

引用格式: 赵淑琴, 张永生. 船用蒸汽发生器给水系统的容错控制[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 117-120, 138.
ZHAO Shuqin, ZHANG Yongsheng. Fault tolerant control of the water-feeding system of steam generators[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(2): 117-120, 138.

船用蒸汽发生器给水系统的容错控制

赵淑琴, 张永生

中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: 为提高二回路控制系统的可靠性,以蒸汽发生器给水系统为对象,设计基于BP神经网络的水位容错控制系统。利用Matlab/Simulink仿真平台,建立容错控制仿真模型,并与蒸汽发生器的集总参数仿真模型联合,分别对水位传感器恒偏差、恒增益和卡死故障进行仿真测试。仿真结果表明,容错控制系统的故障诊断模块能够准确、迅速地诊断出传感器故障并启动容错控制模块进行容错控制,使得蒸汽发生器的水位能够稳定在设定值附近,系统运行稳定。基于BP神经网络的容错控制系统对于修正蒸汽发生器水位传感器的故障有效,可用于蒸汽发生器给水控制系统的设计,提高系统的可靠性。

关键词: 蒸汽发生器; 给水; 容错控制

中图分类号: U664.11 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.02.016

Fault tolerant control of the water-feeding system of steam generators

ZHAO Shuqin, ZHANG Yongsheng

China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: In order to improve the reliability of the secondary circuit control system, a steam generator is taken in this paper as the research object, and a fault tolerant control system of the water level is accordingly designed based on BP neural network. Fault tolerant control simulation is also conducted on the Matlab/Simulink platform, where the lumped parameter dynamic models of the steam generator are joined, and the calculated water level of the steam generator, with the fault of constant deviation, constant gain, or locked, is simulated respectively on the water level sensor. The experimental results show that the sensor faults could be diagnosed accurately and rapidly with the fault diagnosis model, and the fault tolerant control should be implemented when sensor faults occur. Meanwhile, the water level of the steam generator could be regulated close to the target value, and the system works steadily. In brief, the proposed fault tolerant control system based on BP neural network is effective to correct the water level sensor fault of the steam generator, and the system can be applied into the design of the steam generator water-feeding control system, which significantly improves the system reliability.

Key words: steam generator; water-feeding; fault tolerant control

0 引言

容错控制是指系统在发生故障的时候,能够自动补偿故障的影响,维护系统的稳定,尽可能快

地恢复系统在发生故障前的性能,从而保证系统运行稳定、安全可靠^[1-2]。根据系统中处理故障和冗余的不同方式,容错控制系统分为被动容错系统和主动容错系统。被动容错控制系统多采用鲁

收稿日期: 2015-04-08 网络出版时间: 2016-3-17 10:56
基金项目: 国家部委基金资助项目
作者简介: 赵淑琴(通信作者),女,1978年生,硕士,工程师。

张永生,男,1982年生,博士,工程师。



棒控制技术,系统可能发生的故障作为先验知识在系统设计中考虑;主动容错设计算法能自适应在线辨识故障参数,或利用故障诊断获取系统故障信息,通过故障信息来重组系统控制行为^[3-8]。

本文采用船用动力装置的实际设计数据对在 Matlab/Simulink 仿真平台上建立的二回路系统蒸汽发生器集总参数模型^[9]进行修正,在三冲量控制^[10]的基础上设计基于BP神经网络蒸汽发生器的主动容错水位控制系统,并分别对水位传感

器的恒偏差、恒增益以及卡死3种故障下主动容错控制系统的有效性进行了仿真验证。

1 控制系统设计

1.1 容错控制原理

传统的蒸汽发生器三冲量水位控制由2个闭合的反馈回路及一个前馈部分组成,包含2个调节器,水位PID及给水PID,其原理如图1所示。

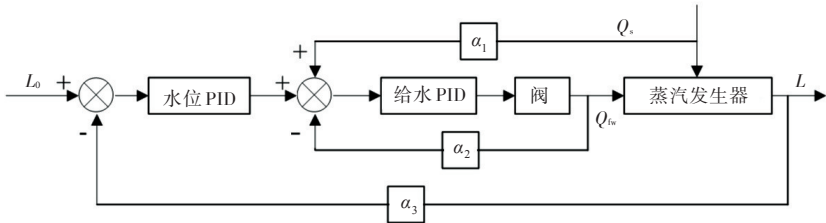


图1 传统三冲量PID控制原理图
Fig.1 Principle diagram of the traditional three impulse PID control

