

8-13-2020

## Credibility Assessment of Fault Injection Simulation Based on Feature Selective Validation

Li Sheng

*School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;*

Yuxiao Li

*School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Credibility Assessment of Fault Injection Simulation Based on Feature Selective Validation

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the complexity and large number feature details of the data of fault injection simulation which lead to the difficulty for the single indicators or expert visual assessment methods to obtain the accurate assessment results, and the evaluation expert giving the interval complementary judgment matrix on the basis of AHP method which lead to the difficulty for the weights of credibility indicators to be determined, *a multi-indicator comprehensive credibility assessment model based on Feature Selection Verification (FSV) is proposed. It can calculate the quantitative credibility values and the qualitative credibility values of the credibility indicators. In order to calculate the weights of credibility indicators, the concepts of interval ambiguity and interval deviation are defined, and a multi-objective optimization model is constructed.* The results show the feasibility and effectiveness of the method.

## Keywords

FSV method, fault injection, simulation credibility, interval complementary judgment matrix, AHP method

## Recommended Citation

Li Sheng, Li Yuxiao. Credibility Assessment of Fault Injection Simulation Based on Feature Selective Validation[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(8): 1567-1576.

# 基于特征选择验证的故障注入仿真可信度评估

李晟, 李玉晓

(江西理工大学理学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 针对故障注入仿真的数据复杂、细节特征多, 导致单一指标可信度评估和专家目测评估方法难以得到准确的评估结果和评估专家按照 AHP 方法给出的是区间互补判断矩阵, 导致可信度指标的权重难以确定的问题。提出了一种基于特征选择验证 FSV(Feature Selection Validation) 的多指标综合可信度评估模型, 通过 FSV 方法计算可信度指标的定量或定性的可信度值; 定义了区间数的模糊度和相离度, 构建了多目标优化模型计算可信度指标的权重。实例证明了方法的可行性和有效性。

**关键词:** 特征选择验证; 故障注入; 仿真可信度; 区间互补判断矩阵; AHP 方法

中图分类号: N945.16 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 08-1567-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0862

## Credibility Assessment of Fault Injection Simulation Based on Feature Selective Validation

Li Sheng, Li Yuxiao

(School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** Aiming at the complexity and large number feature details of the data of fault injection simulation which lead to the difficulty for the single indicators or expert visual assessment methods to obtain the accurate assessment results, and the evaluation expert giving the interval complementary judgment matrix on the basis of AHP method which lead to the difficulty for the weights of credibility indicators to be determined, a multi-indicator comprehensive credibility assessment model based on Feature Selection Verification (FSV) is proposed. It can calculate the quantitative credibility values and the qualitative credibility values of the credibility indicators. In order to calculate the weights of credibility indicators, the concepts of interval ambiguity and interval deviation are defined, and a multi-objective optimization model is constructed. The results show the feasibility and effectiveness of the method.

**Keywords:** FSV method; fault injection; simulation credibility; interval complementary judgment matrix; AHP method

## 引言

故障注入源自于 20 世纪 70 年代的可靠性评估技术, 被用于安全测试和故障诊断验证, 是测试性验证试验的一项关键技术。故障注入技术主要包括

硬件注入和软件注入两类。硬件注入更接近系统运行器件的实际故障, 但是很难实现高集成度和紧密封装设备的故障注入。而软件注入是通过仿真实验模拟出设备工作中可能发生的故障信号并加载到指定位置, 因为软件注入具有高可观察性, 高可控性和测试期短等优点, 已成为故障注入方正的主流方案<sup>[1-3]</sup>。故障注入仿真的可信度直接关系到测试性验证试验的成败, 只有保证仿真模型或算法的有效性, 仿真的结果才具有实际应用价值<sup>[4]</sup>。目前,



收稿日期: 2018-12-28 修回日期: 2019-03-23;  
基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61490702),  
江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ170526);  
作者简介: 李晟(1982-), 男, 湖南湘阴, 博士, 讲师,  
研究方向为复杂系统仿真及仿真可信度评估, 故障诊断、复杂工业过程决策与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1567 •

仿真可信度评估主要是依靠评估专家目测对比仿真数据与参考数据得到主观判断,其评估结果依赖于评估专家对于模型背景知识,模型基本原理和测试性试验条件的了解程度,因此缺乏可传播性和稳定性<sup>[5]</sup>。另外,仿真系统尤其是复杂仿真系统的仿真数据,通常波形复杂甚至是多维数据,这使得传统的目测评估方法难以实现。因此,基于数据的仿真可信度评估方法被广泛关注,成为研究热点<sup>[6]</sup>。

目前,基于数据的仿真可信度评估方法主要有残差分析法<sup>[7]</sup>和基于 Prony 算法的数据特征提取的仿真可信度评估方法<sup>[8]</sup>。残差分析法适用于信号整体误差的分析,不适用于信号间不同动态性能的误差分析,因此并不适用于故障仿真数据。Prony 算法是用一组指数项的线性组合来拟合等间隔采样数据的线性叠加模型,但对强非线性曲线并不敏感,而故障注入时,仿真信号往往是强非线性曲线。因此,研究一种基于数据的客观、标准、定量的适用于故障注入仿真的可信度评估方法具有实际意义。

特征选择验证(Feature Selective Validation, FSV)方法模拟领域专家对仿真数据的视觉评估过程,通过对数据的量级、趋势、特征等方面的差异提取,全面反映数据在整体及细节上的差异,并提供多种定性和定量的评估指标。与传统方法相比,FSV 方法在快速定位数据差异、定量表达差异特性方面都具有明显优势。FSV 方法由 Martin<sup>[9]</sup>于 1999 年提出, Duffy 等<sup>[5]</sup>在 Martin 工作基础上正式提出了 FSV 方法。随着 IEEE 计算电磁学计算机建模与仿真验证标准工作组将 FSV 方法纳入 IEEE1597.1 &1597.2 标准<sup>[10-11]</sup>, FSV 方法在实际工程中的应用和拓展研究成为一个广泛关注的热点。但是 FSV 方法只能评估单个指标仿真数据的可信度,而故障注入仿真的可信度评估通常需要考虑多个指标的仿真数据。为此,研究建立基于 FSV 方法的多指标综合评估模型很有必要,该模型的构建涉及到不同可信度指标的确权问题。

