

基于滑模观测器的电流传感器故障监测系统设计

刘莹, 李娜, 陈玉玲

(沈阳工学院 信息与控制学院, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 为了保证电流传感器的工作效率, 为设备维护提供有效参考, 利用滑模观测器优化设计了电流传感器故障监测系统; 加设滑模观测器, 改装数据采集器、信号处理器等设备, 调整系统的电路连接方式, 在抗干扰约束下, 完成硬件系统的优化设计; 根据电流传感器的工作原理和故障特征, 构建电流传感器故障数学模型; 利用滑模观测器及其逻辑原理, 实时收集电流传感器的运行信号; 根据传感器故障特征, 选择并计算电流传感器的故障监测指标, 通过与设置故障标准的对比, 输出可视化的电流传感器故障监测结果; 通过系统测试实验得出, 所设计电流传感器故障监测系统的 A 相电流故障监测误差为 0.007 5 mA, B 相电流故障监测误差为 0.017 5 mA, 电阻故障监测误差为 0.135 Ω , 故障类型误检率最大为 1.54%, 漏检率最大为 1.88%, 均低于预设值, 由此证明优化设计系统具有良好的故障监测功能。

关键词: 滑模观测器; 电流传感器; 传感器故障; 故障监测系统

Design of Current Sensor Fault Monitoring System Based on Sliding Mode Observer

LIU Ying, LI Na, CHEN Yuling

(School of Information and Control, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: In order to ensure the working efficiency of the current sensor and provide an effective reference for equipment maintenance, the current sensor fault monitoring system is optimized and designed by using the sliding mode observer. Add a sliding mode observer, refit data collectors, signal processors and other equipment, adjust the circuit connection mode of the system, and complete the optimal design of the hardware system under the constraints of anti-interference. According to the working principle and fault characteristics of the current sensor, the fault mathematical model of the current sensor is constructed. Using the sliding mode observer and its logic principle, the running signal of the current sensor is collected in real time. On the basis of the fault characteristics of the sensor, the fault monitoring index of the current sensor is selected and calculated, and the visual fault monitoring result of the current sensor is output by comparing with the set fault standard. Through the system test experiment, it is concluded that the A-phase current fault monitoring error of the designed current sensor fault monitoring system is 0.007 5 mA, the B-phase current fault monitoring error is 0.017 5 mA, the resistance fault monitoring error is 0.135 Ω , and the maximum fault type false detection rate is 1.54%, and the maximum missed detection rate is 1.88%, which are all lower than the preset value, which proves that the optimal design system has a good fault monitoring function.

Keyword: sliding mode observer; current sensor; sensor failure; fault monitoring system

0 引言

电流传感器是能够感应到被测电流信号, 并根据特定的规律将侦测到的讯息转化为其他信息, 以达到传送、处理、储存、显示、记录电力信息的目的^[1]。不同类型的电流传感器可以应用到不同领域, 能够为家用电器、智能电网、电动车以及航天器等设备提供设备支持。电流传感器需要安装在不同的应用环境中, 因此部分电流传感器会长时间处于高温、高压等恶劣环境中, 容易发生故障。据不完全统计, 在智能电网、控制系统等环境中, 传感器故障占硬件设备总故障的概率较高。电流传感器发生故障会直接降低电流数据的采集精度, 甚至出现电流参数采集与传递空缺, 最终出现系统运行故障, 严重时还会产生设备烧毁、

爆炸等危险事故。为了保证电流传感器的应用安全以及使用价值, 有必要对处于工作状态的电流传感器设计相应的故障监测系统。故障监测系统的设计目的就是通过主动地从传感器上接收到各种运行信息, 并对传感器的运行错误进行分析, 从而实现设备故障监测。该系统可以对电流传感器各个组成元件的老化、过热和火灾进行识别。

当前已有学者对电流传感器故障监测系统做出了设计。文献 [2] 提出基于瞬时振幅的电流传感器微故障诊断方法。建立以瞬时振幅为基础的电流传感器微小故障模型, 并采用 Hilbert 变换估算相电流的瞬时幅度。采用 FWMP-CA 技术从三维 DC 信号中提取微故障概率密度分布函数, 建立故障检测阈值, 进行小故障检测与估算。文献 [3] 提

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-06-01。

作者简介: 刘莹(1981-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事嵌入式、图像处理、信号处理方向的研究。

引用格式: 刘莹, 李娜, 陈玉玲. 基于滑模观测器的电流传感器故障监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 74-79.

