

# 基于 T-S 模糊神经网络模型的编码器故障软闭环容错控制方法

李 炜<sup>1</sup>, 李青朋<sup>1\*</sup>, 毛海杰<sup>1</sup>, 龚建兴<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃工大舞台技术工程有限公司, 兰州 730050)

(\* 通信作者电子邮箱 lqp871114@163.com)

**摘 要:**针对舞台吊杆调速系统中速度反馈元件增量式编码器可能产生的丢码、断码等问题,为防止故障影响的传播,结合数据驱动技术提出了一种基于 T-S 模糊神经网络(T-S FNN)模型的编码器故障检测与软闭环容错控制方法。首先,利用系统正常运行时的历史数据建立系统较为精确的 T-S FNN 预测模型,并用实际编码器测量值与模型预测值相减获得残差信息;其次,将其残差实时数据通过改进的序贯概率比检验(SPRT)算法进行故障检测,以克服检测延迟确保故障检测的可靠性,当检测出故障时,再用 T-S FNN 模型的预测输出替代故障编码器的输出,实现软闭环方式下的容错运行;最后,针对编码器丢码、断码等故障,采用上述方法进行了软闭环容错控制的有效性仿真验证。仿真结果表明,该方法能够快速可靠地检测到编码器故障,并用预测的重构信息通过容错切换机制,及时、安全地以软闭环方式实现了对故障编码器的容错控制,提高了舞台吊杆调速系统运行的安全可靠性能。

**关键词:**舞台吊杆调速系统;增量式编码器;T-S 模糊神经网络;改进的序贯概率比检验算法;软闭环容错控制

**中图分类号:** TP212.1 **文献标志码:** A

## Method of soft close-loop fault-tolerant control in encoder faults based on the T-S fuzzy neural network model

LI Wei<sup>1</sup>, LI Qingpeng<sup>1\*</sup>, MAO Haijie<sup>1</sup>, GONG Jianxing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;

2. Gansu University of Technology Stage Technology Engineering Company Limited, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of losing codes and pausing codes in the incremental encoder which conventionally used in the stage speed boom system as speed feedback component and prevent the propagation of fault effect, a fault detection and soft close-loop fault-tolerant control method for encoder faults based on the Takagi-Sugeno Fuzzy Neural Network (T-S FNN) model combined with the data-driven technique was proposed. First, the system of T-S FNN prediction model was established by subtracting the system normal operation of historical data, and achieved the residual error information by using measured values of actual encoder and predicted values. Next, encoder fault was detected by using improved Sequential Probability Ratio Test (SPRT) algorithm through the residual error real-time data information, in order to overcome the detection delay and ensure the reliability of fault detection. Then, according to the prediction model output which was used as the output of the encoder failure to accommodate the failure when fault was detected, in order to realize the soft fault-tolerant operation by using close-loop mode. At last, the encoder fault tolerant process for the losing codes and pausing codes was proved by simulation experiment effectively. The simulation results show that the method of this article can detect the encoder fault information rapidly and reliability, and switch from the fault-tolerant mechanism timely and safely by using the reconstruction of the prediction information, in order to realize the soft closed-loop fault-tolerant control of encoder failure and improve the safety and reliability of stage speed boom system operation process.

**Key words:** stage speed boom system; incremental encoder; Takagi-Sugeno Fuzzy Neural Network (T-S FNN); improved Sequential Probability Ratio Test (SPRT) algorithm; soft close-loop fault-tolerant control

## 0 引言

增量式编码器是舞台机械控制系统中常用的数字测速反馈元件,它是利用光电转换原理将位移转换成周期性电信号,进而转变为计数脉冲的一种数字式传感器,在速度闭环反馈控制系统中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。实际舞台控制系统中,由于

干扰、老化等原因,系统的元部件发生故障是无法避免的。而当反馈元件编码器出现丢码、断码等故障时,故障则会快速通过反馈信号在系统中蔓延开来,轻则引起系统性能下降,重则可能导致设备损坏,甚至对演艺人员安全造成威胁。因此,对编码器进行实时的故障诊断和容错控制技术研究,无疑对于提升舞台系统的安全水平有着重要的意义。

