(西安理工大学 自动化学院, 西安 710048)

摘 要: 要保证磨煤机的最佳运行工况, 就要使磨煤机的负荷, 温度, 入口负压稳定在最佳值附近, 传统的模糊控制在磨煤机系统中虽运用广泛, 但是完全基于专家经验的控制很难保证系统运行在最佳状态下, 因此提出了采用遗传算法优化模糊控制隶属度函数的方法控制磨煤机的运行, 解决了由于专家经验的不精确性带来的不足.

关键词: 磨煤机; 遗传算法; 模糊控制; 优化隶属度函数

Application of Optimize Membership Function in Intermediate Storage Bunker Ball Mill

LIU Jun, WEN Ting

(College of Automation, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To ensure the best operation condition of the storage bunker ball mill, we must make its load, temperature, and its inlet negative pressure be closed to the best value. The traditional fuzzy control of storage bunker ball mill is used widely now, but it is very difficult to guarantee the system run in the best condition if the control totally accord to the expert experience. Therefore this passage adopts the genetic algorithm to optimize membership function of the fuzzy control to control the operation of the system. This way can avoid the subjectivity of membership function depending on expert experience.

Key words: storage bunker ball mill; genetic algorithm; fuzzy control; optimize membership function

1 引言

中储式磨煤机系统广泛应用于火力发电系统, 是火力发电系统主要耗能设备, 要降低制粉能耗, 就要使磨煤机运行在最佳工况, 由于中储式磨煤机系统具有多变量、强耦合、时滞时变的特点, 工作过程较为复杂, 难以用精确的数学模型描述, 因此基于模型的 PID 控制方法很难获得良好的控制效果. 模糊控制不依赖于数学模型, 是解决此类问题比较有效的方法.

但是一般的模糊控制器的隶属度函数依赖于专家的知识 and 现场操作经验, 因此对于一个强耦合非线性系统, 很难到达最佳的控制效果. 文献[17]提出了一种基于遗传算法优化输入输出隶属度函数参数的方法, 并将其应用在了调节直流(DC)电机转速的控制器中, 通过 Matlab 的 Simulink 仿真测试验证了此控制方法的可行性. 中储式磨煤机虽然不同于电机, 但是我们采用的是模糊控制, 不受控制对象模型限制, 采用

常规的模糊控制, 并结合遗传算法进行优化, 便可以解决单独依靠模糊控制器所存在的主观性问题, 由此本文提出了一种由三个模糊控制器构成, 分级的控制方案, 并利用遗传算法来优化隶属度函数, 将其应用在中储式磨煤机系统中, 取得了良好的控制效果.

2 系统的控制策略

2.1 系统数学模型

磨煤机系统是一个多输入多输出非线性的系统, 输入输出各变量之间相互耦合严重, 并且具有时变性.

现在我们以 DPM320/580 的磨煤机系统为例, 它的存煤量通过球磨机前轴瓦的振动垂直分量信号来表示, 可克服风量对负荷信号的影响^[1], 这样, 存煤量的测量不会受到风门变化的影响.

在稳态工作点附近, 已通过实验近似测得磨煤机的输入/输出传递函数矩阵如式(1)^[2]:

^① 收稿时间:2015-02-25;收到修改稿时间:2015-04-29

$$\begin{bmatrix} m \\ t \\ p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{0.1e^{-40s}}{(20s+1)^2} & 0 & 0 \\ -\frac{0.1e^{-20s}}{180s+1} & \frac{3.5}{(80s+1)^3} & \frac{-0.14}{(60s+1)^2} \\ \frac{0.37e^{-15s}}{100s+1} & \frac{2.0}{8s+1} & \frac{0.5}{10s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gm} \\ u_{rh} \\ u_{lf} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,m—磨煤机负荷

t—磨煤机出口温度

p—煤机入口负压

u_{gm} —给煤机转数

u_{rh} —热风门开度, 单位为%

u_{lf} —冷风门开度, 单位为%

2.2 系统动态特性

首先分析给煤机转数, 热风门开度, 冷风门开度对磨煤机负荷, 磨煤机出口温度, 磨煤机入口负压的影响。

2.2.1 给煤机转数对磨煤机负荷的影响

给煤机转数对磨煤机负荷的影响是很复杂的过程, 当系统的通风能力不足时, 磨煤机内会出现堵煤现象, 即磨煤机料位将会没有自平衡能力, 持续上升直到满缸。当系统通风量充足时, 给煤机转数对磨煤机负荷的影响, 如图 1 的单位阶跃响应曲线所示。

