

基于免疫进化算法的过热汽温自整定 PID 控制研究

谈英姿, 沈 炯, 吕震中

(东南大学自控系, 江苏 南京 210096)

摘要: 根据生物免疫系统特性, 提出了一种基于免疫进化算法的 PID 控制器参数自整定方法。免疫进化算法引入记忆细胞和抗体浓度调节机制, 具有种群多样性, 能保证快速稳定地收敛到全局最优解。通过对过热汽温控制系统的仿真, 表明该算法是有效的。

关键词: 免疫进化算法; PID 参数自整定; 过热汽温控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

1 前言

PID 控制器及其改进型在工业过程控制中最常见^[1]。传统的电站锅炉过热汽温控制系统大多采用常规的 PID 串级控制策略。过热汽温对象具有时变性、不确定性和非线性等特点, 常规的 PID 控制器往往难以取得良好的控制品质。

要获得高品质控制效果, 有必要根据运行工况的改变实现 PID 参数的自动整定。结合智能控制理论的研究, 已提出了多种 PID 控制器参数寻优的方法: (1) 具有模糊推理的 PID 参数自整定方法^[2], 有较强的适应性, 但调节过程复杂, 需掌握对象较充分完备的先验知识。(2) 基于神经元的 PID 学习控制器^[3], 神经网络参数调整目标单一, 不能得到较高的控制性能。(3) 基于遗传算法(GA)的 PID 参数优化算法^[4-6], 根据性能指标构建适应度函数, 通过随机搜索以获得最佳的 PID 参数, 而传统 GA 方法存在早熟问题, 容易陷入局部极值点。

根据免疫系统的抗体产生机制, 将先验知识转化为记忆细胞, 并引入抗体多样性和浓度调节机制, 本文提出一种基于免疫进化算法的 PID 参数自整定方法。

2 基于免疫进化算法的 PID 参数自整定

2.1 免疫系统

免疫系统对侵入生物体的非己成分(如细胞、病毒和各种病原体)及发生了突变的自身细胞(如癌细胞)具有精确识别、适度应答和有效排除的能力, 并能保留记忆反应^[7]。免疫系统具有产生多样性抗体的能力, 免疫响应过程中根据抗体的浓度进行促进和抑制调节, 以维持免疫系统的平衡稳定。

2.2 免疫进化算法的要点

2.2.1 记忆细胞及多样性

免疫系统在产生初次免疫响应之后, 一部分抗体成为记忆细胞, 由于记忆细胞的存在, 即使抗原在体内消失很久(数月甚至数年或更长)以后, 仍能对再度进入体内的相应抗原迅速产生较强的再次免疫响应。将记忆细胞引入免疫进化算法, 可加快整个搜索过程。

多样性是免疫系统的重要特征之一, 免疫系统抗体具有足够的多样性, 以对付各种各样的入侵抗原。在随机搜索方法中, 如果缺乏多样性, 不仅减慢进化历程, 而且会过早地收敛于局部的极值点, 将多样性引入免疫进化算法, 能很好地保证得到高质量的搜索空间。

免疫进化算法中采用与遗传算法一致的基因编码。编码字符集大小为 s (如采用二进制编码, 字符集为 $\{0, 1\}$, $s = 2$)。假设免疫系统由 N 个抗体组成, 每个抗体有 m 个基因, 如图 1 所示。

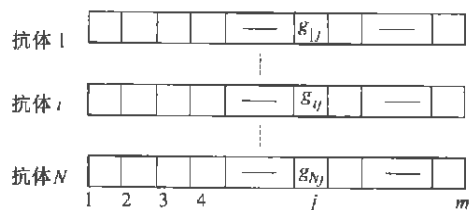


图 1 抗体的数据结构

收稿日期: 2002-03-11; 修订日期: 2002-09-20

基金项目: 教育部高等学校骨干教师基金资助项目(3103001009); 教育部博士点基金资助项目(200202860D1)