**收稿日期:** 2014-06-18; **修回日期:** 2014-08-08。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61364011); 甘肃省自然科学基金资助项目(1310RJYA019); 兰州理工大学校基金资助项目(03-0099)。

**作者简介:** 李炜(1963-),女,陕西西安人,教授,博士生导师,主要研究方向:工业过程先进控制、动态系统的故障诊断与容错控制; 李青朋(1987-),男,河南安阳人,硕士研究生,主要研究方向:控制系统的故障诊断与容错控制; 毛海杰(1978-),女,内蒙古赤峰人,讲师,主要研究方向:动态系统的故障诊断与容错控制; 龚建兴(1968-),男,甘肃酒泉人,高级工程师,主要研究方向:舞台机械电气控制系统设计。

容错控制 (Fault Tolerant Control, FTC) 是伴随着基于解析冗余的故障诊断技术而发展起来的。它的本质是当控制系统发生故障时,通过控制策略的调整或软硬冗余的重构与切换等,使得闭环控制系统依然能够维持自身运行在安全状态,并具有较理想的特性,即系统对故障具有一定的容忍能力<sup>[2]</sup>。经过近 40 年的发展,容错控制技术已在航空航天、船舶以及化工等多个领域得到了成功应用<sup>[3-6]</sup>。容错控制依据对故障的应对方式不同又可分为被动容错控制 (Passive Fault Tolerant Control, PFTC) 和主动容错控制 (Active Fault Tolerant Control, AFTC) 两大类。前者控制器设计时需兼顾故障情况,一旦出现未知故障,系统的性能将无法保障;后者通常需要故障检测与诊断 (Fault Detection and Diagnosis, FDD) 子系统,根据故障信息重组或重构控制律,即使发生未知故障也可使系统保持一定的稳定性能,其容错能力优于 PFTC<sup>[7-8]</sup>,因此它也更受人们的青睐。然而在 AFTC 中,及时、可靠、准确的故障诊断是容错得以安全实现的前提。AFTC 中以基于定量分析的故障诊断方法为主,此类方法又可分为基于解析模型和基于数据驱动的方法<sup>[9]</sup>。前者因对系统数学模型的精确度有过高的依赖,已难以在复杂系统中使用;后者因仅对过程运行数据进行分析处理,无需知道系统的内部结构和机理信息<sup>[10-11]</sup>,在实际系统中更易直接应用。近年来,基于数据驱动的人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN)、支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)、模糊神经网络 (Fuzzy Neural Network, FNN)、偏最小二乘法 (Partial Least Squares, PLS)、主元分析 (Principal Component Analysis, PCA)、小波变换等诊断方法在许多领域得到广泛应用。文献[12]采用 PCA 方法对编码器丢码、断码故障进行诊断研究,与硬件法相比<sup>[13]</sup>,此方法尽管对各种编码器均有良好的适应性,但编码器故障时必须要求速度冗余信号是正常的;文献[14]通过小波变换提取光电编码器信号的特征数据作为故障样本,同时利用局部化递推最小二乘法 (Local Recursive Least Square, LRLS) 训练神经网络作为故障分离器以实现未知故障的诊断。但前述文献均未涉及编码器故障的容错技术。

T-S 模糊神经网络 (Takagi-Sugeno Fuzzy Neural Network, T-S FNN)<sup>[15]</sup> 是一种非线性建模方法,它既能处理模糊信息完成模糊推理功能,又具有神经网络处理定量数据的能力,而且参数的学习和调整相对也较容易。因此,该网络在预测建模中得到越来越多的重视<sup>[16-18]</sup>。文献[16-18]均是 T-S 模糊逻辑与神经网络结合,通过发挥各自的优势,有效地解决模糊系统中参数自整定和规则自生成的问题,但尚未用于故障检测与容错控制。

