

文章编号: 0258-0926(2015)03-0062-04; doi:10.13832/j.jnpe.2015.03.0062

基于人工免疫的直流蒸汽发生器压力控制研究

成守宇, 李程, 彭敏俊, 刘新凯

哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨, 150001

摘要:以生物免疫中 T 细胞和 B 细胞间的协同免疫机理为基础, 结合多抗原多抗体协调免疫机理, 提出一种分布式-多输入多输出耦合的人工免疫控制策略, 并将该策略应用于直流蒸汽发生器 (OTSG) 压力控制。为了验证该控制策略, 在 1 台快堆仿真系统中进行了仿真实验。仿真测试结果表明, 该控制策略较比例、积分、微分 (PID) 控制具有更小的超调量和调整时间, 能够有效改善 OTSG 压力和相关参数的动态运行特性。

关键词:直流蒸汽发生器 (OTSG); 人工免疫; 分布式控制

中图分类号: TP353 文献标志码: A

Research of Pressure Control Based on Artificial Immune Control of Once-through Steam Generator

Cheng Shouyu, Li Cheng, Peng Minjun, Liu Xinkai

Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China

Abstract: The paper proposes a new control strategy to apply in the field of pressure controller of once-through steam generator. The strategy is distributed and multiple input and output coupling Artificial immune control strategy which is based the thought of decentralized control of the distributed control system, the immune mechanism of B-cell co-operating with T-cell, and the biological immune mechanism of antigens and antibodies interacting. In order to verify the control strategy, simulation experiment has been carried out in a simulator of fast reactor. The simulation results show that the new control strategy has small overshoot and shorter steady time compared with conventional PID control strategy, and it can effectively improve the dynamic operating characteristics of pressure and related parameters of once-through steam generator.

Key words: Once-through steam generator, Artificial immune system, Distributed control

0 前言

实验快堆的蒸汽供应系统采用直流蒸汽发生器 (OTSG), 没有汽-水分离器, 结构相对简单; 水通过蒸发段进入过热段之后所产生的汽是过热蒸汽, 可提高快堆电厂的热效率; 但其水容积小, 蓄热能力小, 并且数学模型存在高度非线性、不确定性^[1]; 在受到外部干扰或负荷动态变化的过程中, 主蒸汽压力控制采用简单的比例、积分、微分 (PID) 控制很难满足控制要求, 所以对其给水控制器及相关控制器的设计要求非常高。

为提高 OTSG 压力控制效果, 本文结合 OTSG 上述特点, 将多抗原多抗体交叉免疫反馈机理引

入控制器设计中, 并提出分布式-多变量耦合的人工免疫 (AIS) 控制策略思想, 最后将提出 AIS 应用到 OTSG 控制当中。

1 免疫机理与免疫控制器算法

基于生物免疫中 T 细胞和 B 细胞间的协同免疫机理^[2-5], 推理免疫控制器算法如下:

假设第 k 代辅助细胞 Th 浓度为:

$$Y_{Th} = F_h[Y_{Ag}(k)] \quad (1)$$

式中, Y_{Th} 为第 k 代辅助细胞 Th 浓度; $F_h[\cdot]$ 表示为非线性函数; $Y_{Ag}(k)$ 为第 k 代抗原浓度; 下标 Ag 表示抗原。

免疫系统中辅助细胞Th对抗体Ab有促进作用，而抑制细胞Ts对抗体有抑制作用^[2,5]，第k代抗体Ab细胞浓度 $Y_{Ab}(k)$ 为辅助细胞Th浓度 $Y_{Th}(k)$ 与Ts细胞浓度 $Y_{Ts}(k)$ 的差值：

$$Y_{Ab}(k) = Y_{Th}(k) - Y_{Ts}(k) \quad (2)$$

假设 $Y_{Ts}(k)$ 细胞浓度与d代以前浓度差 $\nabla Y_{Ab}(k-d)$ 有关，即：

$$\nabla Y_{Ab}(k-d) = Y_{Ab}(k-d) - Y_{Ab}(k-d-1) \quad (3)$$

$$Y_{Ts}(k) = f_a[\nabla Y_{Ab}(k-d)] \quad (4)$$

式中， f_a 表示 $Y_{Ts}(k)$ 细胞浓度与d代以前浓度差 $\nabla Y_{Ab}(k-d)$ 为线性函数关系。

将式(1)、式(4)代入式(2)，可得：

$$Y_{Ab}(k) = F_h[Y_{Ag}(k)] - F_h[Y_{Ag}(k)] \cdot \frac{f_a[\nabla Y_{Ab}(k-d)]}{F_h[Y_{Ag}(k)]} \quad (5)$$

