

钢丝绳缺陷识别与安全性能评价模型

摘要

钢丝绳作为矿井提升系统牵引、运输、提升过程中的关键部件，在其长期工作过程中会受到矿井复杂环境的腐蚀、磨损、物理撞击、挤压等各种因素的影响，会出现断丝、磨损、变形、断股等不同程度的损伤和缺陷，导致使用强度和寿命降低，使得钢丝绳发生骤断的风险升高，威胁到人员财产生命安全，造成生产停顿。因此，对钢丝绳具体的损伤和缺陷进行定量识别，对于评价钢丝绳安全性能和保障生产安全具有重要的理论意义和实用价值。

在问题一中，我们首先计算出上行和下行监测数据的每一帧的具体位置，接着对 10 次往返数据进行了**数据整合**，把在同一位置测得的不同数据进行平均处理，并进行重新排序。考虑到实际监测数据的复杂性，我们引入了**多尺度小波分解滤波**的思想，并利用**MATLAB 小波分析工具箱**对钢丝绳检测信号进行分析。通过对原始信号进行 12 尺度分解，设置各分解信号的阈值完成抑噪处理；然后对信号进行重构，得到了去噪后的信号数据，在此基础上，计算得到了 6 根钢丝绳的缺陷数目、程度和位置数据。

在问题二中，我们根据已经得到的 6 根钢丝绳的缺陷数据，把影响钢丝绳安全性能指标的主要因素分为缺陷数目、缺陷程度（微小断丝、变形等）、缺陷位置（密集、稀疏等）和电压值数据的稳定性四类。从具体的数据出发，分别建立了相应的量化评价模型，给出了各钢丝绳各因素的评分指标。之后，对各钢丝绳各因素的评分指标应用**熵权法模型**，得到了最终的钢丝绳安全性能评分；结果显示，1 号钢丝绳的安全性能非常差，2 号钢丝绳的安全性能相对较差，3 号钢丝绳的安全性能相对较好，4、5 和 6 号钢丝绳的安全性能非常好。另外，我们又通过**TOPSIS**方法对各钢丝绳各因素的评分指标进行处理，其结果显示的相对接近度与安全性能评分十分接近，互相验证了两种模型的有效性。

关键词：数据整合 小波分析 多尺度小波分解滤波 多尺度小波分解滤波 熵权法 TOPSIS 法

目录

1 问题重述	1
2 问题分析	1
3 模型的假设与约定	2
4 符号说明	2
5 监测数据的处理	3
5.1 缺陷程度的设定	3
5.2 各脉冲帧数位置的确定	3
5.3 数据的处理与整合	4
6 问题一模型的建立与求解	5
6.1 离散小波变换	5
6.2 多尺度小波分解滤波的思想	6
6.3 基于 MATLAB 工具箱的小波滤波	7
7.问题二模型的建立与求解	12
7.1 钢丝绳评价指标的建立	12
7.1.1 钢丝绳程度和数目的评分标准	13
7.1.2 钢丝绳位置与稳定性评分标准	13
7.2 基于熵权法的评价模型	15
7.3 基于 TOPSIS 法的评价模型	17
参考文献	20
附录	20

1 问题重述

矿井提升机是一种大型机械设备，通过电机带动钢丝绳从而带动容器在井筒中升降，完成输送任务。由于钢丝绳长期处于交变载荷状态下运行，极易断丝、磨损、扭结、锈蚀等损伤，对整个矿井提升系统的安全运行造成严重的威胁。因此，利用“磁平衡”的检测技术完成对钢丝绳的全面安全监控具有重大意义。该项技术是通过传感器获取监控数据信号，并通过数据信号进行分析，对钢丝绳的性能做出评价。

在附件 1 中给出了六绳提升机六根钢丝绳在井筒中升降往返 10 次的监测数据。请解决以下问题：

问题一：钢丝绳的缺陷会导致检测数据产生波动，而监测时钢丝绳的晃动等因素产生的噪音也会导致检测数据的波动，导致误报。请建立数学模型及设计算法去除监测数据中的噪音，并找出六根钢丝绳经过 10 次往返运行后所有缺陷的数量、程度及位置。

问题二：结合问题 1 的结果，建立数学模型，给出钢丝绳安全性能的量化评价方法，依据附件 1 数据，计算六根钢丝绳经过 10 次往返运行之后的安全性能评价价值。

2 问题分析

在对问题的分析中，考虑到实际工程的安全性，要精确的确定六根钢丝绳有缺陷的位置和程度，而附录中只给出了在对应脉冲下检测到钢丝绳电压，没有准确地定位到钢丝绳的具体位置；所以需要先对钢丝绳的数据进行处理，来确定钢丝绳每一帧数所对应的具体位置。另外，10 次的往返测量必然会导致在相同位置的重复测量，可能导致这些位置对应有不同的数据，为了减小误差和数据冗余，有必要对重复测量的数据进行处理。

对于问题一，我们考虑到往返测量中监测数据不是从同一端记录的情况，分别计算出了上行和下行所测出的每一帧数据所对应的具体位置。接着把五次往返的数据（上行和下行的监测数据）进行整合，把在同一位置的不同数据进行平均处理，之后按照位置大小升序排列。由于噪音成分会对监测的数据造成干扰，我们采用对非平稳信号具有良好处理性能离散小波变换进行除噪。考虑到实际监测数据的复杂性，我们引入了多尺度小波分解滤波的思想，并通过对 MATLAB 小波分析工具箱的合理运用，得到了除噪后的监测数据。最后，我们根据 5 种缺陷量化的定义，设计算法找出了六根钢丝绳经过 10 次往返运行后所有缺陷的数量、程度和位置。

对于问题二，在问题一中得到的结果的基础上，我们把影响钢丝绳安全性能的指标大致分为以下几类，微小断丝缺陷数目，变形缺陷数目，轻度断丝数目，中度断丝数目，内部断股数目，各类型缺陷所在的位置，任意钢丝绳所测得电压值的稳定性。通过定义指标，归一化处理，加权平均来得到相应的评分，之后通过熵权法计算综合的评价指数。

3 模型的假设与约定

测量中产生的误差符合偶然误差的特性，它具有一定的限度。

4 符号说明

表 1 符号说明

符号	含义
u_n	钢丝绳任一帧数据中的电压值
\bar{u}	钢丝绳中所有帧的电压值数据平均值
α	钢丝绳缺陷程度的指标
δ_j	钢丝绳的缺陷程度因子
β_{ij}	钢丝绳的缺陷强度因子
x_{ij}	钢丝绳的缺陷数目因子
D_{ij}	对钢丝绳的综合评分指标
$\psi_{a,b}$	小波脉冲
$c_{j,k}$	小波系数
L_{nj}	钢丝绳缺陷的位置函数
L_n	钢丝绳的中点位置
γ_i	钢丝绳缺陷的相对位置的平方和

5 监测数据的处理

5.1 缺陷程度的设定

从题目中我们大致知道了钢丝绳缺陷程度的五种分类，即微小断丝、变形、轻度断丝、中度断丝和内部断股。对此，我们做出如下具体的定义。

设任意钢丝绳任一帧数据中的电压值为 u_n ，则任意一根钢丝绳中所有帧的电压值数据的平均值为：

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n u_n \quad (1)$$

则反映钢丝绳缺陷程度的指标 α 为：

$$\alpha = \frac{|u_n - \bar{u}|}{\bar{u}} \quad (2)$$

缺陷程度的五种分类如下表所示：

表 2 缺陷程度分类表

范围	$0 < \alpha < 1\%$	$1\% \leq \alpha < 1.6\%$	$1.6\% \leq \alpha < 2.5\%$	$2.5\% \leq \alpha < 5\%$	$5\% \leq \alpha < 14\%$	$14\% \leq \alpha$
程度	正常	微小断丝	变形	轻度断丝	中度断丝	内部断股

