

# 基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统设计

肖焕丽

(西安交通工程学院, 西安 710300)

**摘要:** 为使预警软件能够准确识别轨道电路分路的不良故障行为, 设计基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统; 设置电源电路, 借助 RS485 转 RS232 接口模块, 将电源回路与微处理器元件、显示及报警模块相连, 完成轨道电路分路不良故障自动预警系统硬件设计; 根据熵性质定义条件, 求解模糊熵参数, 以此为基础, 分析故障信号的模糊特征, 完成模糊熵算法的预警原理研究; 完善编码器—解码器结构模型, 根据预警指标取值结果, 界定警限区域范围, 实现轨道电路分路不良故障预警体系的建立, 完成基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统软件设计; 对比实验表明, 应用基于模糊熵自动预警系统, 可将非故障电压与故障电压之间的差值水平控制在 0.05 kV 之内, 在提升系统主机对于轨道电路分路不良故障行为的预警能力方面具有突出应用价值。

**关键词:** 模糊熵; 轨道电路分路; 不良故障; 自动预警; 编码器—解码器; 警限区域

## Design of Automatic Early Warning System for Track Circuit Branch Bad Fault Based on Fuzzy Entropy

XIAO Huanli

(Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

**Abstract:** In order to make the warning software can accurately identify the bad fault behavior of track circuit branch, an automatic warning system of track circuit branch bad fault based on fuzzy entropy is designed. With the help of RS485 to RS232 interface module, the power circuit is set and connected to the microprocessor component, display and alarm module, the hardware design of the automatic warning system with the track circuit branching bad fault is completed. According to entropy properties, the fuzzy entropy parameters are solved. Based on this, the fuzzy characteristics of fault signals are analyzed, and the early warning principle of fuzzy entropy algorithm is studied. The structure model of encoder-decoder is improved, the range of warning limit area is defined by the value result of warning index, the early warning system of track circuit branching bad fault is established, and the software design of the automatic early warning system of track circuit branch bad fault based on the fuzzy entropy is completed. Comparative experiments show that the fuzzy entropy based on the automatic warning system can control the difference between the non-fault voltage and fault voltage within 0.05 kV, which has the outstanding application value in improving the system host's early warning ability for the bad fault behavior of track circuit branching.

**Keywords:** fuzzy entropy; track circuit branch; bad fault; automatic early warning; encoder-decoder; warning limit area

## 0 引言

轨道电路分路不良是指由继电器无法正常落下而引起的信号联锁失效作用<sup>[1]</sup>。当轨道电路轨面存在不良导电物时, 负载电压会随着列车行进距离的延长而不断增大, 这就会导致实际分路电阻远超出额定电阻水平, 从而抑制了继电器元件的正常下落, 使轨道电路在列车行进过程中无法呈现区段空闲状态。模糊熵描述了数据样本在模糊集合中的模糊性程度, 由于样本集合中数据信息存储量并不固定, 所以模糊熵指标的求解结果也并不唯一。对于数据样

本完全清晰的分明集合而言, 其模糊熵指标的赋值为 0; 1/2型模糊集合中数据样本的隶属特性最难判断, 故其模糊熵指标的赋值水平相对较高<sup>[2]</sup>。当两个模糊集合的模糊性程度相同时, 则表示这两个集合模糊熵指标的赋值也相同。在同一模糊集合空间内, 数据样本的分布符合单调变化规律, 即数据样本的排列位置越靠后, 与之对应的模糊熵数值也就越大, 当某一样本参量与第一个数据样本之间的间隔距离无限大时, 则表示与该样本对应的模糊熵指标取值也接近无穷大<sup>[3]</sup>。由于同一模糊集合中可能存在多个完全

收稿日期: 2022-08-12; 修回日期: 2022-09-07。

作者简介: 肖焕丽(1985-), 女, 陕西渭南人, 大学本科, 讲师, 主要从事机电一体化方向的研究。

引用格式: 肖焕丽. 基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 89-94.

