

CISA

团 体 标 准

T/CISA XXXX—XXXX

板带轧机动特性检测 第 2 部分：分析方法

Dynamic Characteristic Measurement of Strip and Plate Mills

Part 2: Methods of analysis

（征求意见稿）

202×-××-××发布

202×-××-××实施

中国钢铁工业协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 信号来源及基本参数 2

 4.1 信号来源 2

 4.2 振动分类 3

 4.3 振动工况及基本参数 3

5 振动数据处理 3

 5.1 振动数据清洗与重采样 3

 5.2 相关工况和数据 5

6 振动分析模型开发 5

 6.1 时频分析模型 5

 6.2 轧机固有特征计算 9

 6.3 轧机常见故障振动特征 11

前 言

本文件按照 GB/T1.1—2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由冶金机电标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：

本部分主要起草人：

本文件为首次发布。

板带轧机动特性检测 第2部分：分析方法

1 范围

本文件规定了轧机装备旋转和非旋转部件的振动测试方法。

本文件规定了板带轧机机械振动术语和定义、信号来源及基本参数、振动数据处理、振动分析模型开发。

本部分涵盖轧机装备旋转和非旋转部件的机械振动测试，包括但不限于机架、液压压下缸、辊系轴承座和传动联接轴的分析。

本部分的振动分析准则适用于额定工作转速工况下轧机振动特性分析过程。

本文件适用于板带轧机的振动分析。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准。然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 2298-2010 机械振动、冲击与状态监测词汇（GB/T 2298-2010，ISO 2041:2009，IDT）

GB/T 6075.1-2012 机械振动 在非旋转部件上测量评价机器的振动 第1部分：总则

GB/T 10068-2020 轴中心高为56mm及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值

GB/T 11349.1-2018 机械振动与冲击 机械导纳的试验确定 第1部分：基本术语与定义、传感器特性

GB/T 19873.3-2019 机器状态监测与诊断 振动状态监测 第3部分：振动诊断指南

GB/T 24610-2019 滚动轴承 振动测量方法

GB/T 29716.1-2013 机械振动与冲击 信号处理 第1部分：引论

GB/T 29716.2-2018 机械振动与冲击 信号处理 第2部分：傅里叶变换分析的时域窗

GB/T 29716.3-2021 时频分析方法

GB/T 29716.4-2018 机械振动与冲击 信号处理 第4部分：冲击响应谱分析

GB/T 32335-2015 机械振动与冲击 振动数据采集的参数规定

GB/T 33199.1-2016 机械振动 旋转机械扭振

GB/T 33223-2016 轧制设备 术语

GB/T 35854-2018 风力发电机组及其组件机械振动测量与评估

GB/T 39523-2020 精密行星摆线减速器扭转振动性能测试方法

GB/T 41095-2021 机械振动 选择适当的机器振动标准的方法

JB/T 10237-2014 滚动轴承 圆锥滚子轴承振动(加速度) 技术条件

以上标准性文件确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3 术语和定义

GB/T 2298确立的以及下述术语和定义适用于本标准。

3.1 等效系统 (Equivalent System)

定义：为便于分析，可用于替代另一个系统的系统。

来源：[《工程力学》，GB/T 15391-2004, 4.1]

3.2 采样频率 (Sampling Frequency)

定义：对于均匀的采样数据，单位时间内采样的点数。

来源：[《信号处理基础》，GB/T 14245-2011, 4.5]

3.3 奈奎斯特频率 (Nyquist Frequency)

定义：以给定的采样速率采集的数据之最大可用频率。

来源：[《数字信号处理》，GB/T 17653-2008, 7.3]

3.4 传递函数 (Transfer Function)

定义：线性时不变系统输入与输出之间关系的数学表达式。

来源：[《系统与控制理论》，GB/T 11153-2007, 5.3]

3.5 模态分析 (Modal Analysis)

定义：基于叠加原理的振动分析方法，用复杂结构系统自身的振动模态，即固有频率、模态阻尼和模态振型来表示其振动特性。

来源：[《振动分析方法》，GB/T 23049-2011, 6.1]