5.2 各脉冲帧数位置的确定

在实际的工程中，钢丝绳的电压监控数据由相应的传感器获取，对应钢丝绳的位置通过脉冲的方式记录，脉冲数每增加 1，代表钢丝绳距离增加了 0.4 米。将每一个测量的数据记录为一帧，一个脉冲通常对应有多帧数据的测量；因此，从给定的数据中，无法具体确定每个测量点的位置，这将不能精确衡量钢丝绳的损伤情况。必须计算出精确的位置数据。

设每一帧的数据为 x ，第 i 个脉冲数对应的帧数为 m_i ，则在第 i 个脉冲数中

$$\text{每一帧数据对应的距离为: } \frac{0.4}{m_i} \quad (3)$$

在上行的监测数据中，在第 i 个脉冲，第 j 个帧数对应的位置 L_n 为：

$$L_n = 0.4 \left(\frac{j}{m_i} + i - 1 \right), n = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

在下行的监测数据中在第*i*个脉冲，第*j*个帧数对应的位置 L_n 为：

$$L_n = 960 - 0.4\left(\frac{j}{m_i} + i - 1\right), n = 1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

5.3 数据的处理与整合

在对六根钢丝绳的 10 次测量中，虽然测量的脉冲数相等，但脉冲数所包含的帧数却不相同，结合上一节的结论可以知道，10 次的往返测量必然会导致在相同位置的重复测量，可能导致这些位置对应有不同的数据，在 10 次往返测量中，同一脉冲所包含的帧数对应位置也不相同，这说明每一次测量中，都具有其“独特”的测量位置，经过计算，这种“独特”的测量位置，是非常多的，所以有必要进行数据的预处理。另外，对于每一次测量中具有相同位置的测量，其测量误差符合偶然误差的特性，所以考虑对相同的测量位置所得到的数据取平均值来减少误差对结果的影响。

设任意帧数所对应的电压值与位置为：

$$U_{nj} = (u_{nj1}, u_{nj2}, u_{nj3} \dots u_{nj6}, L_n). \quad n = 1, 2, 3 \dots j = 1, 2, 3 \dots j \quad (6)$$

当任意位置具有唯一数据时，即 $j=1$ ，则电压值与位置表示为：

$$U_n = (u_{n1}, u_{n2}, u_{n3} \dots u_{n6}, L_n). \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

当任意位置具有多组数据时，即，为了保证数据序列的一致性，对电压值与位置函数做如下处理：

$$U_n = \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} U_{nj}}{j} = \left(\frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} u_{nj1}}{j}, \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} u_{nj2}}{j} \dots \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} u_{nj6}}{j}, L_n \right) \quad (8)$$

则处理后的帧数数据形式如下：

$$\begin{cases} U_{\min} = (u_{\min 1}, u_{\min 2} \dots u_{\min 6}, L_{\min}) \\ \vdots \\ U_n = \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} U_{nj}}{j} = \left(\frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} u_{nj1}}{j}, \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} u_{nj2}}{j} \dots \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} u_{nj6}}{j}, L_n \right) \\ \vdots \\ U_{\max} = (u_{\max 1}, u_{\max 2} \dots u_{\max 6}, L_{\max}) \end{cases} \quad (9)$$

6 问题一模型的建立与求解

6.1 离散小波变换

在检测过程中,受到矿井复杂恶劣环境的影响,探头传感器输出的信号中掺杂了很多背景噪声信号,其中,断丝缺陷信号是一随机出现的局部异常信号,这是钢丝绳断丝缺陷定量识别的主要依据。所以,消除背景噪声信号是对钢丝绳断丝缺陷定量识别的前提。

为确定断丝缺陷的位置,需要保持检测信号在空间域上的识别性,同时对其各个频段上进行抑噪处理。而传统的傅里叶变换在频域的分辨率为无穷大,在时域的分辨率为零,使得傅氏分析对损伤信号的处理、准确定位比较困难。为了克服傅氏分析的缺点,我们采用小波变换的方法对信号进行处理,小波变换是一个“时间—频率”窗口,窗口的形状随频率改变,但大小不变,是进行信号时频分析和处理时频局域化的分析方法。相比于傅里叶变换,小波变换保留了时间和频率的分辨率,更适合处理钢丝绳损伤这种突变的信号。离散小波变换是对基本小波的尺度和平移进行离散化,在处理非平稳信号时具有更好的性能[4]。

下面简要介绍离散小波变化的基本理论。

一般设基小波函数为 $\psi(t)$,经过平移和变换后得到小波脉冲序列,在不间断的情况下,小波脉冲 $\psi_{a,b}$ 可以表示为

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (10)$$

式中, a 为伸缩因子, b 为平移因子。

基小波函数在原点附近的波形明显偏离了水平线,在远离原点的位置函数值会很快降为零,整个波动逐渐变得平静。小波分析存在一个信号的分解和重构的问题,对于函数 $f(t) \in L_2(R)$,其小波变换 $W_f(a,b)$ 定义为:

$$W_f(a,b) = f(t) * \psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (11)$$

由小波变换 $W_f(a,b)$ 重构 $f(t)$ 的小波逆变换定义为:

$$f(t) = \frac{1}{c} \iint_{-\infty}^{\infty} W_f(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{1}{a^2} da db \quad (12)$$

由上式可以看出,小波变换与傅里叶变换一样表现为一系列的卷积运算。小波分解本质是采用不同频段的滤波器对其进行数字滤波。选择不同频段的滤波器(小波基)可以将信号分解到相应的频带。

这里为了考虑到数值计算的可行性,引入了离散小波变化。将伸缩因子 a 和

平移因子 b 离散化为 $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0$ ，这里 $j \in Z$ 。则离散化小波函数为：

$$\psi_{j,k} = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi[a_0^{-j}(t - kb_0)] \quad (13)$$

实际应用中通常采用二进制，此时 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 。由此可得小波函数为

$$\psi_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} \psi[2^{-j}(t - kb_0)] \quad (14)$$

对于任意的函数 $f(t)$ ，小波级数展开为

$$f(t) = \sum_{j,k \in Z} c_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (15)$$

其中，

$$c_{j,k} = f(t) * \psi_{j,k}(t) = \int f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt \quad (16)$$

上式中 $c_{j,k}$ 为小波系数。

小波系数 $c_{j,k}$ 是函数 $f(t)$ 的连续小波变换 $W_f(a,b)$ 在尺度参数 a 的二进离散点 $a = 2^j$ 和平移参数 b 的二进整倍数离散点 $b = 2^{j*k}$ 时的取值，因此小波系数 $c_{j,k}$ 实际上是函数 $f(t)$ 的离散小波变换。二进小波变换具有连续小波变换的时移共变性，它在奇异性检测方面有十分重要的应用。

6.2 多尺度小波分解滤波的思想

小波滤波的思想是将外部断丝信号进行离散小波分解，得到低频系数和低频系数，噪声一般包含在高频系数中，所以对高频系数做阈值量化处理，再进行系数重构，得到去除噪声后的信号。