层次分析法<sup>[12]</sup>(Analytic Hierarchy Process, AHP)是获取指标权重的常用方法,其基本原理是将指标

进行层次划分;评估专家将同一层次的指标进行两两比较,按照评估标度给出不同指标间相对重要程度的评判值,形成确定数判断矩阵;通过判断矩阵求同一层次各指标的权重值。但由于复杂仿真系统本身的复杂性和不确定性,评估专家对于指标的偏好程度往往不能做出精确的判断,而是以模糊数的形式给出判断矩阵,这就给权值的计算带来了困难。

为此,本文利用 FSV 方法,针对故障注入仿真的仿真数据复杂、细节特征多,导致单一指标可信度评估和专家目测评估方法难以得到准确的评估结果的问题,提出了一种基于 FSV 方法的多指标仿真可信度综合评估模型。针对评估专家给出的是区间互补判断矩阵,提出了区间数模糊度和相离度的概念,并在此基础上,建立一个非线性多目标优化模型确定同层各指标的权重。通过 CRH2 动车组牵引电机转子断条的故障注入仿真可信度评估实例,验证了方法的可行性和有效性,并根据仿真可信度指导仿真模型参数的设置。

## 1 基于 FSV 方法的多指标可信度综合评价模型

### 1.1 FSV 的基本原理

FSV 方法是通过数值算法来模拟专家的评估过程,从而使不同的应用者具有等价于专家的评估能力。该方法的原理框图如图 1 所示。

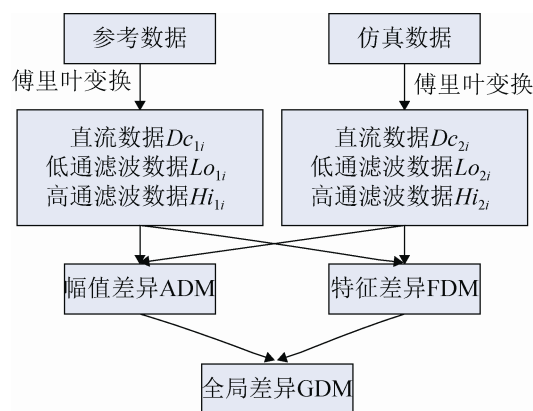


图 1 FSV 方法原理框图

Fig. 1 Principle diagram of FSV method

由图 1 可知,FSV 先将参考数据和仿真数据进行傅里叶变换,然后按照图 1~2 所示的滤波将频域分解为直流、低频和高频 3 个分量。其中直流分量为频谱中频率最低的 4 个频点,  $i_p$  为高频与低频的分界点,按照总能量(除直流分量外)的 40% 确定。

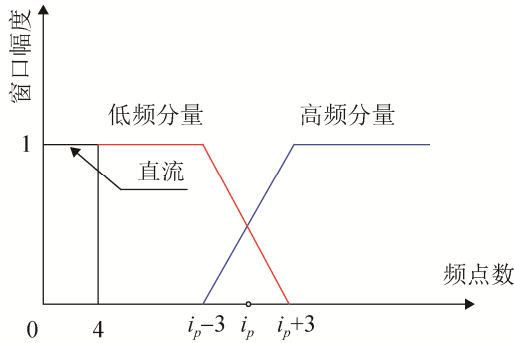


图 2 FSV 方法频域滤波器的定义  
Fig. 2 Filter defined by FSV in frequency domain

$$S = \sum_{i=5}^N TDWS(i) \quad (1)$$

$$\sum_{i=5}^{i_{40\%}} TDWS(i) \leq 0.4S \quad (2)$$

$$i_{bp} = i_{40\%} + 5 \quad (3)$$

式中:  $TDWS(i)$  为第  $i$  个频点的频谱值;  $S$  为频谱值之和(不包括直流分量);  $N$  为频点个数;  $i_{40\%}$  为由第 5 个频点累加达到  $S$  的 40% 时对应的频点。最后,FSV 方法对滤波后的频率成分进行傅里叶逆变换,即可得到数据的直流分量  $DC$ 、低频分量  $Lo$  和高频分量  $Hi$ 。

FSV 方法提供了 3 个数据指标:用于衡量数据总体上的相似程度的幅度差分测度(Amplitude Difference Measure, ADM),用于衡量数据间的快速变化和特征细节的差的频率差分测度(Feature Difference Measure, FDM)和 ADM 与 FDM 组合而成的全局差分测度(Global Difference Measure, GDM)。为了得到量化的比较值,这 3 个数据指标可以进一步具体表示为:  $ADM_i$ ,  $FDM_i$ ,  $GDM_i$ ;  $ADM_{tot}$ ,  $FDM_{tot}$ ,  $GDM_{tot}$ 。

