

# 基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统设计

张唐圣<sup>1</sup>, 高云广<sup>2</sup>, 孙晋璐<sup>1</sup>

(1. 山西科技学院 智能制造工程学院, 山西 晋城 048011;

2. 太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 为实现对定子绕组匝间短路故障行为的精准识别, 确保异步电机的稳定运行状态, 设计了基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统; 在 DSP 外围电量回路中, 设置 ARM 处理器与步进电机驱动模块, 采用模数转换单元结构, 调节电量互感装置的实时运行状态, 实现对异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统硬件设计; 根据 Lyapunov 函数定义条件, 确定 Nussbaum 增益参数取值范围, 在此基础上, 定义 Lyapunov 算法模型, 再通过计算故障预测特征的方法, 求解定子绕组的短路故障电压方程与匝间电感参数, 对定子绕组匝间短路故障特征进行分析, 实现异步电机定子绕组匝间短路故障检测; 实验结果表明, 所设计系统可以有效控制定子绕组匝间短路故障电流和电压检测结果与非干扰条件下检测结果之间的差值水平, 能够精准识别定子绕组匝间短路故障行为, 保障异步电机的稳定运行状态。

**关键词:** Lyapunov 理论; 异步电机; 定子绕组; 匝间短路; 故障检测系统; 外围电路; Nussbaum 增益参数; 电感参数

## Design of Asynchronous Motor Stator Winding Inter turn Short Circuit Fault Detection System Based on Lyapunov Theory

ZHANG Tangsheng<sup>1</sup>, GAO Yunguang<sup>2</sup>, SUN Jinlu<sup>1</sup>

(1. College of Intelligent Manufacturing Engineering, Shanxi Institute of Science and Technology, Jincheng 048011, China;

2. School of Electronic Information Engineering Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** To achieve the accurate identification of stator winding inter turn short circuit fault behavior and ensure the stable operating state of asynchronous motors, an asynchronous motor stator winding inter turn short circuit fault detection system for based on Lyapunov theory was designed. The system is composed of an ARM processor, stepper motor drive module and DSP peripheral power circuit. An analog-to-digital conversion unit is adopted to adjust the real-time operation status of the power mutual inductance device, achieving the hardware design of the asynchronous motor stator winding inter turn short circuit fault detection system. Based on the Lyapunov function definition conditions, the parameter range of Nussbaum gain is determined. On this basis, a Lyapunov algorithm model is defined. Then, the fault prediction characteristics are calculated to solve the short-circuit fault voltage equation and inter turn inductance parameters of the stator winding, and the inter turn short-circuit fault characteristics of the stator winding are analyzed to achieve the asynchronous motor stator winding inter turn short-circuit fault detection. The experimental results show that the designed system can effectively control the difference level between the current and voltage detection results of stator winding inter turn short circuit faults and the detection results under the non-interference conditions, the system can accurately identify the behavior of stator winding inter turn short circuit faults, and ensure the stable operation status of asynchronous motors.

**Keywords:** Lyapunov theory; asynchronous motor; stator winding; inter turn short circuit; fault detection system; peripheral circuits; Nussbaum gain parameter; inductance parameters

## 0 引言

异步电机是一种特殊的感应电动机元件, 其运行过程中, 转子绕组感应电流与气隙旋转磁场的相互作用产生电磁转矩, 而这种电信号作用可以将机电能量直接转化为机械能量<sup>[1-2]</sup>。定子绕组是安装在定子结构上的绕组设备, 由

多个连接在一起的铜制线圈组成。对于异步电机设备而言, 由于相邻定子绕组不能保持完全接触状态, 因此绕组元件的匝间距离也就不能为零, 而这也使得匝间短路故障行为成为了异步电机的常见运行问题。因此, 对异步电机定子绕组匝间短路故障进行检测具有重要意义。

文献 [3] 设计了基于深度学习的故障检测系统, 采用

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-06-16。

基金项目: 山西科技学院校级科研项目(XKY020); 山西省青年基金项目(201901D211285)。

作者简介: 张唐圣(1981-), 男, 硕士研究生, 讲师。

引用格式: 张唐圣, 高云广, 孙晋璐. 基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 57-63, 122.