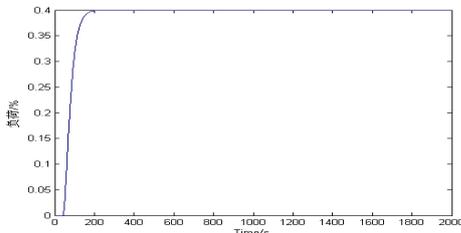


图 1 给煤机转数对磨煤机负荷影响的阶跃响应曲线

2.2.2 给煤机转数对出口温度的影响

由于原煤的温度远低于磨煤机内的温度, 所以改变磨煤机转数, 给煤量也会随之改变, 对出口温度有显著的影响。当给磨煤机转数下降时, 磨煤机出口温度会增加, 给煤机转数上升时, 磨煤机出口温度会降低。其单位阶跃响应曲线如图 2, 可见在相同时间内对出口温度的影响要比对磨煤机负荷影响程度明显偏小。

2.2.3 给煤机转数对入口负压的影响

增大煤机转数, 给煤量增加, 球磨机的出粉量也随之增加, 而磨煤机的负荷(料位或存煤量)增加并不显著, 因此, 对磨煤机入口负压的影响较小。当给煤

机转数增加到给煤量大于出粉量时, 磨煤机料位显著上升时, 才会使磨煤机入口负压显著增加。其单位阶跃响应曲线如图 3, 可见在相同时间内对入口负压的影响只是对磨煤机负荷影响程度的一半。

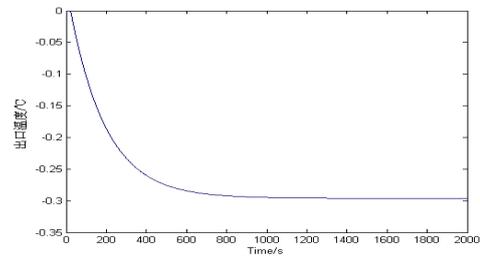


图 2 给煤机转数对出口温度影响的阶跃响应曲线

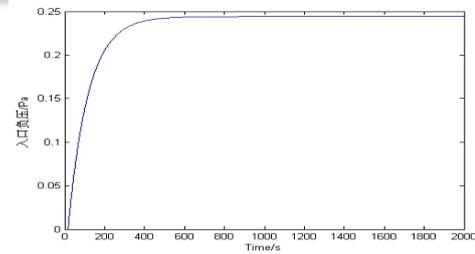


图 3 给煤机转数对入口负压影响的阶跃响应曲线

2.2.4 热风门开度对磨煤机负荷的影响

热风门开度主要用来控制磨煤机炉膛内煤粉的温度, 干燥煤粉, 增大炉膛内的燃烧率, 但是影响制粉效率的主要因素还是钢球装载量, 煤的可磨性, 煤的硬度。因此, 在工程应用中, 热风量对磨煤机负荷影响的放大系数近似认为等于零, 如数学模型式(1)所示。

2.2.5 热风门开度对出口温度的影响

热风温度一般在 250℃—300℃, 在其它条件不变时, 热风门开度越大, 磨煤机的出口温度上升越快, 当热风门开度作阶跃变化时, 磨煤机出口温度的单位阶跃响应曲线如图 4 所示。

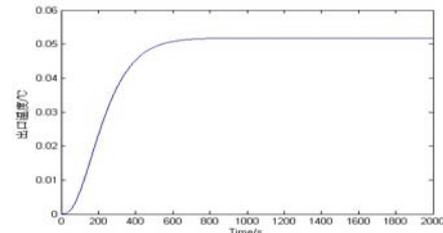


图 4 热风门开度对出口温度影响的阶跃响应曲线

2.2.6 热风门开度对入口负压的影响

从空气预热器送来的热风，对球磨机内的原煤进行干燥，提高制粉效率，同时为了保证磨煤机内的煤粉不跑出，球磨机入口负压保持在-300Pa 左右。热风门开度对磨煤机入口负压的阶跃响应曲线如图 5 所示，可见，相对于热风门开度对出口温度的影响程度，对入口负压的影响明显偏小^[2]。

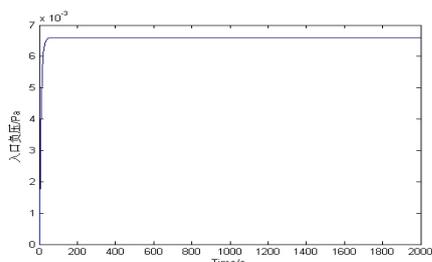


图 5 热风门开度对入口负压影响的阶跃响应曲线

2.2.7 冷风门开度对磨煤机负荷的影响

同热风门开度对磨煤机负荷的影响类似，影响制粉效率的主要因素是钢球装载量，煤的可磨性，煤的硬度。因而冷风量的改变，能够对制粉系统的通风能力起到一定调节作用，使磨煤机的负荷有所改变，但是作用很小。在工程应用中，将冷风量对磨煤机负荷的影响也可忽略不计，如数学模型式(1)所示^[16]。

