

AU3318 大作业报告

李青雅 523030910004 电院 2301

2026 年 1 月 13 日

目录

1 实验目的 3

2 数据预处理与时域分析 3

2.1 数据读取 3

2.2 时域信号切分 3

2.3 时域信号长度的选择 4

3 频域分析 4

3.1 频域变换 4

3.2 频谱特征对比 5

4 特征提取与分类 5

4.1 分类模型与精度 5

5 松紧度与频率的关系 6

1 实验目的

本实验旨在利用数字信号处理技术，对发电机定子槽楔的敲击振动信号进行分析。通过对不同紧固压力下（400N - 4000N）采集的声学/振动信号进行时域切分、频域变换及特征提取，构建分类模型以识别槽楔的松紧状态，并探究松紧度与信号频率特征之间的定量关系。

2 数据预处理与时域分析

2.1 数据读取

实验数据为一系列 TXT 文本文件，记录了不同压力下敲击测试的连续采样点。利用 Python 的 `numpy` 库读取数据，将文本序列转换为内存中的数值数组。

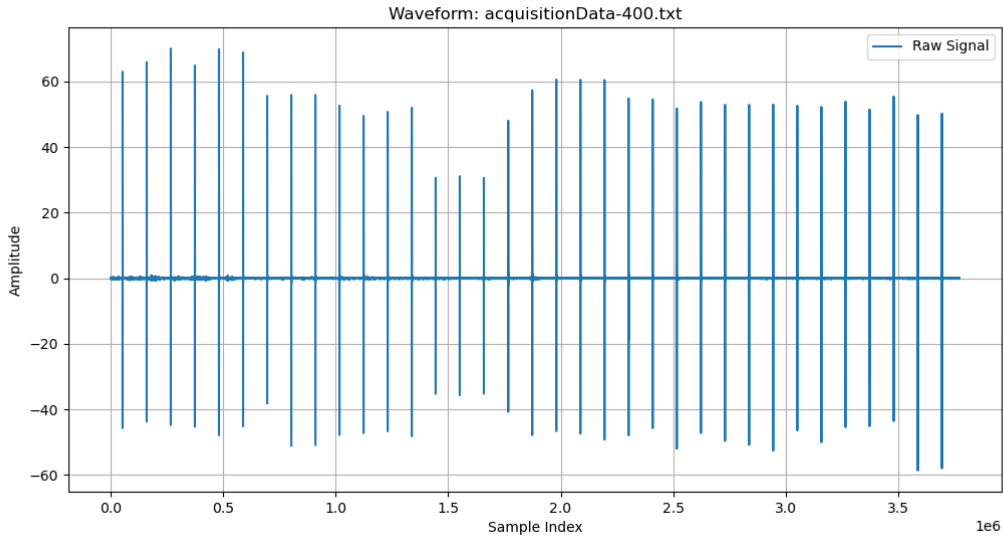


图 1: 原始采集数据的时域波形示例 (acquisitionData-400.txt)

2.2 时域信号切分

原始数据包含连续多次敲击的信号。为了进行特征分析，首先需要将单次敲击信号从长录音中分离出来。本实验采用动态阈值法进行切分：

1. 移除直流分量： $x[n] = x[n] - \text{mean}(x)$
2. 设定阈值：取信号最大幅值的 15% 作为触发阈值。
3. 峰值检测与截取：当信号幅度超过阈值且距离上一次检测超过一定间隔（2000 点）时，判定为一次新的敲击。