其中  $ADM_i$ ,  $FDM_i$  和  $GDM_i$  分别表示仿真数据和参考数据点对点的比较,它们的值越低,说明两

组数据越相似。 $ADM_{tot}$ ,  $FDM_{tot}$  和  $GDM_{tot}$  分别是  $ADM_i$ ,  $FDM_i$  和  $GDM_i$  的平均值。 $ADM_i$ ,  $FDM_i$  和  $GDM_i$  的表达式如下:

$$ADM_i = |\alpha/\beta| + ODM \quad (4)$$

式中:  $ODM$  为直流偏移差异值,反映了数据间的直流差异。

$$\alpha = (|Lo_{1i}| - |Lo_{2i}|) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|Lo_{1i}| + |Lo_{2i}|) \quad (6)$$

$$ODM_i = \left[ \frac{(|DC_{1i}| - |DC_{2i}|)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|DC_{1i}| + |DC_{2i}|)} \right] \times \exp \left\{ \frac{(|DC_{1i}| - |DC_{2i}|)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|DC_{1i}| + |DC_{2i}|)} \right\} \quad (7)$$

$$FDM_i = 2(|FDM_{1i}| + |FDM_{2i}| + |FDM_{3i}|) \quad (8)$$

$$FDM_{1i} = \frac{|Lo'_{1i}| - |Lo'_{2i}|}{\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N (|Lo'_{1i}| + |Lo'_{2i}|)} \quad (9)$$

$$FDM_{2i} = \frac{|Hi'_{1i}| - |Hi'_{2i}|}{\frac{6}{N} \sum_{i=1}^N (|Hi'_{1i}| + |Hi'_{2i}|)} \quad (10)$$

$$FDM_{3i} = \frac{|Hi''_{1i}| - |Hi''_{2i}|}{\frac{6}{N} \sum_{i=1}^N (|Hi''_{1i}| + |Hi''_{2i}|)} \quad (11)$$

$$GDM_i = \sqrt{ADM_i^2 + FDM_i^2} \quad (12)$$

式(5)~(7)中:  $N$  为数据长度;  $i$  为数据点编号;  $DC_{\{1,2\}}$ ,  $Lo_{\{1,2\}}$  和  $Hi_{\{1,2\}}$  分别为数据的直流、低频和高频分量;式(9)~(11)中:  $Lo'_{\{1,2\}}$  为低频分量一阶导数;  $Hi'_{\{1,2\}}$ ,  $Hi''_{\{1,2\}}$  分别为高频分量的一、二阶导数。

可信度指标的可信度值,最终使用  $ADM_{tot}$ ,  $FDM_{tot}$  和  $GDM_{tot}$  定量值的表示,定量值可以由表 1 的对应关系转化为定性表述。

表 1 FSV 评估方法等级划分

Tab. 1 Classification levels of FSV method

FSV 值(定量)	自然语言描述(定性)	FSV 评估等级
$0 \leq X < 0.1$	极好(Excellent)	1
$0.1 \leq X < 0.2$	很好(Very Good)	2
$0.2 \leq X < 0.4$	好(Good)	3
$0.4 \leq X < 0.8$	一般(Fair)	4
$0.8 \leq X < 1.6$	差(Poor)	5
$X \geq 1.6$	很差(Very Poor)	6

FSV 还可以模拟专家目测评估,通过统计每一类定性表述所占比重合成可信度直方图,即可模拟专家评估结果的分布情况,如图 3 所示。

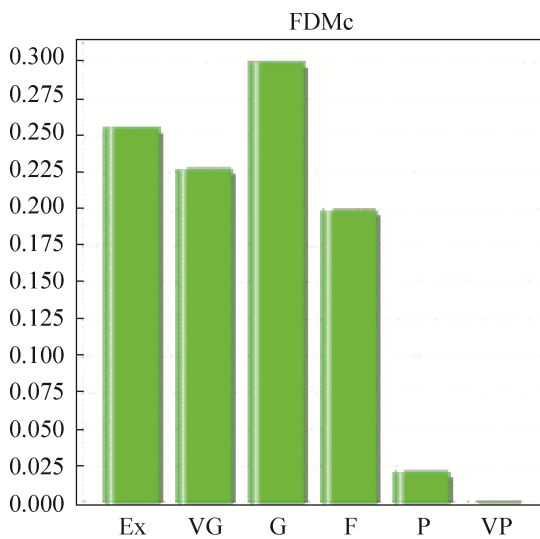


图 3 FSV 可信度直方图  
Fig. 3 Credibility histogram of FSV method

## 1.2 基于 FSV 的多指标综合可信度评估模型

基于 FSV 的多指标综合可信度评估模型可以由一个四元组  $(X, L, V, \omega)$  表示。4 个元素分别表示:

(1)  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为指标集。是在综合评估过程中需要考虑的指标集合,即可以反映仿真可信度的仿真结果。

(2)  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$  为评价集。在 FSV 方法中,可以是定量评估值,即  $ADM_{tot}$ ,  $FDM_{tot}$  和  $GDM_{tot}$  量化值;也可以使用表 1 中相对应的六级定性评价,即  $L = \{\text{“极好”, “很好”, “好”, “一般”, “差”, “很差”}\}$ 。

(3)  $V$  是单指标评估矩阵,由  $X$  中的每个指标的可信度值构成。

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $v_{ij}$  为指标  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  的可信度定量评估值或定性评价  $l_j (j=1, 2, \dots, m)$ 。可见,  $V$  表示了  $X$  到  $L$  的映射关系。本文使用 FSV 方法获取指标的可信度值。

(4)  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  为指标权重集,  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ ,  $\omega_i > 0, i=1, 2, \dots, n$ 。对权重  $\omega$  和单指标评估矩阵  $V$  进行聚合即可获得仿真多指标综合可信度评估结果  $C = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ 。

$$c_j = \sum_{i=1}^n \omega_i v_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

## 2 基于区间互补判断矩阵的 AHP 方法

在确定式(14)中的指标权重过程中,本文针对评估专家利用 AHP 方法确定指标权重时,因为复杂仿真系统的复杂性和不确定性,给出的是区间互补判断矩阵,导致权重难以确定的问题,提出了一种新的确权方法。

### 2.1 区间数互补判断矩阵

定义 1<sup>[13]</sup> 设  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为可信度指标集,设评估专家对  $n$  个指标进行两两比较得到判断矩阵  $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$ , 若对任意  $i, j=1, 2, \dots, n$ , 有  $a_{ji}^- = 1 - a_{ij}^+$ ,  $a_{ji}^+ = 1 - a_{ij}^-$ ,  $a_{ii} = [0.5, 0.5]$ ,  $a_{ij}^+ \geq a_{ij}^- \geq 0$ , 则称矩阵  $\tilde{A}$  为区间数互补判断矩阵。