学习网络模型，对电力故障数据样本进行处理，再根据多尺度特征融合条件，实现对短路故障参数的检测与识别。文献 [4] 设计了基于 ECT 采集单元积分回路的暂态特性检测系统，根据过零点暂态误差结果，确定匝间短路故障数据的提取结果，再通过模拟罗氏线圈信号输出行为的方式，激发主机元件对于故障数据样本的检测能力，从而实现对于短路故障行为的精准识别。然而上述两种检测系统无法精准识别故障行为。

Lyapunov 函数常被用来解决非线性系统中的信息参量输出与调节问题。对于输出受限等特殊非线性系统输出调节问题而言，Lyapunov 函数的定义必须参考反步法原则，一个数据样本参量能否用于计算函数表达式，同时受到同源性条件与全状态非线性约束条件的影响<sup>[5]</sup>。随着 Lyapunov 函数的推广，非线性调节系统的输出受限问题得到了较好解决，特别是在关键输出位置发生障碍问题的情况下，通过计算 Lyapunov 函数，可以判断误差输出向量的瞬时状态，且整个运算过程中，误差向量的取值范围不会发生改变，所以未知参数向量的求解结果始终具有较强的收敛性，这也是 Lyapunov 函数表达式不受参量指标取值条件影响的主要原因<sup>[6]</sup>。此外，Lyapunov 函数在解决输出约束问题时，既可以保证数据对象取值结果的精确性，也能够在此定数值区间内，实现对表达式运算条件的双向定义，这就表示函数算法的开放等级相对较高，即使是在指标参量取值结果无穷大的情况下，函数表达式求解流程也能够与非线性系统信息参量输出问题保持较强的适应性关系。因此，在定义 Lyapunov 函数时，并不需要过多考虑运算参量的取值问题。基于上述分析，设计了基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统。

### 1 异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统硬件设计

异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统的硬件设计方案，由 DSP 外围电路、ARM 处理器、步进电机驱动模块、模数转换单元、电量互感装置 5 个设计环节共同组成，系统硬件结构如图 1 所示。

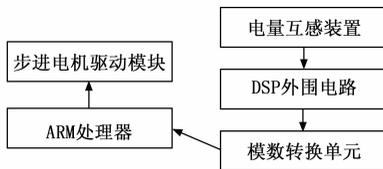


图 1 异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统硬件结构图

由图 1 可知，通过电量互感装置测量电流和电压，利用 DSP 外围电路和模数转换单元将模拟信号转换为数字信号，ARM 处理器接收数字信号进行处理和分析，然后通过指令传输给步进电机驱动模块控制电机运行。以下为各个模块的具体作用和主要设计内容。

#### 1.1 DSP 外围电路

DSP 外围电路提供了异步电机定子绕组匝间短路故障

检测系统所需的电量传输信号，其核心运行目的是将低压输入信号转换成高压输出信号，所以连接于电量转换回路中电阻元件接入部分的数值水平相对较高。LM358 反相器直接与外围电路的 -VDD 终端相连，由于该元件连接子回路中同时负载电流表与电压表装置，所以在电路体系保持供电状态的过程中，根据两个电度表元件示数的实时比值关系，就可以确定反相器设备的实时运行能力，由于电压、电流信号的传输方向会随着异步电机运行状态的改变而发生变化，所以当两个电度表示数的取值方向完全相同时，DSP 外围电路为检测系统提供正向传输电量；当两个电度表示数的取值方向一个为正、一个为负时，DSP 外围电路为检测系统提供负向传输电量。DSP 设备是外围电路的核心应用部件，具有较强的变频控制能力，受到反相器设备运行特性的影响，电量信号很难在 DSP 设备中大量累积，所以随着异步电机定子绕组匝间距离的改变，DSP 外围电路所提供电量传输信号的数值水平只会出现小幅增大或缩小的情况。DSP 外围电路连接结构如图 2 所示。

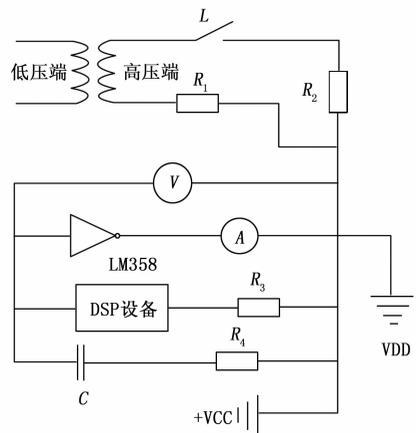


图 2 DSP 外围电路结构图

电路 +VCC 端口、-VDD 端口之间存在大量的电阻元件，且这些电阻设备已接入部分的阻值水平并不相同，所以 DSP 外围电路在驱动异步电机元件时，会根据定子绕组元件匝间距离的具体数值，调节传输电流与传输电压的数值水平，从而在满足主机元件对于短路故障行为的检测需求的同时，避免电量信号在高、低压端口之间出现频繁跳动的情况。

#### 1.2 ARM 处理器

ARM 处理器是基于 RISC 布局结构设置的异步电机定子绕组匝间短路故障检测元件，由 CPU 主板、Cache 端口、目标电机设备、Core 终端主机等多个应用部件共同组成，接受 DSP 外围电路的直接调度，可以同时控制步进电机驱动模块、模数转换单元、电量互感装置 3 个电信号检测结构，ARM 处理器连接结构如图 3 所示。