相同的数据样本参量，所以模糊熵指标不满足唯一性判别条件。

为实现对轨道电路分路不良故障的识别，电气设备局部放电融合诊断与智能预警系统通过采集声电信号局部特征的方式，完成对轨道电路分路不良故障表现行为的初步判定，再根据时间间隔内信号平均指标的取值水平，完成对故障行为的评估与预警<sup>[4]</sup>。然而此系统对于某几类不良故障行为的识别能力有限，并不能完全满足实际应用需求。

为解决上述问题，针对基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统展开研究。

### 1 轨道电路分路不良故障自动预警系统硬件设计

设置电源电路、RS485 转 RS232 接口模块、微处理器元件、微处理器元件 4 个应用单元，完成基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统设计。

#### 1.1 电源电路

电源电路提供了轨道电路分路不良故障自动预警系统所需的电量信号，可以按照模糊熵算法对电量信号的传输行为进行调试，从而使得系统主机能够准确感知轨道电路分路不良故障行为的表现强度<sup>[5]</sup>。WS 设备作为电源电路的核心应用元件，具有 157、106 两种运行模式——157 运行模式下，UF4007 元件、STM32F 元件完全接入电源电路，两者保持并列连接关系，当前情况下 ITLC2272A 设备能够准确监控 FB1 与 FB2 的运行状态，并可以根据 TV1 元件的连接情况，来判断轨道电路分路不良故障行为的表现程度；106 运行模式下，UF4007 元件不接入电源电路，STM32F 元件保持独立运行状态，当前情况下，ITLC2272A 设备对于不良故障行为的预警能力相对较弱。完整的电源电路连接结构如图 1 所示。

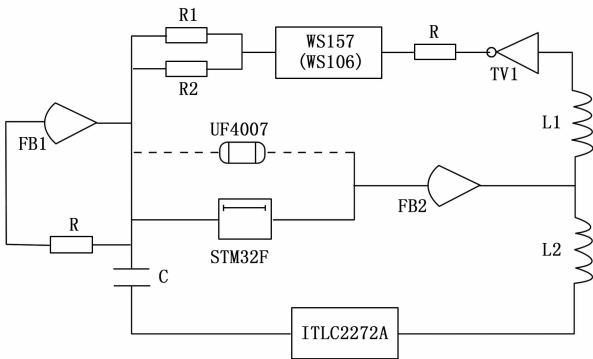


图 1 电源电路连接结构

R 电阻存在于轨道电路的主连接回路中，其内阻水平相对较高；R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 电阻存在于轨道电路的次级分路中，内阻水平相对较低<sup>[6]</sup>。实施不良故障自动预警时，FB1、FB2 元件同时承担轨道电路输出的负载电压，此情况下负载电压数值越大，就表示不良故障行为的表现能力越强。

#### 1.2 RS485 转 RS232 接口模块

由于自动预警系统对轨道电路分路不良故障数据的提取完全遵循模糊熵算法，所以为保障电源电路能够与微处理器元件、显示报警模块准确对接，还要设置 RS485 转 RS232 接口模块将高压输入信号转换成低压输出信号。RS485 端口与轨道电路分路的高压部分相连，能够根据电源电路中电压与电流分量的输出情况，来判断电路分路不良故障行为的表现强度<sup>[7-9]</sup>。RS232 端口与轨道电路分路的低压部分相连，负责与微处理器元件、显示报警模块直接对接，但由于该端口只负责感应，不具备判别信号的能力，所以其在控制系统预警行为时，所表现出来的处理能力受到 RS485 端口中电信号输出量水平的直接影响。设  $q_1、q_2、\dots、q_n$  表示个不同的故障数据预警判别参量，其取值条件满足式 (1)。

$$q_1, q_2, \dots, q_n \in \mathbb{S} \tag{1}$$

规定  $W_1$  表示与 RS485 端口匹配的预警向量， $W_2$  表示与 RS232 端口匹配的预警向量， $v$  表示自动响应系数，联立式 (1)，可将 RS485 转 RS232 接口模块设置条件表示为：

$$Q = \frac{|W_2|^2 - |W_1|^2}{v^2} \cdot \sqrt{q_1 + q_2 + \dots + q_n} \tag{2}$$

