

水轮机调节系统的一种智能控制策略

钱殿伟, 陈海耿

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:将模糊控制和神经控制相结合, 设计出一种单神经元模糊自适应控制器的控制策略. 该控制策略充分利用了模糊逻辑对非线性的逼近性和神经控制自适应的特点. 将该控制策略应用于某水电站混流式发电机组, 在两种工况下进行仿真计算, 仿真结果表明, 该控制策略比常规 PID 控制系统具有更好的动态性能和适应性.

关键词:模糊控制; 神经控制; 控制策略; 自适应; 水轮机调节系统

中图分类号:TK73; TP273+.3

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2005)03-0024-03

An intelligent control strategy for hydro-turbine regulation system//QIAN Dian-wei, CHEN Hai-geng(*School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China*)

Abstract:A control strategy for single-neuron fuzzy self-adaptive controllers was designed by combination of fuzzy control with neural control. The strategy made full use of the nonlinear approximation of fuzzy logic and the self-adaptability of neural control. The application of the strategy to the simulation of operation process of mixed flow generating units at a hydropower station in two cases shows that the control strategy is of good dynamic performance and adaptability as compared with the conventional PID control system.

Key words:fuzzy control; neural control; control strategy; self-adaptation; hydro-turbine regulation system

水轮机调节系统的被控对象是一个高阶、时变、非线性和含非最小相位环节的复杂系统. 随着水电资源的大规模开发, 水发电机组的控制问题逐渐成为研究的热点. 针对我国大中型水电站广泛采用的微机调速器, 人们提出了多种新的控制策略^[1~3], 但这些控制策略的算法较为复杂, 不易于工程应用; 而且运算量大, 难以满足水发电机组的实时性要求. 因此如何将先进的理论和方法应用于水轮机调节系统成为人们关注的焦点. 本文在已有研究成果的基础上, 将模糊控制和神经控制相结合, 充分利用了模糊控制对非线性的逼近性和神经控制自适应、运算量小的特点, 提出了 PID 型单神经元模糊自适应控制策略.

1 控制策略

模糊控制常采用计算机控制方式, 二维模糊控制器实质上是 PD 型控制器, 它存在着难以消除稳态误差的缺陷. 文献[4,5]提出用并联积分环节来消除稳态误差; 文献[6,7]提出将模糊逻辑和神经网络相结合, 组成混合系统以提高控制品质, 但是由于算法过于复杂、运算量大, 工程上较难实现. 本文在二维 PD 型模糊控制器的基础上, 并联入积分环节消

除稳态误差, 再串联入运算量小的单神经元以实现控制器的自适应. 控制器的原理如图 1 所示, 图中 z^{-1} 为延迟算子, u_1 为控制量的输出, u_2 为积分的输出, w_1 和 w_2 为神经元的连接权.