在 ARM 处理器单元中，相关部件结构的具体应用能力如下。

- 1) ARM 处理设备：ARM 处理负责接收 DSP 外围电

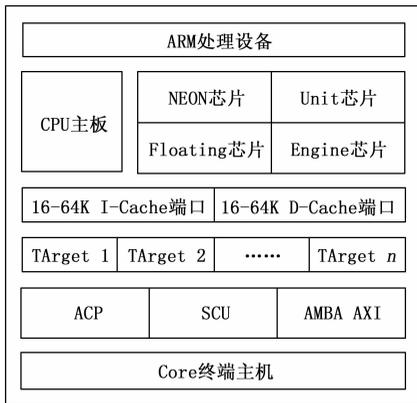


图 3 ARM 处理器连接结构

路输出的电量信号, 同时调节 CPU 主板、Cache 端口等下级应用部件, 能够根据异步电机定子绕组匝间短路故障行为的表现情况, 对短路电流、短路电压参量进行提取, 从而使得 CPU 主板能够精准控制定子绕组匝间的实时距离<sup>[7]</sup>。

2) CPU 主板: CPU 主板的管控 NEON 芯片、Unit 芯片、Floating 芯片与 Engine 芯片。由于芯片设备的连接状态不受到电量信号传输行为的影响, 所以只要 ARM 处理设备向外输出短路故障检测信号, 芯片设备内数据样本参量的记录数值就不可能为零。

3) Cache 端口: Cache 端口由 16-64K I-Cache、16-64K D-Cache 两部分组成, 两个端口组织同时开放, 下级目标电机设备 (TTarget<sub>1</sub>、TTarget<sub>2</sub>、……、TTarget<sub>n</sub>) 就可以接入 ARM 处理器之中。

4) Core 终端主机: Core 终端主机作为 TTarget<sub>1</sub>、TTarget<sub>2</sub>、……、TTarget<sub>n</sub> 电机设备的负载平台, 可以接收 ARM 处理设备输出的短路电流、短路电压参量。由于 ARM 处理设备与 Core 终端主机的间隔距离较远, 所以电信号参量在经过 CPU 主板与 Cache 端口时, 会出现数据样本浪费的情况<sup>[8]</sup>。因此, ARM 处理器为实现对 Core 终端主机的按需调度, 会不断接收 DSP 外围电路输出的电量信号, 直至 Core 终端主机能够完全负载 Cache 端口中的 TTarget 对象。

### 1.3 步进电机驱动模块

为驱动异步电机, 使得检测主机能够准确定义定子绕组匝间短路故障行为的表现强度, 必须设置步进电机驱动模块。该模块结构的最主要设置目的就是保障异步电机的运行能力, 从而使其为定子绕组提供稳定的动力供应作用<sup>[9]</sup>。步进电机结构如图 4 所示。

图 4 中, 滚珠轴承会随着转轴运动而表现出一定程度的收紧或放松状态, 一般来说, 滚珠轴承收紧对应磁钢结构磁性能力的增强, 而滚珠轴承放松对应磁钢结构磁性能力的减弱。转子同时存在于磁钢结构的内、外表面, 其转速水平会随着磁性能力的改变而发生变化, 当步进电机快速向外输出电量信号时, 两个转子元件之间的物理距离不

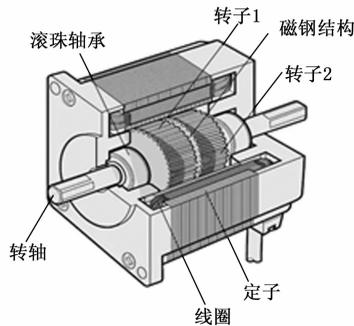


图 4 步进电机结构图

断缩小, 而这也是导致定子绕组匝间距离增大、短路故障行为能力增强的主要原因。

对于图 4 所示的步进电机结构而言, 在驱动其运动行为时, 主要遵循步进电机驱动作用原理如图 5 所示。

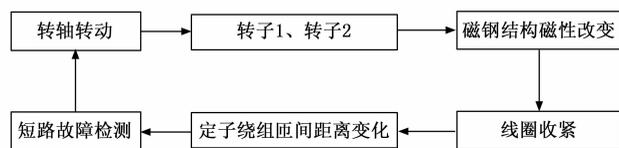


图 5 步进电机驱动作用原理

转轴发生转动行为, 带动转子 1、转子 2 所处位置发生改变, 此时磁钢结构的磁性水平发生变化, 线圈不断收紧。当前情况下, 定子绕组匝间存在短路故障行为, 绕组匝间距离迅速变化, 系统主机元件可针对步进电机驱动模块的瞬时状态, 判断短路故障行为的表现强度<sup>[10]</sup>。此外, 系统主机元件对于步进电机驱动模块瞬时状态的检测有可能出现不符合步进电机实时运行状态的情况, 故而若检测结果无法描述短路故障行为的实时表现强度, 步进电机转轴则会继续转动, 而这也会导致故障程度的不断加大。因此, 在设计步进电机驱动模块时, 还要确保 DSP 外围电路对于 ARM 处理器的电量供应行为保持稳定状态。