2.2.8 冷风门开度对出口温度的影响

由于冷风直接来自大气，它的温度要比磨煤机出口温度低很多，因此冷风门开度的调节就会使磨出口温度有显著变化。当冷风变化时，磨煤机出口温度的阶跃响应曲线与图 3 类似，但变化方向相反，变化幅值要小一些。变化方向相反的原因是因为一个是降低出口温度，一个是升高出口温度，变化幅值小一些的是因为冷风的管道比热风管道要细，在同样的阀位变化下，热风量变化要比冷风量变化的更多一些，并且由于热风温度与磨煤机出口温度之间的温差相比冷风温度与磨煤机出口温度之间的温差要大^[16]。

2.2.9 冷风门开度对入口负压的影响

同上所述，冷风门开度对磨煤机入口负压的影响与热风门开度对负压的影响相似，但影响的幅度要小一些。

2.3 控制策略

综上所述，给煤机转数 u_{gm} 不仅影响负荷，而且还影响出口温度和入口负压，但是相同时间内对出口温

度和入口负压的影响量明显偏小，同时磨煤机负荷又只受给煤机转数的影响，所以可以采取优先调节给煤机转数的方法控制负荷，以保证负荷在最佳值附近；调节热风门开度 u_{rh} 影响出口温度和入口负压，而调节冷风门开度只是对入口负压有较大影响作用，并且以安全运行为主要目的，我们应该首要调节热风门开度以确保出口温度在安全运行范围内，最后再调节冷风门开度，保证入口负压在目标值附近。据此本文提出了相应分级的控制策略^[1]。

首先根据负荷偏差 em 调节给煤机转数增量，以保证负荷稳定，由于控制量 u_{gm} 对 t 有影响，所以采用 u_{gm} ，温度偏差 et 以及 etc 作为控制器 2 的输入量，根据数学模型可知，仅根据 em 就可以确定 u_{gm} ，那么就不必再利用 u_{gm} 、 et 和 etc 来确定 u_{rh} 了，而是可以直接根据 em 、 et 、 etc 来确定 u_{rh} ，这样，具有良好的解耦性，预测的补偿作用可以更加提前，有利于缩短控制周期；最后根据 u_{rh} 和入口负压偏差 ep 调节再循环门 u_{lf} 。

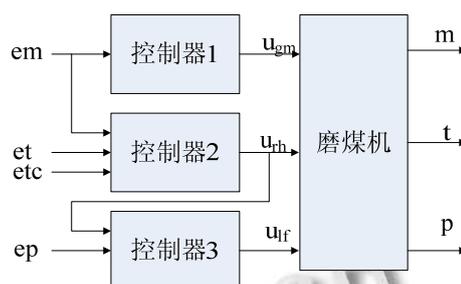


图 6 分级控制策略

- 式中, m —磨煤机负荷
- t —磨煤机出口温度
- p —煤机入口负压
- u_{gm} —给煤机转数
- u_{rh} —热风门开度, 单位为%
- u_{lf} —冷风门开度, 单位为%
- em —负荷偏差
- et —温度偏差
- etc —温度偏差变化
- ep —入口负压偏差

3 控制器设计

3.1 基本模糊控制器设计

基本模糊控制器的设计主要包含以下内容^[3]：

- 1) 确定模糊控制器的输入变量和输出变量及其

论域;

根据数学模型式(1)及分级控制策略图(6)可知,系统的输入变量是: em, et, etc, ep, 论域分别为[-1,1], [-15,15], [-0.1,0.1], [-300,300], 输出变量是 m, t, p, 控制量是 u_{gm} 、 u_{rh} 、 u_{yf} , 论域分别为[-100,100], [-10,10], [-30,30].

2) 设计模糊控制器的控制规则;

① 选择描述输入输出变量的模糊子集

选择描述变量状态的词汇: { NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}表示输入输出的模糊集合.

② 模糊变量的模糊子集的定义

模糊变量的模糊子集的定义, 是为了设计模糊子集隶属函数曲线的形状. 本文采用的是三角形, 并使用均匀分布.