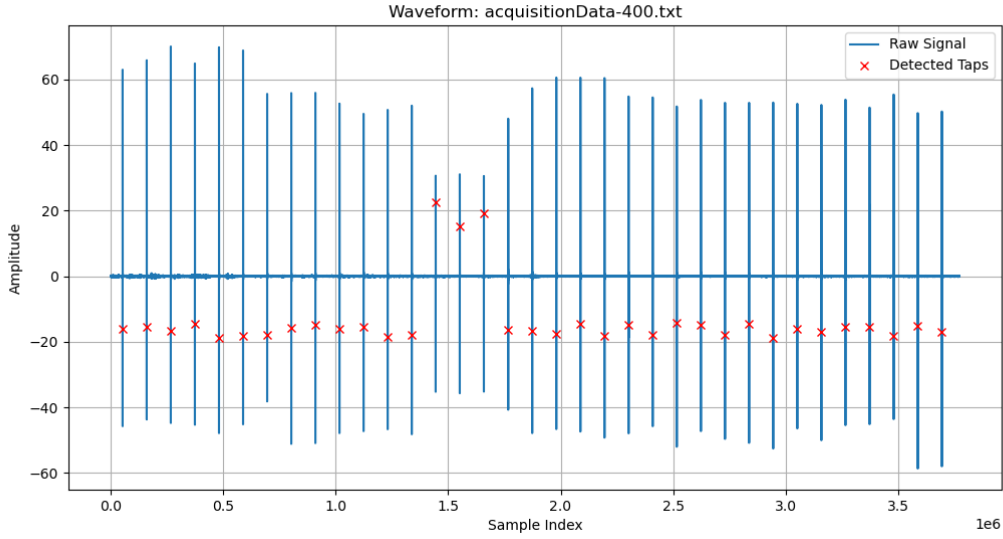


图 2: 时域波形及敲击事件检测结果（红叉标记为检测到的敲击点）

2.3 时域信号长度的选择

在切分过程中，我们选定每个样本的长度为 **4096** 个采样点（约 40ms，假设采样率 100kHz）。选定合适的时域信号长度的原因

- 频率分辨率：FFT 的频率分辨率 $\Delta f = F_s/N$ 。选择 4096 点 (2^{12}) 不仅利用了 FFT 算法的高效性，更重要的是提供了足够高的频率分辨率，以便区分不同松紧度下的细微频率差异。
- 信噪比控制：敲击信号是瞬态阻尼振荡。如果截取过短，会丢失信号尾部的有效信息；如果截取过长，则会引入大量的背景静音噪声，降低信噪比。4096 点恰好能完整覆盖一次敲击的起振与衰减过程。
- 样本一致性：机器学习分类器要求输入特征维度一致，因此必须统一所有样本的长度。

3 频域分析

3.1 频域变换

对截取出的 4096 点时域信号 $x[n]$ 进行快速傅里叶变换 (FFT)，将其转换为频域信号 $X[k]$ 。在变换前，先对信号加 **Hanning** 窗，以减小频谱泄漏 (Spectral Leakage)。Hanning 窗的数学表达式为：

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

其中， N 为窗口长度（本实验中 $N = 4096$ ）。

处理时域和频域关系的区别：

- 步骤 **3**（时域定长）是预处理阶段，目的是准备合格的“原材料”。它决定了后续分析的时间窗口和基本分辨率。
- 步骤 **4**（频域变换）是特征空间转换阶段，目的是将信号从“时间-幅度”视角切换到“频率-能量”视角。

- 关系：时域是信号的真实物理表现（随时间变化），频域是信号的数学统计特性（包含哪些频率成分）。对于槽楔松紧度检测，时域波形受敲击力度影响较大（力大则幅值大），不稳定；而频域特征主要由物体固有的物理属性（刚度、质量）决定，更能反映“松紧”这一本质特征。

