

# 基于神经网络的无刷同步电机控制系统故障诊断研究

Study on Neural Network Based Fault-Diagnostics for Control System of Brushless Synchronous Motor

李先祥<sup>1</sup> 罗中良<sup>1</sup> 肖红军<sup>2</sup>

(佛山大学机电与信息工程学院<sup>1</sup>,佛山 528000;华南理工大学自动化科学与工程学院<sup>2</sup>,广州 510640)

**摘要** 设计了一套无刷同步电机控制器的故障诊断系统,利用实际的非线性控制系统训练神经网络状态观测器,根据系统实际输出与神经网络观测器输出之间的残差来判别和检测实际控制系统的故障,针对系统控制器、电流和速度传感器故障进行故障诊断研究仿真实验。仿真结果表明该方法能有效抑制噪声,能快速准确地确定故障发生的时间、位置、大小以及故障的类型,具有很强的鲁棒性。说明该方法具有很强的适用性和应用价值。

**关键词** 无刷电机 神经网络 故障诊断

**Abstract** A fault diagnostics system for controller of brushless synchronous motor is designed. The neural network state observer is trained by real non-linear control system. From the residual difference between outputs of actual system and neural network observer, the fault of control system is judged and detected. The simulation test and study on fault diagnostics are implemented for faults of system controller, current and speed transducers. The results of simulation show that this method is able to locate the types, scale location of the fault and the time of occurrence, it eliminates the noise effectively and offers high robustness. Thus the method features high adaptation and applicable value.

**Keywords** Brushless motor Neural network Fault diagnostics

## 0 引言

永磁无刷同步电机具有效率高、启动转矩高、功率因数高、响应快、惯性低等诸多的优点,但由于其所处的动力学环境、巨大的能量、机械的复杂性等各种因素,故障的潜伏不可避免。

本文采用基于改进的BP算法的神经网络设计了一套无刷同步电机控制系统的状态观测器故障诊断方法,用神经网络代替解析冗余技术中系统的建模,利用实际无刷同步电机控制系统的输入、输出信号训练神经网络,然后根据系统实际输出与神经网络观测器输出之间的残差来判别和检测控制系统的故障。通过仿真来验证基于神经网络观测器的故障诊断方法能快速准确地确定故障发生的时间、位置、大小以及故障的类型及诊断过程中的良好性能。

## 1 神经网络状态观测器

基于状态观测器的故障诊断的基本思路是:设计检测观测器(也称检测滤波器),根据观测器的输出和真实系统的输出比较产生残差,再对残差进行分析处理以实现其系统的故障检测和诊断。设计故障观测器时不仅要保证观测器的稳定,而且要求通过残差信号能准确快速地识别系统发生的故障,还要求通过完善

观测器的性能以对某些未建模的系统部分出现故障时有鲁棒性。

神经网络观测器故障诊断系统如图1所示,观测器与无刷同步电机非线性控制系统并行连接,通过控制系统正常运行情况下的实际输入和输出学习神经网络诊断系统的特性,将已经训练好的神经网络系统输出与实际控制系统的输出作比较,从两者残差中得到故障信息,从而进一步利用残差信号进行故障诊断。

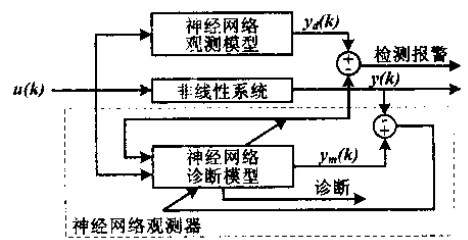


图1 无刷同步电机故障诊断系统

无刷同步电机非线性控制系统的数学模型为

$$y(k) = g(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n), u(k-d), u(k-d-1), \dots, u(k-d-l)) \quad (1)$$

式中  $y(k) \in R^p$  是系统输出,  $u(k) \in R^q$  是系统输入,  $g(\cdot)$  代表控制系统的动态非线性关系。  $n, l, d$  分别

代表系统结构的阶次和时间延迟。并且假设  $u(k)$ 、 $y(k)$  是可测量的。

神经网络具有逼近非线性函数的功能,本文利用神经网络通过学习正常系统的输入和输出特性,从而逼近  $g(\cdot)$ 。因为神经网络能逼近非线性函数  $g(\cdot)$ ,而不是完全的等于,所以训练后的神经网络存在模型误差。这就意味着即使没有故障发生时,输出误差  $\epsilon(k)$  也不等于 0,在利用残差来检测故障时,必须设置一个检测阈值 ( $\sigma > 0$ ),其判别方程如下:

$$\epsilon(k) = \|t_f(k) - y(k)\| = \begin{cases} \leq \sigma & \text{没有故障} \\ > \sigma & \text{发生故障} \end{cases} \quad (2)$$