### 1.4 模数转换单元

模数转换单元可以将异步电机输出的电量信号由模拟状态转换为数字状态, 从而使得步进电机驱动模块能够得到足量的电量供应。单元结构内部负载一个 12 位的 ADC 转换装置, 可以利用 S/H-A、S/H-B、REG 等多个接口组织, 将完成转换的数字电量信号传输至电量互感装置之中, 一方面避免模数转换单元内出现电量信号混乱传输的情况, 另一方面也可以实现对步进电机驱动模块运行速率的有效控制。12 位 ADC 转换装置两端负载 5 对相互关联的端口组织, 其中 MUX 端口对应 S/H-A 端口, 分别接受自动排序器与 SOC 装置的调度, 可以联合 ENCLK 设备, 干预 HSP-CLK 元件的连接行为, 从而为电量信号提供相对稳定的输出环境; ADCIN 端口对应 S/H-B 端口、GPIO 端口对应 REG 端口、ADCSOC 端口对应 EVA 端口、XINT 端口对应 EVB 端口, 能够感知电量信号转换行为的进行程度, 从而使得模数转换单元、DSP 外围电路中的电量信号输出速

率保持一致<sup>[11]</sup>。模数转换单元布局结构如图 6 所示。

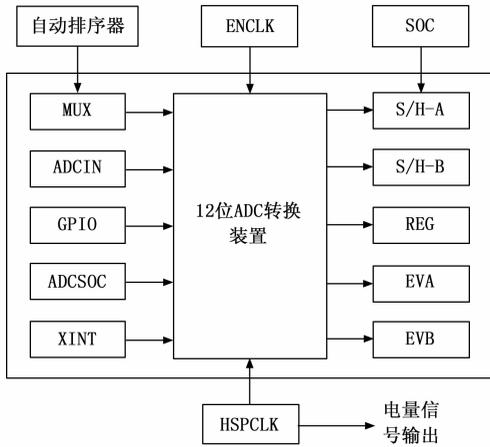


图 6 模数转换单元布局结构

ENCLK 设备、HSPCLK 元件分别负载于 12 位 ADC 转换装置的两端，前者与步进电机驱动模块相连，能够精准感知磁钢结构磁性水平的变化状态；后者与电量互感装置相连，可以根据步进电机驱动作用的表现强度，调节 DSP 外围电路与 ARM 处理器的实时连接关系，从而在传输数字化电量信号的同时，实现对异步电机设备的定向化驱动。

### 1.5 电量互感装置

电量互感装置的本质是敏感性较强的霍尔元件，可以根据模数转换单元中电量信号的输出强度，对故障电压、故障电流进行实时监测，从而最大化保障异步电机设备的稳定运行状态，使得 ARM 处理器能够在单位运行周期内，得到足量的短路故障数据检测样本<sup>[12-13]</sup>。在异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统中，电量互感装置接受模数转换单元的直接控制，在数字信号输出量相对较小的情况下，该装置的实时运行速率也相对较慢，此时模块设备对步进电机的驱动作用能力相对较弱；而在数字信号输出量相对较大的情况下，该装置的实时运行速率相对较快，此时模块设备对步进电机的驱动作用能力极强，模拟状态下的电量信号快速转换为数字状态，主机元件也可以实现对故障电压、故障电流数值的准确检测。

由于短路故障情况下，异步电机定子绕组匝间距离不断缩小，步进电机已接入部分的电阻数值也随之缩小，此时故障电压、故障电流的数值水平不断增大，电量互感装置中电信号样本的单位累积量也相对较大<sup>[14]</sup>。如果异步电机运行速率与定子绕组匝间距离出现瞬时不匹配的情况，表示此时 DSP 外围电路无法有效控制模数转换单元中的电量信号转换行为，电量互感装置对于定子绕组匝间短路故障行为的检测能力也相对较弱。

## 2 基于 Lyapunov 理论的定子绕组匝间短路故障特征

系统主机对于定子绕组匝间短路故障特征的检测，应

在系统硬件的基础上，定义 Lyapunov 算法模型，再根据故障预测特征提取结果，求解定子绕组的短路故障电量方程，从而确定匝间电感参数的实际取值范围。

### 2.1 Lyapunov 算法模型

Lyapunov 算法模型约束异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统的运行能力，本章节内容从 Lyapunov 函数定义、Nussbaum 增益参数计算两个角度，推导算法模型运算表达式。

#### 2.1.1 Lyapunov 函数定义

Lyapunov 函数定义是求解 Lyapunov 算法模型的基础环节，对于异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统而言，该函数条件约束了故障电压、故障电流参数的取值范围<sup>[15]</sup>。因此，Lyapunov 理论规定，如果故障参量取值始终保持在受限区间之内，就表示故障电压、故障电流参数的瞬时数值满足定子绕组匝间短路情况下的异步电机运行特征。规定  $\dot{x}$  表示定子绕组匝间短路故障情况下的异步电机运行特征，且  $\dot{x} \neq 0$  的不等式取值条件恒成立，联立故障参量受限参数  $\alpha$ 、故障参量瞬时约束向量  $\beta$ ，可将短路故障参量  $V(\dot{x})$  表达式定义为：

$$V(\dot{x}) = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{1}{1 - |\beta \dot{x}|^2} \right) \quad (1)$$