出基于可变增益状态观测器的电流传感器故障容错控制技术。采用可变增益状态观测器模型对电流值进行实时估算, 产生电流残差, 采用 CUSUM 方法对传感器故障进行实时检测和定位, 并在故障情况下采用观测器估计取代电流传感器信号, 对牵引系统进行容错控制。上述方法均具有一定的有效性, 但对电流传感器运行信号的观测性能仍有待提升。

为此在现有传感器故障监测系统的基础上, 本文设计了基于滑模观测器的电流传感器故障监测系统。滑模观测器主要是根据系统的外部变量的实测值得出状态变量估计值的一类动态系统, 它能够在一定特性下观测元件的状态轨迹, 提升元件滑模运动的观测精度。在电流传感器故障监测系统优化设计过程中, 通过滑模观测器的应用, 以期能够提高对故障的监测功能。

1 电流传感器故障监测硬件系统设计

1.1 电流传感器运行数据采集器

此次电流传感器故障分别从设备的运行电压和温度两个方面进行监测, 因此电流传感器运行数据采集器分为电压传感器和温度传感器两个部分。选用 VSM600D 型霍尔电压传感模块, 温度传感模块采用的是型号为 MAX6675 的螺钉式 K 型热电偶温度传感器。选用采集器的外部接线方式如图 1 所示。

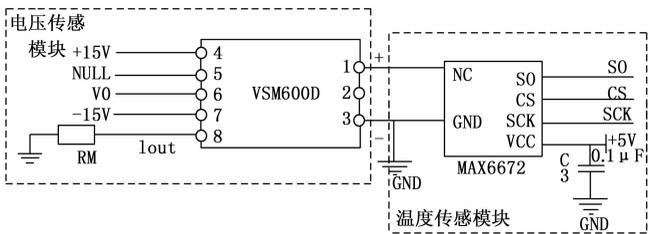


图 1 电流传感器运行数据采集器接线图

按照图 1 的接线方式, 将电压传感器和温度传感器连接在一起, 并安装在待测电流传感器的测点位置上。

1.2 电流传感器运行信号处理器

电流传感器故障监测系统使用 TMS320F2812 作为一种专用于 32 位控制的、最高指令速度 150 MIPS 的数字信号处理器, 该处理器具有高性能的计算和处理能力^[4]。该系统的信号处理部分采用静态 CMOS 技术, 所有的输入端均为施密特触发, 从而增强了设备的抗干扰性。该信号发生器的功率为 3.3 V, 核心电压为 1.8 V, 最高功率为 150 MHz^[5]。

1.3 功率驱动模块

从系统的可靠性和安全性角度出发, 选择了西门驱动器 SKHI23/17 作为一款具有过电流保护和短路保护功能的新型智能双管式执行器^[6]。该设备具有驱动、欠压保护、过电压保护等多种功能, 可为系统提供动力。信号缓冲器、脉冲抑制器的主要功能是保证驱动信号的幅值、宽度和脉冲边缘的最佳化, 特别是当脉冲宽度在 500 ns 以下的情况下, 不会向 IGBT 输出, 以保证驱动组件的响应速度在一个

可靠的范围内^[7]。互锁和死区时间电路确保了上臂和下桥臂的驱动信号互锁, 也就是每个都有规则地切换, 不能同时开启, 并且死区时间根据 TDT2 插入电阻器的变化来调节, 从上臂断开至完全闭合再断开下臂。电源监控、故障监控、错误记忆电路的功能是确保电源在 13 V 以下输出 ERROR, 过电流和短路时输出低, 并能自动关闭电源输出, 直至故障消除为止。

1.4 系统电路设计

1.4.1 电平处理电路

电平处理的内容包括信号整形、信号放大以及电平转换三个部分, 将被检测的传感器置于电源线路上, 在该装置工作时, 50 Hz 的 AC 电流流经该传感器, 其感应电流的频率是该传感器的 1/2 000。当该装置的工作电流是 10 A 时, 该传感器将会输出一个 5 毫安的 AC 信号^[8]。为了便于单片机的数据采集, 需要把交流电转换成直流电。电流感应器的红线与 IN1 相连, 而黑线与 IN2 相连, AC 电信号经变压器及整流二极管转换为 DC。图 2 为信号整形电路连接图。