由于轨道电路分路不良故障行为具备迁移能力，所以在处理故障数据样本时，RS485 转 RS232 接口模块必须与电源电路直接对接。

#### 1.3 微处理器元件

微处理器元件由 ARM Cortex-M4 内核、通用寄存器两部分组成，可以按照模糊熵算法执行原则，完成对故障数据的寄存，并能够借助地址加法器设备，将电压故障、电流故障等多种不同的故障行为区别开来<sup>[10-12]</sup>。具体的微处理器元件连接结构如图 2 所示。

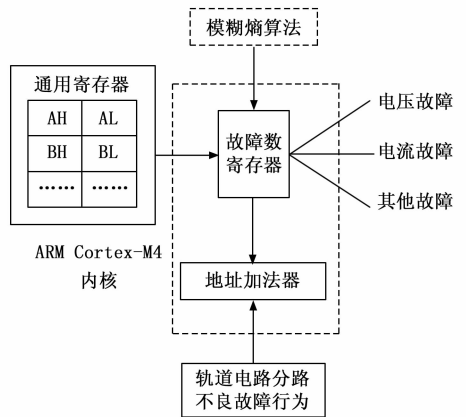


图 2 微处理器元件结构示意图

通用寄存器同时包含 H 类、L 类两种不同的识别端点，可将完成提取处理的故障数据样本，直接反馈至寄存器主机。ARM Cortex-M4 内核能够准确区分故障行为的表现形式，并可以分析与所提取故障数据匹配的位置信息，从而使系统主机能够对轨道电路分路不良故障行为进行准确

预警。

### 1.4 显示与报警模块

显示与报警模块能够表明预警指令的执行状态，在轨道电路分路不良故障自动预警系统中，该结构接受微处理器元件的直接调节与调度<sup>[13]</sup>。在轨道电路分路不良故障行为表现程度保持不变的情况下，显示与报警模块中预警指令的瞬时执行状态，就表示系统预警主机的当前执行状态。在模糊熵算法作用下，按需连接上述模块结构，实现轨道电路分路不良故障自动预警系统的顺利应用。

## 2 基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统软件设计

### 2.1 模糊熵算法的预警原理

模糊熵算法的预警原理涉及对熵性质、模糊熵参数与故障信号模糊特征的分析，本章节将针对上述内容展开深入研究。

#### 2.1.1 熵的性质

熵指标可以解决随机性与无规律性问题，在定量分析不确定性问题时，可以获得大量的宏观样本参量，以用来判定相关数值解的排列形式<sup>[14]</sup>。在故障数据样本模糊程度保持不变的情况下，设  $A$  表示轨道电路分路不良故障数据样本标记值， $\beta$  表示数据样本提取系数， $\Delta D$  表示故障数据的单位累积量， $\alpha$  表示熵值感应权限，且其取值恒满足  $\alpha \geq 1$  的不等式条件，联立上述物理量，可将熵指标性质定义式表示为：

$$S = \left( \frac{\beta A}{|\Delta D|^\alpha} \right) \Big|_{\alpha \geq 1} \quad (3)$$

对于轨道电路分路不良故障行为数据而言，熵指标具有非负性、对称性、确定性、可加性三类基本性质。所谓非负性是指当自动预警系统中只存在确定性故障数据样本时，其熵值指标的求解结果才能小于或等于零，但由于轨道电路分路不良故障行为的表现具有随机性，故障数据样本取值不可能为确定性状态，所以熵值指标求解结果恒大于零<sup>[15]</sup>。对称性是指故障数据样本排列顺序调换不会对熵指标求解结果造成影响。确定性表示每一个故障数据样本都只能对应一个熵指标求解结果。可加性是指两个不相等熵指标具有直接相加的能力。