实际中的检测信号较为复杂，单次小波分解不能很好的滤除噪声信号，通常采用多尺度小波分解滤波的方法，对检测信号进行多次分解。具体结构图如下所示：

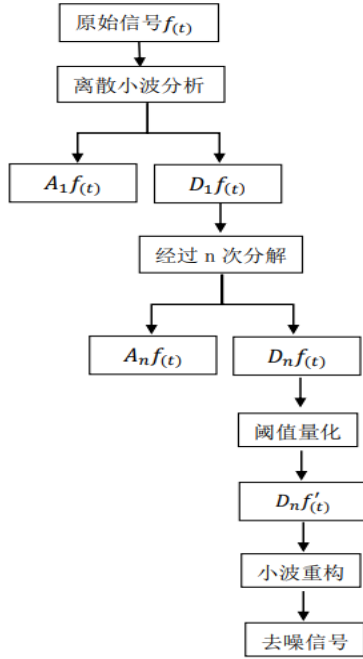


图 1 多尺度小波分解结构图

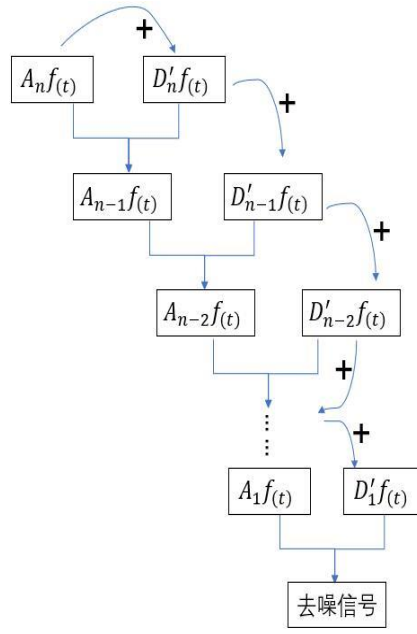


图 2 小波重建结构图

具体实现步骤如下：

● 多尺度小波分解

基于多分辨率分析的思想，可以先检测信号分解成高频部分 $D_1f(t)$ 和低频部分 $A_1f(t)$ ，然后把低频部分 $A_1f(t)$ 进一步分解为高频 $D_2f(t)$ 和低频成分 $A_2f(t)$ ，如此重复就可以得到任意尺度的高频部分 $D_nf(t)$ 和低频部分 $A_nf(t)$ 。

● 阈值量化

阈值法是在小波降噪时使用最多的方法之一。其实现算法简单，检测信号在小波分解后，真实缺陷信号的高频系数是绝对值较大的尺度因子，噪声信号则是绝对值比较小的尺度因子；根据经验人为选取一个合理的阈值，对阈值再进行量化分析，最后再作分解信号的反变换，达到信号抑噪的作用^[2]。

● 小波重构

经过多层分解可以有效的将噪声分离出来，小波重构是一个逆分解的过程，经过小波重构便可得到去噪后的原始信号 $f(t)$ 。小波重构的公式如下：

$$f(t) = A_nf(t) + D'_nf(t) + A_{n-1}f(t) + A_{n-2}f(t) + \dots + A_1f(t) \quad (17)$$

6.3 基于 MATLAB 工具箱的小波滤波

在前面我们简要探讨了多尺度小波分解滤波的方法。在滤波的过程中，噪声的高频部分随着尺度的增大迅速减小，但缺陷信号的奇异部分在小波变换大尺度上信号被保留^[3]。小波分解的层次越多，意味着分解的尺度越大，对高频部分的滤除效果就会越好；但如果小波分解的尺度过大，就有可能造成部分有用信号的损失，且分解所用的时间过长，效率大大降低。因此，选择一个合适的小波分解尺度是进行有效滤波的关键。

而在实际的工程中，监测信号是复杂多变的，难以快速地选择小波滤波分解

的合适尺度；所以小波滤波分解尺度的选择是要结合实际的监测数据，经过多次实验来确定的，采用编程的方式来实现小波滤波的分解具有一定的复杂性，且实际操作不便。MATLAB 是一款强大的数据分析处理软件，为我们提供了小波分析的专用工具箱；本着“简单易行”的实际工程处理原则，为了得到更好的滤波效果，考虑采用 MATLAB 中的工具箱进行反复的实验，以得到最为优质的滤波信号。下面以 1 号钢丝绳为例，给出 MATLAB 工具箱所分析的结果。对 1 号钢丝绳的电压值信号进行 12 层小波分解，结果如图：

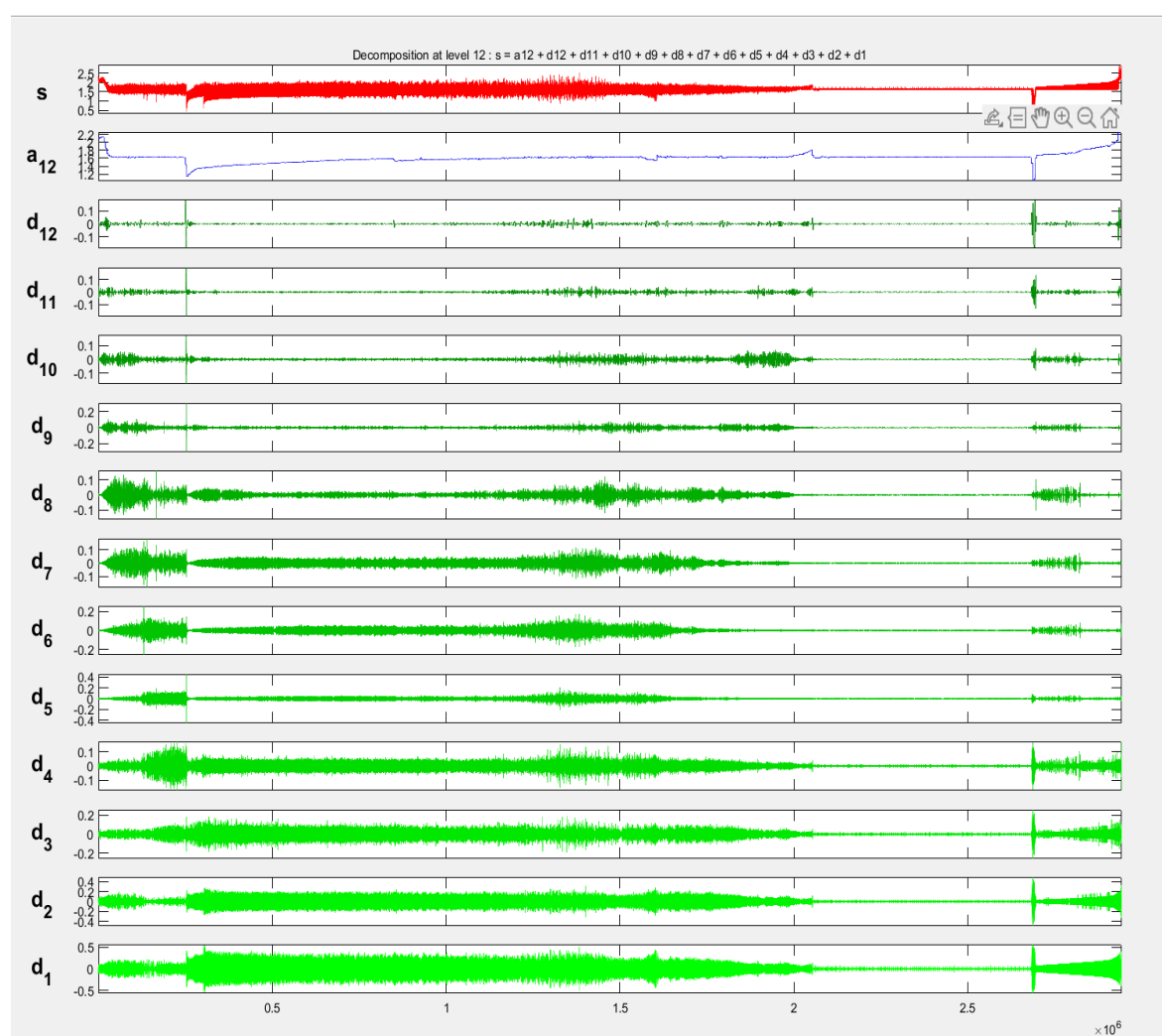


图 3 1 号钢丝绳检测信号 12 层分解

经过 12 层小波分解，可以完全将损伤漏磁信号从各种信号中分离出来。高频干扰主要集中在信号 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 上，在小波变换中对应着小的尺度，其能量随尺度的增大迅速减小，高频干扰主要是由钢丝绳股波和大功率电机引起；而低频扰动主要分布在 a_{12} 上，其主要是由钢丝绳摆动等因素造成；损伤信号则主要集中在 d_9 、 d_{10} 、 d_{11} 、 d_{12} 上。通过对 $d_1 \sim d_{12}$ 的数据进行阈值设置，得到去噪后的信号波形如图所示：