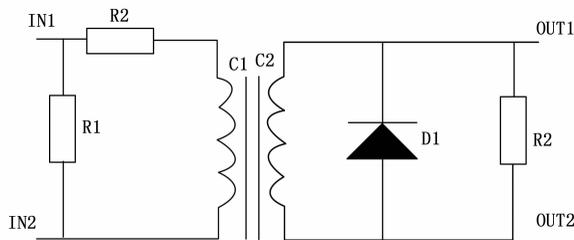


图 2 电流传感器信号整形电路图

电平变换器主要用于多种输入和输出功能的扩充, 利用高速 TTL-COMS 兼容性转换芯片, 完成电平变换功能, 在驱动程序作用下, 既可以实现电平的兼容性, 又可以简化周边电路。

1.4.2 故障监测保护电路

为了确保电路和系统硬件安全、可靠运行, DSP 还具有 PDPINT 的输出信号, 并与其它 DSP 的扩展 I/O 接口相结合, 可以很容易地完成对伺服系统的各种保护, 并通过设计故障监控和保护电路, 达到对系统设备运行过温和驱动板故障的保护。通过 NOR 门电路 MC14078BCP 对各类故障信号进行合成, 然后将其输入到管脚 PDPINT 中, 在此使用的是电平变换的功能^[9]。如果驱动板内部出现过电流、短路、模块驱动控制电压不足、模块控制控制电压过高、模块温度过高等, 则输出一个故障告警信号, 使得 MC14078BCP 输出为低, PDPINT 插针也会被拉到 Low, 这时 DSP 内定时器就会立刻停止计数, 所有的输出插针都处于高电阻状态, 即 PWM 硬件阻塞输出脉冲, 并生成一个中断信号, 以告知出现了异常^[10]。整个流程都是自动化的, 没有任何的程序介入。这对于快速地处理不同的故障状况是很有帮助的。在电机温度过高时, 由热敏开关产生故障, 并经光藕隔离变换到 DSP 输入/输出端口, 以保证系统的正

常工作。

1.4.3 故障监测结果显示电路

选用 JLX12864G-1016 型号的 LCD 液晶显示器, 为电流传感器故障监测结果的可视化输出提供硬件支持, 该型号的液晶显示器具有良好的显示效果、易于操作、成本低廉等特点, 可广泛用于多种人机交互显示, 充分满足多传感器冗余系统的故障信息显示。LCD 驱动芯片采用功能强大、稳定性好的 UC1701X, 采用串行通讯方式将指令、数据传输给芯片, 采用 SPI 通讯。SPI 总线的标准要求有四条线路: 数据输入线路、数据输出线路、时钟线路和选择线路。由于该液晶模组仅需接收数据, 因此不需采用数据输出线。显示电路中令 LCD_CS 信号为液晶模块 SPI 总线的片选信号, 低电平有效, LCD_RESET 信号是液晶模块的复位信号, 复位时通过 MCU 置为低电平, 置为高电平后液晶正常工作^[11]。LCD 模块的暂存器主要有两类: 数据寄存器和指令寄存器, 其中 LCD_RS 信号的选取, 高电平的 LCD_RS, 低电平的 LCD_RS。UC1701X 具备丰富的指令功能, MCU 可以根据不同的指令, 以及对应的数据, 实现所要显示的位置和内容。SCLK 信号是通过主机 MCU 来控制 SPI 总线的时钟信号。SDA 信号为 SPI 总线 LCD 模块的数据输入。LEDA 和 LEDK 是液晶的背光源和背光源的阴极, 它们可以通过 MCU 来控制, 为了使背光源的阴极更容易地被接到较低的位置, 背光电源的阳极被连接到一个能影响 LCD 的清晰度的上拉电阻器上, 一般设定为 500 欧姆。