#### 2.1.2 模糊熵参数

模糊熵参数决定了数据样本之间的相似度，对于轨道电路分路不良故障行为而言，模糊熵参数的取值越大，就表示故障数据样本之间的相似度水平越高。对于模糊熵参数的求解，涉及模式维数、相似容限参数两项物理指标。模式维数影响故障数据信息样本存储量的大小，若维数指标设定值过小，会导致故障数据样本的丢失；若维数指标设定值过大，则会导致预警主机在单位时间内获得过于丰富的故障数据样本，从而增大主机元件的运行压力<sup>[16-18]</sup>。相似容限参数决定预警主机对故障数据样本的处理精度，在轨道电路分路不良故障表现行为不同的情况下，该项参

数指标的取值结果也会有所不同。模式维数  $g$ 、相似容限参数  $j$  的求解表达式为：

$$\begin{cases} g = - \sum_{\substack{\delta \neq 0 \\ \chi \neq 0}} f(\alpha_\delta) \log(\alpha_\chi) \\ j = \frac{1}{H - h' + 1} \sum_{\epsilon=1}^{+\infty} |F(\gamma)|^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\delta$ 、 $\chi$  表示两个随机选取的相似度指标，且  $\delta \neq \chi$  的不等式条件恒成立， $\alpha_\delta$  表示基于系数  $\delta$  的故障数据样本存储特征， $\alpha_\chi$  表示基于系数  $\chi$  的故障数据样本存储特征， $f$  表示故障数据的实时存储向量， $H$  表示数据样本额定存储条件， $h'$  表示容限系数指标， $\epsilon$  表示相似性度量值， $F(\gamma)$  表示基于系数  $\gamma$  的相似性判别函数。在式 (4) 的基础上，设  $\vec{k}$  表示熵指标运行向量，模糊熵参数推导式为：

$$K = \exp \left[ -\ln(\vec{k}) \left( \frac{S}{g \times j} \right)^2 \right] \quad (5)$$

推导模糊熵参数时，要求模式维数、相似容限参数取值不能同时等于最大值或最小值。

#### 2.1.3 故障信号模糊特征分析

针对故障信号模糊特征的提取包含模糊熵参数粗粒化、熵阈值求解两个处理环节。模糊熵参数粗粒化是将模糊熵参数转化为模糊序列集合的处理过程，在轨道电路分路不良故障自动预警系统中，模糊熵参数指标的输入量越大，模糊序列集合内信息参量的排列形式就越密集<sup>[19]</sup>。具体的模糊熵参数粗粒化处理原则如图 3 所示。

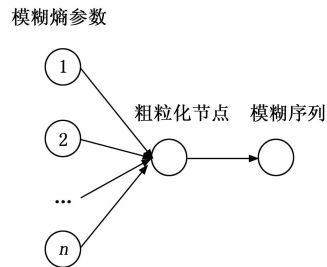


图 3 模糊熵参数粗粒化原则

图 3 中，1、2、……、 $n$  表示  $n$  个不同的熵节点对象，处理轨道电路分路不良故障数据时，每一个节点对象对于数据信息样本的提取能力完全相同。模糊熵参数与粗粒化节点之间保持多对一的映射关系，而粗粒化节点与模糊序列集合之间保持一对一的映射关系。

熵阈值决定了模糊熵算法对故障数据的处理能力，在轨道电路分路不良故障自动预警系统中，熵阈值越大，故障数据的单位累积量就越小，系统主机对于不良故障行为的精准识别能力也就越强<sup>[20]</sup>。熵阈值求解满足式 (6)。

$$l = K \times \frac{1}{\phi} \sum_{z=1}^{\infty} X_z^2, 1 \leq z \leq \phi/2 \quad (6)$$