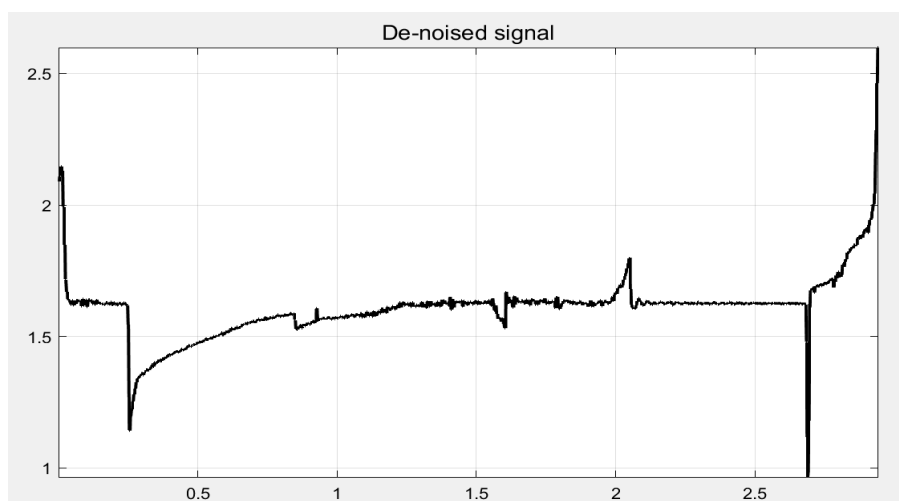


图 4 重构波形

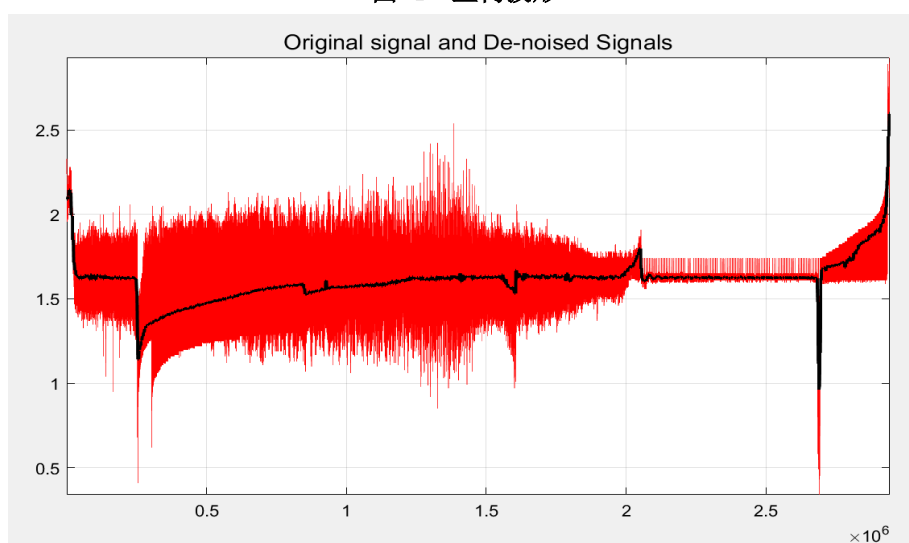


图 5 原始信号与重构信号对比图

另外 5 根钢丝绳对应的原始信号与重构信号对比图如下所示：

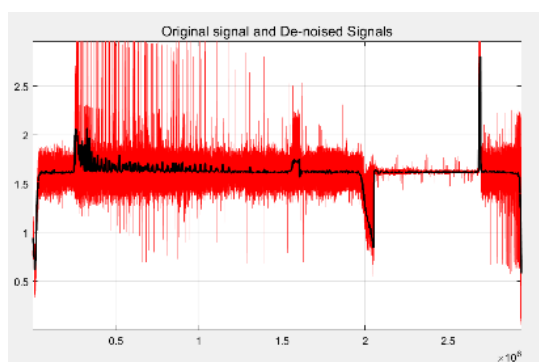


图 6 2号钢丝绳

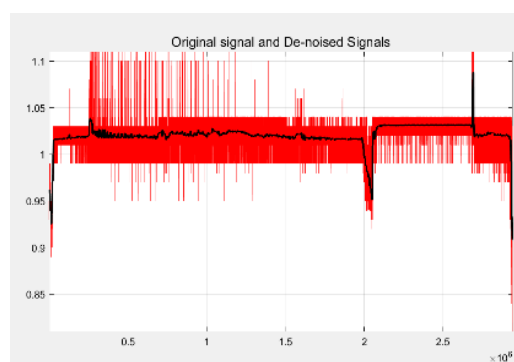


图 7 3号钢丝绳

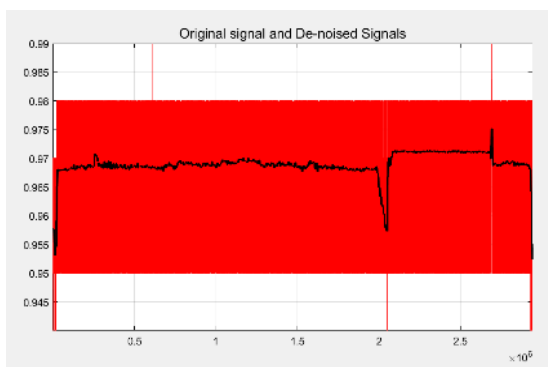


图 8 4 号钢丝绳

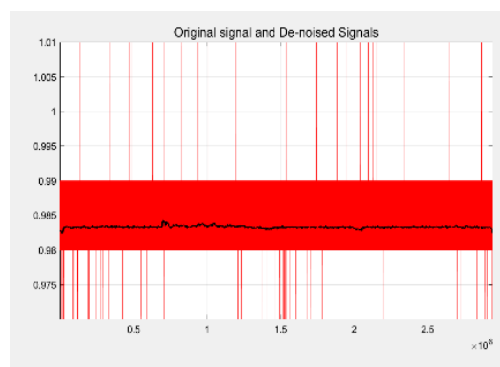


图 9 5 号钢丝绳

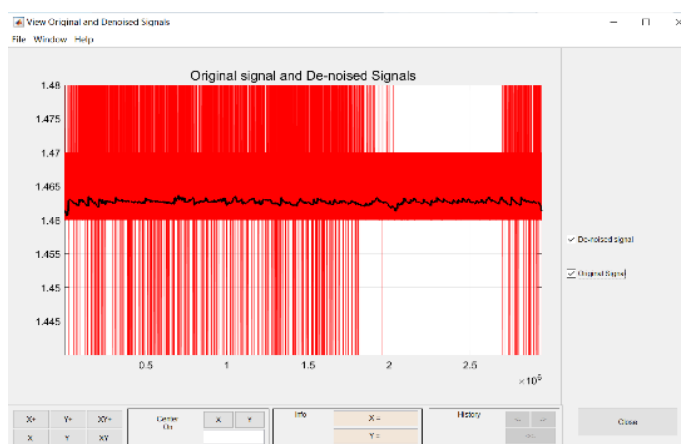


图 10 6 号钢丝绳

通过原始信号与重构信号对比图可以明显地看出，小波分析方法在消噪的效果非常好，去掉了大部分的干扰噪声，同时保留了大部分的缺陷信号。从图中幅值的变化和大小可以定性的看出，一号钢丝绳的缺陷最多，而且最严重，2 号、3 号和 4 号钢丝绳的缺陷相对较少，5 号、6 号钢丝绳几乎没有缺陷。

利用 MATLAB 导出的重构信号的电压值数据，总的数据量为 2942635 帧，计算得到的各钢丝绳的缺陷程度及对应数目如下表所示：

表 3 钢丝绳缺陷数目汇总表

钢丝绳名称	缺陷总数目	微小断丝	变形	轻度断丝	中度断丝	内部断股
1	2266795	851968	409600	329728	459579	215979
2	841771	192768	103552	193536	215040	136875
3	632491	520192	20480	45056	46763	0
4	46763	40960	5803	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

表 4 钢丝绳缺陷数目汇总表

钢丝绳名称	总缺陷占比 (%)	微小断丝 (%)	变形 (%)	轻度断丝 (%)	中度断丝 (%)	内部断股 (%)
1	77.03%	28.95%	13.92%	11.21%	15.62%	7.34%
2	28.61%	6.55%	3.52%	6.58%	7.31%	4.65%
3	21.49%	17.68%	0.70%	1.53%	1.59%	0
4	1.59%	1.39%	0.20%	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