为此,本文结合数据驱动技术提出一种基于 T-S FNN 模型的编码器故障检测与软闭环容错控制方案。首先,根据系统正常时的历史数据建立系统的 T-S FNN 预测模型,并以此预测输出与实际编码器输出产生残差信息,进而采用改进的序贯概率比检验 (Sequential Probability Ratio Test, SPRT) 算法对系统的实时残差数据进行故障诊断,以克服故障检测延迟、确保故障检测的可靠性;其次,当诊断出编码器故障时,借助于容错切换机制用 T-S FNN 预测模型输出替代故障编码器信息,以软传感器的方式进行闭环控制,从而实现故障编码器的容错运行,最终使系统借助于软冗余达到更高的安全水平。

## 1 T-S FNN 编码器故障软闭环容错控制

### 1.1 编码器故障成因及对舞台吊杆调速系统的影响

实际舞台系统中,丢码、断码和完全失效是编码器最为常见的三种故障模式。引起故障的原因主要包括:1) 编码器安装松动;2) 编码器的老化、外部碰撞以及强烈干扰等;3) 编码器连接电缆出现短路、断路或接触不良;4) 编码器本身故障。

在舞台吊杆调速系统中,编码器是系统速度闭环控制的反馈元件,一旦出现故障,错误的测量信息将通过反馈通道迅速在系统中传播,致使吊杆系统的性能急剧下降,影响舞台演艺效果,甚至威胁人员与设备安全。而事实上,在编码器完全失灵之前,一般都会出现丢码、断码等现象。因此,若能及时检测到编码器的此类故障,并对故障编码器快速采取软闭环容错应对措施,那么舞台控制系统的安全性和可靠性则会得到明显的提升。

### 1.2 编码器故障软闭环容错控制方案构建

在舞台速度反馈闭环控制系统中,考虑到编码器丢码、断码等故障对系统性能的影响,为提高舞台吊杆系统运行过程的安全可靠性,本文结合数据驱动的故障诊断技术提出一种基于 T-S FNN 模型的编码器故障检测与软闭环容错控制方案。其结构如图 1 所示。

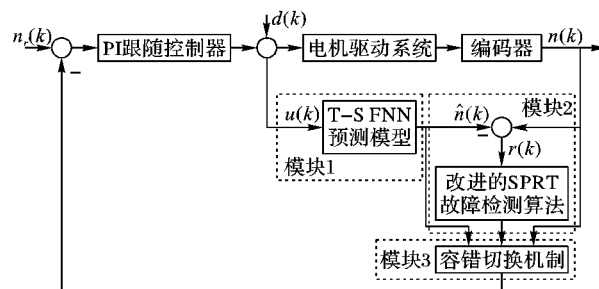


图1 基于 T-S FNN 模型的编码器故障检测与软闭环容错控制结构

图1中: $n_r(k)$  为转速参考输入, $u(k)$ 、 $d(k)$ 、 $n(k)$ 、 $\hat{n}(k)$  分别为控制器的输出、电机的外部扰动、编码器实际测量转速输出和 T-S FNN 模型预测的转速输出, $r(k)$  为实际编码器输出与 T-S FNN 模型预测输出产生的残差信息,即  $r(k) = n(k) - \hat{n}(k)$ 。

系统除正常工作时的元件外,还包括 3 个其他模块。模块 1 为系统的 T-S FNN 预测模型,其功能有二:一是可以与实际输出产生残差,为编码器的故障检测作准备,二是兼有编码器测量的软冗余功能。模块 2 为改进的 SPRT 故障检测算法,其功能是将残差的实时数据信息通过该算法进行故障检测,并给出故障指示,它作为故障诊断的核心为下一步容错奠定基础。模块 3 为容错切换机制,其功能是当检测到故障时,将模型预测值切换为输出测量值来实现反馈,即用软传感器取代实际传感器以实现降低性能的容错控制;当系统恢复正常时,再将实际测量值切换为反馈信号。从上述功能分析可知,该系统借助于 3 个模块的有机结合,使系统在对编码器的故障进行快速可靠检测的同时,并以软闭环的方式协同实现对编码器故障的安全容错。