1.5 硬件设备抗干扰设计

硬件设计中的抗干扰处理对于硬件系统的整体性能非常关键, 首先确定与其他硬件设备相连接的元件的位置, 再决定与组装相关的元件的位置, 以及对某些特定要求的元件的摆放位置, 以及功能模块的不同, 将不同的功能模块放在一起^[12]。良好的布局很关键, 在进行设计时, 必须要考虑到界面、关键设备的布置。其次, 请注意电源解耦和集成晶片解耦, 即在各印制板入口的电源线和地线之间, 并连接一个解耦电容。利用集成晶片解耦技术将 0.1 μF 陶瓷电容器置于各晶片的电源和接地端。最后, 留意电源线电流的大小, 尽可能的增加电线的宽度, 采用电源线、地线的方向和数据的传输方向, 并在电源线和地线间增加 0.1 μF 的陶瓷电容器。

2 电流传感器故障监测系统软件设计

在上述硬件设备的基础上, 对电流传感器故障监测系统软件进行设计。构建电流传感器故障数学模型, 对电流传感器故障类型进行分类并分别计算其特征值, 利用滑模观测器获取传感器运行信号, 针对电流传感器的不同故障类型, 对不同的指标进行监测。最后, 设置故障监测阈值, 判定待测设备是否处于故障状态, 实现电流传感器故障监测。

2.1 构建电流传感器故障数学模型

电流传感器是遵循霍尔效应研制的硬件设备, 从结构

上看, 电流传感器包含一个原边线圈和一个副边线圈, 当传感器达到磁平衡时, 原副边线圈电流满足式如下关系式:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (1)$$

其中: N_1 和 N_2 分别为原边线圈和次边线圈的匝数, I_1 和 I_2 对应的是原边电流和次边电流。根据公式 (1) 可以看出, 在已知的原副边线圈的数目的情况下, 通过测量副边的电流, 即可从平衡关系推断出原边的电流^[13]。由于机械振动、电磁、噪声等因素的干扰, 以及接触不良等因素, 使得电流传感器出现故障。表 1 表示的是常见的电流传感器故障类型。

表 1 电流传感器故障类型说明表

故障类型	故障原因	故障特征
卡死故障	供电不足、线圈分布不均等	传感器输出结果为定值
偏差故障	传感器内部存在偏置电压或电流	电流传感结果偏差超出正常范围, 且偏差量固定
增益故障	工作环境存在正向干扰	输出读数与真实值之间存在倍数关系
开路故障	信号电缆断裂, 管脚接触不良	传感器结果不显示
短路故障	污染导致电路通路腐蚀, 桥路短路等	传感器输出结果为零
漂移故障	传感器内部元件温度异常	电流传感结果偏差超出允许范围, 偏差量不固定

将表 1 中表示的电流传感器故障类型的运行特征进行量化表示, 其中卡死故障、增益故障和偏差故障特征可以表示为:

$$y_{\text{out}}(t) = \begin{cases} k_i, i \in R_1 \\ \gamma_i y_{\text{in}}(t), i \in R_2 \\ y_{\text{in}}(t) + \Delta i, i \in R_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中: $y_{\text{in}}(t)$ 和 $y_{\text{out}}(t)$ 分别表示 t 时刻电流传感器的输入值和输出值, R_1 、 R_2 和 R_3 对应的是卡死、增益以及偏差故障类型, k_i 为常数, 用来表示传感器输出固定值, γ_i 为待测电流传感器的增益比例系数, Δi 为恒定偏差^[14]。根据电流传感器的时间特性, 可以将故障分为突变、缓变和间歇三种形式, 其中偏差故障和漂移故障属于突变故障, 增益故障满足缓变故障类型, 而间歇故障主要针对的是卡死、开路、短路等特征, 其数学模型表达式如下:

$$y_{\text{out}}(t) = y_{\text{in}}(t) + \alpha \cdot \tau(t) \quad (3)$$

其中: $\tau(t)$ 表示待测传感器发生故障的时间, 一般以集合的方式表示, α 为间歇故障的发生幅值^[15]。根据故障数学模型的构建结果, 确定不同电流传感器故障类型的基本特征, 以此作为判断待测传感器是否存在故障的比对标准。

2.2 利用滑模观测器获取传感器运行信号

在电流传感器故障监测系统中安装滑模观测器的目的是用来观测电流传感器待测目标的运行状态, 并收集其实时运行数据。滑模观测器的设计可以分为两个阶段, 首先系统状态由任意初始状态向滑模面移动, 直到电流传感器进入滑模面, 系统状态进入滑模面后要求其能沿着滑模面