通过 MATLAB 对缺陷位置数据绘图，得到的缺陷在钢丝绳的大致位置的图形如下：

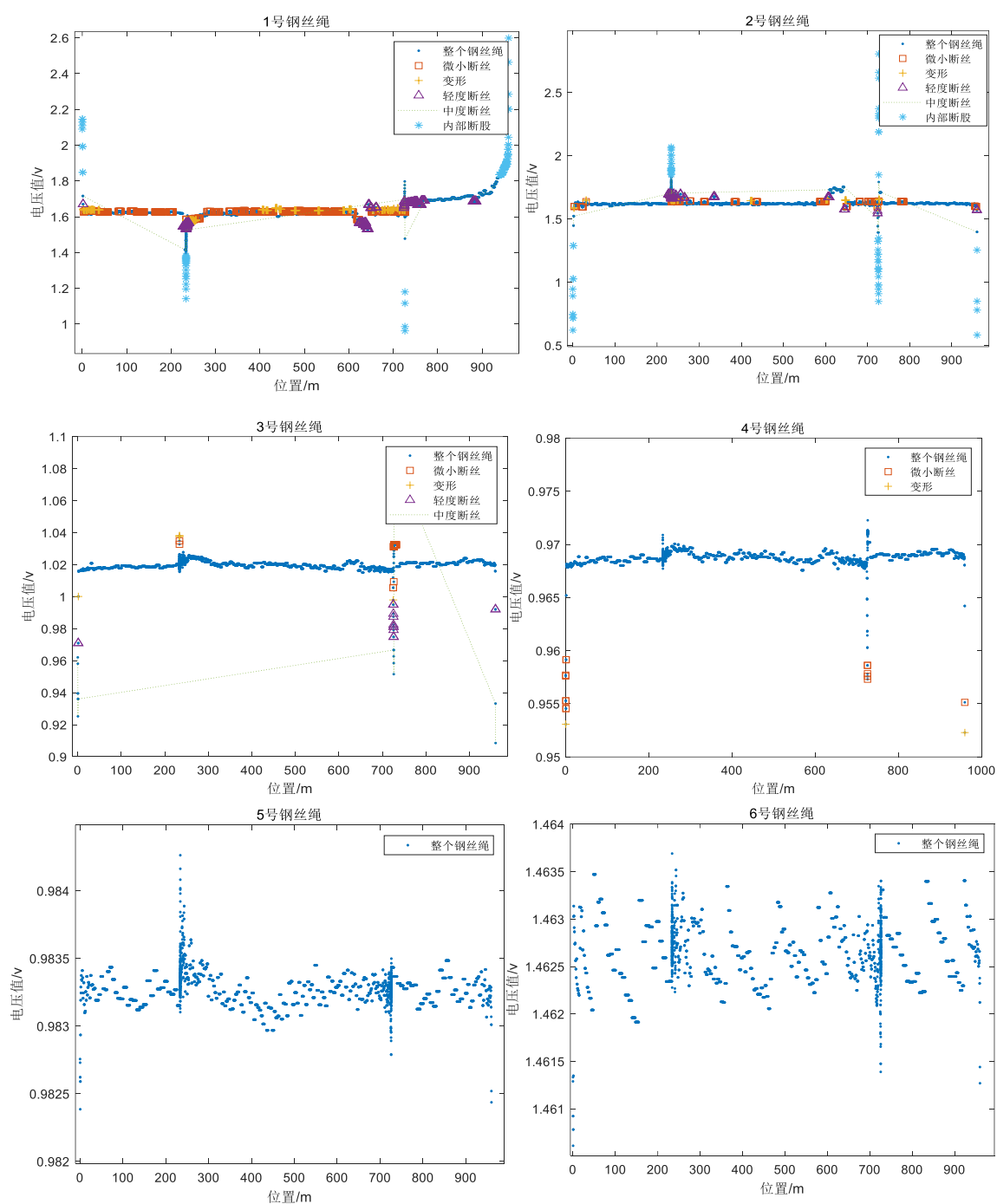


图 11 6 根钢丝绳的缺陷位置图

注：上面所列图像的纵坐标的比例不相同，尤其对于 5 和 6 号图像，实际电压值的变化幅度很小。

从上面的图像可以大致看出各程度缺陷在整个钢丝绳的分布，由于数据量庞大，图像无法显示出各程度缺陷具体的位置细节。一部分的具体缺陷位置数据见附件（很遗憾，数据量太大，无法完全上传，只能选取一部分，1 号钢丝绳部分缺陷位置数据如下表所示）。

G	H	I	J	K
微小断丝	变形	轻度断丝	中度断丝	内部断股
3.365766	2.183575	1.706122	1.290435	0.000148
3.365818	2.1838	1.706224	1.290476	0.000154
3.365854	2.183832	1.706395	1.290584	0.000158
3.365942	2.184026	1.706412	1.290647	0.000167
3.365981	2.184155	1.706519	1.29066	0.000175
3.366486	2.184219	1.706706	1.290932	0.000296
3.366545	2.184389	1.706777	1.290952	0.000307
3.366604	2.184431	1.706958	1.291061	0.000316
3.366667	2.184665	1.706977	1.291127	0.000334
3.366729	2.184753	1.707074	1.291158	0.000349
3.367207	2.184863	1.707289	1.291429	0.000443
3.367273	2.184978	1.707331	1.291538	0.000461
3.367355	2.18503	1.707503	1.291607	0.000474
3.367391	2.185304	1.707558	1.291656	0.000502
3.367477	2.185351	1.707628	1.291905	0.000524
3.367928	2.185507	1.707872	1.291925	0.000591
3.368	2.185567	1.707884	1.292014	0.000615
3.368105	2.185629	1.708049	1.292086	0.000632
3.368116	2.185942	1.70814	1.292154	0.000669
3.368224	2.185949	1.708183	1.292381	0.000699
3.368649	2.186151	1.708437	1.292422	0.000739

7. 问题二模型的建立与求解

7.1 钢丝绳评价指标的建立

监测钢丝绳的目的就是为了更好地了解钢丝的实时性能，保障矿井提供机工作的安全。在前面我们对钢丝绳的监测数据进行了处理，并找到了六根钢丝绳经过 10 次往返运行后所有缺陷的数量、位置和程度。为了更好地了解钢丝绳的安全情况，我们把影响钢丝绳的安全性能指标主要分为以下几种，即微小断丝缺陷数目，变形缺陷数目，轻度断丝数目，中度断丝数目，内部断股数目，各类型缺陷所在的位置，任意钢丝绳所测得电压值的稳定性等。下面将基于获得的数据对

这些安全性能指标进行量化分析，并对钢丝绳的安全性能做出评价。

7.1.1 钢丝绳程度和数目的评分标准

首先，我们考虑钢丝绳缺陷的数量和程度对钢丝绳安全性能的影响，我们知道钢丝绳缺陷的程度越严重，对实际工程安全性的威胁就越大，也就是缺陷程度越严重的钢丝绳的危险程度越高；在实际中，钢丝绳的危险程度和缺陷程度之间的关系往往是非线性的，所以我们考虑用指数函数去刻画这种非线性关系：

$$\delta_j = \frac{e^{\alpha_j}}{\log \sum_{j=1}^5 e^{\alpha_j}}, i = 1, 2, 3 \dots \quad (18)$$

其中 δ_j 为缺陷程度因子， α_j 为断丝的程度。

钢丝绳缺陷的数目也会影响整条钢丝绳的安全性能，而钢丝绳缺陷的数目往往和钢丝绳缺陷的程度关联，钢丝绳缺陷的数目越多、缺陷的程度越严重，其危险程度越高；在此引入缺陷强度因子 β_{ij} 来刻画缺陷数目因子 x_{ij} 和缺陷程度因子 δ_j 对钢丝绳的影响：

$$X_i = \delta_j x_{ij} \quad (19)$$

$$\beta_{ij} = \frac{X_i}{\sum_{i=1}^6 X_i} = \frac{\delta_j x_{ij}}{\sum_{i=1}^6 \delta_j x_{ij}}, i = 1, 2, 3 \dots, j = 1, 2, 3 \dots \quad (20)$$