定义 2<sup>[14]</sup> 设  $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$  为区间互补判断矩阵,若存在向量  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ , 使得  $\forall i, j=1, 2, \dots, n$ , 有  $a_{ij}^- \leq \omega_i / (\omega_i + \omega_j) \leq a_{ij}^+$ , 且  $\omega_i \geq 0$ ,  $\sum_i \omega_i = 1$ , 则称  $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$  满足积型一致性。

### 2.2 区间数的模糊度和相离度

定义 3 若区间数  $\tilde{a} = [a^-, a^+]$  为区间互补判断

矩阵的元素, 则称

$$amb(\tilde{a}) = \frac{1-2a^-}{\max(|1-2a^-|, 0.5)} - \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} \quad (15)$$

为区间数的模糊度。 $amb(\tilde{a})$  反映了区间数的模糊程度。当且仅当  $a^- = a^+$  时, 区间数为实数, 此时区间数模糊度为 0。易证明,  $amb(\tilde{a})$  具有以下性质:

(1) 非负性, 即  $amb(\tilde{a}) \geq 0$ , 当且仅当  $a^- = a^+$ ,  $amb(\tilde{a}) = 0$ ;

(2) 互补一致性, 即  $amb(\tilde{a}) = amb(1-\tilde{a})$ 。

定义 4 设有区间数  $\tilde{a} = [a^-, a^+]$ ,  $\tilde{b} = [b^-, b^+]$ , 则称

$$dev(\tilde{a}, \tilde{b}) = \left| \frac{1-2a^-}{\max(|1-2a^-|, 0.5)} - \frac{1-2b^-}{\max(|1-2b^-|, 0.5)} \right| + \left| \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} - \frac{1-2b^+}{\max(|1-2b^+|, 0.5)} \right| \quad (16)$$

为区间数  $\tilde{a}$  和  $\tilde{b}$  的相离度。易证明,  $dev(\tilde{a}, \tilde{b})$  具有以下性质:

- 1) 非负性, 即  $dev(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq 0$  当且仅当  $\tilde{a} = \tilde{b}$ ;
- 2) 对称性, 即  $dev(\tilde{a}, \tilde{b}) = dev(\tilde{b}, \tilde{a})$ 。

定理 1 对任意的互补型区间数, 有  $dev(\tilde{a}, \tilde{b}) = dev(1-\tilde{a}, 1-\tilde{b})$ , 即任意互补型区间数具有互补一致性。

证明

$$\begin{aligned} dev(1-\tilde{a}, 1-\tilde{b}) &= \left| \frac{1-2(1-a^+)}{\max(|1-2(1-a^+)|, 0.5)} - \frac{1-2(1-b^+)}{\max(|1-2(1-b^+)|, 0.5)} \right| + \\ &\left| \frac{1-2(1-a^-)}{\max(|1-2(1-a^-)|, 0.5)} - \frac{1-2(1-b^-)}{\max(|1-2(1-b^-)|, 0.5)} \right| = \\ &\left| \frac{2a^+ - 1}{\max(|2a^+ - 1|, 0.5)} - \frac{2b^+ - 1}{\max(|2b^+ - 1|, 0.5)} \right| + \\ &\left| \frac{2a^- - 1}{\max(|2a^- - 1|, 0.5)} - \frac{2b^- - 1}{\max(|2b^- - 1|, 0.5)} \right| = \\ &\left| \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} - \frac{1-2b^+}{\max(|1-2b^+|, 0.5)} \right| + \\ &\left| \frac{1-2a^-}{\max(|1-2a^-|, 0.5)} - \frac{1-2b^-}{\max(|1-2b^-|, 0.5)} \right| = \\ &dev(\tilde{a}, \tilde{b}) \end{aligned}$$

证毕。

定义 5 对给定的区间数, 若存在区间数  $\tilde{a}' = [a'^-, a'^+]$ , 使  $amb(\tilde{a}) = amb(\tilde{a}')$ , 则称  $\tilde{a}'$  为  $\tilde{a}$  的平移区间数。若  $a'^- > a^-$ , 则称  $\tilde{a}'$  为  $\tilde{a}$  的右移区间数; 若  $a'^- < a^-$ , 则称  $\tilde{a}'$  为  $\tilde{a}$  的左移区间数; 平移距离为  $dev(\tilde{a}, \tilde{a}')/2$ 。

定理 2 设区间数  $\tilde{a}'$ 、 $\tilde{b}'$  分别为区间数  $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$  的平移区间数, 若平移距离和方向均一致, 则有  $dev(\tilde{a}, \tilde{b}) = dev(\tilde{a}', \tilde{b}')$ , 称其具有平移不变性。

证明 假设  $\tilde{a}'$ ,  $\tilde{b}'$  均为  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$  的右移区间数, 由定义 4 可知,  $amb(\tilde{a}) = amb(\tilde{a}')$ ,  $amb(\tilde{b}) = amb(\tilde{b}')$ , 且  $dev(\tilde{a}, \tilde{a}') = dev(\tilde{b}, \tilde{b}')$ 。

令

$$\alpha_1 = \frac{1-2a^-}{\max(|1-2a^-|, 0.5)} - \frac{1-2b^-}{\max(|1-2b^-|, 0.5)};$$

$$\alpha_2 = \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} - \frac{1-2b^+}{\max(|1-2b^+|, 0.5)};$$

$$\alpha_3 = \frac{1-2a'^-}{\max(|1-2a'^-|, 0.5)} - \frac{1-2b'^-}{\max(|1-2b'^-|, 0.5)};$$

$$\alpha_4 = \frac{1-2a'^+}{\max(|1-2a'^+|, 0.5)} - \frac{1-2b'^+}{\max(|1-2b'^+|, 0.5)}.$$