作者简介: 谈英姿(1969-)女, 上海人, 东南大学讲师

下面根据信息理论来定义免疫系统的多样性^[8]。

$$E_j(N) = -\sum_{k=1}^s P_{kj} \log\left(\frac{1}{P_{kj}}\right) \quad (1)$$

式中: $E_j(N)$ 为第 j 个基因的信息熵, P_{kj} 为第 k 个字符出现在第 j 个基因位置上的概率。

$$P_{kj} = \frac{\text{第 } j \text{ 个基因位上出现字符 } k \text{ 的总个数}}{N} \quad (2)$$

如果在位置 j 上所有抗体的基因都相同, 那么 $E_j(N)$ 等于零。

免疫系统的多样性可用平均信息熵来计算, 对于有 m 个基因的 N 个抗体免疫系统, 其平均信息熵 $E(N)$ 的计算如式(3)所示。

$$E(N) = \frac{E_1(N) + E_2(N) + \dots + E_m(N)}{m} \\ = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E_j(N) \quad (3)$$

2.2.2 免疫抑制及亲和力计算

抗体与抗原以及抗体与抗体之间的相互作用采用亲和力来描述, 能与抗原很好结合的抗体具有较高的抗原亲和力, 抗体之间亲和力大表示抗体特性比较接近。

抗体浓度则表示同类抗体在整个抗体种群中所占的比例。在免疫响应过程中, 浓度较高的抗体将会受到抑制, 这样能维持免疫响应的稳定平衡。总的来说, 在免疫调节中, 那些有高抗原亲和力且浓度较低的抗体会受到促进, 而低抗原亲和力及浓度较高的抗体将受到抑制。

(a) 抗体 i 和抗体 j 之间的亲和力 $(A_b)_{ij}$

$$(A_b)_{ij} = \frac{1}{1 + E(2)} \quad (4)$$

$E(2)$ 是抗体 i 和抗体 j 两者之间的平均信息熵。 $E(2) = 0$ 表示抗体 i 和抗体 j 的所有基因都是相同的。 $(A_b)_{ij}$ 的值介于 0 和 1 之间。

(b) 抗体 i 的浓度 C_i

$$C_i = \frac{\text{与抗体 } i \text{ 的亲和力大于 } \theta \text{ 的抗体数}}{N} \quad (5)$$

其中的 θ 是亲和力常数, 一般取 $0.9 \leq \theta \leq 1$ 。

(c) 抗体 i 与抗原的亲和力 $(A_g)_i$

$$(A_g)_i = \frac{1}{1 + t_i} \quad (6)$$

这里 t_i 表示抗原与抗体 i 之间的匹配程度。 $(A_g)_i$ 的值介于 0 和 1 之间。

2.3 基于免疫进化算法的 PID 参数自整定

在基于免疫进化算法的 PID 参数自整定中, 将表征控制系统性能的目标函数作为抗原, PID 参数作为抗体, 所要求解的最优 PID 自整定参数就是那些与抗原有最大亲和力的抗体。

2.3.1 抗体编码

在免疫进化算法中, 首先要对抗体进行编码, 本文选用搜索能力较强的二进制编码方式。采用多参数级联的方式对 PID 参数 (K_p 、 T_i 、 T_d) 进行编码, 如图 2 所示。

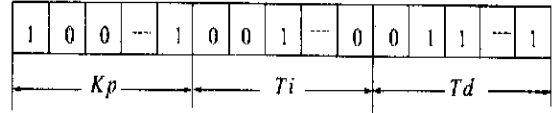


图 2 PID 参数编码图

2.3.2 目标函数

免疫进化算法就是寻找使目标函数最小的 PID 参数组合。本文采用式(7)所示的目标函数。

$$O_f = \alpha e_{\text{over}} + \beta t_s + \gamma \int e^2 dt \quad (7)$$

式中: O_f 是目标函数, e_{over} 是超调量, t_s 是调整时间, $\int e^2 dt$ 是误差平方积分, α 、 β 和 γ 是加权系数。

由于 e_{over} 、 t_s 和 $\int e^2 dt$ 的大小的变化范围是不一致的, α 、 β 和 γ 一方面具有尺度变换的作用, 另一方面能体现控制系统动态性能对稳定性和快速性的综合要求。作为尺度变换, α 、 β 和 γ 的取值要根据实际的控制系统的响应确定初值, 再根据不同的稳定性和快速性要求进行进一步调整。