#### 1.2.1 T-S FNN 预测模型的建立

考虑到 T-S FNN 具有较强的适应能力,且能利用系统的历史数据建立较为精确的预测模型,确保了故障检测中生成

残差的可靠性。对于多输入单输出系统而言,T-S FNN 结构如图2所示,它由用于匹配模糊规则的前件网络和产生模糊规则的后件网络两部分组成,且第  $k$  采样时刻的模糊规则后件为此时刻输入语言变量的线性组合,即  $y_j(k) = p_{j0} + p_{j1}x_{k1} + \dots + p_{jn}x_{kn}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ),  $n$  为输入变量个数。该模型分为输入层、隶属度函数层、规则层、归一化层和输出层共5层。

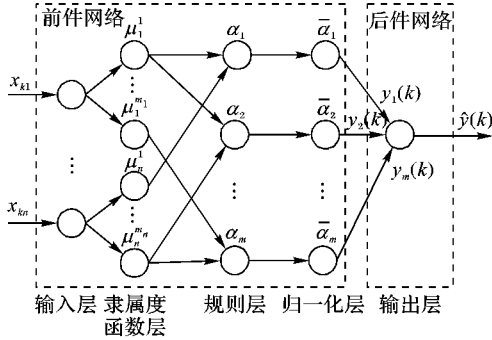


图2 T-S FNN 结构图

图2中,输入层为第  $k$  采样时刻的输入向量  $X_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}]^T$ ;隶属度函数层为计算各输入分量属于各语言变量值模糊集合的高斯型隶属度函数值,即  $\mu_i^j = \exp[-(x_{ki} - c_{ij})^2/\sigma_{ij}^2]$  ( $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m_i$ ),  $c_{ij}, \sigma_{ij}$  为高斯型隶属度函数的中心和宽度,  $m_i$  是  $x_i$  的模糊分割数;规则层为每条模糊规则的适应度,即  $\alpha_j = \mu_1^{j1} \mu_2^{j2} \dots \mu_n^{jn}$  ( $j = 1, 2, \dots, m, m = \prod_{i=1}^n m_i$ );归一化层为实现归一化计算值,即  $\bar{\alpha}_j = \alpha_j / \sum_{i=1}^m \alpha_i$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ );输出层为第  $k$  采样时刻系统的输出,即  $\hat{y}(k) = \sum_{j=1}^m \bar{\alpha}_j y_j(k)$ 。

文中采用上述方法来建立吊杆系统编码器输出的预测模型,并以此作为编码器预测输出。其中,系统运行正常情况下的第  $k$  采样时刻的输入数据为  $X_k = [u(k)]^T$ 、输出数据为  $Y_k = [n(k)]^T$ ,即该模型系统为单输入单输出系统。本文用实验采集的所有输入输出数据构成该网络模型的样本数据集,并将其分为训练集和测试集两部分。其T-S FNN的建模步骤如下:

1) 随机取一定的样本数作为训练集,用以训练模糊神经网络并确定后件网络的连接权  $p_{ji}$ 、前件网络中各节点隶属度中心值  $c_{ij}$  和宽度  $\sigma_{ij}$  等参数<sup>[15,19]</sup>,最终建立系统的T-S FNN预测模型为该吊杆系统的预测输出,即:

$$\hat{n}(k) = \hat{y}(k) = \sum_{j=1}^m \bar{\alpha}_j y_j(k) \quad (1)$$

其中

$$y_j(k) = p_{j0} + p_{j1}u(k); j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

2) 取样本的剩余数据作为测试集,并依据式(3)、(4)、

(5)评价T-S模糊神经网络预测模型的性能:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |n(k) - \hat{n}(k)| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (n(k) - \hat{n}(k))^2} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|n(k) - \hat{n}(k)|}{|n(k)|} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $MAE$ 、 $RMSE$ 、 $MAPE$  分别为平均绝对误差、均方根误差和平均绝对误差百分比,  $\hat{n}(k)$ 、 $n(k)$  分别为第  $k$  采样时刻编码器的转速预测输出值和转速实测输出值。