以总分 100 分为标准，则钢丝绳缺陷的程度和数目的综合评分指标为：

$$D_{ij} = 100(1 - \beta_{ij}) = 100(1 - \frac{\delta_j x_{ij}}{\sum_{i=1}^6 \delta_j x_{ij}}), i = 1, 2, 3 \dots, j = 1, 2, 3 \dots \quad (21)$$

7.1.2 钢丝绳位置与稳定性评分标准

钢丝绳缺陷的位置同样会影响整条钢丝绳的安全性能，钢丝绳缺陷的位置越集中、越靠近钢丝绳的中点以及缺陷的程度越高、缺陷的数目越多，钢丝绳的危险程度就越高。我们用位置因子 Ω_i 进行描述

设任一钢丝绳缺陷的位置函数为 L_{nj} ，钢丝绳中点位置为 L_n ，则任一钢丝绳的相对位置可描述为：

$$L = \frac{|L_{nj} - L_0|}{L_0} \quad (22)$$

任一钢丝绳的缺陷的相对位置的平方和 γ_i 为:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^5 \sum_{n=1}^n \delta_j L^2, i=1,2,3\cdots \quad (23)$$

则位置因子 Ω_i 为:

$$\Omega_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^6 \gamma_i}, i=1,2,3\cdots \quad (24)$$

以总分 100 分为标准, 则钢丝绳缺陷所在位置的综合评分指标为:

$$D_i = 100(1 - \Omega_i) = 100 \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^5 \sum_{n=1}^n \delta_j L^2}{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^5 \sum_{n=1}^n \delta_j L^2} \right), i=1,2,3\cdots \quad (25)$$

钢丝绳每一帧数据之间都会有所波动, 波动的幅度越大, 数据的稳定性越差, 钢丝绳的安全性能就越低, 反之就越小。这里我们用钢丝绳每一帧的电压值的方差 6_i^2 来描述稳定性并引入稳定因子 p_i , 则有:

$$6_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (u_n - \bar{u})^2, i=1,2,3\cdots \quad (26)$$

任一钢丝绳的稳定因子 p_i 为:

$$\rho_i = \frac{n 6_i^2}{\sum_{i=1}^6 n 6_i^2} = \frac{\sum_{n=1}^n (u_n - \bar{u})^2}{\sum_{i=1}^6 \sum_{n=1}^n (u_n - \bar{u})^2}, i=1,2,3\cdots \quad (27)$$

以总分 100 分为标准, 则钢丝绳缺陷所在位置的综合评分指标为

$$D_i = 100(1 - \rho_i) = 100 \left(1 - \frac{\sum_{n=1}^n (u_n - \bar{u})^2}{\sum_{i=1}^6 \sum_{n=1}^n (u_n - \bar{u})^2} \right), i=1,2,3\cdots \quad (28)$$

经过计算, 6 根钢丝绳的综合评分如下表所示:

表 5 综合评分表

钢丝绳	微小断丝	变形	轻度断丝	中度断丝	内部断股	位置	稳定性
1	46.949	24.07	41.98	36.3	38.79	38.48	58.37
2	88	80.81	65.95	70.19	61.21	69.17	42.07
3	67.71	96.2	92.07	93.52	100	92.75	99.57
4	97.45	98.92	100	100	100	99.6	99.99
5	100	100	100	100	100	100	100
6	100	100	100	100	100	100	100

7.2 基于熵权法的评价模型

在前面我们基于实际情况完成了对钢丝绳各项指标的评分,为了更加客观地刻画每根钢丝绳的整体情况,考虑采用熵权法对各条钢丝绳做出评价。

在信息处理中,熵是对不确定性的一种度量;根据熵的特性,可以通过熵值的计算来判断一个事件的随机性和无序程度。研究表明,熵值可用于判断某个指标的离散程度,指标的离散程度越大,该指标对综合评价的影响权重也越大^[5]。因此,利用熵权法可以客观地对钢丝绳的安全性能做出评价。

熵权法的一般步骤:

● Step1 采集属性数据

确定需要处理的样本属性集合采集属性数据。初步选取 m 个样本组成集合,每个样本有 n 个评价指标,得到原始数据矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (29)$$

● Step2 指标正向化

为消除因量纲不同对评价结果的影响,需要对各指标进行标准化处理。不同的指标代表含义不一样,有的指标越大越好,称为越大越优型指标。有的指标越小越好,称为越小越优型指标。

所用指标的值越大越好 (正向指标:)

$$x'_{ij} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (30)$$

所用指标的值越小越好 (负向指标:)

$$x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_j}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (31)$$

其中, x'_{ij} 为指标正向化后的矩阵元素, x_j 为第 j 项指标值, x_{\max} 为第 j 项指标

的最大值， x_{\min} 为第 j 项指标的最小值。实际上，正向指标可以不用处理，本文中采用的是正向标。

● Step3 数据标准化

在实际问题中，不同的数据一般有不同的量纲，为了使有不同的量纲也能进行比较，通常需要对数据作适当的变换，以消除属性值对物理量纲的影响，并将“逆向指标”正向化，使指标特征值规格在(0,1)范围内^[6]。本文采用最大最小值标准化方法。设标准化后的矩阵为 r_{ij} ，有如下公式：

$$r_{ij} = \frac{x'_{ij} - \min(x'_j)}{\max(x'_j) - \min(x'_j)} \quad (32)$$

● Step4 计算信息熵

处理过后可以构成数据矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ，对于第 j 个指标 r_j ，信息熵 E_j 的计算公式为：

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (33)$$

其中

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$$

● Step5 计算权重和综合评价指数

通常将权重定义为 w_{ij} ，综合评价指数定义为 S_i ，对应的计算公式如下：

$$w_{ij} = \frac{(1 - E_j)}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (34)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (35)$$

利用 MATLAB 绘出的安全性能比较图如下所示：

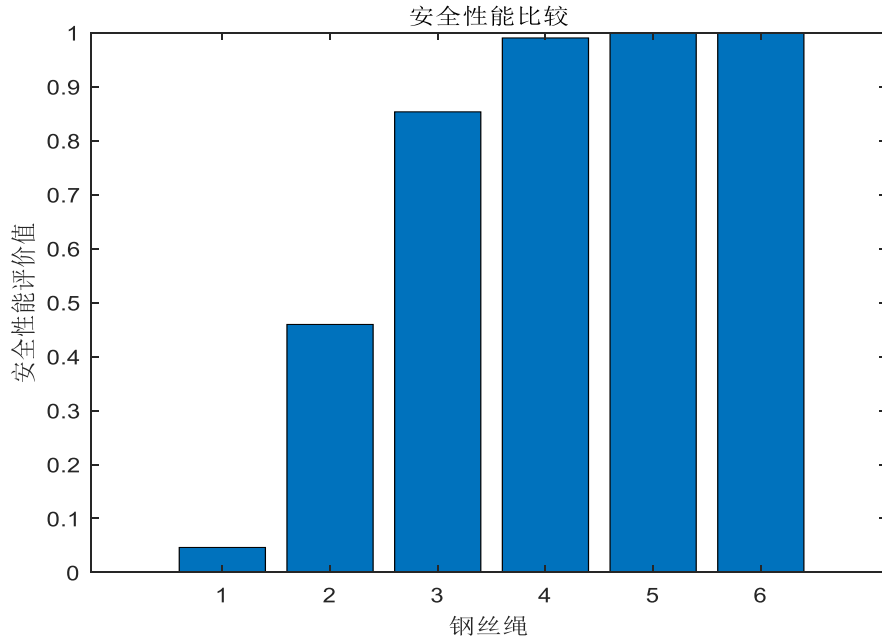


图 12 安全性能比较图

表 6 安全性能评分表

钢丝绳	1	2	3	4	5	6
安全性能评价指数	0.0463	0.4595	0.8534	0.9903	1.000	1.000

从上图和表格可以看出，1 号钢丝绳的安全性能非常差，2 号钢丝绳的安全性能相对较差，3 号钢丝绳的安全性能相对较好，4、5 和 6 号钢丝绳的安全性能非常好，尤其是 5 和 6 号钢丝绳，在我们的算法得出的结果中，安全性能评分是满分，而且其去噪后的实际电压值数据几乎没有波动，其也没有缺陷，从这一方面来看，我们的安全性能评价模型是有效的。