图1中 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为蒸汽流量传感器、给水流量传感器和水位传感器。主调节器的任务是根据水位偏差信号及时校正水位,使稳态时的水位等于给定值;副调节器的任务是根据给水流量与蒸汽流量的偏差及时改变给水流量,使给水流量迅速跟随蒸汽流量的变化,及时减少水位波动。

三冲量控制能够可靠工作的前提是系统的所

有传感器能够正常工作。当传感器发生突发性故障时,如水位传感器故障,将使测量信号产生很大波动,进而导致整个控制系统不稳定甚至崩溃。因此,为了提高系统的可靠性,保证在传感器发生故障的情况下,控制系统仍能够正常工作,设计了蒸汽发生器水位的主动容错控制系统,如图2所示。

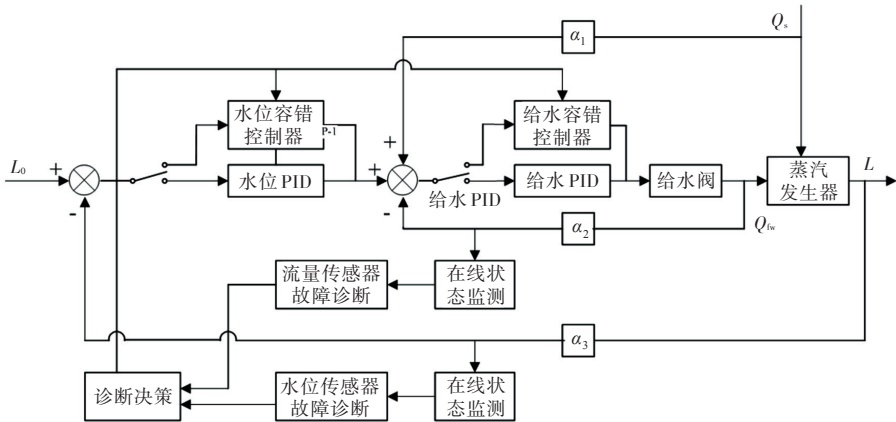


图2 主动容错控制系统原理图
Fig.2 Schematic diagram of active fault tolerant control system

在尽量不改变系统原有三冲量PID控制结构的基础上,通过控制律重构来实现容错控制。当检测到故障发生时,切换到容错控制单元,驱动给水阀动作,完成对传感器的容错控制,维持系统的稳定运行。

1.2 基于控制律重构的容错控制

单输入单输出(SISO)的线性定常状态反馈控

制系统如图3所示,设 $G_i(s)$ 为传递函数, k_i 为传感器增益, $i=1,2,\cdots,n$ 。

系统正常时特征方程为

$$E(s)/R(s)=1/[1+k_1G_1(s)+k_2G_1(s)G_2(s)+\cdots+k_nG_1(s)\cdots G_n(s)] \tag{1}$$

当系统中第*i*($i=1,2,\cdots,n$)个传感器失效时,系统的特征方程变为

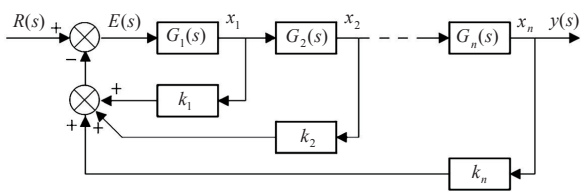


图3 SISO线性定常状态反馈控制系统

Fig.3 SISO linear constant state feedback control system

$$E'_i(s)/R(s) = 1/[1 + k'_1G_1(s) + \cdots + k'_{i-1}G_1(s)\cdots G_{i-1}(s) + k'_{i+1}G_1(s)\cdots G_{i+1}(s) + \cdots + k'_nG_1(s)\cdots G_n(s)] \quad (2)$$

系统中第*i*个传感器失效时,特征方程中缺少了 $k_iG_1(s)G_2(s)\cdots G_i(s)$ 这一项。令式(1)等于式(2),对控制律重构方程进行简化、分解并求解得到:第*i*个($i=1,2,\cdots,n-1$)传感器失效时,第*i*+1个传感器的反馈增益进行重构,重构控制律为

$$\begin{cases} k'_l = k_l, l=1,2,\cdots,i-1,i+2,i+3,\cdots,n \\ k'_{i+1} = k_{i+1} + \frac{k_i}{G_{i+1}(s)} \end{cases} \quad (3)$$