### 1.2.2 基于改进SPRT检验法的编码器故障检测

在故障诊断过程中,常用残差法来检测判决是否发生故障。序贯概率比(SPRT)检验算法是残差判决中一种较为常用的方法<sup>[20]</sup>。它预先根据期望设定故障检测的误报率与漏报率,并由此获得故障检测的阈值,在检验过程中随故障的大小会自适应地增加样本数据直到满足判决阈值为止,具有检测可靠性高、速度快等特点,但经典SPRT方法中存在一定的检测延迟。为克服此延迟,文中采用改进的SPRT检验算法对编码器进行故障检测,其判决阈值  $T(H_0)$ 、 $T(H_1)$  和判决函数  $\lambda^*(k)$  如式(6)、(7)<sup>[21]</sup>所示:

$$\begin{cases} T(H_0) = P_M / (1 - P_F) \\ T(H_1) = (1 - P_M) / P_F \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda^*(k) = \begin{cases} \lambda(k) = \sum_{j=1}^k \ln \frac{f(r(j), \theta_0)}{f(r(j), 0)} = \\ \sum_{j=1}^k r(j) \theta_0 - \frac{k}{2} \theta_0^2 = \\ \lambda(k-1) + r(k) \theta_0 - \frac{1}{2} \theta_0^2, \lambda(k) \geq 0 \\ 0, \lambda(k) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $r(k)$  表示残差序列,即  $r(k) = n(k) - \hat{n}(k)$ ;  $\theta_0$  表示未发生故障时  $r(k)$  的统计分布均值;  $P_F$ 、 $P_M$  表示允许的误报率和漏报率。

根据式(8)的SPRT检验法的判决规则,可检测编码器是否发生故障:

$$\begin{cases} \lambda^*(k) \geq T(H_1), & \text{编码器发生故障} \\ \lambda^*(k) \leq T(H_0), & \text{编码器没有发生故障} \\ T(H_0) < \lambda^*(k) < T(H_1), & \text{继续增加数据检测} \end{cases} \quad (8)$$

### 1.2.3 故障编码器信息重构及软闭环容错切换机制

依据1.2.2节分析,当诊断出编码器故障后,若仍以此作为反馈信息,则故障的影响会通过反馈在闭环系统中迅速蔓延,致使系统性能下降,甚至无法正常工作。而若能利用系统的其他冗余信息重构故障编码器的输出,并以此进行反馈,则可实现舞台吊杆系统在编码器故障下安全运行的目标。

根据1.2.1节模块1的分析,T-S FNN模型兼有编码器测量的软冗余功能,因此该模型的预测值可替代故障编码器的实际测量值,即对故障编码器的输出实现信息重构。因此,这里设计了如图3所示的软闭环切换机制,当编码器被检测到发生故障时,用T-S FNN模型预测输出切换到软冗余方式下的闭环容错运行,防止了故障在闭环控制系统中的传播;待系统恢复正常后,再将编码器实际测量恢复为正常反馈信号送至闭环控制系统。

## 2 仿真研究

### 2.1 预测模型的建立

实际舞台工程中,调速吊杆多采用交流电机的矢量控制,而通过矢量变换<sup>[22]</sup>可将交流电机模型近似等效为直流电机模型。在额定励磁下其传递函数是一个二阶线性环节,即

$G(s) = \frac{1/C_e}{T_m T_i s^2 + T_m s + 1}$ 。其中选用电机转矩系数为  $C_e = 0.1925 \text{ V} \cdot \text{min/r}$ 、电机机电惯性  $T_m = 0.075 \text{ s}$  及电磁惯性的时间常数  $T_i = 0.017 \text{ s}$  作为仿真电机驱动系统的数学模型。文中 PI 跟随控制器采用 Ziegler-Nichols 方法整定参数,分别为:  $K_p = 14.26, K_i = 0.45$ 。