移动, 并使此时的等效运动具有期望的性能。此次故障监测系统中使用滑模观测器的设计结构如图 3 所示。

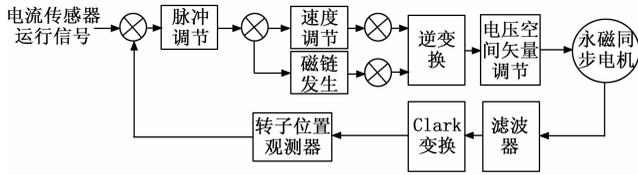


图 3 滑模观测器结构框图

在滑模观测器设计与应用过程中省略了机械式或光电式编码器, 以转子滑模观测器代之。滑模观测器的输入信号为电流传感器的实时运行定子电压和电流, 通过滑动薄膜控制系统进行计算, 将转子的角度和速度输出给系统转换和调整。

当电流传感器状态在滑模面运动时, 硬件系统中安装的滑模观测器具备很好的鲁棒性。对于一个多变量多输出的非线性系统, 可用公式 (4) 表示的状态方程描述。

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + B(x)u \\ y(x) = Cx \end{cases} \quad (4)$$

式中, C 为常数系数, $A(x)$ 为电流传感器状态变量, $B(x)$ 为输入变量, $y(x)$ 为观测器的输出量, u 为观测器误差阈值^[16]。由此可以将滑模观测器的工作原理量化表示为:

$$\frac{dx}{dt} = A(x) + B(x)u - K \operatorname{sgn}(C - y) \quad (5)$$

其中: K 为增益矩阵, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为取整函数。按照上述原理, 可以将电流传感器故障监测系统安装在待测电流传感器上, 根据图 4 表示的逻辑运行原理, 得出传感器实时运行数据的观测结果。

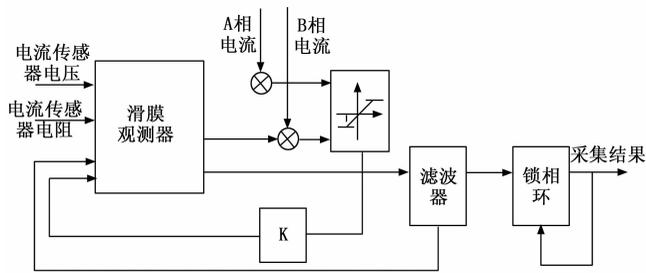


图 4 滑模观测器逻辑原理图

电流传感器的实时运行数据输入到滑模观测器中, 经过滤波得到的新状态, 可以量化表示为:

$$y_{\text{new}}(t) = -A_f y(t) + A_f C x(t) + A_f N y(t) \quad (6)$$

其中: N 为滑模观测器中存在的不确定因素, A_f 为传感器的噪声矩阵。那么提取滑模观测器读取的实时状态参数, 即为电流传感器实时运行数据的采集结果。为了滤除初始采集数据中的干扰, 需要将滑模观测器的输出结果进行滤波处理^[17]。设定相邻两次采样允许的最大偏差值为 E , 定义滑模观测器的第 i 个电流传感器运行数据采集结果为 $c(i)$, 则经过滤波处理后得出的结果为:

$$c = \begin{cases} c(i), & |c(i) - c(i-1)| \leq E \\ c(i-1), & |c(i) - c(i-1)| > E \end{cases} \quad (7)$$

经过滤波处理后最终输出的结果, 即为待测电流传感器实时运行数据的采集结果。

2.3 选取与计算电流传感器故障监测指标

针对电流传感器的不同故障类型, 对不同的指标进行监测。设置电流传感器异常变化的三个故障特征监测指标及其计算公式如下:

$$\begin{cases} i_{a_res} = |I_A - I'_A| \\ i_{b_res} = |I_B - I'_B| \\ \Delta = |\omega_{re} - \omega| \end{cases} \quad (8)$$