令 $\eta = F_h[Y_{Ag}(k)]^{-1}$ ，则式(5)可表达如下：

$$Y_{Ab}(k) = F_h[Y_{Ag}(k)] \cdot \{1 - \eta f_a[\nabla Y_{Ab}(k-d)]\} \quad (6)$$

若以控制器中的偏差 $e(k)$ 为抗原，以控制器输出 $u(k)$ 为抗体，则可表示为：

$$u(k) = F_h[e(k)] \cdot \{1 - \eta f_a[\nabla u(k-d)]\} \quad (7)$$

式中， $F_h[e(k)]$ 可以根据所处理的控制规律进行选择； $f_a[\nabla u(k-d)]$ 取具有S形状的表达式，如式(8)^[3]：

$$f_a[\nabla u(k-d)] = k \left\{ -0.5 + \frac{1}{1 + \exp[-\nabla u(k)]} \right\} \quad (8)$$

基于式(7)可设计出免疫P控制器和免疫PID

控制器，免疫P控制器具体算法见式(9)，而免疫PID控制器算法见式(10)：

$$u(k) = K \cdot e(k) \cdot \{1 - \eta f_a[\nabla u(k-d)]\} \quad (9)$$

$$u(k) = \left\{ K_1 \cdot e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \times \{1 - \eta f_a[\nabla u(k-d)]\} \quad (10)$$

式中， K 表示免疫P控制器比例增益系数； K_1 、 T_I 、 T_D 、 T 、 j 分别表示免疫PID控制器的比例增益系数、积分时间、微分时间、采样时间、离散采样时刻点。

2 基于人工免疫控制机理的 OTSG 给水控制研究

当蒸汽发生器给水流量（或蒸汽流量）变化或产汽量与排汽量不匹配，都会造成过热蒸汽母管汽压偏离预定范围。调节蒸汽母管汽压需要调节过热器通往汽轮机的进汽调节阀，还得根据钠侧热功率和蒸汽发生器出口钠温进行给水流量的调节，而给水流量的调节与给水调节阀和给水泵有关，为了使给水调节阀获得较好的流量特性，往往需要保证给水调节阀前后压差保持不变，而保持压力不变需要控制给水泵的转速。

本文基于分布式-多变量耦合（D-MIMO）的人工免疫控制策略思想设计的 OTSG 压力控制系统如图1所示。分布式-多变量耦合的免疫控制策略的基本原理为：将多抗体与多抗原分别对应于多变量输入输出控制系统的控制输出量和输入偏

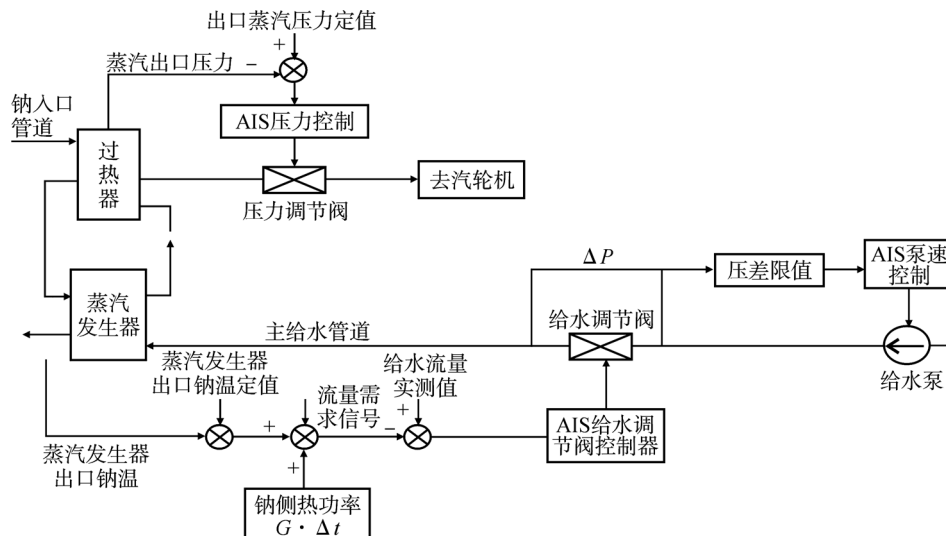


图1 基于D-MIMO人工免疫控制策略的OTSG压力控制系统示意图

Fig1. Schematic Diagram of OTSG Pressure Control System Based on D-MIMO Coupling ARTIFICIAL Immune Control Strategy