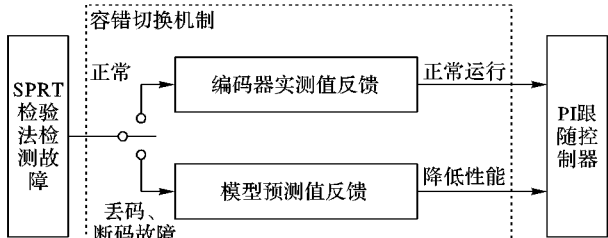


图 3 故障编码器的软闭环容错切换机制结构图

在 Matlab R2010b 环境下搭建上述电机驱动系统结构模型,为使预测模型建立的更精确且具良好的泛化能力,通过采集多个速度时段(吊杆调速范围  $0 \sim 1000 \text{ r/min}$ ) 的控制器输出与编码器输出值共 2948 组样本数据,选取 2211 组样本数据作为训练集、737 组样本数据作为测试集,并依据 1.2.1 节建立系统 T-S FNN 预测模型,其结构为  $1 \times 7 \times 7 \times 7 \times 1$ , T-S FNN 预测模型输出曲线、性能评价指标如图 4、表 1 所示。

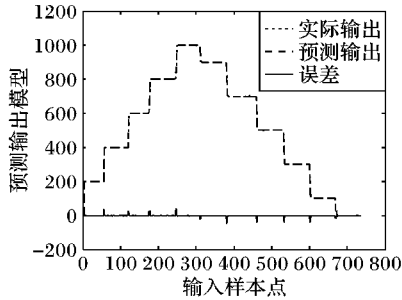


图 4 T-S FNN 预测模型输出曲线

表 1 性能评价指标

评价指标	值
MAE	0.0017
RMSE	0.0074
MAPE/%	15.4541

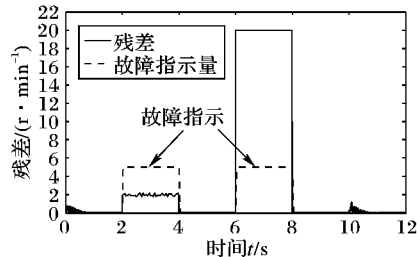
从图 4 和表 1 可以看出,该 T-S FNN 模型能够很好地预测电机驱动系统各个阶段的速度值,这为下面实现高可靠的故障检测与高性能的软闭环容错提供了保障。

2.2 编码器故障检测与软闭环容错有效性仿真研究

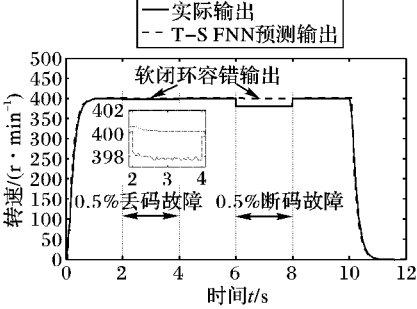
为验证文中所述方法的有效性,在给定电机转速  $400 \text{ r/min}$ 、转动位移  $67 \text{ r}$  情况下,针对编码器丢码、断码故障进行仿真研究。取误报率  $P_F = 0.01$ 、漏报率  $P_M = 0.01$ ,则由式(6)知故障检测阈值  $\ln T(H_1) = 4.5951$ ,另取未发生故障时的残差统计分布均值  $\theta_0 = 0.055$ 。故障具体施加时刻分别为:在  $2 \sim 4 \text{ s}$  时,模拟由于干扰及外部碰撞引起编码器实际输出的  $0.5\%$  丢码,  $4 \text{ s}$  后排除其故障使系统恢复正常;在  $6 \sim 8 \text{ s}$  时,模拟  $5\%$  断码故障,  $8 \text{ s}$  后排除故障使系统恢复正常。依据 1.2.2 节、1.2.3 节分析,对应的故障检测与软闭环容错效果如图 5 所示。