式中, I_A, I_B, I'_A 和 I'_B 分别表示的是 A、B 相电流测量值与对应电流观测器模型的估计值, ω_{re} 和 ω 为电流传感器转速的测量值与估计值, 计算结果 i_{a_res}, i_{b_res} 和 Δ 对应的是两相电流和转速的偏差值^[18]。在电流传感器正常工作状态下, 其计算值基本为 0, 而在不同的故障状态下, 其故障特征值也会有相应的变化。在短路和断路故障的监测过程中, 需要另外对传感器的电阻进行监测, 监测结果可以表示为:

$$R = \frac{1\,000 \cdot U}{5 - U} \quad (9)$$

其中: U 为滑模观测器采集的传感器运行电压数据。同理可以计算出其他的电流传感器故障监测指标, 并通过数据整合得出结果。

2.4 实现电流传感器故障监测

根据电流传感器的故障原理, 设置故障监测阈值, 并比对监测指标与设置阈值之间的大小关系, 若当前电流传感器的监测值低于阈值, 则认为电流传感器当前处于正常运行状态, 否则判定待测设备处于故障状态, 需要通过与设置故障特征标准之间的匹配, 确定设备的故障类型。从实时监测的角度来看, 以测量电流传感器的实时工作数据为曲线, 以时间为横坐标, 从总体上看是动态的电流数值。在系统数据展示模块的设计中, 采用了 Chart 组件, 可以在属性对话框中直接选择曲线的类型、坐标轴的设置、曲线的命名。为实现对电流传感器的实时监控, 并根据计时器的周期特性, 以每秒 1 个数据点的形式绘制出一条动态曲线^[19]。此外, 为了方便清晰地观察监测结果, 设置 80 个最大数据显示点, 并在一定时间内对在此时间之前的 81 个数据点进行删除显示接口, 从而形成 80 个数据点稳定地显示的图表^[20]。最终将包含电流传感器运行状态、故障判定等内容的监测结果, 以可视化的形式输出, 实现系统的电流传感器故障监测功能。

3 系统测试

为验证所设计基于滑模观测器的电流传感器故障监测系统的应用性能, 设计系统测试实验, 此次实验主要从系统的故障监测功能方面进行分析, 从而验证优化设计的系统是否满足应用要求。

3.1 准备电流传感器监测样本

为了保证系统测试结果的可信度, 同时为系统的适配

度测试提供充足的研究样本, 设置 AKH-0.66、LZZBJ9-10A3G、HCT204A 和 LFZ-10Q 四种型号的电流传感器作为监测样本, 分别将其编号为 C01、C02、C03、C04, 样本总数量为 800 个, 每个型号样本均为 200 个。其中 AKH-0.66 型电流传感器的耐温温度为 220 °C, 另外三种类型的电流传感器的耐温温度均为 180 °C, 使用普通的塑料包线方式。在系统测试前期, 根据不同型号传感器样本的内部结构, 确定其基本运行参数, AKH-0.66 电流传感器的输入和输出的最大电流分别为 3.5 mA 和 12 mA, 温度系数为 60 ppm/°C, 工作频率范围为 [0.03 kHz, 10 kHz], 能够承受 60 mA 的短时热电流, LZZBJ9-10A3G、HCT204A 和 LFZ-10Q 三种型号电流传感器的输入和输出的最大电流分别为 2.5 mA 和 10 mA, 温度系数为 50 ppm/°C, 工作频率范围为 [0.03 kHz, 10 kHz], 能够承受 50 mA 的短时热电流。在初始状态下, 电流传感器均为正常工作状态, 通过人为破坏的方式将监测样本调整至故障状态, 设置的故障类型包括卡死、偏差、增益和短路故障四种类型, 并对样本故障类型进行标记。

3.2 设置系统测试指标计算

从电流传感器故障监测功能方面来看, 设置测试指标包括故障指标监测误差、故障类型的误检率和漏检率, 其中故障指标监测误差的数值结果为:

$$\epsilon_{\text{error}} = \sum_{i=1}^n |x_{i-\text{monitor}} - x_{i-\text{actual}}| \quad (10)$$

其中: $x_{i-\text{monitor}}$ 和 $x_{i-\text{actual}}$ 分别为第 i 个监测指标的监测值和实际值。另外误检率和漏检率的量化测试结果如下:

$$\begin{cases} \eta_e = \frac{N_{\text{err}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \\ \eta_l = 1 - \frac{N_{\text{cor}} + N_{\text{err}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \end{cases} \quad (11)$$

式中, 变量 N_{err} 、 N_{cor} 和 N_{total} 分别表示的是故障类型监测错误、监测正确的样本数量以及实验设置的样本总数量, $N_{\text{cor}} + N_{\text{err}}$ 表示的是系统能够正常输出的故障监测样本数量。测试得出监测误差越大, 误检率和漏检率越大, 证明系统的故障监测功能越差。为了保证此次故障监测系统的设计价值, 要求监测的电流误差不得高于 0.1 mA, 电阻误差不得高于 0.1 Ω, 误检率和漏检率均不得高于 2.0%。