差信号,多抗原多抗体的交互作用机理与多变量输入输出控制系统耦合免疫控制类似。

分布式控制策略将每一个抗体输出作为一个控制器,分布式策略为:免疫系统在机体免疫应答调理过程中,不同的入侵抗原通过机体免疫应答激活不同的抗体,从而由抗体来毁灭抗原,控制机体使之处于安全正常,即各分布式控制器根据各自偏差信号产生不同的控制输出,从而使偏差尽快减小或消除。

人工免疫控制器(AIS)设计为:分别将各控制目标参数与预期值的偏差作为抗原,将各抗体(即免疫控制器的输出)作为消除偏差的控制信号。本文采用给水流量变化信号和给水流量偏差的变化来作为人工免疫控制器的输入变量,经过免疫算法的计算产生控制量,改变给水调节阀开度来保证给水流量的控制;给水泵控制的输入变量为给水调节阀前后压差与定值的差值,通过免疫算法计算的输出量来调整泵速;汽轮机进汽门前的压力控制中采用主蒸汽母管的压力与定值的差值和偏差的变化量作为输入变量,经过免疫算法产生汽轮机进汽阀的控制量。直流蒸汽压力控制的压力调节阀、给水调节阀、给水泵转速控制等皆采用免疫PID控制器。

3 仿真测试及结果分析

为研究D-MIMO免疫控制的控制效果,以1台全范围实验快堆仿真系统为研究平台,将新控制策略的蒸汽发生器控制系统加入到实验快堆仿真机的仿真程序中,并且加入控制接口变量,可使基于新控制策略的控制程序与原仿真控制程序实现互相切换。为验证其具有很强的负荷跟踪和抗干扰能力,堆机运行控制方案为“机跟堆模式”,使核功率从61 MW分别降低到59.7、58.6、59.9 MW。基于AIS控制和传统PID控制的降功率过程,OTSG及相关系统的主要参数曲线见图2~图5;基于AIS控制和传统PID控制的升功率过程OTSG及相关系统的主要参数曲线见图6~图9。

从升降功率各变化曲线可知(除核功率曲线外),AIS控制的各参数较经典PID控制调整时间缩短,且AIS比PID控制器的参数超调量要小,系统相对平稳,能够很好克服由于功率等变换而引起的扰动。核功率曲线基本相同,原因是功率调节系统采用原仿真系统的方案且采用“机跟堆

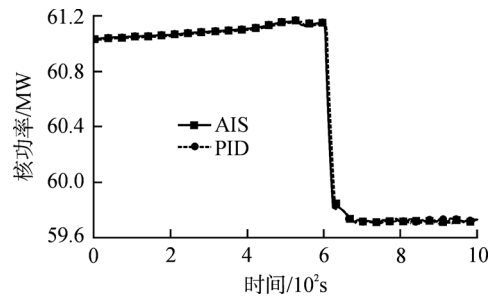


图2 降功率过程中核功率仿真曲线

Fig. 2 Simulation Curve of Nuclear Power while Reducing Nuclear Power

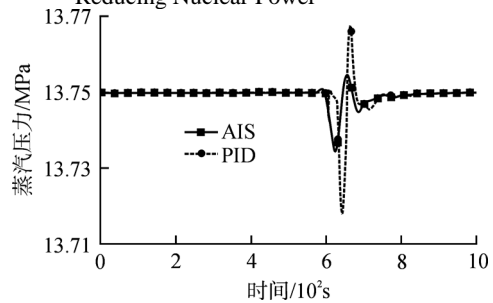


图3 降功率过程中过热器出口母管蒸汽压力仿真曲线
Fig. 3 Simulation Curve of Steam Pressure of Super-heater Outlet Main Pipe while Reducing Nuclear Power