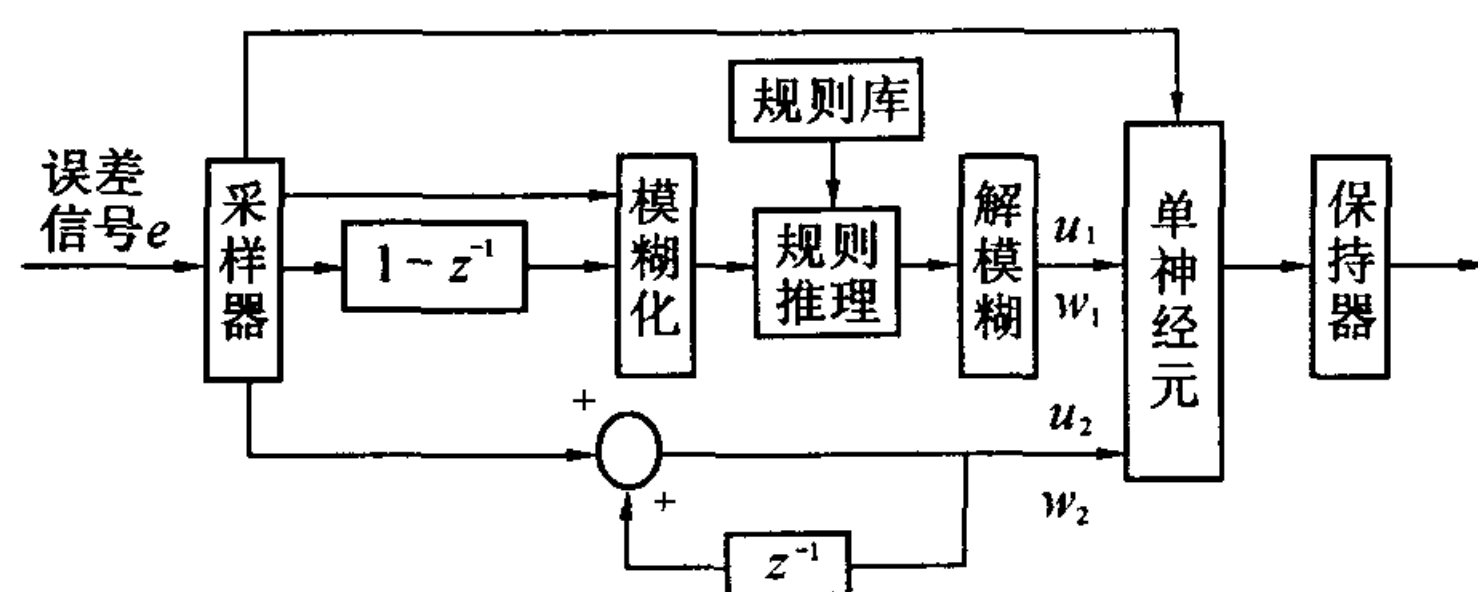


图 1 单神经元模糊自适应控制器

1.1 二维 PD 型模糊控制器设计

定义误差 e , 误差变化 Δe 和控制量的输出 u_1 的模糊子集均为 {正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}, 选择 $e, \Delta e$ 和 u_1 的离散论域分别为 $[-6, 6]$, $[-6, 6]$ 和 $[-3, 3]$; $e, \Delta e/T$ 和 u_1 的实测值为 $[-0.077, 0.077]$, $[-0.0583, 0.0583]$ 和 $[-0.04, 0.08]$, T 为采样周期; 实测值由本文模型在 matlab 中在 PID 控制器作用下的响应并结合经验综合确定.

模糊集合 A_i 和 B_j 的隶属函数图形为三角形, 如图 2 所示. 设在第 k 时刻, 输入 $e(k)$ 落在

$[e_i, e_{i+1}]$ 之间, $\Delta e(k)$ 落在 $[\Delta e_j, \Delta e_{j+1}]$ 之间, 其中 e_i 和 e_{i+1} 分别为模糊子集 A_i 和 A_{i+1} 的核, Δe_j 和 Δe_{j+1} 分别为模糊子集 B_j 和 B_{j+1} 的核, 也就是在 $e_i, e_{i+1}, \Delta e_j$ 和 Δe_{j+1} 处隶属函数的隶属度为 1. 采用 IF-THEN 形式描述控制规则 (if $e(k)$ is A_i and $\Delta e(k)$ is B_j then $u_1(k)$ is $u_{i,j}$), 按照文献[5,8]提出的代数积-加法-重心模糊推理法, 可得采样周期为 T 时, 第 k 时刻二维 PD 型模糊控制器的输出为

$$u_1(k) = A + Pe(k) + D\Delta e(k) \quad (1)$$

其中 $A = u_{i,j} - \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{e_{i+1} - e_i}e_i - \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta e_{j+1} - \Delta e_j}\Delta e_j$

$$D = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta e_{j+1} - \Delta e_j}$$

$$P = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{e_{i+1} - e_i}$$

各个模糊变量的隶属度可参照文献[9]选取, 控制规则如表 1 所示.