针对短路故障参量定义 Lyapunov 函数，应考虑临界值对故障电压、故障电流取样结果的影响。所谓临界值就是指短路故障参量在临近短路故障行为时的电量检测结果<sup>[16]</sup>。临界情况下，异步电机定子绕组匝间距离并没有达到不受限状态，且电量信号的模数转换关系受到模数转换单元设备的直接控制。对于短路故障参量临界值的求解满足下式：

$$V(\dot{x})' = \frac{|\Delta M|^2}{\chi} \cdot V(\dot{x}) \quad (2)$$

其中： $\Delta M$  表示异步电机定子绕组匝间距离的单位取值， $\chi$  表示短路故障评估参数。

在式 (2) 的基础上，可将 Lyapunov 函数定义式表示为：

$$B = \vec{C} \cdot \frac{V(\dot{x})'}{\delta \times (\tilde{m}^2 - 1)} \quad (3)$$

式中， $\vec{C}$  表示短路故障情况下的电量信号传输向量， $\tilde{m}$  表示电量信号的数值受限特征， $\delta$  表示基于 Lyapunov 理论所选择的模数转换参量。Lyapunov 理论要求故障电压、故障电流两类电量参数的取值必须保持同向性，所以  $\vec{C}$  参数的取值属于  $(0, +\infty)$  的数值区间。

#### 2.1.2 Nussbaum 增益参数

Nussbaum 增益参数决定了 Lyapunov 算法模型是否能够约束异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统的运行能力，由于 Lyapunov 函数定义式始终保持定值状态，所以求解 Nussbaum 增益参数时，可以将 Lyapunov 函数定义式看作一项定值指标<sup>[17]</sup>。异步电机的运行会随着定子绕组设备连接形式的改变而发生变化，在单位运行周期内，匝间短路故障行为参量的取值有可能同时出现正值与负值结果，

因此为保证 Nussbaum 增益参数计算结果的准确性, 在定义 Lyapunov 算法模型时, 应判断故障电压、故障电流的实际传输方向<sup>[18]</sup>。

对于异步电机定子绕组匝间短路故障电压  $U_\epsilon$ 、故障电流  $I_\epsilon$  的取值满足下式:

$$\begin{cases} U_\epsilon = \frac{\left(\frac{U_{\min}}{U_{\max}}\right)^2}{RB} \\ I_\epsilon = \left(\frac{I_{\min}}{I_{\max}}\right)^2 \times RB \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\epsilon$  表示短路故障行为的瞬时表现特征,  $U_{\min}$ 、 $I_{\min}$  表示 Lyapunov 理论作用下电压参量与电流参量的最小取值结果,  $U_{\max}$ 、 $I_{\max}$  表示 Lyapunov 理论作用下电压参量与电流参量的最大取值结果,  $R$  表示异步电机定子绕组设备的匝间电阻均值。

联立式 (3)、式 (4), 推导 Lyapunov 算法模型的 Nussbaum 增益参数计算结果如式 (5) 所示:

$$Z = \liminf_{\gamma \rightarrow +\infty} \frac{U_\epsilon}{I_\epsilon} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{z} B^{1/\epsilon} + \dot{X}(\bar{b}) \quad (5)$$

式中,  $\gamma$  表示短路故障参量的瞬时增益参数,  $\tilde{z}$  表示电量信号在定子绕组设备匝间区域的传输特征,  $X$  表示短路故障情况下的电量行为定义特征,  $\bar{b}$  表示短路故障数据样本的单位累积量。检测系统运行过程中, 短路故障电压、短路故障电流取值为零, 都表示异步电机定子绕组匝间不存在短路故障行为, 因此在定义 Lyapunov 算法模型时, 默认不存在上述取值情况。

## 2.2 故障预测特征

设计异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统时, 对于故障预测特征的提取必须遵循 Lyapunov 算法模型, 且针对短路故障情况下电气变化量的取值, 要求电量信号峰值、陡峭度与频率水平都必须保持完全相同的数值状态。电量信号峰值常表示为  $\bar{p}$ , 对于异步电机设备而言, 其定子绕组匝间距离会在电量信号传输行为的牵引作用下而表现出不断增大的变化形式, 所以当电量信号峰值实际取值相对较小时, 匝间短路的故障行为等级相对较低<sup>[19]</sup>。短路故障信号陡峭度常表示为  $\phi$ , 在检测故障行为的过程中, 该项物理量可以用来描述故障电压、故障电流参量取值结果的稳定性程度, 在  $\phi > 0$  不等式条件恒成立的情况下, 陡峭度数值越大, 就表示故障电压、故障电流参量取值结果的稳定性越强<sup>[20]</sup>。短路故障信号频率常表示为  $\varphi$ , Lyapunov 理论规定,  $\varphi < 0$  时故障信号在绕组匝间区域内的传输速率越快;  $\varphi > 0$  时故障信号在绕组匝间区域内的传输速率越慢; 由于异步电机定子绕组所负载的电压数值不可能为零, 所以  $\varphi = 0$  的取值条件不可能成立。