其中， $\phi$  表示故障信号传输特征辨别系数， $z$  表示模糊度标记系数， $X_z$  表示基于系数  $z$  的数据模糊程度。为实现对轨道电路分路不良故障行为的准确识别，应根据模糊熵

算法作用原则，对故障信号的模糊特征进行提取与处理。

### 2.2 轨道电路分路不良故障预警体系建立

轨道电路分路不良故障预警体系借助编码器—解码器结构，选择预警指标，又按照模糊熵算法应用原则，完成对警限区域的界定。

#### 2.2.1 编码器—解码器结构

编码器—解码器结构（如图 4 所示）可以对轨道电路分路不良故障自动预警系统中的数据样本进行转码处理，由于信息参量的传输具有双向性，所以进行转码时不对码源状态设置要求。当码源参量为密文时，编码器—解码器结构运行方向为转码节点——寄存节点——编码节点；当码源参量为明文时，运行方向则相反<sup>[21]</sup>。

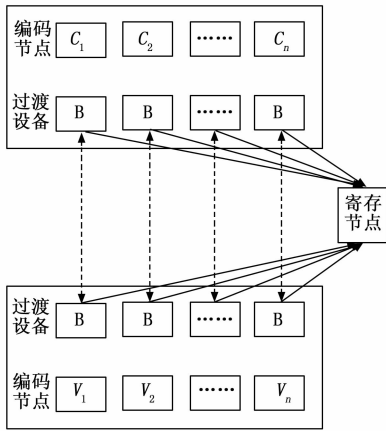


图 4 编码器—解码器结构简图

寄存节点存在于解码器单元与密码器单元中部，可以在短暂存储轨道电路分路不良故障数据的同时，将密文模板与明文模板分离开来，从而使得过渡设备能够准确记录数据信息样本的传输状态<sup>[22]</sup>。设  $\vec{M}$  表示轨道电路分路不良故障数据的编码向量， $v$  表示基于模糊熵算法的数据样本辨别系数， $\varphi$  表示信息参量的方向性传输系数， $l$  表示明文编码参量， $B_i$  表示故障数据明文样本的编码特征， $k$  表示密文解码参量， $B_k$  表示故障数据密文样本的解码特征。自动预警系统编码器—解码器结构的定义式条件满足式 (7)。

$$C = \vec{M} \cdot \frac{\varphi \times l}{\sum_{v=1}^{+\infty} \exp(B_i^v - B_k^v)} \quad (7)$$

在编码器—解码器结构中，一类轨道电路分路不良故障数据只能对应一个编码节点与一个解码节点。

#### 2.2.2 预警指标选择

轨道电路分路不良故障自动预警系统的预警指标选择包含对轨道电压模量的定义与轨道电流模量的调整。设  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $\dots$ 、 $U_n$  表示  $n$  个不同的电压模量指标， $\bar{I}$  表示电流模量指标的定频系数， $g(\bar{I})$  表示基于系数  $\bar{I}$  的电流模量预警表达式，联立上述物理量，可将基于模糊熵的轨道电路分路不良故障数据预警指标提取表达式定义为：

$$\lambda = \frac{C \cdot \lim_{n \rightarrow +\infty} (U_1 \cdot U_2 \cdots U_n)}{n \times g(\bar{I})} \quad (8)$$

轨道电压模量是指在轨道电路分路运行过程中，由不良故障行为引发的压升或压降现象，当电压模量对应压升现象时，表示不良故障行为发生在轨道电路的主路部分，此情况下电压信号在单一频段内呈现快速波动的变化状态，由于阶段性电压的累积量相对较大，所以轨道电压模量不断增大；当电压模量对应压降现象时，表示不良故障行为发生在轨道电路的次级分路部分，此情况下电压信号的波动能力较弱，故而阶段性电压的累积量相对较少，轨道电压模量持续减小<sup>[23-24]</sup>。电流模量决定了轨道电路主机对分路不良故障行为的预警能力，一般来说，电流模量的累计数值越大，预警指标的计算数值也就越小。