2.3.3 亲和力的计算

由目标函数可得到抗原亲和力的计算公式。

$$(A_g)_f = \frac{1}{1 + O_f} \quad (8)$$

2.4 基于免疫进化算法的 PID 参数自整定的实现
算法的具体步骤如图 3 所示。整个优化参数的搜索过程由以下 7 个步骤组成:

2.4.1 抗原识别

输入目标函数和各种约束作为抗原。

2.4.2 产生抗体候选解的集合(P)

首先从一般的工程整定方法得到“粗糙”的 PID 参数值作为记忆细胞 M , 并与随机产生的初始种群 (Pr) 一起组成 $P(P = Pr + M)$ 。设抗体种群的个体

数为 N 。

2.4.3 计算亲和力

根据式(4)、式(7)和式(8),对于任一抗体 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 分别计算其抗原亲和力 $(A_g)_i$ 和抗体亲和力 $(A_b)_j$ ($j = 1, 2, \dots, N, j \neq i$)。

2.4.4 记忆细胞更新

将高抗原亲和力的抗体加入到记忆细胞,由于记忆细胞数目有限,所以在记忆细胞中用新加入的抗体取代与其亲和力最高的原有抗体。

2.4.5 促进和抑制抗体的产生

根据式(5)计算抗体浓度,并根据抗体浓度进行免疫调节,增进抗体的多样性。选择抗体的标准由抗体亲和力和浓度抑制因子两部分组成:

$$S_i = \lambda(A_g)_i + (1 - \lambda)e^{\mu C_i} \quad (9)$$

式(9)中: λ 和 μ 是加权系数,由于高亲和力的抗体得到促进,而高浓度的抗体受到抑制,所以式(9)体现了抗体种群的多样性。

2.4.6 产生抗体通过变异和交叉产生进入下一代的抗体

为了整个搜索空间更大更完全,重复执行以上四个步骤,直到终止条件(收敛判据)满足为止。

2.4.7 终止条件

本文采用了限定迭代次数以及在连续几次(如5次)迭代中的最好解都无法改善,则停止计算的混合形式的终止条件。

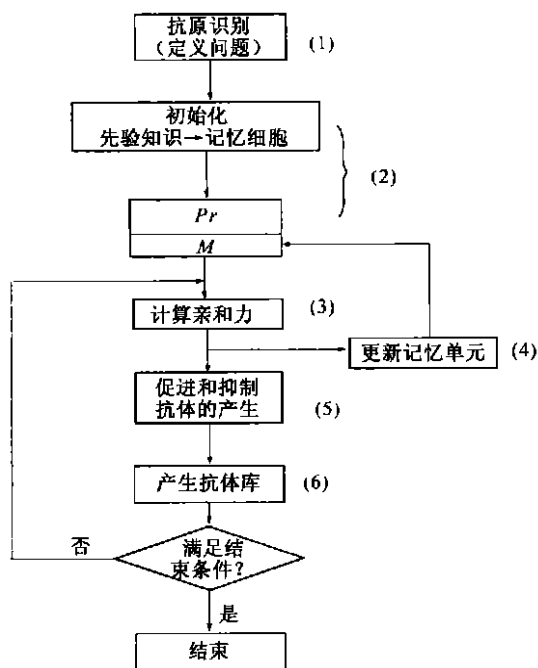


图3 免疫进化算法的流程图

从以上的实现步骤可以看出,基于免疫进化算法的PID参数自整定是通过随机搜索亲和力最大的抗体,得到控制性能最优的PID控制器的参数。

3 过热汽温控制系统的仿真研究

过热汽温过程一般可用多容惯性环节表示,由于惯性较大,目前大多数锅炉过热汽温控制系统都采用具有导前信号的串级控制系统,如图4所示。

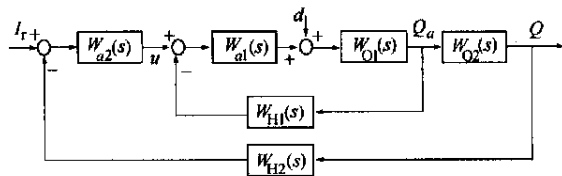


图4 锅炉过热汽温控制系统方框图

图4中, I_r 为过热汽温设定值(mA), Q_a 为导前汽温, Q 为过热汽温。 $W_{a1}(s)$ 、 $W_{a2}(s)$ 分别为汽温控制系统的副调节器和主调节器, $W_{o2}(s)$ 、 $W_{o1}(s)$ 、分别为调节对象及其导前区的传递函数, $W_{H1}(s)$ 和 $W_{H2}(s)$ 分别为导前汽温和过热汽温的测量单元, d 为扰动,主要是减温水量的自发扰动。

在PID参数自整定仿真研究中,采用文献[9]中的参数。

$$W_{o1}(s) = \frac{8}{(1 + 15s)^2} \quad ^\circ\text{C}/\text{mA} \quad (10)$$

$$W_{o2}(s) = \frac{1.125}{(1 + 25s)^3} \quad ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$W_{H1}(s) = W_{H2}(s) = 0.1 \text{ mA}/^\circ\text{C} \quad (12)$$

为保持串级系统的优点,本文仅对主调节器进行PID自整定,副调节器采用文献[9]中的控制器参数。

$$W_{a1}(s) = 25 \quad (13)$$

$$W_{a2}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (14)$$

在免疫进化算法中,各种参数考虑如下:抗体种群数 N 取为60;考虑到既要保证计算精度又要减少计算复杂性,抗体二进制编码的长度 m 选为30, K_p 、 T_i 和 T_d 每个长度都为10;记忆细胞数量为5;交叉概率为0.80;变异概率为0.01。在目标函数计算中 α 、 β 和 γ 分别取为0.5、0.02和0.8。在抗体浓度计算中 λ 和 μ 分别取为0.7和1.25。

4 仿真结果

为了评价免疫进化算法寻优 PID 参数的效果,本文对文献[10]中的控制器整定参数的系统也作了仿真,将两者进行比较。文献[10]中的系统为:

$$\begin{cases} W_{o1}(s) = 25 & (15) \\ W_{o2}(s) = \frac{1}{0.3} \left(1 + \frac{1}{45s} + 11.3s \right) & (16) \end{cases}$$

4.1 系统阶跃响应

4.1.1 系统设定值阶跃变化

过热汽温设定值 I_r 作 1 mA 阶跃变化,由免疫进化算法自寻优得到的 PID 参数为 $K_p = 2.8196$, $T_i = 58.2157$, $T_d = 26.1176$ 。图 5 所示为设定值阶跃变化的汽温响应曲线,虚线为文献[10]的 PID 控制系统,实线为免疫进化算法得到的 PID 参数控制系统的响应曲线。从图中可以看出,实线具有更小的超调和更短的调整时间。

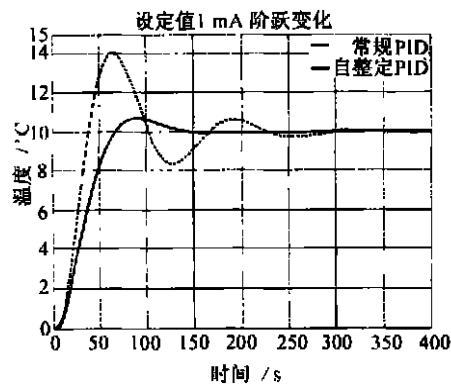


图 5 系统阶跃响应 ($I_r = 1 \text{ mA}$)