在上述物理量的支持下, 联立式 (5), 可将故障预测特征求解结果表示为:

$$O = \frac{1}{\sqrt{Z}} \sum_{-\infty}^{+\infty} |\bar{p}| \cdot \left| \frac{(\phi - 1)}{\varphi^2} \right|_{\varphi \neq 0} \quad (6)$$

基于 Lyapunov 算法模型求解故障预测特征参量时, 为保障系统主机对异步电机定子绕组匝间短路故障的精准检测能力, 必须针对同一故障信号参量进行峰值、陡峭度与频率指标的取值。

## 2.3 定子绕组的短路故障电量方程

定子绕组短路故障电量方程由电压方程、电流方程两部分组成, 前者描述故障电压参数的取值情况, 后者描述故障电流参数的取值情况。

联合 Lyapunov 算法模型, 可以按照如下流程定义短路故障电量方程表达式。

异步电机定子元件的实时绕组参数:

$$u = |\Delta Q| \cdot O \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)} \quad (7)$$

式中,  $\Delta Q$  表示短路故障情况下的单位电感强度,  $\lambda$  表示异步电机的磁性参数。

定子绕组的短路故障电压方程:

$$W_U = \left(\frac{O \cdot u}{\kappa - 1}\right)^2 - \eta_1 U_0 \quad (8)$$

式中,  $\kappa$  表示定子绕组设备匝间区域内的电量信号敏感性识别条件,  $U_0$  表示短路故障情况下的额定负载电压,  $\eta_1$  表示主机元件对于故障电压参数的检测效率。

定子绕组的短路故障电流方程:

$$W_I = O \cdot u \cdot \frac{(\eta_2 I_0)}{\kappa^2} \quad (9)$$

$I_0$  表示短路故障情况下的额定负载电流,  $\eta_2$  表示主机元件对于故障电流参数的检测效率<sup>[21-22]</sup>。如果某一特定时刻异步电机定子绕组匝间短路故障行为的表现能力相对较弱, 主机元件对于故障电压、故障电流的检测结果有可能不满足 Lyapunov 算法模型在电量精度方面的要求, 在定义短路故障电量方程时, 可以适当控制故障预测特征的取值结果, 从而达到延长信号参量单位传输周期的目的。

## 2.4 匝间电感参数

匝间电感参数的求解完全遵循 Lyapunov 算法模型的约束条件, 检测系统在分析异步电机定子绕组匝间短路故障行为时, 该项物理量的计算必须同时考虑定子绕组短路故障的电压与电流方程<sup>[23]</sup>。异步电机定子绕组设备匝间距离的设定直接影响短路故障电压与电流参量的取值结果, 而匝间电感参数作为一项矢量指标, 同时具有方向性与数值性特征, 所以在计算参数指标取值范围时, 还应判断故障电压、故障电流参量的取值符号是否一致<sup>[24]</sup>。在短路故障参量分布权值保持为  $f$  的情况下, 联立式 (9), 可将匝间电感参数计算式表示为:

$$d = f \times \left( \left| \frac{W_U}{s_1} \right|^2 + \left| \frac{W_I}{s_2} \right|^2 \right) \quad (10)$$

其中:  $s_1$  表示故障电压检测参数,  $s_2$  表示故障电流检测参数, 且  $s_1 \neq 0$ 、 $s_2 \neq 0$  的不等式取值条件同时成立。为保证异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统的使用能力, 对于相关参数指标的计算必须严格遵循 Lyapunov 理论依据, 且在调节相关部件模块连接关系时, 还要求短路电压、

短路电流参数的取值应属于同一故障行为区间。

### 3 实验分析

#### 3.1 实验电路

为了验证设计的基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统的有效性,进行实验分析。对于异步电机设备而言,定子绕组匝间的短路故障行为影响电机元件的稳定运行能力,在实际应用过程中,主机元件对于故障行为的检测能力,决定了所选测试系统的实用性价值。将电量回路作为实验电路,通过人工控制的方式,使电路表现出短路故障状态,并记录当前情况下相关故障参数的具体数值。实验电路如图 7 所示。