图 2 所示为神经网络的结构图。基于改进的 BP 算法的神经网络包含输入层、隐含层、输出层,输入节点与隐节点间的网络权值为  $w_{ij}$ ,隐节点与输出节点间的网络权值为  $T_{li}$ , $\theta$  为隐含层和输出层神经元的阈值。 $x_j$  为输入层神经元输入, $y_i$  为隐含层神经元输入, $O_l$  为神经网络输出,输出节点的期望输出为  $t_l$ 。

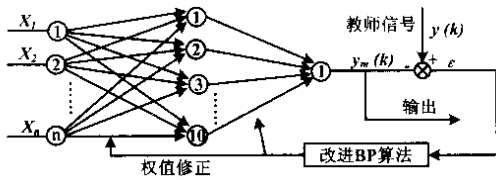


图 2 神经网络结构图

神经网络的工作特性为

$$Y_i = f_1\left(\sum_j w_{ij}x_j - \theta_i\right) \quad (3)$$

$$Q_l = f_2\left(\sum_j T_{lj}y_j - \theta_l\right) \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_l (t_l - O_l)^2 \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_l \left( t_l - f_2\left(\sum_j T_{lj}f_1\left(\sum_j w_{ij}x_j - \theta_i\right) - \theta_l\right) \right)^2 \quad (6)$$

选择不同的激励函数可以增强网络的映射功能,且提高网络收敛速度。本文设计的神经网络故障诊断系统的隐含层激励函数选择 logsig moid 函数,输出层激励函数选择 tmsig moid 函数:

$$f_1(x) = \log \text{sig}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (7)$$

$$f_2(x) = \tan \text{sig}(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} \quad (8)$$

传统 BP 算法中的权值调节公式只是按梯度负方向进行修正,而没有考虑以前积累的经验,即以前时刻的梯度方向,从而使学习过程发生振荡,收敛缓慢。本

文采用了一种基于动量-自适应的 BP 学习算法,加入动量项实质上相当于阻尼项,它减小了学习过程的振荡趋势。自适应学习就是使学习率不断地调整,克服了学习率太小、收敛太慢和学习率太大、修正过头而导致振荡甚至发散的缺点。动量-自适应学习算法的公式如下:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(t) + \eta(\delta_j(t) o_j(t) + \alpha |w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)|) \quad (9)$$

$$\eta(t+1) = \begin{cases} m\eta(t) \lfloor \delta_j(t) o_j(t) \rfloor, & [\delta_j(t-1) o_j(t-1)] > 0 \text{ 时} \\ n\eta(t) \lfloor \eta_j(t) o_j(t) \rfloor, & [\eta_j(t-1) o_j(t-1)] < 0 \text{ 时} \\ \eta(t) \lfloor \delta_j(t) o_j(t) \rfloor, & [\delta_j(t-1) o_j(t-1)] = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $\alpha$  为动量因子,后面与其相乘项为动量项; $m$  与  $n$  为常数  $0 < n < m$ ;  $\eta$  为变化中的学习率,也称为步长; $\delta$  为神经元的误差; $o$  为神经元的输入。

## 2 无刷同步电机控制系统

无刷同步电机控制系统的原理框图如图 3 所示。主电路由整流桥、滤波电容以及 IGBT 逆变器组成变频器,将恒压、恒频的交流电变换成频率电压均可调的三相交流电,控制永磁无刷同步电机实现伺服控制。驱动电路采用 TLP250 IGBT 驱动模块。电流检测采用根据磁场补偿原理制成的霍尔元件 LEM 模块。由于无刷电机电流为三相互差  $120^\circ$  的方波,任一时刻只有两相通电,在  $60^\circ$  电区间内相当一直流电流,因而可以采用电流分时反馈技术,使三相电流合成反馈成一直流,这样系统只需要一个电流调节器,系统稳定且调试方便。又因三相电流  $i_a + i_b + i_c = 0$ ,故只需检测两相电流。速度和位置检测采用光电编码器,利用光电编码器输出的 A 和 B 两路脉冲信号检测速度的方向。整个系统由 TMSF2407DSP 进行控制,具有参数设置、参数显示以及与上位机通信等功能,还设置了过流、过载、欠压、过压以及过压吸收等保护。

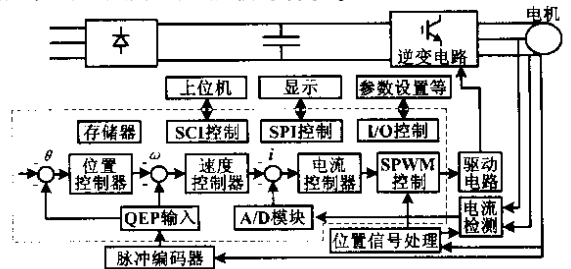


图 3 无刷同步电机控制系统结构框图

### 3 仿真分析

本文利用 Matlab 软件对基于神经网络的无刷同步电机故障诊断系统进行仿真,采样频率取组成本系统的逆变器主电路的 IGBT 最高频率 40kHz。无刷同步电机的参数如下:

$$R = 2.875\Omega, \psi_{\lambda} = 0.175 \text{ Wb}, L_d = L_q = 8.5 \text{ mH},$$

$$P_m = 4, J = 0.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

首先利用实际非线性无刷同步电机控制系统的数学模型对神经网络输入层、隐含层、输出层进行训练。隐含层根据仿真分析选取 10 个神经元,采样时间是 0.01s 则在时间  $T \in [0, 20]$  中共有 2001 组训练样本,学习算法采用动量-自适应的 BP 学习法。

