特征方法1

一、时域特征

对于一个长度为 (N) 的离散振动信号序列 $x(n) = \{x_1, x_2, \ldots, x_N\}$，计算以下特征：

均值：
$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$

均方根值：
$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2}$

峰值：
$X_{\text{peak}} = \max(|x_i|)$

峰峰值：
$X_{\text{pp}} = \max(x_i) - \min(x_i)$

偏度：
$\gamma = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2}\right)^3}$

峭度：
$\kappa = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2\right)^2}$

波形因子：
$S_f = \frac{X_{\text{rms}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |x_i|}$

脉冲因子：
$I_f = \frac{X_{\text{peak}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |x_i|}$

裕度因子：
$C_f = \frac{X_{\text{peak}}}{X_{\text{rms}}}$

方差：
$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2$

二、频域特征

对 $x(n)$进行离散傅里叶变换得到频谱 $X(k) = \{X_1, X_2, \ldots, X_M\}$，其中 $M = \lfloor N/2 \rfloor$，对应频率 $f_k = \frac{k \cdot f_s}{N}$，$k = 0, 1, \ldots, M-1$，$f_s$ 为采样频率。

频谱重心：
$FC = \frac{\sum_{k=1}^{M} f_k \cdot |X_k|}{\sum_{k=1}^{M} |X_k|}$

均方频率：
$MSF = \frac{\sum_{k=1}^{M} f_k^2 \cdot |X_k|}{\sum_{k=1}^{M} |X_k|}$

频率方差：
$VF = \frac{\sum_{k=1}^{M} (f_k - FC)^2 \cdot |X_k|}{\sum_{k=1}^{M} |X_k|}$

频谱峭度：
$SK = \frac{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^{M} (|X_k| - \bar{X})^4}{\left(\frac{1}{M} \sum_{k=1}^{M} (|X_k| - \bar{X})^2\right)^2}$
其中 (\bar{X} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{M} |X_k|)

三、轴承故障特征频率

给定轴承转速 (n) (rpm)、滚动体直径 (d)、节径 (D)、滚动体个数 (N_d)

转频：
$f_r = \frac{n}{60}$

外圈故障特征频率：
$\text{BPFO} = f_r \cdot \frac{N_d}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right)$

内圈故障特征频率：
$\mathrm{BPFI} = f_r \cdot \frac{N_d}{2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D}\right)$

滚动体故障特征频率：
$\mathrm{BSF} = f_r \cdot \frac{D}{d} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]$

四、小波包能量特征

对信号进行 (L) 层小波包分解，得到 2^L个子频带。第 j 个子频带的小波包系数为 $w_{j,m}$，$m = 1, 2, \ldots, M_j$

子带能量：
$E_j = \sum_{m=1}^{M_j} |w_{j,m}|^2$

总能量：
$E_{\text{total}} = \sum_{j=1}^{2^L} E_j$

归一化能量百分比：
$p_j = \frac{E_j}{E_{\text{total}}}$

小波包能量熵：
$H_{\text{wp}} = -\sum_{j=1}^{2^L} p_j \cdot \log\left(p_j\right)$

五、特征向量构建

最终特征向量 $\mathbf{f}$由以上所有特征拼接而成：

$\mathbf{f} = [\mu, X_{\text{rms}}, X_{\text{peak}}, \ldots, FC, MSF, \ldots, p_1, p_2, \ldots, p_{2^L}]^T \in \mathbb{R}^D$

其中 (D) 为特征总维数。

特征方法2

基于时间序列的驱动端（DE）、风扇端（FE）和基座（BA）加速度数据的特征提取数学表达式如下：

一、多通道时间序列表示

设三个通道的加速度时间序列为：

驱动端：$\mathbf{x}_{\text{DE}} = \left\{x_{\text{DE},1}, x_{\text{DE},2}, \ldots, x_{\text{DE},N}\right\}$

风扇端：$\mathbf{x}_{\text{FE}} = \left\{x_{\text{FE},1}, x_{\text{FE},2}, \ldots, x_{\text{FE},N}\right\}$

基座：$\mathbf{x}_{\text{BA}} = \left\{x_{\text{BA},1}, x_{\text{BA},2}, \ldots, x_{\text{BA},N}\right\}$