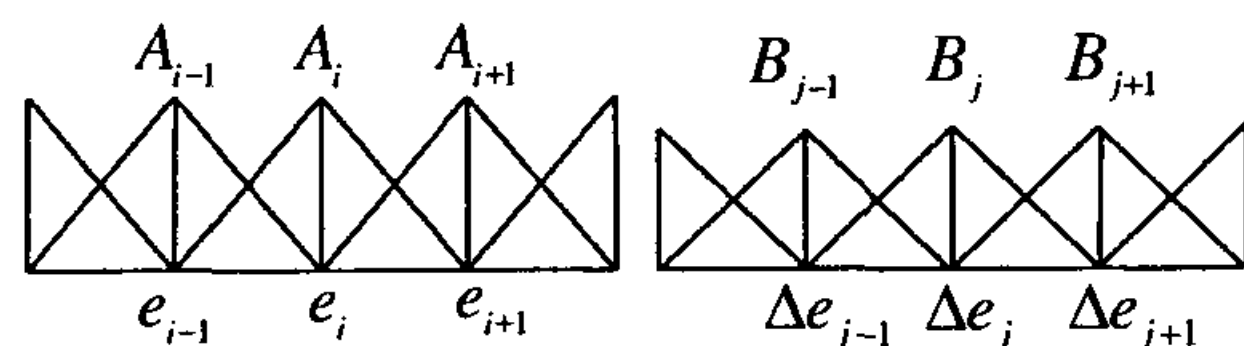


图 2 模糊子集的隶属函数

表 1 控制规则

$\Delta e(k)$	$e(k)$						
	正大	正中	正小	零	负小	负中	负大
正大	负大	负大	负大	负大	负小	负小	负小
正中	负大	负大	负中	负中	负小	正小	正中
正小	负大	负中	负中	负小	正小	正中	正中
零	负中	负中	负小	零	正小	正中	正大
负小	负中	负中	负小	正小	正中	正中	正大
负中	负中	负小	正小	正中	正中	正大	正大
负大	正小	正小	正小	正大	正大	正大	正大

1.2 单神经元设计

单神经元的输入为二维 PD 型模糊控制器输出和并联的积分环节输出, 采用有监督的 Hebb 学习规则^[10]调整神经元的连接权, 通过在线调整单神经元的两个输入端的连接权来实现其自适应, 学习算法如下:

$$u(k+1) = u(k) + \sum_{i=1}^2 \bar{w}_i(k) u_i(k) \quad (2)$$

$$\bar{w}_i(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{j=1}^2 |w_j(k)|} \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta e(k) u(k) u_i(k) \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

于是, 控制对象的输入为

$$u(k) = w_1(k)(A + Pe(k) + D\Delta e(k)) + w_2(k) \sum e(k) \quad (5)$$

式中: η 为学习速率. 可见, 通过单神经元的训练算法调整连接权 w_1 和 w_2 , 相当于综合调整比例、积分和微分各项的系数, 进而实现控制器的自适应, 以保持较好的控制性能.

2 对象的数学模型

水轮机调节系统通常由液压随动系统、水轮机及引水系统、发电机及负载组成, 对于混流式发电机组, 采用刚性水击模型, 单机带孤立负荷, 按文献[11]对各个环节进行简化描述:

液压随动系统传递函数

$$G_y(s) = \frac{1}{T_y s + 1} \quad (6)$$

引水系统传递函数

$$G_h(s) = -T_w s \quad (7)$$

水轮机数学模型为

$$m_t = e_x x + e_y y + e_h h \quad (8)$$

$$q = e_{qx} x + e_{qy} y + e_{qh} h \quad (9)$$

发电机及负载传递函数

$$G_f(s) = \frac{1}{T_a s + e_g - e_x} \quad (10)$$

其中: s 为拉普拉斯算子; $e_x, e_y, e_h, e_{qx}, e_{qy}, e_{qh}$ 为水轮机的传递系数; e_g 为发电机自调节系数; T_w 为水流惯性时间常数; T_a 为机组惯性时间常数; T_y 为接力器反应时间常数; x, y, h, q 分别为转速偏差相对值、接力器行程相对值、水压变化相对值、流量变化相对值; m_t 为水轮机的主动转矩. 由式(6)~(10)可推导出被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{T_y s + 1} \frac{e_y - (e_{qy} e_h - e_{qh} e_y) T_w s}{1 + e_{qh} T_w s} \frac{1}{T_a s + e_g - e_x} \quad (11)$$

3 实例仿真计算

将本文控制策略应用于某水电站混流式发电机组, 采用刚性水击模型, 单机带孤立负荷, 在两种工况下仿真: 工况 1 为设计水头, 额定功率出力; 工况 2 为设计水头, 部分负荷运行.

机组参数: 转轮型号 HL220-LJ-410; 单机容量 $P_r = 102.6$ MW; 设计水头 $H_r = 70$ m, 设计流量 $Q_r = 160$ m³/s, 额定转速 $n_r = 150$ r/min, 机组运动部分飞轮力矩 $GD^2 = 10790$ kN·m², 水流惯性时间常数 $T_w = 1.10$ s, 机组惯性时间常数 $T_a = 6.65$ s, 接力器反应时间常数 $T_y = 0.5$ s.

常规 PID 控制器的参数按 T Stein 推荐的方法^[11]整定: $K_p = 4.03, K_i = 1.22, K_d = 2.66$.