则有

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \left( \frac{1-2a^-}{\max(|1-2a^-|, 0.5)} - \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} + \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} \right) - \left( \frac{1-2b^-}{\max(|1-2b^-|, 0.5)} - \frac{1-2b^+}{\max(|1-2b^+|, 0.5)} + \frac{1-2b^+}{\max(|1-2b^+|, 0.5)} \right) = \\ &amb(\tilde{a}) - amb(\tilde{b}) + \alpha_2 \end{aligned}$$

同理有  $\alpha_3 = amb(\tilde{a}') - amb(\tilde{b}') + \alpha_4$ , 因为  $amb(\tilde{a}) = amb(\tilde{a}')$ ,  $amb(\tilde{b}) = amb(\tilde{b}')$ , 故有  $\alpha_1 - \alpha_3 = \alpha_2 - \alpha_4$ , 因为是右移区间数, 有  $a'^- > a^-$ ,  $b'^- > b^-$ , 则有

$$\begin{aligned}
& dev(\tilde{a}, \tilde{a}') = dev(\tilde{b}, \tilde{b}') \Rightarrow \\
& \left| \frac{1-2a^-}{\max(|1-2a^-|, 0.5)} - \frac{1-2a'^-}{\max(|1-2a'^-|, 0.5)} \right| + \\
& \left| \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} - \frac{1-2a'^+}{\max(|1-2a'^+|, 0.5)} \right| = \\
& \left| \frac{1-2b^-}{\max(|1-2b^-|, 0.5)} - \frac{1-2b'^-}{\max(|1-2b'^-|, 0.5)} \right| + \\
& \left| \frac{1-2b^+}{\max(|1-2b^+|, 0.5)} - \frac{1-2b'^+}{\max(|1-2b'^+|, 0.5)} \right| \Rightarrow \\
& \left( \frac{1-2a^-}{\max(|1-2a^-|, 0.5)} - \frac{1-2b^-}{\max(|1-2b^-|, 0.5)} \right) + \\
& \left( \frac{1-2a^+}{\max(|1-2a^+|, 0.5)} - \frac{1-2b^+}{\max(|1-2b^+|, 0.5)} \right) = \\
& \left( \frac{1-2a'^-}{\max(|1-2a'^-|, 0.5)} - \frac{1-2b'^-}{\max(|1-2b'^-|, 0.5)} \right) + \\
& \left( \frac{1-2a'^+}{\max(|1-2a'^+|, 0.5)} - \frac{1-2b'^+}{\max(|1-2b'^+|, 0.5)} \right) \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha_3 + \alpha_4$$

与  $\alpha_1 - \alpha_3 = \alpha_2 - \alpha_4$  联立, 易知  $\alpha_1 = \alpha_3$ ,  $\alpha_2 = \alpha_4$ , 故  $dev(\tilde{a}, \tilde{b}) = dev(\tilde{a}', \tilde{b}')$ 。

证毕。

区间数的模糊度和相离度可用于测度区间互补判断矩阵的不确定性以及区间互补判断矩阵之间的差异。

### 2.3 基于区间互补判断矩阵的 AHP 确权方法

根据仿真对象的实际结构和层次, 结合仿真目的和特点, 由仿真系统开发人员、使用者及评估专家共同论证, 科学确定仿真系统可信度评估的指标体系。设  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$  是根据区间互补判断矩阵  $A = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$  计算得到的指标权重向量且应满足定义 2, 若评估专家给出的是区间数互补判断矩阵。由于判断矩阵需满足一致性条件, 因此可以构建如下多目标优化模型, 采用适当优化算法, 可以求得同层各可信度指标的权重:

$$M := \begin{cases} \min f(\omega) = \\ \sum_{i,j=1,2,\dots,n} [dev(\frac{\omega_i}{\omega_i + \omega_j}, \tilde{a}_{ij}) - amb(\tilde{a}_{ij})] \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \\ \omega_i > 0, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

## 3 评估实例

下面利用本文提出的多指标综合可信度评估模型, 对 CRH2 型动车组牵引电机转子断条故障注入仿真的结果进行可信度评估。本实例的仿真数据, 是通过 Simulink 环境下搭建牵引传动控制系统虚拟离线故障注入仿真平台得到的。该仿真系统是基于 CRH2-200 型动车组, 根据每个动力单元独立具有的牵引传动系统的主电路拓扑结构和系统控制策略, 利用 Simpower-system 工具箱和 Simulink 基本单元库, 分别构建牵引传动控制系统主电路拓扑结构、控制器和故障注入/模拟 Benchmark。评估过程中用于对比的参考数据, 是由利用 dSPACE 仿真器和实物控制器搭建半实物实时仿真平台得到的<sup>[15]</sup>。仿真时, 取采样间隔  $4 \times 10^{-4}$  s, 时长 6 s, 故障电机模型转差率设为 0.04。

评估具体步骤如下:

step 1: 按照 AHP 方法, 建立分层次的可信度指标体系。由领域内专家和仿真平台的技术人员, 通过对牵引电机转子断条故障的机理分析, 在仿真平台上设置 3 个数据采集点, 分别采集牵引电机电磁转矩, 直流环节下支撑电容电压和定子侧 A 相电流的输出信号, 并将它们作为底层可信度指标, 构建如图 4 所示的可信度指标体系。