第*n*个传感器失效时,第*n*-1个传感器的反馈增益进行重构,重构控制律为:

$$\begin{cases} k'_l = k_l, l=1,2,\cdots,n-2 \\ k'_{n-1} = k_{n-1} + k_nG_n(s) \end{cases} \quad (4)$$

系统任意一个传感器故障后,按照控制律重构后的系统闭环传递函数特征方程与重构前的特征方程相同,说明按照式(3)和式(4)对系统进行控制律重构是有效的,能够维持整个系统的稳定性。在此基础上加入故障诊断单元,就能实现系统的容错控制。

1.3 容错控制的实现

容错控制主要包括故障诊断模块和容错控制器模块。为了保证故障诊断结果的准确性,故障诊断模块采用“检测—诊断”两级诊断模式。检测级实时在线检测蒸汽发生器水位传感器的状态,当检测到异常时,向诊断级发出信号,诊断级诊断是否发生恒偏差、恒增益和卡死等故障,将诊断结果提交到容错控制器模块进行控制律重构,产生相应的控制输出,驱动给水调节阀动作,实现蒸汽发生器水位的容错控制。工作原理如图4所示。

基于BP神经网络在Matlab/Simulink仿真平台上开发蒸汽发生器水位的容错控制系统。系统处于正常运行状态时,学习被控对象特性,训练神经网络,当系统发生故障时,BP神经网络学习故障模式,存储相应的容错控制策略下的重构控制律,扩展模型库,提高系统的容错控制律重构的快速性。

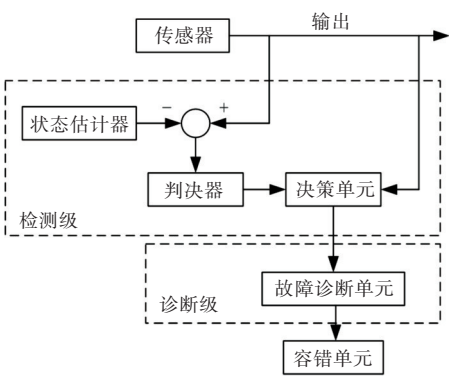


图4 故障诊断单元原理图

Fig.4 Principle diagram of fault diagnosis unit

2 仿真结果及分析

为验证蒸汽发生器水位容错控制器的控制效果,分别计算水位传感器恒偏差、恒增益和卡死3种故障情况下蒸汽发生器水位随时间的变化曲线,如图5~图7所示。其中,纵坐标为水位的标么值,即实际值与设计值的比值。

图5所示为水位传感器发生恒偏差故障时蒸汽发生器水位随时间的变化。首先系统在100%额定工况下稳定运行,450 s时插入水位传感器恒偏差故障,故障大小为0.15。

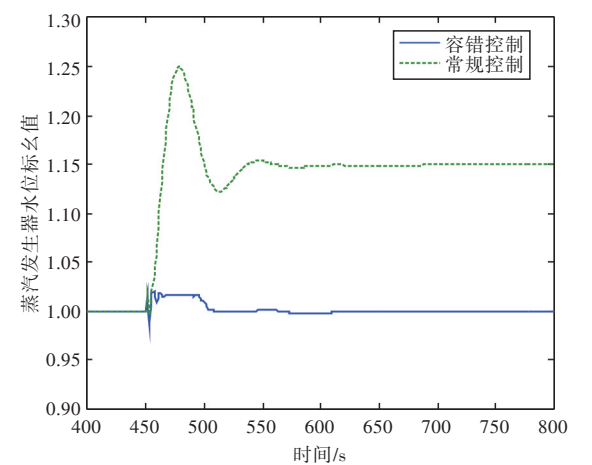


图5 水位传感器恒偏差故障时的仿真曲线

Fig.5 Simulation curve of fault of the constant deviation on water level sensor

从图5中可以看到,由于系统的动态特性,当水位传感器发生恒偏差故障后,常规控制器在短时间内水位有一个较大的水位波动,最终在三冲量控制器的作用下稳定在水位传感器恒增益值附近。容错控制系统能诊断出水位传感器发生0.15的恒偏差故障,并启动容错控制模块,使得水位在过渡期的变化趋势得到了遏制,波动范围小,并且能够很快地将水位稳定在设定值附近。