1) 故障检测的快速、可靠性分析。

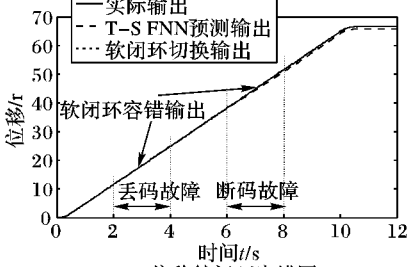
由图 5(a)可以看出,虽然启动初期系统有一定的残差,但经 SPRT 故障检测算法判决并未发生故障,此时输出故障指示量为 0;而当编码器在第  $2 \text{ s}$ 、 $6 \text{ s}$  分别发生丢码、断码故障时,残差迅速变大,随之输出故障指示量变为 5,即快速可靠地检测到了故障,在第  $4 \text{ s}$ 、 $8 \text{ s}$  排除故障时,残差又重新接近于 0,输出故障指示量为 0,即判决未发生故障;第  $10 \text{ s}$  系统即将到达给定位移时,系统开始减速,此时虽然也会存在一定的残差信息,但依然能准确地判决系统并未发生故障,故障指示量仍为 0。说明文中将 T-S FNN 与改进 SPRT 结合的数据驱动方法,能快速可靠地检测舞台吊杆调速系统中编码器的故障。



(a) 故障检测指示图



(b) 转速软闭环容错图



(c) 位移软闭环容错图

图 5 丢码、断码故障检测与软闭环容错图

2) 软闭环切换的及时、安全性分析。

由图 5(b)可以看出,在第  $2 \text{ s}$ 、 $6 \text{ s}$  检测到故障时,容错切换机制立即将 T-S FNN 模型的预测输出切换至闭环系统,实现了软闭环容错控制;而在第  $4 \text{ s}$ 、 $8 \text{ s}$  系统恢复正常时,系统又及时将实际编码器输出切换至反馈形成硬闭环控制系统。说明文中设计的软闭环容错切换机制可确保系统在编码器异常或正常时,及时安全地完成软闭环或硬闭环的切换。

3) 软闭环容错的有效性分析。

由图 5(b)、(c)可以看出,当检测到编码器发生故障时,若不进行软冗余容错切换控制,电机转速及转动位移会下降,即故障会通过反馈信号在系统中蔓延开来;而文中方法用预测模型重构编码器信息替代故障编码器的测量信息对系统进行软闭环后,则电机转速及转动位移未出现异常,从而确保了舞台吊杆调速系统中速度闭环控制的安全和高精度稳定运

行。由此也说明文中方法对编码器故障情形下能实现容错运行是安全且有效的。

### 3 结语

本文针对舞台吊杆调速系统中编码器可能产生的丢码、断码等故障问题,提出了一种基于数据驱动技术的 T-S FNN 模型的编码器故障检测与软闭环容错控制方法。该方法基于系统正常运行时的历史数据建立编码器输出的 T-S FNN 预测模型,并与实际编码器输出产生残差,进而将残差信息通过改进的 SPRT 检验算法来检测故障;当编码器发生故障时,又用预测模型输出重构故障编码器的信息,以软闭环的方式实现对故障编码器的容错。仿真结果表明,文中所述方法能够快速可靠地检测到编码器的丢码、断码等故障信息,并通过软闭环切换机制实现了系统在编码器故障情况下的安全、可靠运行。本文为提高舞台吊杆调速系统的安全运行水平提供了一种有效的方法,如何将其应用于实际工程是下一步努力的方向。