设 x_1, \dots, x_l 是输入量, 则隶属度函数采用三角形形状函数即:

$$\mu(x_j) = \begin{cases} \frac{x_j}{a_{ij}}, & x_j < a_{ij} \text{ 时} \\ \frac{x_j}{a_{ij} - b_{ij}}, & x_j > a_{ij} \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

其中 a_{ij} 是模糊隶属度函数的中心元素, b_{ij} 为尺度因子.

例如下图, 变量 em 的模糊集合为 { NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}, 采用均匀的三角形状函数分布, 对应的模糊划分情况如下图:

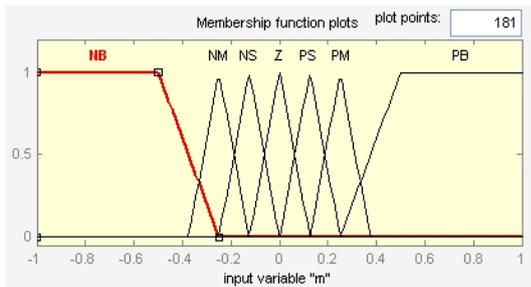


图 7 em 的隶属度函数

显然隶属度函数参数的调整相当于模控制规则的改变. 所以通过遗传算法可以实现对于模糊控制的寻优.

那么, 如图 7 中的隶属函数, 需要优化的隶属参数为该图中三角图形的中心点及宽度.

隶属度函数如果仅仅根据运行经验制定很难保证控制效果达到最好, 因此本文采用遗传算法优化隶属度函数的方法, 这部分会在 2.2 做详细说明.

③建立模糊控制规则

模糊控制器的控制规则是以专家经验为基础建立的. 利用模糊集合理论可将专家经验归纳为具体的控制规则.

用 Matlab 中的模糊工具箱提供的模糊规则编辑器制定相应的控制运算规则, 控制器 1 的控制规则如下.

表 1 em 与 u_{gm} 的控制规则表

em	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
u_{gm}	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB

控制器 2 由于含有 3 个输入 1 个输出, 所以是个多维的控制器, 控制规则复杂, 可以将其制成以下两张表格.

表 2 em, et,etc 与 u_{rh} 的控制规则表

em et/etc	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS/NB	-	-	-	PM	PS	ZO	PS
NS/NM	-	-	-	PM	PS	ZO	PS
NS/NS	-	-	PM	PS	ZO	ZO	PS
NS/ZO	PM	PS	PS	PS	ZO	ZO	ZO
NS/PS	ZO						
NS/PM	ZO						
NS/PB	ZO						
ZO/NB	-	-	PM	PM	PM	ZO	PS
ZO/NM	-	-	PM	PS	PS	ZO	PS
ZO/NS	-	-	PS	ZO	ZO	ZO	ZO
ZO/ZO			ZO	ZO	ZO	NS	NM
ZO/PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	-	-
ZO/PM	ZO	ZO	ZO	NS	NS	-	-
ZO/PB	ZO	ZO	ZO	NM	NS	-	-
PS/NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	NS
PS/NM	ZO						
PS/NS	ZO						
PS/ZO	ZO	ZO	ZO	NS	ZO	-	-
PS/PS	ZO	ZO	ZO	NS	NS	-	-
PS/PM	ZO	ZO	ZO	NM	NS	-	-
PS/PB	ZO	ZO	ZO	NM	-	-	-

表 3 et,etc 与 u_{rh} 的控制规则表

etc et	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	ZO	ZO	ZO
NM	PB	PM	PM	PM	ZO	ZO	ZO
PM	ZO	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB

关系曲面如图 8.

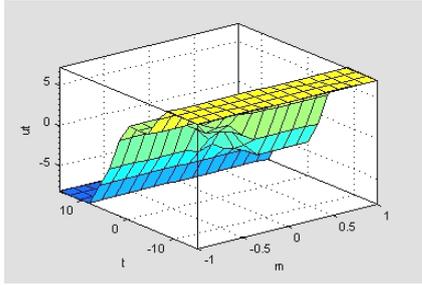


图 8 em,et,etc 与 u_{rh} 的关系曲面图

控制器 3 输入为 u_{rh} 与 ep , 输出为 u_{lf} , 根据运行经验, 制定表格如下:

表 4 ep 与 u_{rh} 的控制规则表

$ep \backslash u_{lf}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	ZO	ZO
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO	NS
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
PM	ZO	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	ZO	NS	NB	NB	NB	NB

3.2 利用遗传算法优化模糊控制隶属函数的设计

3.2.1 模糊控制器的隶属度函数优化

在传统的模糊控制器中, 控制规则的个数以及隶属度函数的个数都是确定的, 所以对模糊控制器的优化主要就是对模糊集的隶属度函数参数 a_{ij} , b_{ij} 进行优化, 从而调整隶属度函数的位置和形状, 选择最合适的隶属度函数.