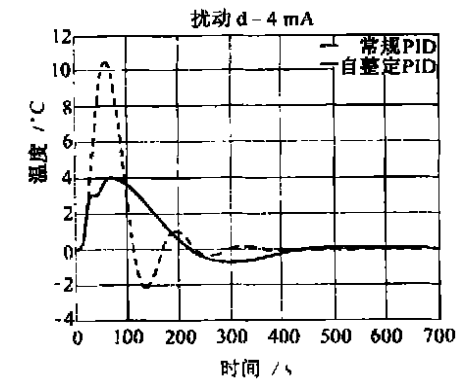


图 6 扰动 $d = 4 \text{ mA}$ 时的系统响应

这是由于扰动 d 发生在内回路,主回路的控制器对于发生在内回路的干扰抑制的快速性效果要差一

些。

4.1.3 系统模型参数变化

考虑到过热汽温的动态特性一般随工况等因素变化,现假定汽温参数在较大范围内变化。

保持 $W_{o1}(s)$ 不变,惯性增大, $W_{o2}(s)$ 变为 $W_{o2} \times (s)$ 。

$$W_{o2}^*(s) = \frac{1.125}{(1+35s)^3} \quad (17)$$

由免疫进化算法得到的 PID 参数为 $K_p = 2.8510$, $T_i = 73.5882$, $T_d = 38.8235$ 。

保持 $W_{o1}(s)$ 不变,增益变大, $W_{o2}(s)$ 变为 $W_{o2}'(s)$ 。

$$W_{o2}'(s) = \frac{1.875}{(1+25s)^3} \quad (18)$$

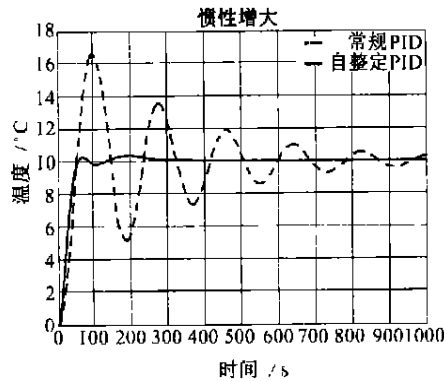


图 7 对象惯性增大

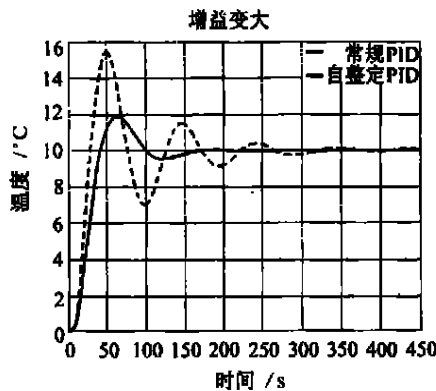


图 8 对象增益增大

如图 7 和图 8 中的虚线。而根据变化对象模型经过免疫进化算法寻优后能得到图中实线所示的较满意的控制效果。

4.2 抗体种群多样性

免疫进化算法作为一种随机搜索方法,与传统遗传算法相比,其主要优势在于种群的多样性,搜索

由免疫进化算法得到的 PID 参数为 $K_p = 1.5333$, $T_i = 59.8627$, $T_d = 24.2353$ 。图 7 和图 8 分别为对象惯性增大和增益变大后的仿真结果,虚线和实线的含义同图 5 所示。

从图中可以当对象模型变化后,如果仍然使用根据原来模型整定的 PID 参数,系统的控制性能明显变差,

空间更完全,能更好地保证得到全局最优解。

图9所示为免疫进化算法寻优过程中抗原亲和力和遗传算法的适应度变化趋势,曲线1和曲线3分别为免疫进化算法的最大抗原亲和力和平均抗原亲和力曲线;曲线2和曲线4分别为遗传算法的最大适应度和平均适应度曲线,可以看出免疫进化算法的最优解收敛较快,种群的整体进化趋势平稳。