7.3 基于 TOPSIS 法的评价模型

TOPSIS 的基本原理：在归一化后的原始数据矩阵中，找到有限方案中的最优方案和最劣方案，然后分别计算评价对象与最优方案和最劣方案之间的距离，并以此作为依据来评价样本的优劣等级。

基本步骤：假设有 n 个待评价样本， p 项评价指标，形成原始指标数据矩阵：

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (36)$$

1. 数据预处理

使指标具有同趋势性。评价指标中有正向指标和负向指标之分，一般把负向指标转化为正向指标，转化的方法可采用倒数法(即 $1/X$)，多适用于绝对数指标；差值法（即 $1-X$ ），多适用于相对数指标。转化后的数据矩阵仍记为 X 。

数据无量纲化：将原始数据归一化，以消除量纲向量数据归一化的方式：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}} \quad (37)$$

最终得到分析数据矩阵为：

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{np} \end{pmatrix} \quad (38)$$

2.寻找最优值和最劣值

找出各项指标的最优值和最劣值，建立最优值向量，和最劣值向量

$$z^+ = \max_{n \ j} (z_1^+, z_2^+, \dots, z_p^+) \quad (39)$$

$$z^- = \min_{n \ j} (z_1^-, z_2^-, \dots, z_p^-) \quad (40)$$

3.计算各个评价对象与最优值和最劣值之间的距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_j (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (41)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_j (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (42)$$

4. 计算各个评价指标与最优值的相对接近度

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (43)$$

5.排序

根据 C_i 大小进行排序， C_i 越大，表明评价对象越接近最优值

利用 MATLAB 可以计算出相对接近度 C_i 如下表所示：

表 7 相对接近度表

钢丝绳	1	2	3	4	5	6
相对接近度	0.1326	0.4572	0.7567	0.9782	1.000	1.000

从上表可以看出，1 号钢丝绳的安全性能非常差，2 号钢丝绳的安全性能相对较差，3 号钢丝绳的安全性能相对较好，4、5 和 6 号钢丝绳的安全性能非常好。

另外，通过比较熵值法和 TOPSIS 方法的结果，可以看出，两种方法计算出的结果，在 1 号和 3 号钢丝绳上有一定差异，在 2 号、4 号、5 号和 6 号钢丝绳上差异非常小。虽然 1 号和 3 号钢丝绳的结果存在一定的差异，但并不影响这 6 根钢丝绳相对安全性能的比较，所以这两种方法在评价钢丝绳的安全性能指标上都是有效的。两种方法结合，更能反映出钢丝绳的安全性能指标。

参考文献

- [1] 李春华, 王璐. 小波分析与神经网络在钢丝绳断丝处理中的应用[J]. 自动化仪表, 2009.(12): 61-64.
- [2] 罗兵. 矿用钢丝绳在线检测系统的研究与设计[J]. 内江科技, 2019, 40(05): 26.
- [3] 陈礼娟, 何辅云, 徐明亮. 小波变换在漏磁检测中的应用研究[J]. 合肥工业大学学报, 2002, 25(5): 707-710
- [4] Rizzo P, Scalea F L D. Ultrasonic inspection of multi-wire steel strands with the aid of the wavelet transform[J]. Smart Material Structures, 2005, 14: 685-695.
- [5] 赵庆聪. 基于熵权法的云平台企业用户信息安全风险评估[J]. 北京信息科技大学学报 (自然科学版), 2019, 34(06): 42-46+52.
- [6] 孙凯, 安宏宇, 苑嘉航等. 基于模糊熵权法二次系统信息安全风险评估[J]. 陕西电力, 2014, 42(01): 17-21.

附录

1. 求每一帧数据对应的位置

```
m=load X.mat
x=m;
a=tabulate(x(:));
b=a(:,2);
a=b;
c=[];
for i=1:1:1816
    for n=(0.4*(i-1)):(0.4/a(i)):(0.4*i)
        c(end+1)=n;
    end
end
c=c';
```

2. 对去噪后的数据处理，得到各程度缺陷的数目和位置

```
load SAA.mat
load LLL.mat
%将缺陷程度分别定义为1~5级
c1=[];%用于存放缺陷位置
c2=[];
c3=[];
c4=[];
c5=[];
```

```

d1=[];
d2=[];
d3=[];
d4=[];
d5=[];
k=[];
%设处理后有n个位置
%a(i)为处理后的电压
%b(i)为处理后的位置
a=SAA;
s=0;
n=length(a(:));
b=LLL;
for i=1:n
    %初始化一个数组,用于传递值
    s=a(i)+s;    %计算电压之和
end
a0=s/n;    %计算电压均值
num1=0;
num2=0;
num3=0;
num4=0;
num5=0;%用于存放缺陷数量
for i=1:n
    k(i)=(abs(a(i)-a0))/a0;
    if(k(i)<0.01)
        continue;%没有缺陷，继续循环
    elseif(k(i)>=0.01 && k(i)<0.016)
        num1=num1+1;
        c1(end+1)=b(i);
        d1(end+1)=a(i);
    elseif(k(i)>=0.016 && k(i)<0.025)
        c2(end+1)=b(i);
        num2=num2+1;
        d2(end+1)=a(i);
    elseif(k(i)>=0.025 && k(i)<0.05)
        c3(end+1)=b(i);
        num3=num3+1;
        d3(end+1)=a(i);
    elseif(k(i)>=0.05 && k(i)<0.14)
        c4(end+1)=b(i);
        num4=num4+1;
        d4(end+1)=a(i);
    else

```

```

        c5(end+1)=b(i);
        num5=num5+1;
        d5(end+1)=a(i);
    end
    NUM=num1+num2+num3+num4+num5;
end
plot(b,a,'!',c1,d1,'s',c2,d2,'+',c3,d3,'^',c4,d4,'!',c5,d5,'*')

```

3.计算序列数

```

a(:,7)=cccsuju(:,7);
for n=2:4471978
    b(n)=a(n,7)-a((n-1),7);
end
b=b';
a(:,8)=b;
cccsuju(:,8)=b;

```

4.熵权法求安全性能指标并绘图

```

Xij=[46.94924.07  41.98  36.3  38.79  38.48  58.37
88 80.81  65.95  70.19  61.21  69.17  42.07
67.71  96.2  92.07  93.52  100 92.75  99.57
97.45  98.92  100 100 100 99.6  99.99
100  100 100 100 100 100 100
100  100 100 100 100 100 100];
[rows,cols]=size(Xij);
%数据标准化, 计算 R(i,j)
Rmin=min(Xij);
Rmax=max(Xij);
A=max(Xij)-min(Xij);
y=Xij-repmat(Rmin,rows,1);
for j=1:size(y,2)
    y(:,j)=y(:,j)/A(j);
end
%计算 R(i,j)
S=sum(y,1);
Xij=zeros(rows,cols);
for i=1:size(Xij,2)
    Xij(:,i)=y(:,i)/S(i);
end
Pij=zeros(rows,cols);
%计算 Pij
for i=1:rows
    for j=1:cols
        if Xij(i,j)==0

```



```

        Pij(i,j)=0;
    else
        Pij(i,j)=log(Xij(i,j));
    end
end
end
k=1/log(rows);
Ej=-k*(sum(Xij.*Pij,1));%求得信息熵
%4 计算权重
Wij=(1-Ej)/(cols-sum(Ej));
%5 计算得分
Si=zeros(rows,cols);
for k=1:size(Xij,2)
    Si(:,k)=Wij(k)*y(:,k);
end
format long
Si=sum(Si,2);
%% 绘图
bar(Si);
title('安全性能比较')
xlabel("钢丝绳");ylabel("安全性能评价值")