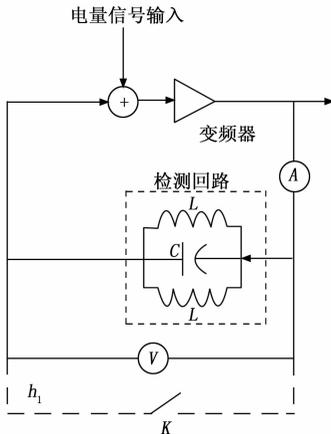


图 7 实验电路

模拟短路故障情况下,控制开关 K 闭合,此时电量信号在经过变频器设备后,直接进入 h1 回路,电流表、电压表的当前显示结果就是故障电压、故障电流的实时示数。

#### 3.2 流程与数据处理

实验过程中,首先利用电流传感器、电压传感器获取非干扰条件下的电流表、电压表示数,然后应用基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统进行实验,测试过程如下:

- 1) 利用电量互感装置测量电流和电压;
- 2) 通过 DSP 外围电路和模数转换单元将模拟信号转换为数字信号;
- 3) 采用 ARM 处理器接收数字信号进行处理和分析;
- 4) 最后通过指令传输给步进电机驱动模块控制电机运行。

通过上述过程,记录该系统作用下,电流表、电压表示数,所得数据为实验组故障电流、故障电压检测结果;其次分别应用基于深度学习的故障检测系统(文献 [3] 系统)、基于 ECT 采集单元积分回路的暂态特性检测系统(文献 [4] 系统)进行实验,记录这两种系统作用下,电流表、电压表示数,所得数据分别为对照(1)组与对照(2)组的故障电流、故障电压检测结果;接着将故障电流、故障电压检测结果与非干扰条件下检测结果对比,并分析实验组、对照组指标参量之间的差值水平;最后根据所得

结果总结实验规律。

在非干扰条件下的电流表、电压表示数如表 1 所示。

表 1 非干扰条件下电流、故障电压检测结果

实验组别	故障电流/A	故障电压/V
1	21.8	130.5
2	23.6	135.2
3	21.5	110.6
4	22.7	130.5
5	22.0	124.1
6	21.4	120.0
7	23.1	117.8
8	23.2	132.4

分析表 1 可知,非干扰条件下故障电流检测结果保持在 21.0~24.0 A 之间,极限差值仅为 2.2 A;非干扰条件下故障电压检测结果保持在 110.0~140.0 V 之间,极限差值为 24.6 V。

实验组、对照组故障电流实际检测结果如图 8 所示。

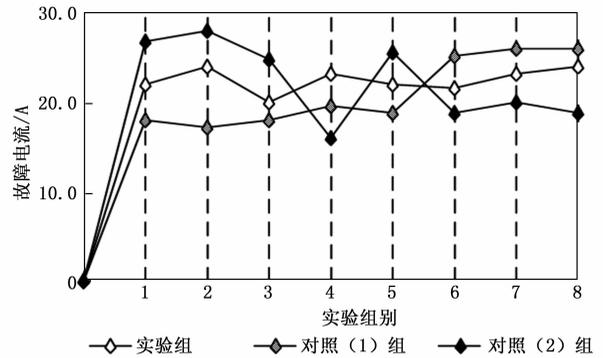


图 8 故障电流实际检测结果

联立表 1 和图 7,计算故障电流实测数值与非干扰条件下检测结果之间的差值如表 2 所示。

表 2 故障电流实测数值与非干扰条件下检测结果之间的差值

实验组别	实验组	对照(1)组	对照(2)组
1	0.2	3.7	5.6
2	0.4	6.3	4.4
3	1.5	3.5	3.8
4	0.4	2.8	6.7
5	0	3.4	3.8
6	0.4	4.1	2.3
7	0.5	2.9	3.1
8	0.8	2.8	4.3

根据表 2 中的数据可知,在 8 个实验组别中,与对照(1)组和对照(2)组相比,实验组的故障电流实测数值与非干扰条件下检测结果之间的差值较小。

实验组、对照组故障电压实际检测结果如图 9 所示。

联立表 1 和图 8,计算故障电压实测数值与非干扰条件下检测结果之间的差值如表 3 所示。

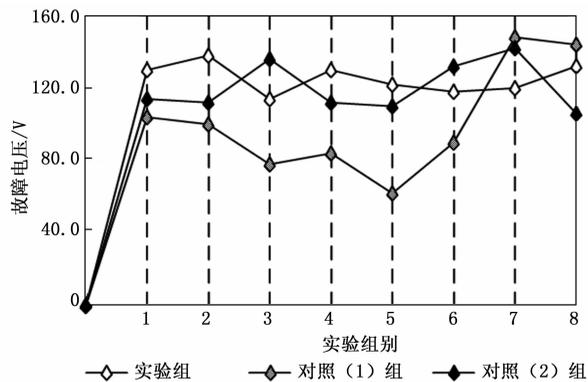


图 9 故障电压实际检测结果

表 3 故障电压实测数值与非干扰条件下检测结果之间的差值

实验组别	实验组	对照(1)组	对照(2)组
1	0.5	14.8	28.1
2	2.2	21.6	35.1
3	0.1	24.7	30.9
4	0.6	19.3	48.3
5	2.0	14.1	62.3
6	0.3	11.9	30.0
7	2.2	23.0	30.5
8	1.8	23.9	24.5