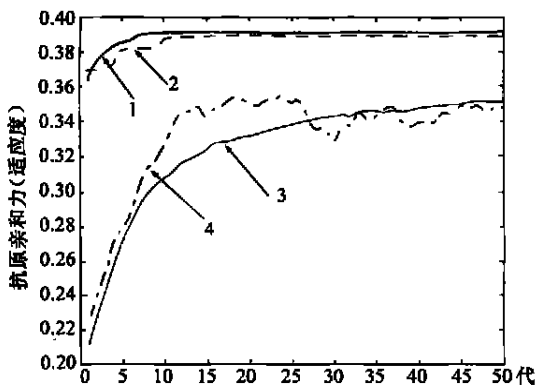


图9 抗原亲和力变化趋势

本文采用式(3)平均信息熵 $E(N)$ 分别计算遗传算法和免疫进化算法中的各代种群多样性,结果如图10所示。由于具有基于抗体浓度的抑制和促进抗体生长的机制,在进化过程中,免疫进化算法的种群多样性下降缓慢,而遗传算法的种群多样性下降较快。

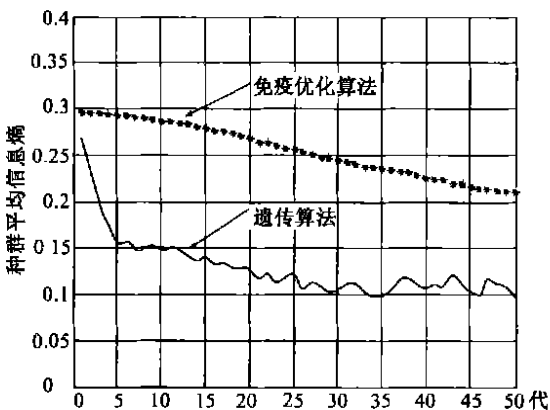


图10 种群多样性比较

免疫进化算法作为随机优化方法对那些精确模型系统的PID参数自寻优及精确调整具有广泛的应用价值。与基于传统遗传算法的PID参数优化方法相比,采用免疫进化算法进行PID参数自整定有如下优点:(1)在记忆细胞基础上运行,确保了快速收敛于全局最优解;(2)有计算亲和力的程序,反映了生物免疫系统的多样性;(3)通过促进或抑制抗体的产生,体现了免疫反应的自我调节功能,能更快更稳定地搜索到最优的PID控制器参数。

今后工作将进一步深入研究免疫进化算法的理论问题,包括算法的收敛性和收敛速度及参数的选择等。免疫进化算法的重要特性是具有“记忆”和抗体多样性,下一步PID参数在线自整定研究的重点在于利用免疫特性将离线优化参数存储在“抗体库”中,在线寻优时可根据被控对象的现场信息进行抗原识别,利用抗体多样性和记忆细胞快速地得到优化PID整定参数,以适应不同的被控过程。

参考文献:

- [1] 王伟,张晶涛,柴天佑. PID参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.
- [2] 涂象初,汪培庄. 自寻优调节器与人工智能控制[J]. 模糊数学, 1985, 5(3): 81-85.
- [3] 吕剑虹,张世军,陈来九,等. 智能PID控制器的设计及其应用研究[J]. 动力工程, 1995 15(4): 6-10.
- [4] HUANG W. Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems [J]. *Energy and Buildings* 1997, 26(3): 277-282
- [5] 占永明,罗中明,鲍绍宣,等. 基于遗传算法PID参数的自动整定[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2000, 5(2): 34-37.
- [6] 杨智,高靖. 基于遗传算法的预测自整定PID控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(1): 113-118.
- [7] 林飞卿,余传霖,何球藻. 医学基础免疫学[M]. 上海:上海医科大学出版社, 1992.
- [8] HUANG SHYH-JIER. Enhancement of thermal unit commitment using immune algorithms based optimization approaches [J]. *Electrical Power and Energy System* 1999 21(4): 245-252.
- [9] 陈来九. 热工过程自动调节原理和应用[M]. 北京:水利电力出版社, 1982.
- [10] HANG C C, ASTROM K J, HO W K. Refinements of the ziegler-nichols tuning formula [J]. *IEE Proceedings D- Control Theory and Applications* 1991, 138(2): 111-118.