#### 2.2.3 警限区域界定

警限区域的划分决定了系统主机对轨道电路分路不良故障行为的预警能力，存在不良故障行为的情况下，系统主机对于预警指标的取值不可能为零，所以警限区域的规划度量值也就不可能等于零，由于模糊熵算法的作用规则具有单一方向性，所以预警指标的取值越大，警限区域的规划度量值也就越大。为实现对轨道电路分路不良故障行为的准确识别，预警主机在界定警限区域时，要求电路总电压、总电流、总电阻的数值水平必须保持稳定。A 表示自动预警系统警限区域内的规划度量值，且  $A \neq 0$  的不等式条件恒成立， $\mu$  表示系统主机对轨道电路分路不良故障行为的识别权限， $s'$  表示识别指征向量， $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\dots$ 、 $A_n$  表示  $n$  个不等于零的故障数据定标值，联立式 (8)，可将警限区域定义式表示为：

$$\mathfrak{S} = \left\{ A \mid A = \frac{1}{2\mu} \prod_{i=1}^{+\infty} \lambda \times \frac{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2}}{n!} \right\} \quad (9)$$

根据模糊熵算法原则，对于显示与报警模块连接能力的判别条件满足式 (10)：

$$E = \dot{r} \times \left( \frac{\theta \cdot \bar{E}}{Q} \right)_{\theta \neq 0} \quad (10)$$

其中： $\theta$  表示轨道电路分路不良故障行为的预警参数， $\bar{E}$  表示故障数据信息的累积量均值， $\dot{r}$  表示预警指令执行系数。

模糊熵算法作用下，为提升系统主机的精准预警能力，要求在预警指标取值结果保持恒定的情况下，轨道电路分路不良故障行为的表现情况应与警限区域规划度量值保持一一对应关系，且执行预警指令的过程中，编码器—解码器结构必须维持明文模板、密文模板之间独立映射关系的稳定性。

## 3 实例分析

### 3.1 实验准备

选择如图 5 所示的轨道电路设备作为实验对象，调节主控设备，使实验电压等于 35 kV。实验过程中，轨道电路回路已连接内阻的数值水平始终保持不变，故而传输电流

也保持相对稳定的数值状态，因此本次实验选择负载电压作为变量指标。



图 5 轨道电路设备

在图 5 所示轨道电路设备的连接分路内，设置限流器与继电器设备，一方面保证行驶列车不会因负载电流过大而造成超速行驶，另一方面也可以使 RK3399 主机能够有足够时间对采集到的故障数据进行分析与处理。轨道电路分路连接情况如图 6。

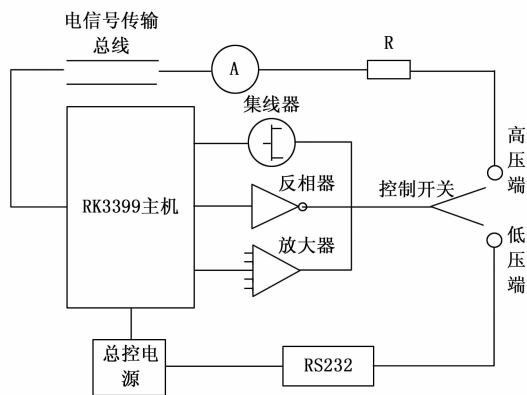


图 6 轨道电路分路

不存在故障行为的情况下，控制开关与低压端相连，故而轨道电路分路中传输电压的数值水平较低；若存在故障行为时，控制开关与高压端相连，故而轨道电路分路中传输电压的数值水平较高，这也是预警主机可以根据电压数值来判断轨道电路分路中是否存在不良故障行为的主要原因。