3.2 频谱特征对比

通过对比不同压力下的频谱图（图 3），可以发现：

- 低压力（松）：主峰频率较低，且频谱分布较散乱，包含较多低频杂波。
- 高压力（紧）：主峰频率明显向高频移动，且能量更加集中。

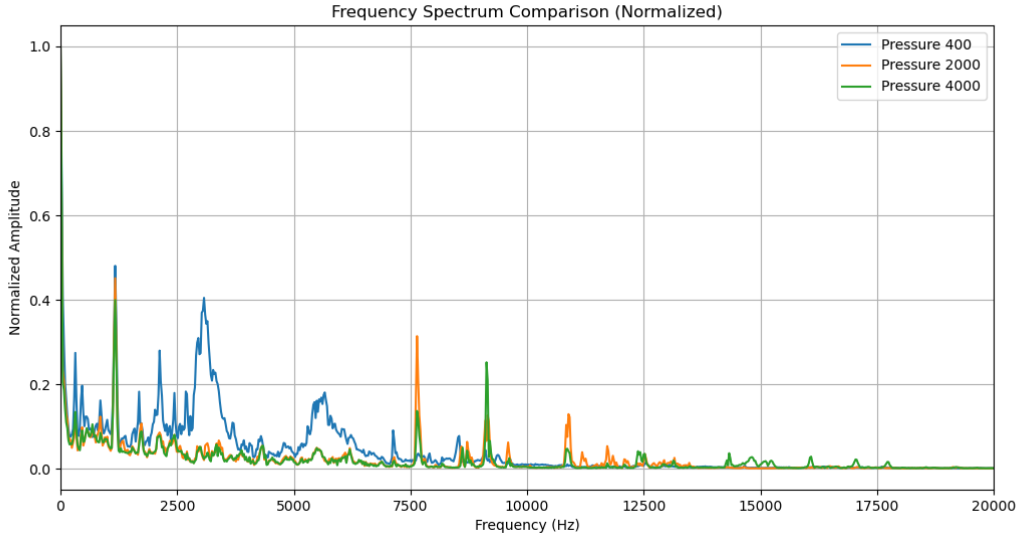


图 3: 不同压力下的归一化频谱对比

4 特征提取与分类

为了量化信号特征，本实验提取了多域特征进行融合分析：

- 频域特征：主频（Peak Frequency）、频谱质心（Spectral Centroid）、带宽（Bandwidth）、谱偏度（Spectral Skewness）、能量（Energy）。
- 时域特征：峰度（Kurtosis，反映波形尖锐度）、偏度（Skewness，反映波形对称性）、均方根值（RMS，反映有效强度）。

4.1 分类模型与精度

构建了包含 382 个样本的数据集，并划分 70% 训练集和 30% 测试集。使用 随机森林 (Random Forest) 分类器进行训练，最终在测试集上达到了 **86.96%** 的准确率。

压力类别	Precision	Recall	F1-Score
400 (很松)	1.00	1.00	1.00
1200 (较松)	1.00	1.00	1.00
2000 (中等)	0.81	0.93	0.87
4000 (很紧)	0.67	0.67	0.67

表 1: 部分压力类别的分类性能表

实验结果表明，模型对低压力（松动）状态的识别非常精准（F1=1.00），能有效检出故障；而在高压力区，由于物理特性趋于饱和，区分难度较大，但在去除低频干扰后，整体准确率有了显著提升。