5 结论

(渠源 编辑)

Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 50 ~ 52, 77

With a liquid-phase residual saturation degree S_r being assigned a definition a wet capillary porous media drying-zone is divided into a wet zone and a dry one. On this basis set up was a phase-transformation heat transfer and mass transfer constant-pressure model for the drying process of a wet region with liquid-phase saturation-degree S and temperature T serving as parameters. By using a full-hidden finite difference method a numerical calculation was conducted of the above-cited model. The numerical solution indicates that with the help of the model one can accurately forecast the change of the liquid-phase saturation-degree S and temperature T in the drying process of the wet region. **Key words:** capillary porous media, phase transformation, heat transfer and mass transfer

电磁式在线自动平衡系统及其动平衡方法研究 = The Study of An On-line Automatic Dynamic Balancing System and Its Dynamic Balancing Method When Used on a Flexible Rotor [刊, 汉] / WANG Xi-xuan, ZENG Sheng (Chemical Machinery Research Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 53 ~ 57

An innovative on-line automatic dynamic balancing system is proposed along with a description of its working principle, construction and dynamic balancing method. The system is equipped with one or more than one automatic dynamic balancing head on the shaft of a rotating machine. The stator of the balancing head is capable of producing a non-contact electromagnetic force to drive the balancing disc installed on a rotating shaft. Each balancing head has two or three balancing discs, each of which has been provided with a balancing block (or called the balancing mass). The total balancing vector as a resultant composed of the balancing masses of the two or three balancing discs can balance the loss of balance of the rotor. The vibration of the shaft and positioning of the balancing discs can be detected by relevant sensors. The balancing disc assumes a single-direction movement mode, which can considerably simplify a control system. The movement principle and procedures of the balancing disc aimed at a dynamic balancing of the rotor are also discussed. The dynamic balancing test has been successfully conducted on an experimental test rig incorporating a flexible rotor. **Key words:** automatic dynamic balancing, on-line dynamic balancing, electromagnetic balancing head

基于免疫进化算法的过热汽温自整定 PID 控制研究 = A Study of the Immune Evolutionary Algorithm-based Self-tuning PID Control of Superheated Steam Temperature [刊, 汉] / TAN Ying-zi (Automation Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), SHEN Jiong, LU Zhen-zhong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 58 ~ 62

In accordance with biological immune-system characteristics the authors have come up with a method of self-tuning PID controller parameters on the basis of an immune evolutionary algorithm. The immune evolutionary algorithm has introduced memory cells and features diversity and an anti-body concentration regulation mechanism, ensuring a rapid and stable convergence to attain an overall optimal point. A simulation of the superheated steam temperature control system has demonstrated the validity of the recommended algorithm. **Key words:** immune evolutionary algorithm, PID parameter self-tuning, superheated steam temperature control

火电厂耐热钢承压部件的蠕变损伤研究 = A Study of the Creep-related Damage of Heat-resistant Steel Pressure Parts of a Thermal Power Plant [刊, 汉] / GUO Jing (Institute of Power & Mechanical Engineering under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072), ZHAN Ping (Institute of Urban Construction under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072), WANG Wen-an (Institute of Civil Engineering under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 63 ~ 66

Heat-resistant steel materials are often used for the pressure parts and components of a thermal power plant, such as steam pipelines. After being subjected to high-temperatures and high-pressures lasting for a long time and with the even-