```

5.计算钢丝绳缺陷程度因子、距离因子和数据的方差

```

load CAA.mat
load CLLL.mat
a=CAA;
%将缺陷程度分别定义为 1~5 级
c1=[];%用于存放缺陷位置
c2=[];
c3=[];
c4=[];
c5=[];
d1=[];
d2=[];
d3=[];
d4=[];
d5=[];
k=[];
%设处理后有 n 个位置
%a(i)为处理后的电压
%b(i)为处理后的位置
s=0;
n=length(a(:));
b=CLLL;

```

```

for i=1:n
    %初始化一个数组,用于传递值
    s=a(i)+s;    %计算电压之和
end
a0=s/n;    %计算电压均值
num1=0;
num2=0;
num3=0;
num4=0;
num5=0;%用于存放缺陷数量
for i=1:n
    k(i)=(abs(a(i)-a0))/a0;
    if(k(i)<0.01)
        continue;%没有缺陷，继续循环
    elseif(k(i)>=0.01 && k(i)<0.016)
        num1=num1+1;
        c1(end+1)=b(i);
        d1(end+1)=a(i);
    elseif(k(i)>=0.016 && k(i)<0.025)
        c2(end+1)=b(i);
        num2=num2+1;
        d2(end+1)=a(i);
    elseif(k(i)>=0.025 && k(i)<0.05)
        c3(end+1)=b(i);
        num3=num3+1;
        d3(end+1)=a(i);
    elseif(k(i)>=0.05 && k(i)<0.14)
        c4(end+1)=b(i);
        num4=num4+1;
        d4(end+1)=a(i);
    else
        c5(end+1)=b(i);
        num5=num5+1;
        d5(end+1)=a(i);
    end
    NUM=num1+num2+num3+num4+num5;
end
plot(b,a,'.',c1,d1,'s',c2,d2,'+',c3,d3,'^',c4,d4,'!',c5,d5,'*')
xlabel('位置/m')
ylabel('电压值/v')
legend('整个钢丝绳','微小断丝','变形','轻度断丝','中度断丝','内部断股')
l1=0;
for o1=1:num1
    l1=l1+(d1(o1)-480).^2;

```

```

        L1=l1;
    end
    l2=0;
    for o2=1:num2
        l2=l2+(d2(o2)-480).^2;
        L2=l2;
    end
    l3=0;
    for o3=1:num3
        l3=l3+(d3(o3)-480).^2;
        L3=l3;
    end
    l4=0;
    for o4=1:num4
        l4=l4+(d4(o4)-480).^2;
        L4=l4;
    end
    l5=0;
    for o5=5:num5
        l5=l5+(d5(o5)-480).^2;
        L5=l5;
    end
    LL=log(L1+L2+L3+L4+L5);
    var(a,1);

```

6.对整合后的数据替换

```

a(:,7)=cceshuju(:,7);
for n=2:4471978
    b(n)=a(n,7)-a((n-1),7);
end
b=b';
a(:,8)=b;
cceshuju(:,8)=b;

```

7. 从原始信号中提取钢丝绳数据

```

CA=cceshuju(:,1);
CB=cceshuju(:,2);
CC=cceshuju(:,3);
CD=cceshuju(:,4);
CE=cceshuju(:,5);
CF=cceshuju(:,6);
CLLL=cceshuju(:,7);

```

8. 对去噪后的数据进行转置，以便查看

```
CAA=CAA';
CBB=CBB';
CCC=CCC';
CDD=CDD';
CEE=CEE';
CFF=CFF';
```

9.计算熵权值

基于熵权法对于 TOPSIS 的修正

```
clear;clc;
X=[46.949 24.07 41.98 36.3 38.79 38.48 58.37
88 80.81 65.95 70.19 61.21 69.17 42.07
67.71 96.2 92.07 93.52 100 92.75 99.57
97.45 98.92 100 100 100 99.6 99.99
100 100 100 100 100 100 100
100 100 100 100 100 100 100];
%获取行数列数
[r,c]=size(X);
%r = size(X,1);
%c = size(X,2);
%然后对正向化后的矩阵进行熵权法赋权重
tempX = X; %代替 X 进行计算的辅助变量，避免 X 受到影响而发生改变
%测试: tempX = [1,2,3;-1,0,-6;5,-3,2];
%标准化矩阵,消除负数项，并且把数值控制在 0-1 区间
min = min(tempX);
max = max(tempX);
min = repmat(min,size(tempX,1),1);
max = repmat(max,size(tempX,1),1);
tempX = (tempX-min)./(max-min);
%求出矩阵的概率矩阵，即能取到该值的概率
sumX = repmat(sum(tempX),size(tempX,1),1);
pX = tempX./sumX;
%求出信息熵矩阵,信息熵越大，能获得的信息就越少
temp = pX.*mylog(pX);
n = size(tempX,1);
sum1 = sum(temp);
eX = sum1.*(-1/log(n));
%求出信息效用值
dX = 1-eX;
%求出每个指标的熵权
wX = dX./(sum(dX));
%打印输出
disp("每个指标依次的熵权为: ");
disp(wX);
```

```

Z=X./sumX;
Z1=Z.*wX;
disp(Z1);
Z1min=min(Z1);
Z1max=max(Z1);
10.定义的函数
% 重新定义一个 mylog 函数，当输入的 p 中元素为 0 时，返回 0
function [lnp] = mylog(p)%lnp 为输出变量，p 为输入变量
[n1,n2]= size(p); % 向量的长度
lnp = zeros(n1,n2); % 初始化最后的结果
    for i = 1:n1
        for j=1:n2 % 开始循环
            if p(i) == 0 % 如果第 i 个元素为 0
                lnp(i,j) = 0; % 那么返回的第 i 个结果也为 0
            else
                lnp(i,j) = log(p(i));
            end
        end
    end
end
end

```

11. 根据 TOPSIS 方法计算相对接近度

```

A=[46.949 24.07 41.98 36.3 38.79 38.48 58.37
88 80.81 65.95 70.19 61.21 69.17 42.07
67.71 96.2 92.07 93.52 100 92.75 99.57
97.45 98.92 100 100 100 99.6 99.99
100 100 100 100 100 100 100
100 100 100 100 100 100 100
];

```

```

W=[0.193983984980888
0.114946994825926
0.128492191394206
0.123004418199260
0.109785354408827
0.125145019181799
0.204642037009094
];

```

%这里输入自己的评价矩阵

%这里输入上面求得的权重

%A 为决策矩阵，W 为权值矩阵,M 为正指标所在的列，N 为负指标所在的列

```

[ma,na]=size(A); %ma 为 A 矩阵的行数，na 为 A 矩阵的列数
for i=1:na
    B(:,i)=A(:,i)*W(i); %按列循环得到[加权标准化矩阵]
end

```

```

end
V1=zeros(1,na);           %初始化正理想解和负理想解
V2=zeros(1,na);
BMAX=max(B);              %取加权标准化矩阵每列的最大值和最小
值
BMIN=min(B);              %
for i=1:na
    %if i<=size(M,2)      %循环得到理想解和负理想解，注意判断，不
    然会超个数
    V1(i)=BMAX(i);
    V2(i)=BMIN(i);
    %end
    %if i<=size(N,2)
    %V1(N(i))=BMIN(N(i));
    %V2(N(i))=BMAX(N(i));
    %end
end
for i=1:ma                 %按行循环求各方案的贴近度
    C1=B(i,:)-V1;
    S1(i)=norm(C1);        %S1,S2 分别为离正理想点和负理想点的距离，
    用二阶范数
    C2=B(i,:)-V2;
    S2(i)=norm(C2);
    T(i)=S2(i)/(S1(i)+S2(i)); %T 为贴近度
end
output_args=T;

```