来源：[《机械振动基本术语》，GB/T 22098-2009, 2.9]

3.6 优势频率 (Dominant Frequency)

定义：频谱中的最大值所对应的频率。

来源：[《振动信号处理标准》，GB/T 19392-2010, 5.6]

3.7 模态振型 (Mode Shape)

定义：机械系统的某一固有模态振动的形状，是指由中性面（或中性轴）上的点偏离其平均值的最大位移值所描述的图形。各点振型值通常是按选定点的偏离值进行归一化。

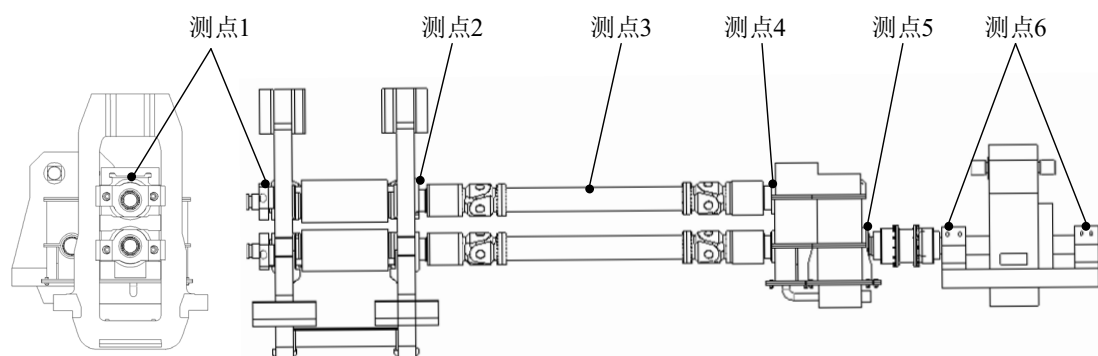
来源：[《振动分析与控制》，GB/T 28550-2012, 6.4]

4 信号来源及基本参数

4.1 信号来源

轧机振动信号的来源主要包括操作侧工作辊轴承座、传动侧齿轮箱轴承座，或根据需要在其他位置安排测点采集信号，每个测量部位要监测水平、垂直以及轴向三个方向的振动信息，在出现磨损明显或振动强烈的位置要重点监测。

振动信号数据来源位置见图 1。



说明：

测点1—轧机操作侧工作辊轴承座；

测点2—轧机传动侧工作辊轴承座；

测点3—轧机传动轴；
测点4、测点5—轧机齿轮箱轴承座；
测点6—轧机电机轴承座；

图1 轧机振动数据来源位置

4.2 振动分类

按照产生振动的原因进行分类，轧机的典型振动可以划分为三种情况：

- a) 自由振动：轧机系统接受能量后，由于阻尼影响而衰减的振动；
- b) 受迫振动：轧机系统受到周期变化的外力作用而引起的振动；
- c) 自激振动：轧机在没有外力作用下由于系统自身原因所产生的激励而引起的振动。

按照产生振动的表现形式进行分类，轧机的典型振动可以划分为三种情况：

- a) 轧机扭转振动：；
- b) 轧机垂直振动：；
- c) 轧机水平振动：；

4.3 振动工况及基本参数

轧机测量工况如下：

- a) 轧机空载；
- b) 轧机咬钢；
- c) 轧机轧钢；
- d) 轧机抛钢。

轧机的振动数据采用加速度传感器进行测量，测量单位为米每平方秒（m/s²）。

5 振动数据处理

5.1 振动数据清洗与重采样

5.1.1 通则

对轧机振动进行有效分析的前提是保证分析数据的有效性，在轧机振动数据收集过程中，由于工厂环境复杂，振动信号传递路径耦合以及传感器测量误差等因素往往会导致振动数据异常，常见的异常情况包括插值误差、随机数据误差、缺失数据、重要数据丢失及其他。数据应经过检查和修正。