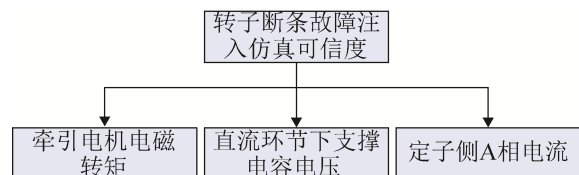


图 4 牵引电机转子断条故障仿真可信度评估指标层次  
Fig. 4 Simulation credibility index system for rotor bar breaking fault of traction motor

step 2: 请领域内经验丰富的评估专家参照区

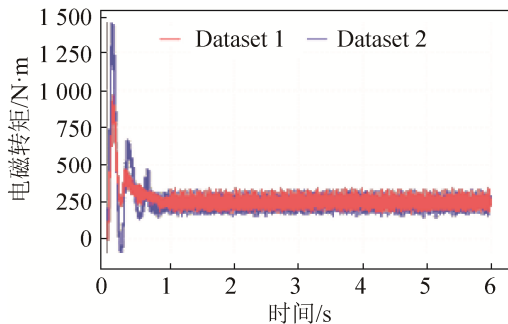


间数 AHP 方法的 0.1~0.9 五标度法<sup>[13]</sup>给出区间互补判断矩阵  $A$ 。

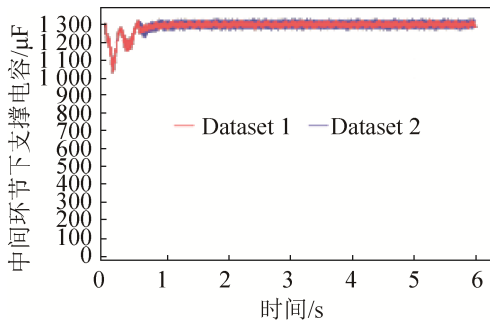
$$A = \begin{bmatrix} [0.5, 0.5] & [0.3, 0.5] & [0.7, 0.9] \\ [0.5, 0.7] & [0.5, 0.5] & [0.4, 0.7] \\ [0.1, 0.3] & [0.3, 0.6] & [0.5, 0.5] \end{bmatrix}$$

利用优化算法, 例如遗传算法, 可以求得式(17)所示的优化模型的最优解作为可信度指标的独立权重, 权重向量为  $\omega = (0.3495, 0.4080, 0.2425)$ 。

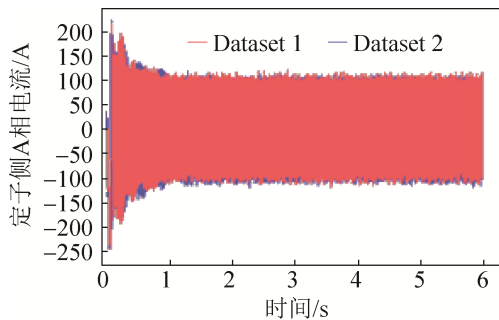
step 3: 3 个指标的仿真数据和参考数据对比图, 如图 5 所示。其中, Dataset1 为仿真信号, Dataset2 为参考信号。



(a) 电磁转矩



(b) 直流环节下支撑电容



(c) 定子侧 A 相电流

图 5 仿真数据与参考数据的对比图

Fig. 5 Comparisons of simulation data and reference data

由图 5 可见, 每组仿真数据波形的差别仅凭评估专家目测已经很难准确评估, 且该故障仿真结果的可信度评估需要综合所有指标的仿真数据才能做出明确判断。

step 4: 根据 FSV 方法, 分别计算 3 个指标的  $ADM_{tot}$ ,  $FDM_{tot}$  和  $GDM_{tot}$ 。作为底层指标的可信度测度值, 并依据表 1 给出定性的可信度等级。如表 2 所示。

表 2 各可信度指标的评估值(转差率 0.04)  
Tab. 2 Credibility indices values of slip ratio=0.04

可信度指标	$ADM_{tot}$	$FDM_{tot}$	$GDM_{tot}$
牵引电机	0.341 9	0.358 6	0.550 2
电磁转矩	好	好	一般
直流环节下	0.071 2	0.262 7	0.212 5
支撑电容电压	极好	好	好
定子侧	0.773 3	0.426 6	0.951 0
A 相电流	一般	一般	差

得到单指标评估矩阵  $V$ 。

$$V = \begin{bmatrix} 0.3419 & 0.3586 & 0.5502 \\ 0.0712 & 0.2627 & 0.2125 \\ 0.7733 & 0.4266 & 0.9510 \end{bmatrix}$$

step 5: 用式(14)将  $V$  的元素和权重进行聚合, 得到仿真多指标综合可信度。如表 3 所示。

表 3 转子断条故障仿真综合可信度(转差率 0.04)  
Tab. 3 Rotor bar fault simulation synthesize credibility (slip ratio=0.04)

综合可信度	$ADM_{tot}$	$FDM_{tot}$	$GDM_{tot}$
定量评估值	0.336 1	0.336 0	0.509 6
定性评价	好	好	一般

得到仿真多指标综合可信度为  $C = (0.3361, 0.3360, 0.5096)$ 。

可以利用仿真综合可信度来修正仿真模型的关键参数以提高仿真的准确度。转差率是异步电机运行的重要电气参数之一, 反映了电动机转速降低, 影响转子损耗和电机的效率。鼠笼型异步电机转子出现断条后, 其定子电流会出现一些附加频率分量, 如左边频分量  $(1-2s)f_1$  和右变频分量  $(1+2s)f_1$ , 其中,  $f_1$  为供电主频率,  $s$  为转差率。

因此在转子断条故障仿真过程中,异步电机的转差率是故障模型的一个关键且难以确定的参数(参数值较小,取值范围 2%~5%)<sup>[16-17]</sup>。对故障仿真的结果设置转差率分别为 0.03 和 0.05,再次进行故障注入仿真。利用本文方法计算它们的仿真可信度,如表 4~表 7 所示。

表 4 各可信度指标的评估值(转差率 0.03)

Tab. 4 Credibility indices values of  $s=0.03$

可信度指标	$ADM_{tot}$	$FDM_{tot}$	$GDM_{tot}$
牵引电机	0.252 4	0.353 3	0.489 3
电磁转矩	好	好	一般
直流环节下	0.315 2	0.608 3	0.638 5
支撑电容电压	好	一般	一般
定子侧	0.895 8	0.493 7	1.446 5
A 相电流	差	一般	差

表 5 转子断条故障仿真多指标综合可信度(转差率 0.03)