利用训练好的神经网络故障诊断模型,在控制系统执行器故障、转速传感器故障、电流传感器故障情况下进行故障诊断仿真分析。将无刷电机控制系统发生故障时的输出与神经网络观测器输出进行比较,可以得到一个残差向量。残差向量经过滤波后进一步分析可判断故障的发生以及故障类型,通过设定一定的阈值也可以进行故障报警。图 4 所示为控制系统执行器故障时的速度和电流残差曲线,图 5 为速度传感器故障时速度残差曲线。

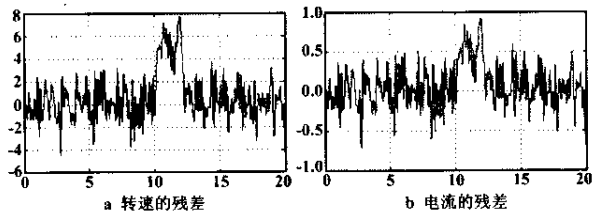


图 4 滤波后的系统控制器故障下的残差曲线

经过训练以后的神经网络能有效地抑制输入中的噪声。未发生故障时,残差或判别函数的值基本为 0。当发生故障时残差或判别函数就有明显的突变,从而可以判断故障的发生。

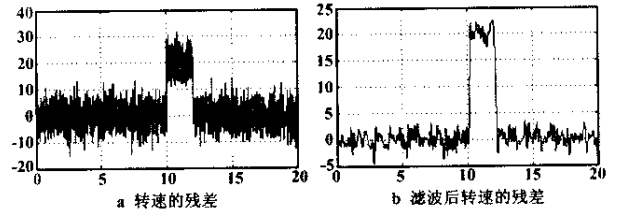


图 5 转速传感器故障时的残差曲线

### 4 结束语

利用改进的 BP 算法设计了一套无刷同步电机控制器的故障诊断系统,利用实际非线性控制系统训练神经网络状态观测器,利用训练好的神经网络故障诊断模型输出与实际非线性系统输出的残差分析进行故障的诊断和报警。仿真结果表明该诊断方法能快速准确地确定故障发生的时间、位置、大小以及故障的类型,能有效地抑制输入中的噪声,具有良好的鲁棒性。基于模糊神经网络的故障诊断方法具有适用性广、实时性强、鲁棒性强以及结构和设计步骤更简便等特点。

#### 参考文献

- 1 闻新,张洪钺,周露.控制系统的故障诊断和容错系统[M].机械工业出版社,1998
- 2 Vazquez, Ernesto, Altuve Hector J. Chacon, Oscar L. Neural network approach to fault detection in electric power systems [J]. IEEE international Conference on Neural Networks-Conference Proceedings 1996, 2090 ~ 2095
- 3 Zhang H. Y., et al. Sensor fault diagnosis for systems with unknown non-linearity using neural network based nonlinear observers [J]. IEEE Conference publication, 1998, A55(2) 809 ~ 813

广东省高教自然科学基金资助项目(编号:1999267)。

收稿日期 2004-09-18。

第一作者李先祥,男,1965年生,1996年毕业于南京航空航天大学,获硕士学位,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电机控制系统设计及故障诊断等。

(上接第 14 页)

#### 参考文献

- 1 Henriette Ossoing, Erwin Reisner. Design and FPGA-Implementation of a Neural Network. Proceedings of the 7th International Conference on Signal Processing Applications & Technology. 1996
- 2 Cirstea M, Dinu A, McCormick M, Nicula D. A VHDL Success Story: Electric Drive System Using Neural Controller. Proceedings of VIUF 2000 Workshop. 2000
- 3 牧本次生. 芯片业变化的范例. 电子产品世界, 2004(4)

- 4 白瑞林,梁宏,李军. 仪用模糊神经网络 PID 控制器的研究. 仪器仪表学报, 1999, 20(6)
- 5 Yihua Liao. Neural Network in Hardware: A Survey. ECS 250A(Computer Architecture) project, 2001

江南大学基础研究基金项目(编号:200208)。

修稿改稿收到日期 2004-08-14。

第一作者江吕锋,男,1976年生,2000年毕业于南京大学,现为江南大学在读硕士研究生,主要研究方向为基于 FPGA 的嵌入式系统设计。