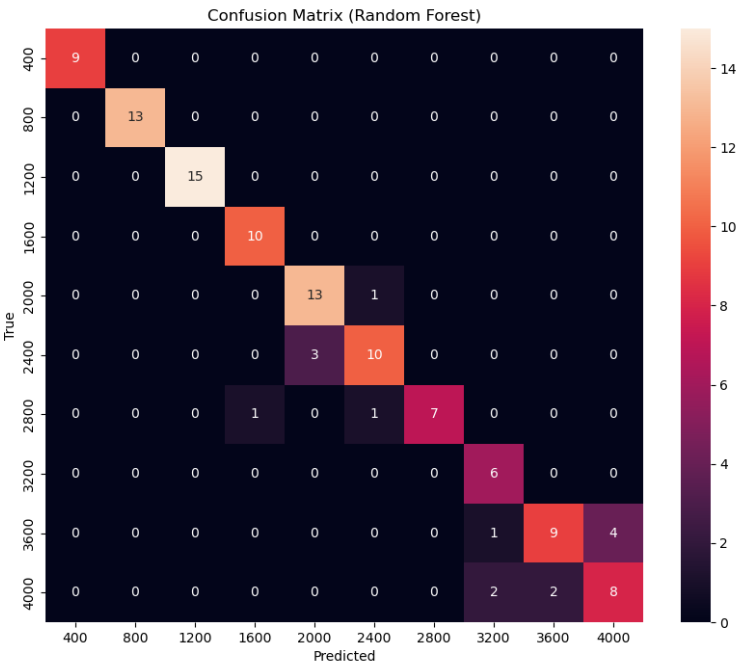


图 4: 分类结果混淆矩阵

5 松紧度与频率的关系

通过统计所有样本的平均特征，绘制了压力值与频率特征的关系曲线（图 5）。
特别说明：在初步分析中，我们发现高压力（4000N）样本在 1000Hz 附近存在异常强的低频分量（可能是台架共振或刚体模态），这掩盖了反映接触刚度的高频特征，导致频率与压力关系出现反常。因此，在特征提取时我们滤除了 **1500Hz** 以下的低频成分。
修正后的结果显示：

- 趋势：随着压力值（松紧度）的增加，信号的特征频率（尤其是频谱质心 Spectral Centroid）呈现非常显著的上升趋势（从约 6000Hz 上升至 9500Hz）。
- 主频的波动：图中蓝线（主频 Peak Frequency）在某些压力点（如 1600N）出现大幅波动。这

是由于槽楔结构存在多个相近的固有频率（多模态），当敲击位置或力度微小变化时，最大峰值可能在两个模态之间跳变（Mode Jumping）。相比之下，频谱质心（**Spectral Centroid**）作为频谱能量的重心，综合了所有频率成分，因此表现出极好的稳定性和单调性。

- 物理机制：根据振动理论，结构的固有频率 $f \propto \sqrt{k/m}$ 。随着槽楔压紧力增大，接触刚度 k 增大，导致固有频率升高。
- 结论：频率特征（特别是质心频率）与松紧度存在显著的正相关性，验证了利用声学/振动信号检测槽楔松紧度的可行性。

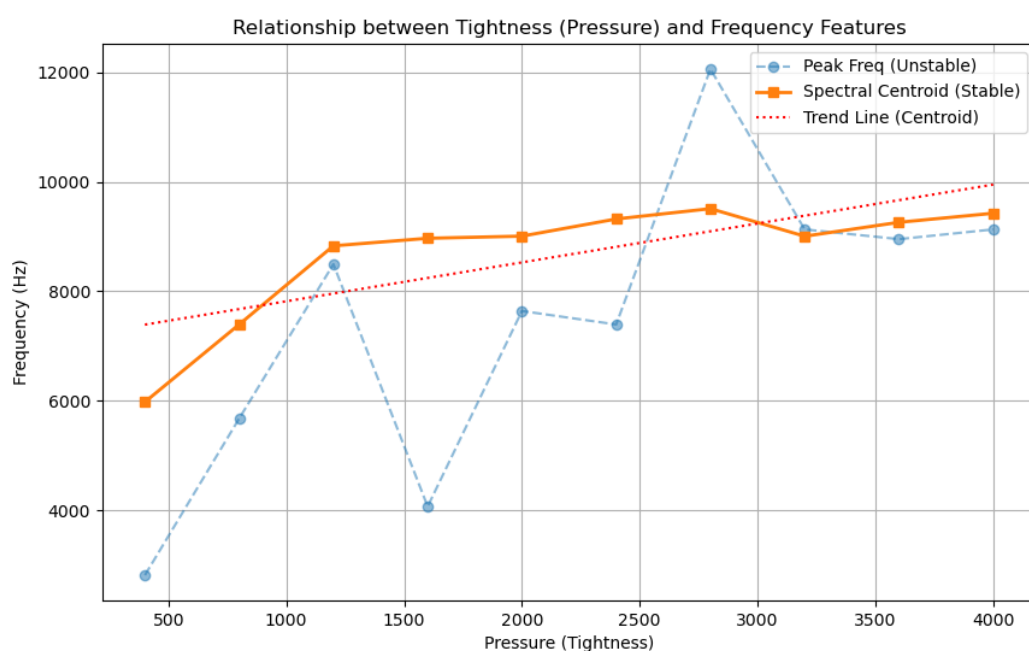


图 5: 松紧度（压力）与频率特征的变化关系