本系统的输入输出变量如下:

输入变量为: em, et, etc, ep .

输出变量为: u_{gm}, u_{rh}, u_{lf} .

它们的隶属函数类型均为三角形和梯形的组合. 模糊集合为: {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}.

3.2.2 编码

编码是遗传算法的第一个步骤, 也是首要解决的问题. 编码方法有实数编码, 二进制编码等. 隶属度参数采用实数编码, 能够大大缩短串长, 遗传无需频繁编码和解码, 提高了运算效率. 模糊控制器中, 隶属度函数个数和控制规则个数都是一定的, 所以在对隶属度函数遗传优化时, 个体编码的长度是一定的. 隶属度函数的编码, 输入变量 e, ec 和输出变量 u 各

有 7 个模糊集合 NB、NM、NS、ZR、PS、PM、PB, 其中两边模糊集的隶属度函数为梯形或直角三角形, 其余中间的均为三角形. 确定其顶点位置和底边宽度即可确定一个模糊集合, 直接以三角形和梯形的顶点横坐标作为优化参数, 如图 9 所示.

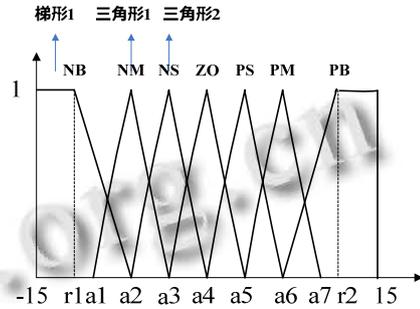


图 9 隶属度函数

输入变量 e 和 ec 输出变量 u 需要确定的参数, 即 $a_1 \sim a_7$ 以及 $r_1 \sim r_2$, 则该隶属度函数部分共有个待优化参数, 采用实数制编码. 另外, 在遗传算法寻优过程中, 隶属度参数经过交叉变异, 在模糊集论域内会出现一些不合理的隶属度参数, 如图 5-3 中若出现 $a_6 > a_7$ 或者 $a_6 < a_5$ 时, 那么本文将 a_6 控制在在 (a_5, a_7) 这个范围内, 其他的三角形论域做相同的处理即可.

下面举例说明具体编码步骤:

对于图 9 中的隶属度函数, 首先选取初始种群, 采用随机的方法在论域范围内选择 n 组实数数值, 使其从小到大排列作为初始种群, 假设其中一组种群为图 9 中的 $[r_1, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, r_2]$, 那么 NB 所对应的参数为 $[r_1, a_2]$, 相应的隶属度函数形状如梯形 1, NM 对应的参数为 $[a_1, a_2, a_3]$, 相应的隶属度函数形状如三角形 1, NS 对应的参数为 $[a_2, a_3, a_4]$, 相应的隶属度函数形状如三角形 2, 以此类推 ZO、PS、PM、PB. 那么在以后的遗传优化过程中, 就是直接对 n 组如初始种群 $[r_1, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, r_2]$ 的排列进行优化.

3.2.3 适应度函数

在采用遗传算法优化参数时, 适应度函数用来衡量群体中各个个体的优良程度, 是遗传算法的关键, 适应度的大小决定着种群个体进入下一代的概率, 越优秀的个体, 它的适应度函数也应该越大.

在适应度函数的选择上, 为了提高控制性能, 采用误差绝对值作为参数选择最小目标函数^[4,5]即:

$$J = \int_0^T (w1|em(t)| + w2|et(t)| + w3|ep(t)| + w4|etc(t)|) + w5tu_m + w6tu_t + w7tu_p \quad (3)$$

其中, $w1, w2, w3, w4, w5, w6, w7$ 为加权系数, tu_m, tu_t, tu_p 分别为输出 m, t, p 的上升时间, 为避免超调, 采用遗传算法的处罚功能, 即一旦超调, 将超调量作为最优指标的一项. 即

$$J = J + e(i), \text{当 } e(i) > 0 \text{ 时} \quad (4)$$

3.2.4 交叉变异

选择方法: 利用轮盘赌法, 对最优个体采取保留策略, 把上一代的最优个体不仅选择, 直接进入下一代的遗传进化过程中.