Tab. 5 Rotor bar fault simulation synthesize credibility ( $s=0.03$ )

综合可信度	$ADM_{tot}$	$FDM_{tot}$	$GDM_{tot}$
定量评估值	0.432 8	0.485 1	0.782 2
定性评价	一般	一般	一般

表 6 各可信度指标的评估值(转差率 0.05)

Tab. 6 Credibility indices values of  $s=0.05$

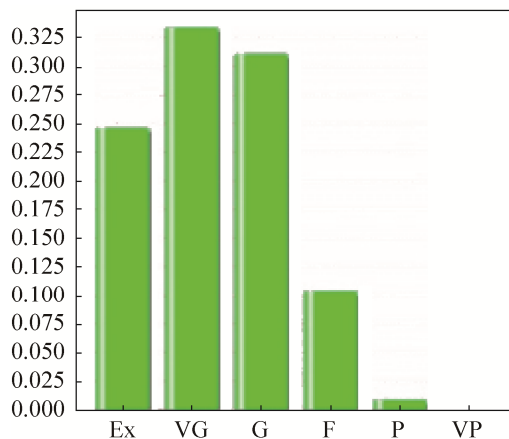
可信度指标	$ADM_{tot}$	$FDM_{tot}$	$GDM_{tot}$
牵引电机	0.883 2	1.208 9	1.551 0
电磁转矩	差	差	差
直流环节下	0.509 8	0.495 1	0.800 4
支撑电容电压	一般	一般	差
定子侧	0.588 6	0.460 1	0.747 1
A 相电流	一般	一般	一般

表 7 转子断条故障仿真多指标综合可信度(转差率 0.05)

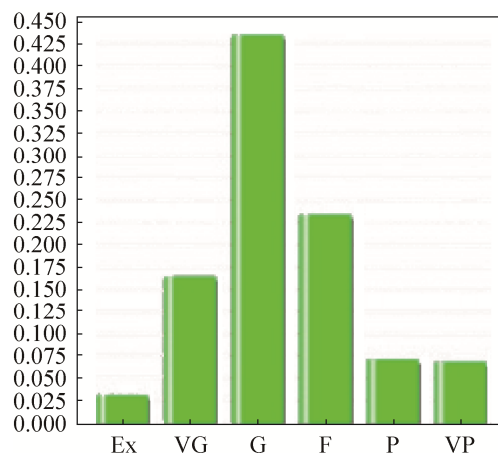
Tab. 7 Rotor bar fault simulation synthesize credibility ( $s=0.05$ )

综合可信度	$ADM_{tot}$	$FDM_{tot}$	$GDM_{tot}$
定量评估值	0.659 5	0.736 1	1.244 8
定性评价	一般	一般	差

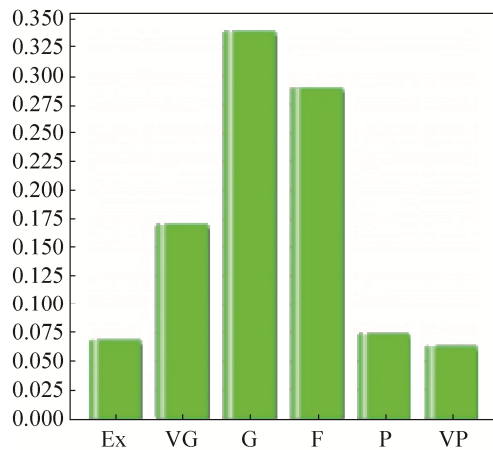
对比表 3,表 5,表 7 的仿真多指标综合可信度可以看出,当转差率的设置值分别为 0.03, 0.04 和 0.05 时,对应转差率为 0.04 的仿真可信度最高。而转差率为 0.03 和 0.05 时,仿真可信度的评价等级均比转差率为 0.04 时要低一个等级。3 种转差率条件下的仿真多指标综合可信度直方图如图 6 所示。



(a) 转差率 0.04



(b) 转差率 0.03



(c) 转差率 0.05

图 6 不同转差率条件下的仿真综合可信度直方图  
Fig. 6 Histograms of simulation synthesize credibility with different slip ratios

为进一步说明本文方法的有效性,利用文献[7]的方法,确定 3 个可信度指标在转差率分别为 0.03, 0.04 和 0.05 时的可信度量值,见表 8~10。

表 8 牵引电机转子断条故障仿真可信度指标量化值(转差率 0.04)  
Tab. 8 Credibility quantitative indices of rotor bar broken simulation ( $s=0.04$ )

可信度指标	整体可信度( $C_E$ )		特征可信度( $C_T$ )	
	残差相似度	频率相似度	幅值相似度	阻尼相似度
牵引电机电磁转矩	93.70	78.76	91.38	77.62
直流环节下支撑电容电压	90.88	72.56	82.02	89.61
定子侧 A 相电流	99.95	99.97	99.13	99.77

表 9 牵引电机转子断条故障仿真可信度指标量化值(转差率 0.03)  
Tab. 9 Credibility quantitative indices of rotor bar broken simulation ( $s=0.03$ )

可信度指标	整体可信度( $C_E$ )		特征可信度( $C_T$ )	
	残差相似度	频率相似度	幅值相似度	阻尼相似度
牵引电机电磁转矩	86.79	80.06	89.98	80.50
直流环节下支撑电容电压	85.94	82.56	88.50	80.85
定子侧 A 相电流	99.91	99.87	99.67	99.83

表 10 牵引电机转子断条故障仿真可信度指标量化值(转差率 0.05)  
Tab. 10 Credibility quantitative indices of rotor bar broken simulation ( $s=0.05$ )

可信度指标	整体可信度( $C_E$ )		特征可信度( $C_T$ )	
	残差相似度	频率相似度	幅值相似度	阻尼相似度
牵引电机电磁转矩	78.95	83.33	87.38	82.44
直流环节下支撑电容电压	70.68	78.67	73.40	74.73
定子侧 A 相电流	99.88	99.90	98.33	99.91