根据表 3 中的数据可知, 在 8 个实验组别中, 与对照(1)组和对照(2)组相比, 实验组的故障电压实测数值与非干扰条件下检测结果之间的差值较小。

综合上述分析可知, 设计的基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统可以有效控制故障电流、故障电压检测结果与非干扰条件下检测结果之间的差值水平, 符合精准识别定子绕组匝间短路故障行为的实际应用需求, 可以有效保障异步电机的稳定运行状态。

#### 4 结束语

本文设计了基于 Lyapunov 理论的异步电机定子绕组匝间短路故障检测系统, 在 Lyapunov 理论原则的配合下, 设置 DSP 外围电路、ARM 处理器、步进电机驱动模块、模数转换单元等多个硬件应用结构, 根据 Lyapunov 函数定义式, 求解 Nussbaum 增益参数, 从而在分析故障预测特征的同时, 推导定子绕组短路故障电量方程。在整个系统设计过程中, 匝间电感参数的取值不会出现明显波动变化的情况, 不仅可以有效控制故障电流、故障电压检测结果与非干扰条件下检测结果之间的差值水平, 还能够实现对定子绕组匝间短路故障行为的精准识别, 在维持异步电机稳定运行状态方面具有突出作用价值, 更为符合实际应用需求。

#### 参考文献:

[1] 刘乐, 高杰, 刘鹏, 等. 基于滑模观测器的交流异步电机预设性能位置跟踪控制 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (9): 3432-3443.

[2] 梅杨, 易高. 间接矩阵变换器-异步电机调速系统模型预测控制权重系数自整定方法 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (18): 3938-3948.

[3] 黄威, 袁廷翼, 邓百川, 等. 基于深度学习的机器人电路板自主故障检测系统 [J]. 电工电能新技术, 2022, 41 (2): 72-80.

[4] 王宇, 孟令雯, 汤汉松, 等. ECT 采集单元积分回路的暂态特性改进及其检测系统研发 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (10): 98-104.

[5] 唐伦, 胡彦娟, 刘通, 等. 移动边缘计算中基于 Lyapunov 的任务卸载与资源分配算法 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (3): 29-36.

[6] 林旭梅, 陈一戈, 苗芳荣, 等. 基于给定收敛律的四旋翼高阶滑模控制器设计 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (1): 38-42, 187.

[7] 赵二虎, 吴济文, 查晶晶, 等. 基于 ARM+DLP+SRIO 的嵌入式智能计算系统研究 [J]. 电子学报, 2021, 49 (3): 443-453.

[8] 林新华, 王杰, 王一超, 等. 基于数据分布一致性的处理器硬件性能计数器复用估计方法 [J]. 计算机研究与发展, 2022, 59 (6): 1192-1201.

[9] 王春雷, 曹东兴, 曲祥旭, 等. 三相电压源型逆变器馈电两相混合式步进电机预测电流控制 [J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (12): 27-35.

[10] 戚振亚, 秦倩倩, 王立英, 等. 两相混合式步进电动机恒流细分驱动控制仿真研究 [J]. 微特电机, 2022, 50 (9): 48-52.

[11] 张翼, 刘坤, 韩春林, 等. 基于  $0.7\mu\text{m}$  InP HBT 工艺的  $10\text{ GS/s}$  宽带  $\Sigma-\Delta$  模数转换器设计 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (6): 554-559.

[12] 刘素娟, 张仲侯. 基于记忆多项式的时间交织模数转换器自适应非线性失配校正方法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (12): 3718-3726.

[13] 张月, 赵罡, 胡春光, 等. 基于改进优化隶属度函数的便携式电量计量装置综合评估方法 [J]. 电测与仪表, 2021, 58 (11): 186-193.

[14] 安义岩, 张星宇, 刘天奇, 等.  $\pm 800\text{ kV}$  换流变压器局放试验双端加压技术研究 [J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39 (5): 22-26.

[15] 朱安, 艾海平, 陈力. 基于障碍 Lyapunov 函数的双臂空间机器人捕获卫星柔顺控制 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (24): 2997-3006.

[16] 宋平岗, 江志强, 杨声弟, 等. 基于 Lyapunov 函数的 MMC- RPC 非线性控制策略 [J]. 机车电传动, 2021 (4): 78-84.

[17] 陈庆彬, 杨丰钢, 陈为. 具有可变增益恒压特性的三线圈 WPT 系统补偿网络结构及参数确定新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (6): 2277-2289.

[18] 陆远方, 黎祎阳, 杨斌, 等. 考虑线圈参数变化的 SS 型动态无线电能传输系统参数优化设计方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (18): 4537-4547.

(下转第 122 页)