1) 交叉:

由于该遗传算法采用的是实数编码, 交叉采用中间重组的方法, 指有两个个体的线性组合而产生新的个体, 假设用于交叉的任意两父代个体分别为: y_{11}, y_{12} , 它们经过中间重组后的子代个体为: y_{21}, y_{22} , 则:

$$y_{21} = y_{11} * \alpha + y_{12} * (1-\alpha) \quad (5)$$

$$y_{22} = y_{12} * \alpha + y_{11} * (1-\alpha) \quad (6)$$

其中, α 为一个小于 1 的随机数.

2) 变异:

变异方法采用均匀变异. 假设用于变异的父代个体分别为: y_f , 对应的边界范围为 $[\min, \max]$, 子代个体为: y_z , 则:

$$y_z = \min + \beta * (\max - \min) \quad (7)$$

其中, β 为一个小于 1 的随机数.

均匀变异法可以在整个搜索空间内自由地移动, 从而可以增加群体的多样性, 使算法的出力有更多的模式.

3.2.5 控制器参数设置

下面先对本文设计的优化模糊控制器的遗传算法进行参数设置, 其中需要选择的运行参数主要有个体编码串长度 L 、群体大小 M 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、终止代数 G 等.

1) 种群规模 M

对于种群规模 M , 当 M 过小时, 由于满足不了种群多样性, 一般不会很好的发挥遗传算法的优化性能, 而为了减少遗传算法陷入局部最优的可能性可以采用较大规模的群体规模, 与此同时的代价是, 群体规模较大, 计算强度增高. 经过试验, 这里我们取 $M=30$.

2) 交叉概率 P_c

典型交叉概率采用的是一个常数, 其大小的设定要通过反复试验来确定. 该值如果设定的太大, 就失去意义, 变成随机算法了; 太小的话, 收敛太慢. 而事实上在遗传算法进化初期的种群, 个体之间的差异比较大, 应该选取较大的交叉概率, 从而起到加强遗传算法全局搜索的能力的作用, 也可以加快种群进化速度; 进化后期的种群, 个体之间的差异比较小, 这种交叉算子所带来的搜索能力降低, 为了减少对优秀个体的破坏, 造成运算效率低下, 选择取较小的交叉概率. 如式(8)所示, 本文给出了一种可以随着进化代数变化的交叉概率, 代数增大, 交叉概率降低.

$$P_c(i) = pc - \frac{i^4 \times 0.3}{G_{zz}^4} \quad (8)$$

其中 $P_c(i)$ 为第 i 代交叉概率, $pc=0.6$ 是初始交叉概率, $eratum$ 是进化终止代数.

3) 变异概率 P_m

变异算子的作用强度由变异概率 P_m 决定. 进化初期的种群个体, 有着比较大的差异, 此时应该选取较小的变异概率, 使交叉算子的影响更为突出; 在进化后期的种群个体, 比较相近, 此时应该选取较大的变异概率, 使种群的多样性增强, 从而减少遗传算法陷入局部最优解的可能性. 为了避免适应度大的个体被破坏, 促进适应度小的个体进化, 双层变异概率概念的提出, 可以达到以上目的, 它是一种首先对第 i 代种群的本代变异概率 $P_m(i)$ 定义, 之后再确定该代个体的第 j 个个体变异概率 $pm(j)$. 本代变异概率 $P_m(i)$ 随进化代数的增加而逐步加大, 如式(9)所示.

$$P_m(i) = 0.01 - \frac{i^4 \times 0.3}{G_{zz}^4} \quad (9)$$

其中 $eratum$ 是进化终止代数. 式(3-7)说明, 变异概率可以从 0.01 随着代数一直变化到 0.3.

当由上式得到了第 i 代种群的变异概率 $P_m(i)$ 之后, 就可以确定第 i 代种群中第 j 个个体的变异概率 $pm(j)$, 具体如式(10)所示.

$$pm(j) = \begin{cases} P_m - \frac{(f_{\max} - f_j)(P_m - 0.001)}{(f_{\max} - f_{avg})}, & f_j \geq f_{avg} \\ P_m, & f_j < f_{avg} \end{cases} (j=1, 2, \dots, M) \quad (10)$$

4) 进化终止代数 eranum

算法运行的终止条件一般是运行到固定的进化代数即停止, 这里设定进化终止代数 GZZ=30.

3.3 遗传算法优化隶属度函数的流程图

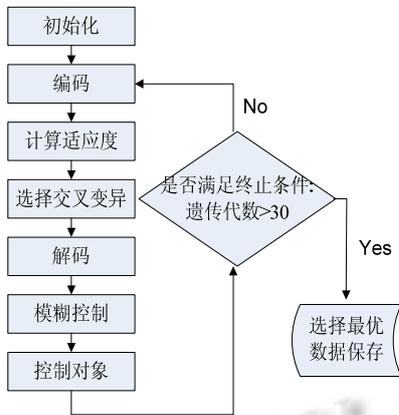


图 10 遗传算法流程图

4 仿真结果分析

为了验证遗传算法优化模糊控制隶属函数的方法比单纯的模糊控制要更优秀, 本文利用 matlab 做了仿真比较.