仿真模型参数见表 2, 控制系统见图 3. 图 4 为

在工况1下机组分别受到 10% 负荷扰动和 2 Hz 频率扰动时的响应曲线;图 5 为在工况 2 下机组分别受到10% 负荷扰动和 2 Hz 频率扰动时的响应曲线.

表 2 模型参数

工况	e_x	e_y	e_h	e_{qx}	e_{qy}	e_{qh}	e_g
工况 1	-0.30	0.74	1.46	0	0.79	0.49	0.2
工况 2	-0.26	1.29	0.92	0	1.06	0.35	0.2

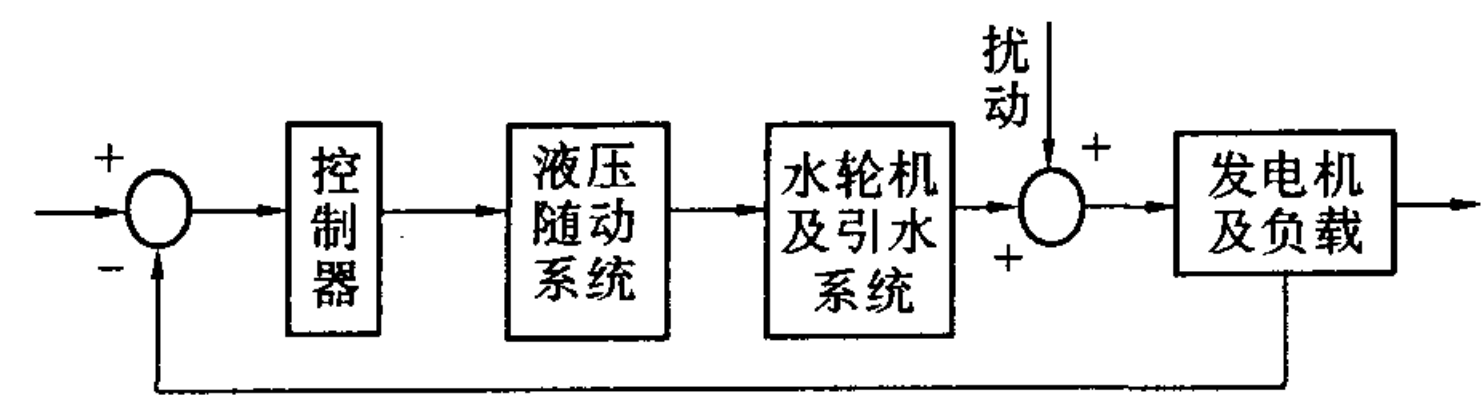


图 3 水电机组控制系统

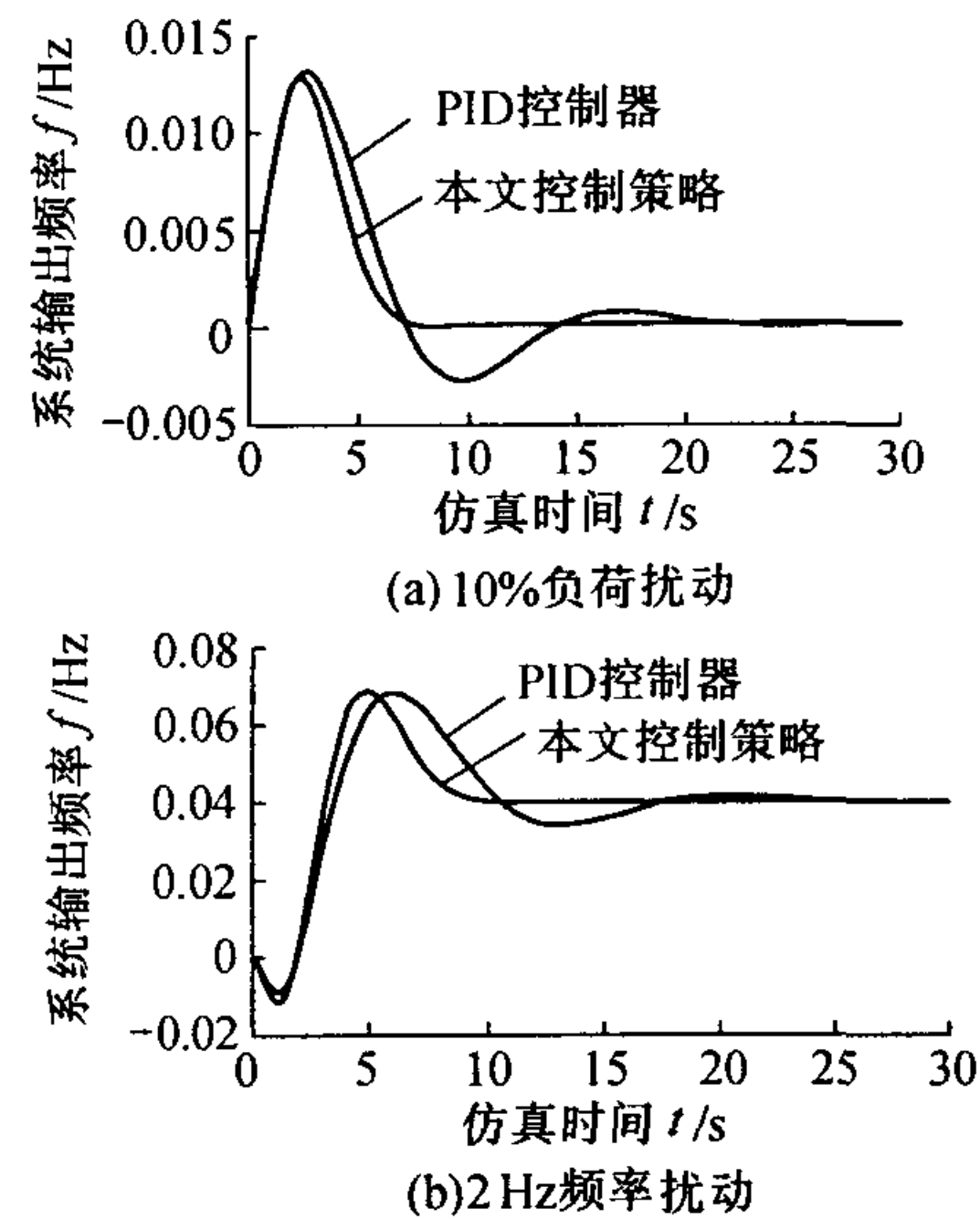


图 4 工况 1 机组响应曲线

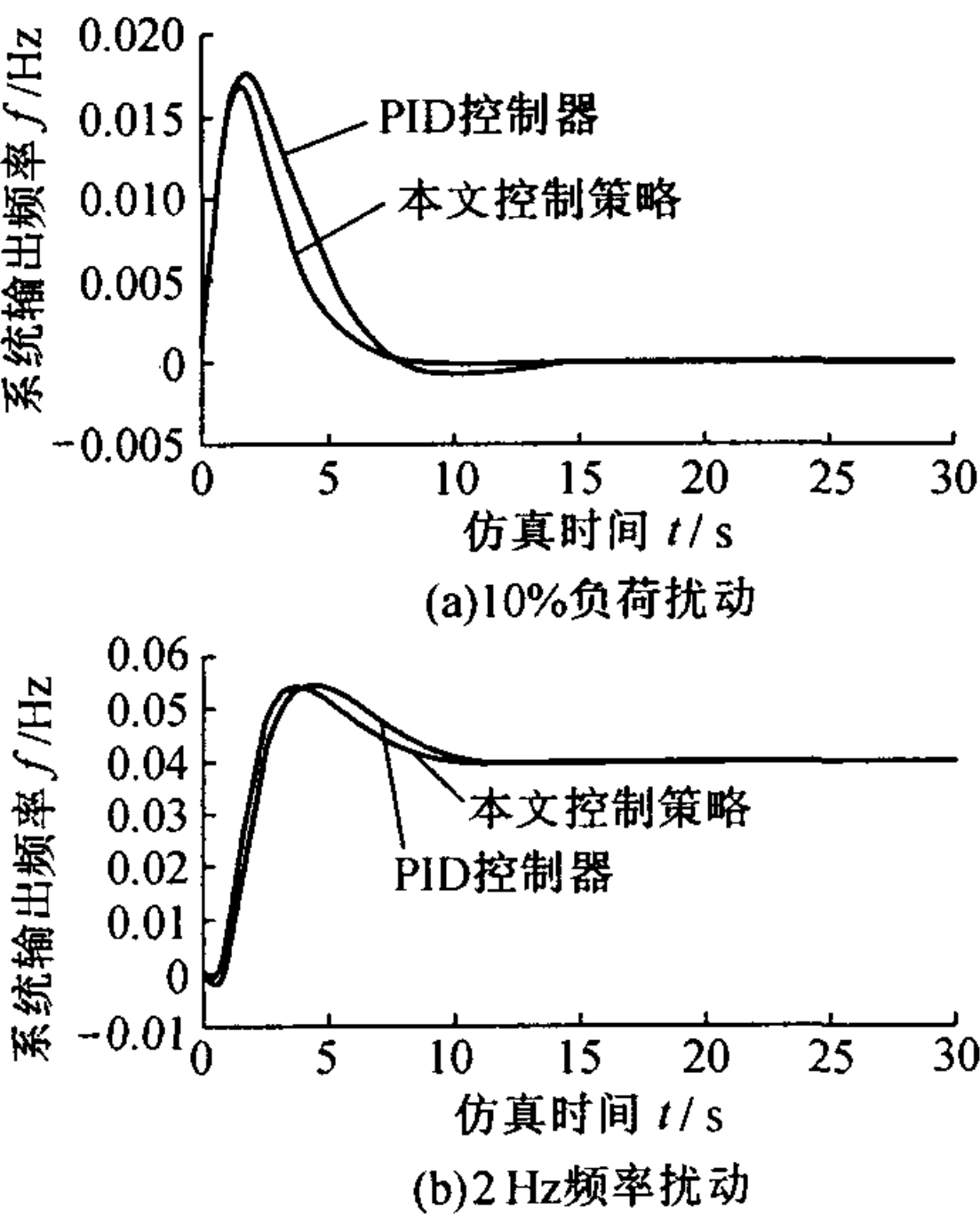


图 5 工况 2 机组响应曲线

单神经元的学习速率 $\eta = 150$. 赋连接权 w_1 和 w_2 的初值为 $[0, 1]$ 内的随机数. 过渡过程结束后, 图 4 的连接权分别为 $w_1 = 2.09$, $w_2 = 1.18$ 和 $w_1 = 2.11$, $w_2 = 1.18$; 图 5 的连接权分别为 $w_1 = 1.93$, $w_2 = 1.50$ 和 $w_1 = 2.01$, $w_2 = 1.65$.

从图 4 和图 5 中的响应曲线可以看出, 基于本文控制策略的控制器比 PID 控制器具有更好的动态性能和适应性. 这是因为基于本文控制策略的控制器在设计过程中不依赖对象的数学模型, 而且使用模糊逻辑融入操作人员的经验, 并通过神经元模拟人的记忆, 实现了控制器的自适应, 因而可根据过渡过程的要求给出合适的控制量, 使控制器在不同工况下均能保持良好的控制性能.