5.1.2 数据清洗

数据清洗是数据预处理的重要步骤，其目的是确保数据质量，使得数据适合于后续的分析、挖掘或展示。轧机振动数据的清洗可按照以下几个方面依次进行：

1) 缺失值处理：缺失值是指轧机振动数据中某些丢失或不可用的数据，处理方法包括删除含有缺失值的记录、填充缺失值（如使用均值、中位数、众数或模型预测等方法）或标记缺失值。

2) 重复数据处理：重复数据会导致分析结果的偏差，处理方法包括删除重复记录、合并重复记录或标记重复记录。

3) 数据转换：数据转换的目的是统一数据分析的格式，包括数据类型的转换（如将字符串转换为数值类型）、数据单位的转换（如加速度单位统一转换为米每平方秒）以及数据格式的转换（如统一日期格式）。

4) 修正错误：识别并修正数据中的错误，如错误的数值、错误的分类等。

5) 丢弃数据/变量：对于不符合分析需求或质量低下的数据进行丢弃，或者从数据集中移除不相关的变量。

6) 数据标准化/归一化：将数据缩放到一个较小的范围内，以消除不同量纲的影响。

轧机振动数据清洗的手段较多，实际操作中需要根据数据的特性、质量问题以及业务目标来选择合适的清洗方法。数据清洗是一个迭代的过程，需要不断地检查数据质量，调整清洗策略，直到满足分析的要求。

5.1.3 数据重采样

数据重采样是轧机振动分析的重要步骤，其目的是改善数据分布的均衡性，从而改进振动信号分析的准确性。数据重采样可按照以下步骤开展：

1) 直接采样：直接从原始数据中抽取样本，而不改变采样率。

2) 插值采样：通过对原始数据中的空隙进行插值，生成新的数据点。插值方法可以使用线性插值、多项式插值、样条插值等方法。

3) 降采样：通过丢弃原始轧机振动数据中的某些样本，降低采样率。这种方法可以减少数据量，但可能导致信息丢失。

4) 升采样：增加原始轧机振动数据中的样本数量，以提高采样率。这种方法可以增强数据的频率分辨率，但可能会引入额外的噪声。

5) 周期性采样：将轧机原始振动数据进行周期性复制，以生成新的数据集。这种方法可以增加数据量，但可能导致数据的周期性重复。

6) 重叠相加或重叠相减：通常用于信号处理中的时域重采样。通过重叠窗口技术，将原始数据分割成多个小段，然后进行重采样和重叠窗口的叠加或相减。

在实际应用中，不一定要完成上述所有步骤，需要根据振动数据的特性、重采样的目的以及计算资源等因素综合考虑来选择合适的重采样方法。

5.2 相关工况和数据

应该选取覆盖所有工况的振动数据进行分析，轧机轧制过程中以下数据需要重点关注并考虑全面：

1) 生产工况：振动数据应覆盖不同轧制生产工况，包括不同轧制速度、不同轧制力、不同轧件尺寸以及不同轧件材质等。

2) 设备状态：振动数据应覆盖不同轧机设备状态，包括轧机零部件的磨损状况：如轴承、齿轮、轧辊等的磨损情况；轧机结构完整性：如是否存在结构缺陷或损伤。

3) 工艺参数：振动数据应覆盖不同轧机工艺参数，包括轧制道次和轧制工艺：如热轧、冷轧、平整等；

4) 操作参数：振动数据应覆盖不同轧机操作参数，包括自动化控制系统设置：如张力控制、位置控制等参数设置；操作模式：如连续轧制模式或间歇轧制模式等。

选择数据时，应确保数据的完整性和准确性，并根据分析需求进行适当的数据预处理。图2为某轧机采集到的工作辊轴承处采集的加速度信号时域图的例子，信号选取时应该包含轧机轧辊空转、咬钢、轧制以及抛钢的4个阶段。