3.3 系统测试过程与结果分析

按照硬件系统的优化设计结果, 对各个组成元件进行调试, 并利用供电电路实现硬件设备的连接与驱动。图 5 为部分硬件设备的配置结果。

由于优化设计的故障监测系统应用了滑模观测器设备, 因此需要将相关的硬件设备连接到监测样本上, 并设置观测器的初始运行参数均为 0。同时启动电流传感器监测样本、系统硬件设备以及故障监测程序, 输出实时故障监测结果。图 6 表示的是传感器样本 C01 的监测结果。

由此可以得出系统测试实验中所有传感器样本的故障监测结果, 通过与初始样本设置标记的对比, 可以确定当



图 5 实验环境配置实景

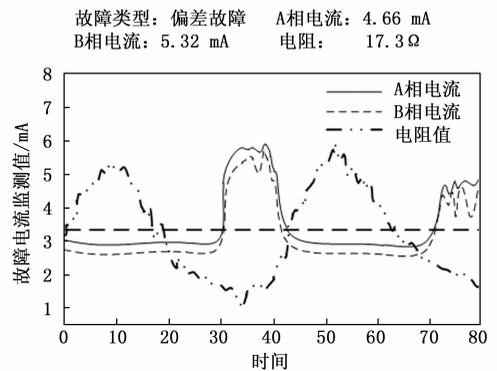


图 6 电流传感器故障监测结果

前系统输出的故障监测结果是否正确。通过相关数据的提取, 得出系统故障指标监测误差的测试结果, 如表 2 所示。

表 2 系统故障指标监测误差测试结果

样本编号	故障指标	真实值	监测值
C01	A 相电流值/mA	5.75	5.78
	B 相电流值/mA	3.34	3.35
	电阻值/Ω	5.91	5.90
C02	A 相电流值/mA	4.68	4.66
	B 相电流值/mA	5.35	5.32
	电阻值/Ω	17.6	17.3
C03	A 相电流值/mA	3.42	3.41
	B 相电流值/mA	4.57	4.55
	电阻值/Ω	20.6	20.4
C04	A 相电流值/mA	10.31	10.28
	B 相电流值/mA	8.45	8.42
	电阻值/Ω	16.23	16.20

将表 2 的数据代入到公式 (10) 中, 得出所设计电流传感器故障监测系统的 A 相电流故障监测误差为 0.007 5 mA, B 相电流故障监测误差为 0.017 5 mA, 电阻故障监测误差为 0.135 Ω, 均低于预设值。

分别设置电流传感器卡死、偏差、增益和短路故障四

种类型,每种故障出现的次数为5次。采用本文系统进行电流传感器故障监测,进行10次实验,故障监测结果如表3所示。

表3 电流传感器不同类型故障的监测准确性

实验次数	卡死故障监测次数	偏差故障监测次数	增益故障监测次数	短路故障监测次数
1	5	5	5	5
2	5	5	5	4
3	5	5	5	5
4	5	5	5	5
5	5	5	5	5
6	5	5	4	5
7	5	5	5	5
8	5	5	5	3
9	5	4	5	5
10	5	5	5	5

分析表3可知,在10次电流传感器不同类型故障的监测过程中,均能准确监测到卡死故障,对偏差故障、增益故障的监测仅有一次实验中出现漏检情况,对短路故障的监测出现两次漏检情况。综上可证明所设计系统能够准确监测电流传感器不同类型的故障。

通过公式(11)的计算,得出系统误检率和漏检率的测试结果,如图7所示。

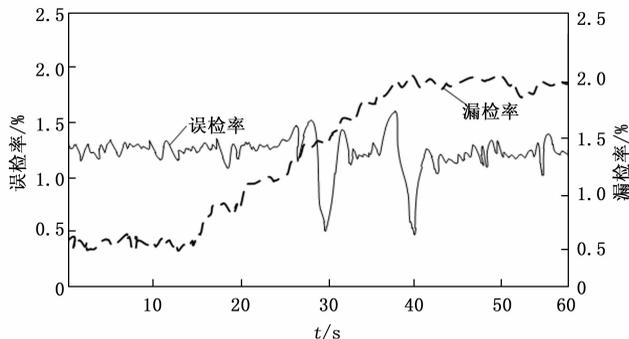


图7 电流传感器误检率与漏检率的测试结果

从图7中可以直观的看出,设计系统的误检率和漏检率的最大值分别为1.54%和1.88%,均低于2.0%,综合三个指标的测试结果,可以证明优化设计基于滑模观测器的电流传感器故障监测系统具有良好的监测功能。