4 结 语

本文在总结已有研究成果的基础上, 提出了一种将模糊控制和神经控制相结合的新控制策略, 该控制策略充分利用了模糊控制和神经控制的优点, 控制算法简便, 运算量小, 便于工程上实现而且能满足水电机组的实时性要求. 仿真实例表明: ①该控制策略在不同工况下均能给出合适的控制量, 实现了水轮机调节系统的自适应; ②该控制策略的稳态性能好而且动态性能具有调节时间短的特点, 这对于水电站的安全、经济运行是十分有利的.

参考文献:

- [1] Tan S H, Yu Y. Adaptive fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems[J]. Automatic, 1996, 32(4): 637—643.
- [2] Lee C H, Wang S D. A self-organizing adaptive fuzzy controller [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 80: 295—313.
- [3] 王玲花, 沈祖诒, 陈德新. 水轮机调速系统控制策略研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(2): 56—58.
- [4] Woo Z W, Chung H Y, Lin J J. A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factor[J]. Fuzzy Set and System, 2000, 115 (2): 321—326.
- [5] Qiao W Z, Mizumoto M. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method[J]. Fuzzy Sets and System, 1996, 78(1): 23—35.
- [6] Tung W L, Quek C. GenSOFNN: a generic self-organizing fuzzy neural network[J]. IEEE Trans On Neural Network, 2002, 13 (5): 1075—1080.
- [7] Yager R. Implementing fuzzy logic controllers using a neural network framework[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 48(1): 53—64.
- [8] Carvajar J, Chen G, Ogmen H. Fuzzy PID controller: design, performance evaluation and stability analysis [J]. Information Sciences, 2000, 123(3): 249—270.
- [9] 张化光. 复杂系统的模糊辨识和模糊自适应控制[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993. 102—109.
- [10] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 160—170.
- [11] 沈祖诒. 水轮机调节系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991. 7—33.

(收稿日期: 2004-10-12 编辑: 骆超)