系统参数的设置:

负荷给定值: 50%

温度给定值: 67.5°C

入口负压给定值: -300Pa

仿真时间为 2000s

无扰动情况下, 模糊控制与遗传算法优化的模糊控制对比图(如图 11).

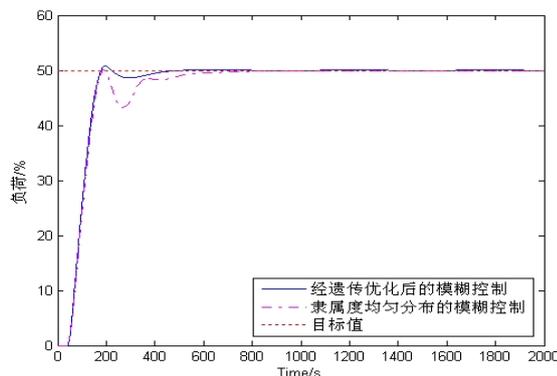


图 11 负荷响应比较

从图中可以看出, 遗传算法优化后的模糊控制中, 磨煤机负荷的上升时间为 480s, 明显小于均匀分布的

模糊控制; 出口温度的上升时间虽然没有减少, 但是超调量为 3.7%, 较模糊控制的超调量, 显著减少, 在实际运行当中, 温度要求在 65 到 70, 显然进过优化后的控制更能保证安全运行; 入口负压控制过程中波动较小, 稳定性也得到了提升.