4 结束语

电流传感器的工作状态直接决定其应用价值,通过滑模观测器的应用,充分考虑到外界干扰因素对电流传感器故障监测的影响,最大程度的提高了系统的故障监测功能。然而系统测试实验只针对故障监测功能进行测试,未对系统的运行性能进行测试,由于测试数据不完整还不能直接投入到实际应用中,还需要在今后的工作中对相关数据作进一步补充。

参考文献:

- [1] 郭磊磊,金楠,李琰琰,等.基于滑模观测器的并网逆变器无交流电压传感器模型预测控制[J].电力自动化设备,2020,40(6):108-114.
- [2] 许水清,陶松兵,柴毅,等.基于瞬时幅值的光伏系统电流传感器微小故障检测及估计[J].控制与决策,2022,37(3):583-592.
- [3] 李启明,李学明,黄庆.牵引系统电流传感器故障诊断与容错控制[J].电气自动化,2020,42(3):80-82.
- [4] 韩超,龙锋利,程健,等.直流电流传感器高精度校准系统设计[J].原子能科学技术,2020,54(1):166-171.
- [5] 潘凤文,弓栋梁,高莹,等.基于锂离子电池线性化模型的电流传感器故障诊断[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(2):435-441.
- [6] 贾嘉瑞.基于物联网的配电系统传感器故障检测与定位[J].信息技术,2021(10):161-166.
- [7] 李启明,李学明,黄庆,等.电机驱动系统电流传感器故障诊断与容错控制[J].科学技术与工程,2020,20(32):13265-13272.
- [8] 尚博祥,殷博,郭晓艳,等.电力物联网技术在电力设备在线监测中的应用研究[J].电气自动化,2021,43(6):67-70.
- [9] 杨泽斌,王丁,孙晓东,等.无轴承异步电机传感器故障容错控制[J].仪器仪表学报,2021,42(5):99-109.
- [10] 卫星光,房方,刘玉升.基于自适应观测器的燃气轮机控制系统传感器故障容错控制[J].中国电机工程学报,2021,41(19):6658-6670.
- [11] 单彪,堵俊,商亮亮.基于改进PCA空调系统传感器故障检测与诊断[J].控制工程,2020,27(4):765-770.
- [12] 吕晓鹏.基于IDDT的传感器集成电路故障智能检测研究[J].通信电源技术,2020,37(10):35-36,39.
- [13] 张爽爽,陈焕新,张弘韬,等.基于改进主元分析方法的空调系统传感器故障检测和诊断研究[J].制冷学报,2020,41(1):147-153.
- [14] 万磊,戴滨,蒋寒.基于自主诊断重构技术的航天器故障检测系统设计[J].计算机测量与控制,2021,29(9):5-9,22.
- [15] 秦宝坤,戴宇辉,秦园莉,等.基于关联规则算法的卷烟厂空调系统传感器故障实时检测方法[J].工业仪表与自动化装置,2021(6):83-87.
- [16] 龙广钱,李博,陈启新.列车测速测距设备故障检测系统研究[J].计算机测量与控制,2020,28(1):16-20,40.
- [17] 刘娇,程然,王颖,等.基于非线性卡尔曼滤波器的双通道传感器故障检测及隔离方法[J].节能技术,2021,39(3):281-284.
- [18] 苗雨阳,刘成刚.空调系统传感器自动故障诊断方法研究[J].机械设计与制造,2020(7):161-164,169.
- [19] 曹兆锦,牛绿原,刘超.基于滑模观测器的PMSM变结构直接转矩控制[J].大电机技术,2020(1):5.
- [20] 白玉轩,杨建忠,孙晓哲,等.基于GA-BP的机电传动系统传感器故障诊断研究[J].机床与液压,2021,49(15):188-194.