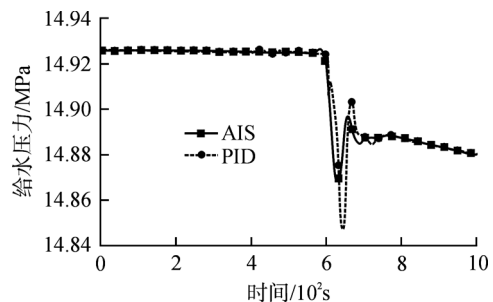


图4 降功率过程中给水压力仿真曲线

Fig. 4 Simulation Curve of Feed Water Pressure while Reducing Nuclear Power

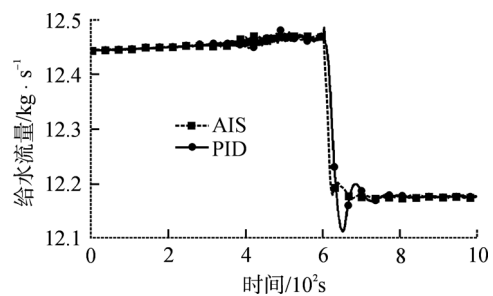


图5 降功率过程中给水流量仿真曲线

Fig. 5 Simulation Curve of Feed Water Flow while Reducing Nuclear Power

模式”,其蒸汽系统对功率调节影响不大。仿真结果表明:AIS控制器能很好地控制OTSG到达稳定值,AIS控制性能明显优于经典PID控制,控制

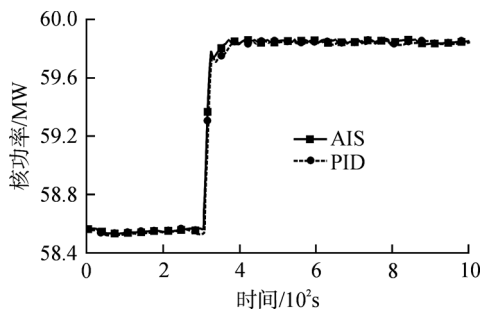


图 6 升功率过程中核功率仿真曲线

Fig. 6 Simulation Curve of Nuclear Power while Inducing Nuclear Power

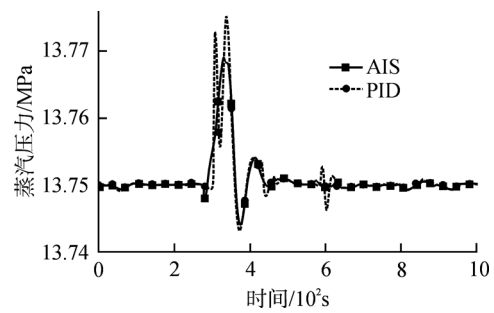


图 7 升功率过程中过热器出口母管蒸汽压力仿真曲线

Fig. 7 Simulation Curve of Steam Pressure of Super-heater Outlet Main Pipe while Inducing Nuclear Power

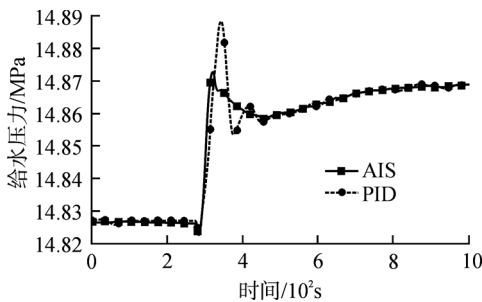


图 8 升功率过程中给水压力仿真曲线

Fig. 8 Simulation Curve of Feed Water Pressure while Inducing Nuclear Power

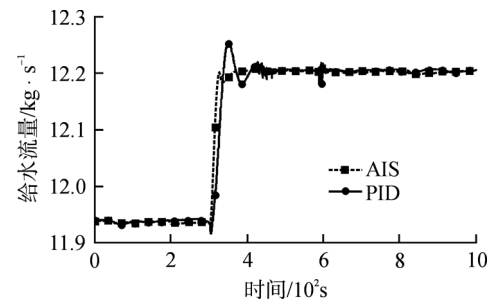


图 9 升功率过程中给水流量仿真曲线

Fig. 9 Simulation Curve of Feed Water Flow while Inducing Nuclear Power

效果有所提高，验证了本文方案的合理有效性。

4 结论

借鉴生物免疫中 T 细胞和 B 细胞间的协同免疫机理，提出一种人工免疫控制算法，参考多抗原多抗体交叉免疫反馈机理提出分布式-多变量耦合的 AIS 控制策略思想，最后将提出控制策略应用到 OTSG 控制当中。为了验证本文分布式-多变量耦合的人工免疫控制的控制效果，分别将各 AIS 控制器分别加入到全范围实验快堆仿真系统中。仿真测试结果表明：AIS 控制器在调节时间和超调量方面要优于经过优化 PID 控制参数的控制效果，且满足各工况的控制需求。该 AIS 控制器具有很强的自适应性、鲁棒性和抗干扰能力，

能够更好地控制 OTSG 出口蒸汽压力的动态变化，这对 OTSG 压力的实际控制系统设计具有一定的参考意义。

参考文献：

- [1] 夏国清, 艾明, 张伟. 基于模糊神经网络的直流蒸汽发生器压力协调控制[J]. 核科学与工程, 2010, 30(3): 266-271.
- [2] 莫宏伟, 左兴权. 人工免疫系统系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 付冬梅, 郑德玲. 人工免疫控制器的设计及其控制效果的仿真[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 442-445.
- [4] 李晓红, 李安伏, 牛红惠. 基于免疫机理的控制调节器设计[J]. 电气应用, 2005, 25(1): 111-113.
- [5] 张建秋, 任伟建, 武文斌. 双容对象的人工免疫控制系统[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(1): 78-80.

(责任编辑：马 蓉)