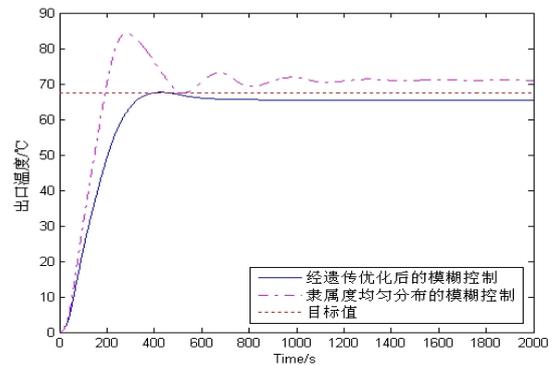


图 12 温度响应比较

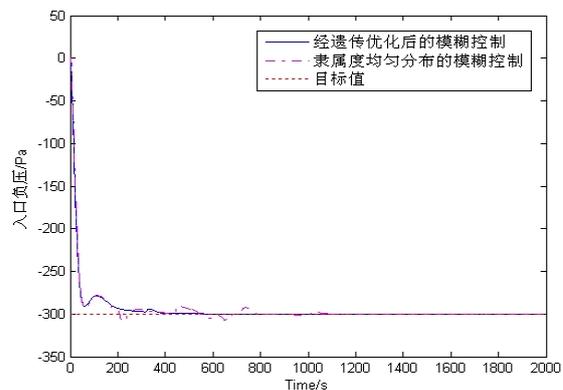


图 13 入口负压响应比较

下面仿真带有扰动时的控制图形

给煤机扰动为: -50

热风门扰动为: 5%

再循环门扰动为: 10%

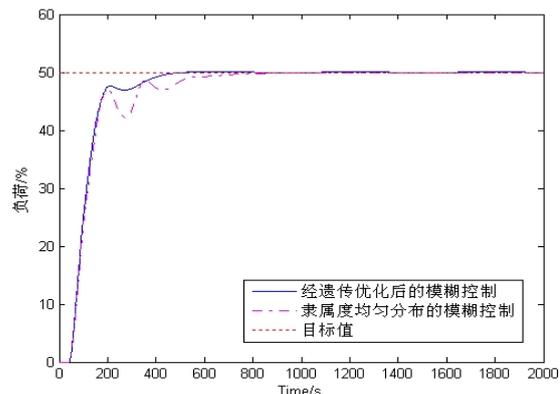


图 14 负荷响应比较

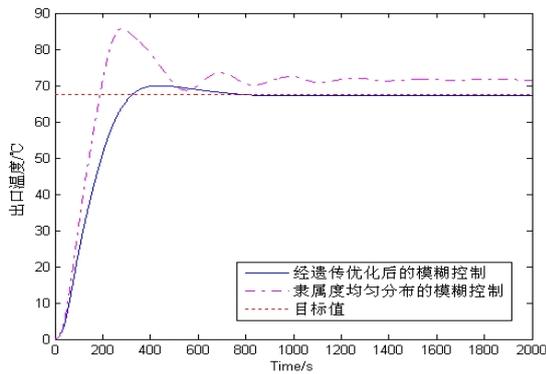


图 15 温度响应比较

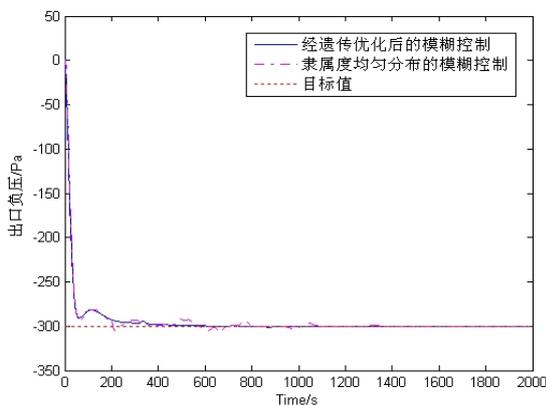


图 16 入口负压响应比较

从图中可以看出, 遗传算法优化后的模糊控制中, 在干扰情况下, 系统的负荷在 50s 时受到干扰影响但是迅速回升, 比均匀分布的模糊控制恢复更快, 提高了系统的抗干扰性。

5 结语

基于该系统大延迟, 非线性, 强耦合的特点, 首先通过专家经验制定了模糊控制规则, 又进一步使用遗传算法对隶属度函数进行了优化, 解决了由于专家经验的不准确性而带来的缺陷, 并用 MATLAB 进行了建模和仿真, 仿真结果显示, 控制的超调量减小, 控制时间缩短, 稳态误差减小, 提高了磨煤机控制性能, 证明了系统在快速性, 稳定性, 鲁棒性都优于普通的模糊控制。

参考文献

1 孙丽华, 曲莹军. 钢球磨煤机负荷检测方法的研究及实现. 热力发电, 2004, 33(11): 25-27.

- 2 刘长良, 梁伟平, 董泽. 钢球磨煤机制粉系统的递阶模糊控制. 动力工程, 2002, 22(5): 1969-1973.
- 3 孙增圻. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- 4 王蕾, 沈庭芝, 招扬. 一种改进的自适应遗传算法. 系统工程与电子技术, 2002, 24(5).
- 5 朱坚民, 李孝茹, 周冬儿. 基于改进自适应遗传算法的固定结合面动态特性参数优化识别. 中国机械工程, 2014, (3).
- 6 唐世浩, 朱启疆. 遗传算法中初始群体与交叉、变异概率对解的影响及其解决方案. 科技通报, 2001, 17(3).
- 7 张超群, 郑建国, 钱洁. 遗传算法编码方案比较. 计算机应用研究, 2011, 3: 819-822.
- 8 Jun C, Lim TCP, Cheah YN. A modified micro genetic algorithm for undertaking multi-objective optimization problems. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2013, (3).
- 9 Sbarbaro D. Neural control of a steel rolling mill. IEEE Control Systems Magazine 1993, 13(4): 69-75.
- 10 王斌, 郭翠爱, 温曙光. 钢球磨煤机的模糊控制. 热力发电, 2004, (11): 51-55.
- 11 Mamdani EH. Applications of fuzzy algorithms for dynamic plant. Proc. IEEE, 1974, 121(12): 1585-1588.
- 12 周秋月. 300MW 机组磨煤机制粉系统智能控制研究. 南京师范大学学报(工程技术版), 2003, 3(1): 54-61.
- 13 周洪, 李志斌, 等. 基于 PLC 的火电厂钢球式磨煤机制粉系统模糊神经元控制系统. 中国电力, 2002, 35(7): 66-68.
- 14 Itch O, Gotoh K, Nakayama T, Takamizawa S. Application of fuzzy control to activated sludge process. Proc. IFSA Congress. Tokyo, Japan. July, 1987. 282-285.
- 15 袁丽华, 黎明, 李军华. 进化优化小生境遗传算法控制参数的研究. 计算机工程, 2006, 13: 206-208.
- 16 兰吉勇. 钢球磨煤机制粉系统控制研究及在闵行发电厂的实际应用[学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- 17 Maldonado Y, Castillo O, Melin P. Optimization of membership functions for an incremental fuzzy PD control based on genetic algorithms. Soft Computing for Intelligent Control and Mobile Robotics, 2011: 195-211.