### 3.2 实验步骤

本次实验的具体实验流程如下：

步骤一：将控制开关与低压端节点相连，记录非故障情况下的电压数值，再将已获取故障数据样本导入 RK3399 主机，直至操作界面的显示情况如图 7 所示；

步骤二：将基于模糊熵的轨道电路分路不良故障自动预警系统应用程序输入 RK3399 主机，记录实验电压的数值变化情况，将所得电压作为实验组变量；

步骤三：将电气设备局部放电融合诊断与智能预警系



图 7 故障数据加载界面

统应用程序输入 RK3399 主机，记录实验电压的数值变化情况，将所得电压作为对照组变量；

步骤四：对比实验组、对照组电压数值，总结实验规律。

### 3.3 实验结果

系统主机对轨道电路分路不良故障行为的预警能力，可以用非故障电压与故障电压之间的差值水平来判断，在不考虑其他干扰条件的情况下，故障电压与非故障电压之间的差值越小，就表示系统主机对轨道电路分路不良故障行为的预警能力越强，反之则越弱。

表 1 给定了非故障电压与理想故障电压的具体数值。

表 1 电压标准值

时间/min	非故障电压/kV	理想故障电压/kV
10	35.00	34.95
20	35.00	34.96
30	35.00	34.97
40	35.00	34.97
50	35.00	34.97
60	35.00	34.97
70	35.00	34.98
80	35.00	34.99

分析表 1 可知，非故障电压始终保持稳定的数值状态，理想故障电压则保持两端上升、中间稳定的数值状态，其最小值与非故障电压之间的差值仅为 0.05 kV。

图 8 反映了实验组、对照组轨道电路分路电压在不良故障行为模式下的实验数值。

分析图 8 可知，实验组故障电压检测数值相对较高，整个实验过程中，其平均检测数值为 34.97 kV，与非故障电压之间的差值为 0.03 kV。对照组故障电压检测数值相对较低，整个实验过程中，其平均检测数值为 34.93 kV，与非故障电压之间的差值为 0.07 kV，高于实验组差值水平。

综上所述本次实验结论为：基于模糊熵的自动预警系统能够较好控制非故障电压与故障电压之间的差值水平，

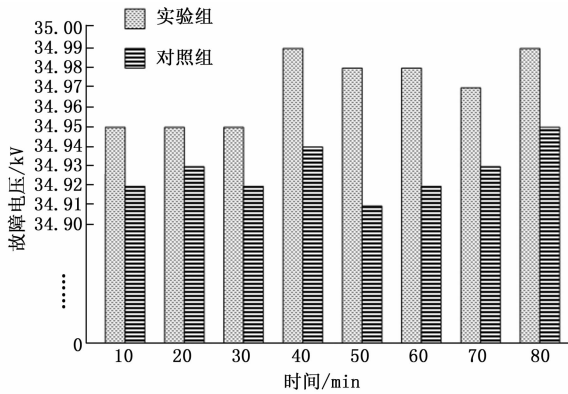


图 8 故障电压实验数值

当轨道电路分路连接网络中存在不良故障行为时,该系统对于故障表现行为的准确预警能力更强。

#### 4 结束语

轨道电路分路不良故障自动预警系统在电气设备局部放电融合诊断与智能预警系统的基础上,按照模糊熵算法的应用原则,对故障信号的表现特征进行准确分析,又联合电源电路、RS485 转 RS232 接口模块、微处理器元件等多个硬件应用结构,完成预警指标的选择与警限区域的界定。随着自动预警系统的应用,非故障电压与实测故障电压差值过大的问题得到有效解决,在提升预警系统自动响应能力,辅助预警软件对轨道电路分路不良故障行为进行准确识别方面具有较强的实用性价值。