再利用式(18)~(20)计算转差率分别为 0.03, 0.04 和 0.05 时的仿真综合可信度。

$$C_T = \frac{1}{3}C_F + \frac{1}{3}C_A + \frac{1}{3}C_D \quad (18)$$

$$C' = \lambda C_E + (1-\lambda)C_T \quad (19)$$

$$R = \sum_{i=1}^3 \omega_i C'_i \quad (20)$$

式中:  $C_T$  为特征可信度;  $C_F$  为频率相似度;  $C_A$  为幅值相似度;  $C_D$  为阻尼相似度;  $C_E$  为整体可信度,  $C'$  为可信度指标的相似度。  $0 \leq \lambda \leq 1$ ,  $R$  表示仿真综合可信度。

取  $\lambda=0.5$ , 则可以得到转差率在 0.03, 0.04 和 0.05 时的仿真综合可信度值如表 11 所示。

表 11 牵引电机转子断条故障仿真综合可信度  
Tab. 11 Synthesize credibility of Rotor Bar Broken Simulation

转差率	综合可信度/%
0.04	90.16
0.03	88.70
0.05	82.55

由此可见转差率为 0.04 时, 仿真可信度比转差率为 0.03 和 0.05 时高, 验证了本文所提方法的有效性。

## 4 结论

本文提出了一种针对故障注入仿真的多指标综合可信度评估模型。通过 FSV 方法计算可信度指标的定量和定性的可信度值; 定义了区间数的模糊度和相离度, 构建了多目标优化模型计算可信度指标的权重。将客观的数据分析与人类感知、专家经验进行了有效的结合, 并将方法用于指导仿真模型的参数设置, 可以指导仿真模型参数的修正, 实现仿真可信度水平的进一步提高, 尤其是对建模过程中常遇到的已知模型参数取值范围, 但是很难确定模型参数精确取值的问题, 给出了一种解决方案。另外, 本文方法可以定量和定性的评估仿真数据与参考数据的差异, 使得对仿真方法和模型的有效性判断更加直观、简单。

## 参考文献:

- [1] 石君友. 测试性设计分析与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 276-289.  
Shi Junyou. Testability Design Analysis and Verification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 276-289.
- [2] Azimi S, Du B, Sterpone L. Evaluation of transient errors in GPGPUs for safety critical applications: An effective simulation-based fault injection environment [J]. Journal of Systems Architecture (S1383-7621), 2017, 75(4): 95-106.
- [3] Juez G, Amparan E, Lattarulo R. Early Safety Assessment of Automotive Systems Using Sabotage Simulation-Based Fault Injection Framework[J]. Computer Safety, Reliability, and Security (S0167-4048), 2017, 33(7): 255-269.
- [4] 张忠, 方可, 杨明. 基于 2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(1): 147-151.  
Zhang Zhong, Fang Ke, Yang Ming. Method for simulation credibility evaluation based on 2-additive fuzzy measures[J]. Control and Decision, 2013, 28(1): 147-151.
- [5] Orlandi A, Duffy A P, Archambeault B, et al. Feature Selective Validation (FSV) for Validation of Computational Electromagnetic (CEM). Part I – the FSV Method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (S0018-9375), 2006, 48(3): 449-459.
- [6] 肖舒文, 李柏文, 陈晓盼. 特征选择验证方法: 原理、应用及最新进展[J]. 电讯技术, 2016, 56(3): 346-352.  
Xiao Shuwen, Li Bowen, Chen Xiaopan. Feature selective validation method: principle, application and the latest progress[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(3): 346-352.
- [7] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 电力系统仿真可信度评估方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 51-57.  
Jia Xudong, Li Gengyin, Zhao Chengyong, et al. Study of the Credibility Evaluation Method for the Power System Simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 51-57.
- [8] 周成, 贺仁睦. 应用界标分解法的电力系统动态仿真准确度评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 42-47.  
Zhou Cheng, He Renmu, Accuracy Assessment of Power System Dynamic Simulation Based on Landmark Method [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 42-47.
- [9] Martin A J M. Quantitative data validation[D]. Leicester: De Montfort University, 1999.
- [10] IEEE STD 1597.1-2008. IEEE standard for validation of computational electromagnetics computer modeling and simulations[S].
- [11] IEEE STD 1597.2-2010. IEEE recommended practice for validation of computational electromagnetics computer modeling and simulations[S].
- [12] Witold P, Song M L. A granulation of linguistic information in AHP decision making problems[J]. Information Fusion (S1566-2535), 2014, 17: 93-101.
- [13] 徐泽水. 区间数互补判断矩阵排序的一种实用方法[J]. 运筹与管理, 2001, 10(1): 16-19.  
Xu Zeshui. A practical method for priority of interval number complementary judgement matrix[J]. Operations Research and Management Science, 2001, 10(1): 16-19.
- [14] 涂振坤. 区间互补判断矩阵的拟一致性及其权重研究[J]. 中国科技技术大学学报, 2014, 44(3): 248-256.  
Tu Zhenkun. Quasi-consistency of interval complementary judgment matrix and its weights[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(3): 248-256.
- [15] Yang C H, Yang C, Peng T, et al. A Fault-Injection Strategy for Traction Drive Control Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2017, 64(7): 5719-5727.
- [16] 曹玉泉, 闫丽梅, 李梦达, 等. 变频调速异步电动机的转差率[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(1): 37-41.  
Cao Yuquan, Yan Limei, Li Mengda, et al. Slip of Induction Motor with Frequency Speed Control[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(1): 37-41.
- [17] 刘新正, 何升华, 高琳, 等. LMS 滤波法在笼型异步电机转子断条诊断中的特征 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21(5): 1-7.  
Liu Xinzheng, He Shenghua, Gao Lin, et al. The feature of LMS adaptive filter in rotor bar broken diagnosis of squirrel cage asynchronous machines [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(5): 1-7.