#### 参考文献:

- [1] DU Y, WANG X, WANG S, *et al.* Auto-detection system of incremental encoder[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(11): 993 – 998. (杜颖财, 王希军, 王树洁, 等. 增量式编码器自动检测系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(11): 993 – 998.)
- [2] ZHOU D, YE Y. *Modern fault diagnosis and fault-tolerant control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 3 – 16. (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: 3 – 16.)
- [3] ZHANG Y, JIANG J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems [J]. *Annual Reviews in Control*, 2008, 32(2): 229 – 252.
- [4] XU Y, JIANG B, GAO Z, *et al.* Fault tolerant control for near space vehicle: a survey and some new results [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(1): 88 – 94.
- [5] WU N E, THAVAMANI S, ZHANG Y, *et al.* Sensor fault masking of a ship propulsion system[J]. *Control Engineering Practice*, 2006, 11(14): 1337 – 1345.
- [6] SOURANDER M, VERMASVUORI M, SAUTER D, *et al.* Fault tolerant control for a dearomatisation process[J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(7): 1091 – 1102.
- [7] JIANG J, YU X. Fault-tolerant control system: a comparative study between active and passive approaches[J]. *Annual Reviews in Control*, 2012, 36(1): 60 – 72.
- [8] MAO H, LI W, FENG X. Review of active fault tolerant control for nonlinear system[J]. *Transducer and Microsystems Technologies*, 2014, 33(4): 6 – 9, 13. (毛海杰, 李炜, 冯小林. 非线性系统主动容错控制综述[J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(4): 6 – 9, 13.)
- [9] ZHOU D, HU Y. Fault diagnosis techniques for dynamic systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 748 – 758. (周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 748 – 758.)
- [10] LI H, XIAO D. Survey on data driven fault diagnosis methods[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(1): 1 – 9, 16. (李晗, 萧德云. 基于数据驱动的故障诊断方法综述[J]. *控制与决策*, 2011, 26(1): 1 – 9, 16.)
- [11] WANG H, CHAI T, DING J. Data driven fault diagnosis and fault tolerant control: some advances and possible new directions [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 739 – 747.
- [12] XIAO J, WANG H. An applicable diagnosis way on the fault of encoders in numeric control system [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(2): 358 – 361. (肖金壮, 王洪瑞. 一种实用的数控系统中编码器故障诊断方法[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(2): 358 – 361.)
- [13] CHEN D, GUO X, YU C, *et al.* Research and realization of automatic monitoring and fault diagnosis system for coders [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(3): 617 – 619, 622. (陈德国, 郭晓松, 于传强, 等. 编码器自动监测与故障诊断系统的研究与实现[J]. *传感技术学报*, 2005, 18(3): 617 – 619, 622.)
- [14] CHEN X, LIU Y, LYU H. Wavelet processing based intelligent fault diagnosis of special photoelectrical encoders [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010, 38(4): 79 – 82. (陈兴林, 刘杨, 吕恒毅. 采用小波处理的空间光电编码器智能故障诊断[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(4): 79 – 82.)
- [15] LI G. *Intelligent Control and its MATLAB implementation* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 261 – 273. (李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 261 – 273.)
- [16] CAO G, LI M, WANG J, *et al.* Application of T-S neural network in prediction for anaerobic bioreactors [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(11): 119 – 123. (曹刚, 李明玉, 王君, 等. T-S 模糊神经网络在厌氧反应器预测中的应用[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(11): 119 – 123.)
- [17] SUN Y, YAN Y, ZHANG B, *et al.* Fuzzy neural network method based on the T-S model for the urban water demand forecasting and its application [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(2): 136 – 139. (孙月峰, 闫雅飞, 张表志, 等. 基于 T-S 模型的模糊神经网络城市需水量预测方法研究[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 136 – 139.)
- [18] KE Y, XIE B, WU Q. The vehicle fault diagnosis research based on T-S model fuzzy neural network [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2012, 32(2): 41 – 44. (柯喻寅, 谢铨, 吴卿. 基于 T-S 模糊神经网络的汽车故障诊断系统的研究[J]. *杭州电子科技大学学报*, 2012, 32(2): 41 – 44.)
- [19] HE Y, ZHU K, GUO H, *et al.* Determining structure and parameters of fuzzy neural network [J]. *Application Research of Computers*, 2007, 24(3): 247 – 249, 252. (贺勇, 诸克军, 郭海湘, 等. 一种模糊神经网络的结构和参数的确定方法[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(3): 247 – 249, 252.)
- [20] LI W, LI Y. Application of the optimized M-SPRT method in pipeline leakage detection [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(4): 93 – 95. (李炜, 李阳. 优化 M-SPRT 法在管道泄漏检测中的应用[J]. *天然气工业*, 2009, 29(4): 93 – 95.)
- [21] WEN X, ZHANG H, ZHOU L. Fault diagnosis and fault tolerant control for control systems [M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 64 – 69. (闻新, 张洪钺, 周露. 控制系统的故障诊断和容错控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 64 – 69.)
- [22] CHEN B. *Automatic control system for electric drive* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 255 – 261. (陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 255 – 261.)