#### 参考文献:

- [1] 蒋佳炜,胡以怀,方云虎,等.基于多尺度时域平均分解和模糊熵的船用风机故障诊断方法[J].中国机械工程,2022,33(10):1178-1188.
- [2] 王桥梅,吴浩,胡潇涛,等.基于VMD多尺度模糊熵的HVDC输电线路故障识别方法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(5):134-144.
- [3] 杨锡运,邓子琦,康宁.融合集合经验模态分解与宽度学习的齿轮箱故障预警方法[J].计算机集成制造系统,2022,28(6):1835-1843.
- [4] 王晓康,牛勃,马飞越,等.电气设备局部放电融合诊断与智能预警系统研究[J].高压电器,2021,57(11):93-100,107.
- [5] 班爱玲,周恺.具有白噪声的随机格点系统的随机吸引子的Kolmogorov熵[J].应用数学和力学,2021,42(7):735-740.
- [6] 卢盈齐,范成礼,付强,等.基于改进IFRS相似度和信息熵的反导作战目标威胁评估[J].系统工程与电子技术,2022,44(4):1230-1238.
- [7] 蒋佳炜,胡以怀,柯赞,等.基于小波包特征提取和模糊熵特征选择的柴油机故障分析[J].振动与冲击,2020,39(4):273-277,298.

- [8] 张学军,万东胜,孙知信.基于LMD和模糊熵融合CSP的脑电信号特征提取方法[J].仪器仪表学报,2020,41(8):226-234.
- [9] 刘红文,曾祥君,柴晨超,等.配电网柔性接地装置注入非工频小信号的接地故障检测与区段定位方法[J].南方电网技术,2022,16(6):44-53.
- [10] 吴金利,马宏忠,吴书煜,等.基于振动信号的高压并联电抗器故障诊断方法与监测系统研制[J].电测与仪表,2020,57(1):113-120.
- [11] 李忠,靳小龙,王亚杰,等.属性网络中基于变分图自编码器的异常节点检测方法[J].模式识别与人工智能,2022,35(1):17-25.
- [12] 李锋,程阳洋,陈勇,等.用于旋转机械状态趋势预测的量子注意力循环编码解码神经网络[J].中国机械工程,2020,31(21):2573-2582.
- [13] 马良玉,程善珍.基于支持向量数据描述和XGBoost的风电机组异常工况预警研究[J].电工技术学报,2022,37(13):3241-3249.
- [14] 杨锡运,邓子琦,康宁.融合集合经验模态分解与宽度学习的齿轮箱故障预警方法[J].计算机集成制造系统,2022,28(6):1835-1843.
- [15] 王宁,李哲,梁晓龙,等.通信距离受限条件下的无人机集群协同区域搜索[J].系统工程与电子技术,2022,44(5):1615-1625.
- [16] 杜施默,陈国军,陆敏,等.应用梯度提升树的小区域无线网络多标签流量预测[J].电讯技术,2022,62(6):802-807.
- [17] 莫玉斌,秦海鸿,修强,等.基于SiC BJT典型双电源阻容驱动电路的开关过程分析及损耗最优的实现[J].电工电能新技术,2020,39(2):30-39.
- [18] 智玉欣,蔡小五,赵海涛,等.一种宽电源电压输入多通道振荡器的电路设计[J].微电子学与计算机,2020,37(9):1-5.
- [19] 王宇飞,李俊娥,刘艳丽,等.容忍阶段性故障的协同网络攻击引发电网级联故障预警方法[J].电力系统自动化,2021,45(3):24-32.
- [20] 段巍,韩旭,马良玉,等.基于Elman神经网络的风力机风轮子系统故障预警[J].太阳能学报,2021,42(12):157-162.
- [21] 王昊,李旷代,张晓光,等.基于改进灰色模型的模拟电路故障预测研究[J].计算机测量与控制,2020,28(10):20-24.
- [22] 郝振和,焦继业,李雨倩.基于AHB总线的RISC-V微处理器设计与实现[J].计算机工程与应用,2020,56(20):52-58.
- [23] 汪洪潮,杨俊峰,王天星,等.流处理数据获取系统中的通用显示模块实现[J].数据采集与处理,2021,36(2):374-383.
- [24] 马一博,石勇.轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术研究[J].计算机测量与控制,2021,29(1):20-23,28.