图6所示为水位传感器发生恒增益故障时蒸

汽发生器的水位随时间的变化。首先系统在100%额定工况下稳定运行,450 s插入水位传感器恒增益故障,故障大小为0.42。

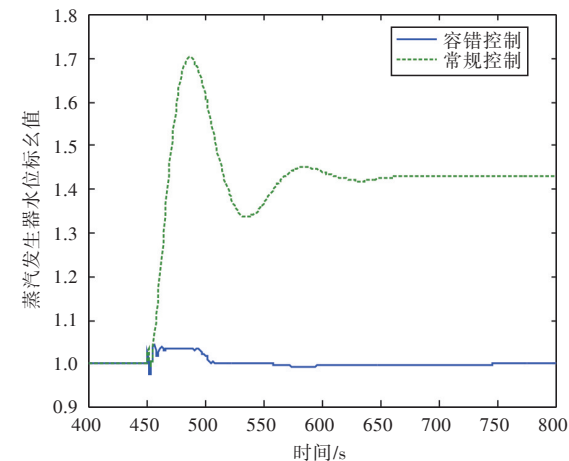
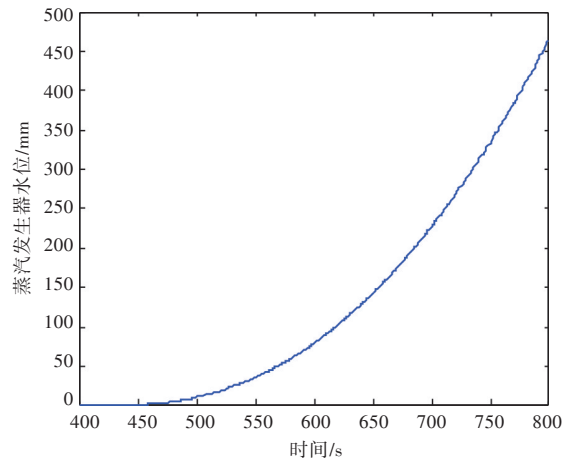


图6 水位传感器恒增益故障时的仿真曲线
Fig.6 Simulation curve of fault of the constant gain on water level sensor

从图6中可以看到,水位传感器发生恒增益故障时水位的变化情况与水位传感器发生恒偏差故障时水位的变化情况类似。在传感器发生故障时,常规控制无法将水位控制在设定值,而容错控制能够很快地将水位调节至设定值附近。

图7所示为水位传感器发生卡死故障时蒸汽发生器的水位随时间的变化。首先系统在100%额定工况下稳定运行,450 s插入水位传感器卡死故障,即为水位传感器失效。

从图7中可以看到,水位传感器发生卡死故障后常规三冲量控制是毫无作用的,最终会导致控制系统崩溃。而主动容错控制能够诊断出传感器的卡死故障,并启动容错控制模块,能在一定的时间内将水位值稳定在设定值附近。



(a) 常规控制

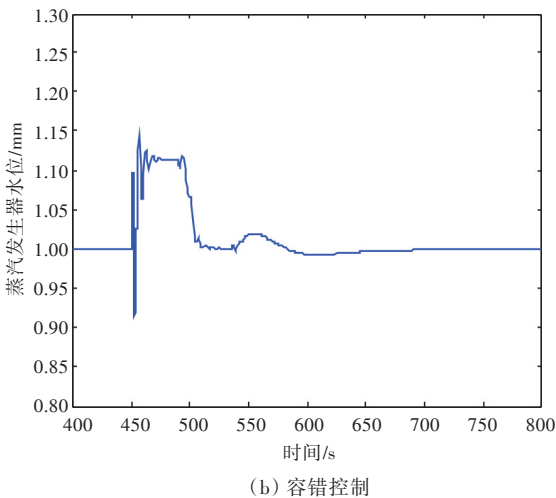


图7 两种控制方法下水位传感器卡死故障时的仿真曲线
Fig.7 Simulation curve of fault of the locked on water level sensor

3 结 语

本文以二回路系统的蒸汽发生器为研究对象,在常规PID控制的基础上,采用BP神经网络设计了蒸汽发生器的主动容错控制系统,针对水位传感器的恒偏差、恒增益、卡死3种典型故障进行了仿真试验。结果表明,水位传感器故障时,传统的三冲量控制无法将蒸汽发生器的水位维持在设定值。本文所设计的主动容错控制系统在传感器发生故障时,能够及时诊断出故障类型、故障值,并进行容错控制,使蒸汽发生器的水位维持在设定值附近。基于BP神经网络的容错控制系统对于修正蒸汽发生器水位传感器的故障是有效的。