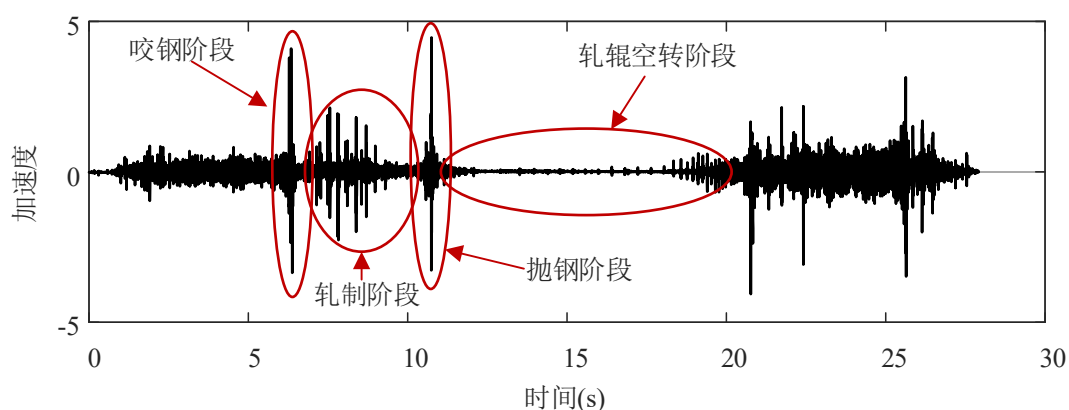


图2 轧制过程加速度信号时域图示例

6 振动分析模型开发

6.1 时频分析模型

6.1.1 通则

振动信号时频域分析是一种将时域和频域分析结合起来的信号处理技术，它可以提供信号在时间和频率两个维度上的信息。这种方法对于分析轧机非平稳振动信号优势显著。

6.1.2 时域分析法

时域分析法主要关注信号在时间轴上的变化，用于提取信号的时间域特征，以便进行故障诊断、状态监测等。以下是振动信号时域分析的主要步骤：

- 1) 基本特征分析：计算信号的基本统计量，包括均值、标准差、方差、峰度、偏度等；评估信号的能量指标，如均方根值（RMS）、方根幅值等。
- 2) 波形分析：观察信号的波形，检查是否存在异常波形或突变点；分析信号的周期性，确定主频和谐波成分。
- 3) 趋势分析：检查信号是否有长期趋势或周期性变化；使用移动平均等方法来平滑信号，以便更好地识别趋势。
- 4) 峰值和谷值分析：识别信号中的局部最大值（峰值）和最小值（谷值）；分析峰值和谷值的分布，包括它们的频率、幅度等。
- 5) 相关性分析：计算信号的自相关函数，分析信号与自身在不同时间延迟下的相似性；如果有多个信号，可以计算它们之间的互相关函数，分析不同信号之间的关联。

时域分析是理解振动信号的基础，它可以为后续的频域分析、时频分析等提供重要的先验信息。部分时域指标可按照以下公式计算：

均值表征信号的平均值，是信号的一阶矩，其表达式为：

$$\mu_x(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t)$$

峰值为信号在时域上的最大值，表征信号振动冲击的强弱，其表达式为：

$$p = \max(x_i(t))$$

有效值也叫均方根值，反映了振动幅值大小和冲击的密集程度，其表达式为：

$$RMS(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

峰值因子是信号峰值与有效值的比值，代表的是峰值在波形中的极端程度，用来检测信号中是否存在冲击，其表达式为：

$$C = \frac{x_p}{RMS(x)}$$

峭度指标为无量纲的高阶统计参数,对引起旋转设备振动信号产生大幅值冲击脉冲的关键零部件故障敏感。正态分布的峭度等于 3,峭度小于 3 时分布的曲线会较“平”,大于 3 时分布的曲线较“陡”。其表达式为:

$$ku = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu)^4}{\sigma^4}$$

波形因子是信号有效值与绝对平均值之商,反应信号波型的尖锐程度,其表达式为:

$$sh = \frac{RMS}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|}$$

脉冲因子是信号绝对值的最大值与绝对平均值之商,反应信号的冲击程度,信号冲击越大脉冲因子数值越高,其表达式为:

$$im = \frac{\max |x|}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|}$$

裕度因子是信号峰值与方根幅值的比值,表征信号的冲击程度,其表达式为:

$$cl = \frac{\max |x|}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{|x_n|} \right)^2}$$