其中 (N) 为每个通道的数据点数。

二、单通道时域特征（以DE为例）

均值：
$\mu_{\text{DE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{\text{DE},i}$

均方根值：
$X_{\text{rms,DE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{\text{DE},i}^2}$

峰值：
$X_{\text{peak,DE}} = \max\left(|x_{\text{DE},i}|\right)$

峭度：
$\kappa_{\text{DE}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_{\text{DE},i} - \mu_{\text{DE}})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_{\text{DE},i} - \mu_{\text{DE}})^2\right)^2}$

偏度：
$\gamma_{\text{DE}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_{\text{DE},i} - \mu_{\text{DE}})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_{\text{DE},i} - \mu_{\text{DE}})^2}\right)^3}$

三、通道间时域关系特征

DE-FE互相关系数：
$\rho_{\text{DE-FE}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{\text{DE},i} - \mu_{\text{DE}})(x_{\text{FE},i} - \mu_{\text{FE}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_{\text{DE},i} - \mu_{\text{DE}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_{\text{FE},i} - \mu_{\text{FE}})^2}}$

DE-BA互相关系数:
$\rho_{\text{DE-BA}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{DE},i}-\mu_{\text{DE}})(x_{\text{BA},i}-\mu_{\text{BA}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{DE},i}-\mu_{\text{DE}})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{BA},i}-\mu_{\text{BA}})^2}}$

FE-BA互相关系数:
$\rho_{\text{FE-BA}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{FE},i}-\mu_{\text{FE}})(x_{\text{BA},i}-\mu_{\text{BA}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{FE},i}-\mu_{\text{FE}})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{BA},i}-\mu_{\text{BA}})^2}}$

四、多通道频域特征

对每个通道进行离散傅里叶变换:

$X_{\text{DE}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{\text{DE},n}e^{-j2\pi kn/N}$

$X_{\text{FE}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{\text{FE},n}e^{-j2\pi kn/N}$

$X_{\text{BA}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{\text{BA},n}e^{-j2\pi kn/N}$

DE通道频谱重心:
$FC_{\text{DE}} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} f_k|X_{\text{DE}}(k)|}{\sum_{k=0}^{N-1}|X_{\text{DE}}(k)|}$

通道间频谱相干性(DE-FE):
$C_{\text{DE-FE}}(f) = \frac{|S_{\text{DE-FE}}(f)|^2}{S_{\text{DE}}(f)S_{\text{FE}}(f)}$
其中 $S_{\text{DE}}(f)$, $S_{\text{FE}}(f)$为功率谱密度,$S_{\text{DE-FE}}(f)$ 为互功率谱密度。

五、时频域特征(小波包变换)

对每个通道进行L层小波包分解:

DE通道第j子带能量:
$E_{\text{DE},j} = \sum_{m=1}^{M_j}|w_{\text{DE},j,m}|^2$

多通道能量比特征:
$R_{\text{DE/FE},j} = \frac{E_{\text{DE},j}}{E_{\text{FE},j}}$

$R_{\text{DE/BA},j} = \frac{E_{\text{DE},j}}{E_{\text{BA},j}}$

$R_{\text{FE/BA},j} = \frac{E_{\text{FE},j}}{E_{\text{BA},j}}$

六、最终特征向量构建

综合所有通道的特征,构建最终特征向量:

$\mathbf{f} = [\mu_{\text{DE}}, \kappa_{\text{DE}}, \mu_{\text{FE}}, \kappa_{\text{FE}}, \mu_{\text{BA}}, \kappa_{\text{BA}}, \rho_{\text{DE-FE}}, \rho_{\text{DE-BA}}, \rho_{\text{FE-BA}}, FC_{\text{DE}}, FC_{\text{FE}}, FC_{\text{BA}}, E_{\text{DE},1}, \ldots, E_{\text{DE},2^L}, R_{\text{DE/FE},1}, \ldots, R_{\text{DE/FE},2^L}]^T$

该特征向量充分利用了三个通道的时域、频域、时频域信息以及通道间的相互关系,为轴承故障诊断提供了丰富的特征表示。