参考文献:

- [1] 张醒研. 系统容错控制的方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [2] 王佳. 小型反应堆故障诊断与容错控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [3] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 赵雪萍. 基于BP网络的容错控制的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [5] 王德军. 故障诊断与容错控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [6] LI J Y, XIA H. Application of fuzzy neural network to fault diagnosis of sensor with mechanical properties in nuclear power plant[J]. Advanced Materials Research, 2013, 644: 68-71.
- [7] 邓志红, 施小成, 夏国清, 等. 核电厂蒸汽发生器的容错控制[J]. 核动力工程, 2010, 31(1): 107-111, 116.

物特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 556-561.

WU Zhichao, HE Lei, WANG Zhiwei. Influence of hydraulic retention time on characteristics of dissolved organic matter [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2011, 39(4): 556-561.

[4] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918-2002[S/OL]. [2015-01-22]. http://wk.baidu.com/view/5eee62747fd5360cbaladb50?uid=1456452693567_20&ssid=31399dblec664609b36209e1b4de200.3.1456452724.1TVDJMpXngmK#1.

[5] JUDD S, JUDD C. Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.

[6] FANG H H P, YU H Q. Effect of HRT on mesophilic acidogenesis of dairy wastewater [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126(12): 1145-1148.

[7] 李秀芳, 吴建堃, 孙美侠. 污泥浓度对MBR净化效果影响试验研究[J]. 广东化工, 2014, 41(4): 74-76.

LI Xiufang, WU Jiankun, SUN Meixia. Effect of sludge concentration on removal efficiencies of membrane bioreactor [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(4): 74-76.

[8] 邢锴, 张宏伟, 龙树勇, 等. MBR中中空纤维膜和板式膜不同的膜污染机理[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2009, 42(11): 1028-1033.

XING Kai, ZHANG Hongwei, LONG Shuyong, et al. Different fouling mechanisms of hollow fiber membrane bioreactor and flat sheet membrane bioreactor [J]. Journal of Tianjin University (Natural Science Edition), 2009, 42(11): 1028-1033.

[9] ROSENBERGER S, LAABS C, LESJEAN B, et al. Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment [J]. Water Research, 2006, 40(4): 710-720.

[10] 李菊, 唐书娟, 王志伟. 温度对膜生物反应器运行特性及膜污染的影响[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(5): 110-114.

LI Ju, TANG Shujuan, WANG Zhiwei. Effect of temperature on the operating characteristics and membrane fouling in membrane bioreactor [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(5): 110-114.

[11] 袁丽梅, 张传义, 张雁秋, 等. 水力停留时间对膜生物反应器复合工艺污水处理特性的影响[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(5): 363-366.

YUAN Limei, ZHANG Chuanyi, ZHANG Yanqiu, et al. Effect of HRT on the performance of a step-feed hybrid MBR process treating synthetic domestic wastewater [J]. Environmental Pollution and Control, 2007, 29(5): 363-366.



(上接第120页)

DENG Zhihong, SHI Xiaocheng, XIA Guoqing, et al. Fault tolerant control for steam generators in nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(1): 107-111, 116.

[8] 张伟, 邓志红, 夏国清, 等. 蒸汽发生器故障诊断和容错控制中强跟踪滤波的应用研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(6): 23-27.

ZHANG Wei, DENG Zhihong, XIA Guoqing, et al. Research on fault diagnose and fault tolerant control of steam generator based on strong tracking filter[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(6): 23-27.

[9] 张永生, 马运义, 高伟, 等. U型管蒸汽发生器的筒化集总参数动态模型[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(4): 52-55.

ZHANG Yongsheng, MA Yunyi, GAO Wei, et al. A simplified lumped parameter dynamic model for U-tube steam generator [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2010, 5(4): 52-55.

[10] 张永生, 马运义, 高伟, 等. 核动力蒸汽发生器水位的前馈反馈控制[J]. 船海工程, 2010, 39(4): 132-134.

ZHANG Yongsheng, MA Yunyi, GAO Wei, et al. Feedforward-feedback control of water level for the nuclear powered steam generator[J]. Ship and Ocean Engineering, 2010, 39(4): 132-134.