6.1.3 频域分析法

振动信号频域分析法是一种将振动信号从时域转换到频域的方法,以揭示轧机振动信号的频率特性。以下是进行振动信号频域分析的基本步骤:

- 1) 计算频谱:采用快速傅里叶变换算法将振动时域信号转化为频域信号。
- 2) 频谱特征提取:从频谱中提取特征,如峰值频率、能量集中区域、频率分布的形状等。
- 3) 频率分析:分析频谱中的频率成分,以识别信号中的周期性、调制、谐波等特征。
- 4) 故障模式比较:根据频域分析的结果,解释信号的特征和模式,并将其与实际情况进行比较,以验证分析的准确性和可靠性。

进行振动信号频域分析时,应确保数据的准确性和可靠性,以及分析结果的解读和应用。频域分析

可以单独使用，也可以与其他分析方法（如时域分析、时频分析等）结合使用，以获得更全面的信号特征和信息。图 3 为某轧机采集到的工作辊轴承处采集的加速度信号频域图的例子，从中可以找到较为清晰的 25Hz 左右的基频，将根据本部分的步骤将其与已知故障模式或正常操作条件的频谱进行比较，可以分析轧机状态。

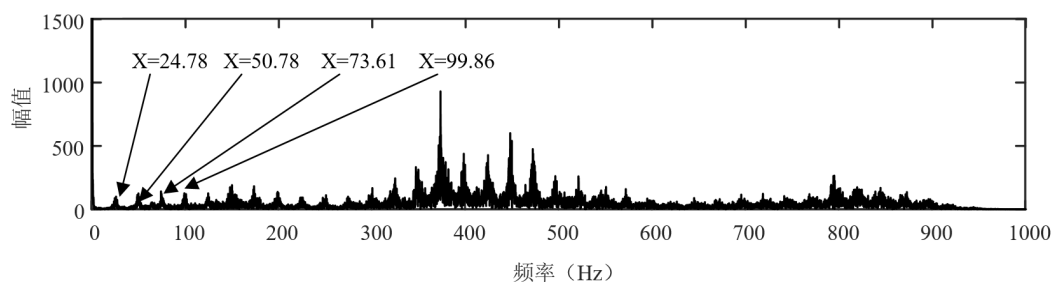


图3 轧制过程加速度信号频域图示例

6.1.4 时频分析法

振动信号时频分析法是一种将时域和频域分析结合起来的信号处理技术，它可以提供轧机振动信号在时间和频率两个维度上的信息。以下是轧机振动信号时频分析的主要步骤：

- 1) 时频转换：根据信号特性和分析需求选择合适的时频分析方法，如短时傅里叶变换（STFT）、小波变换(WT)、经验模式分解(EEMD)等，应用选定的时频转换技术将时域信号转换为时频表示。
- 2) 时频谱分析：从时频谱中提取有用的特征，如能量峰值、频率轨迹、时频熵等。
- 3) 时频特征分析：分析时频特征，识别信号中的异常模式或特征事件。对比不同时间段或不同工况下的时频特征，以识别变化趋势。
- 4) 滤波与降噪：根据需要设计滤波器，如带通滤波器、带阻滤波器等，以去除噪声或突出特定频率成分。
- 5) 结果解释：解释时频分析的结果，将其与机械设备的运行状态、故障模式等联系起来。
- 6) 报告与应用：编写分析报告，总结时频分析的结果和发现。将时频分析方法应用于实际的故障诊断、状态监测或维护决策支持。

时频分析法可根据现场需要以及初步分析的结果来调整分析方法或参数。图 4 为一段轧机轧辊轴承滚动体故障振动信号的时频分析效果例子，通过小波滤波器降噪后右侧时频域分析可以找到左侧频域分析难以找到的振动信号循环频率特征。

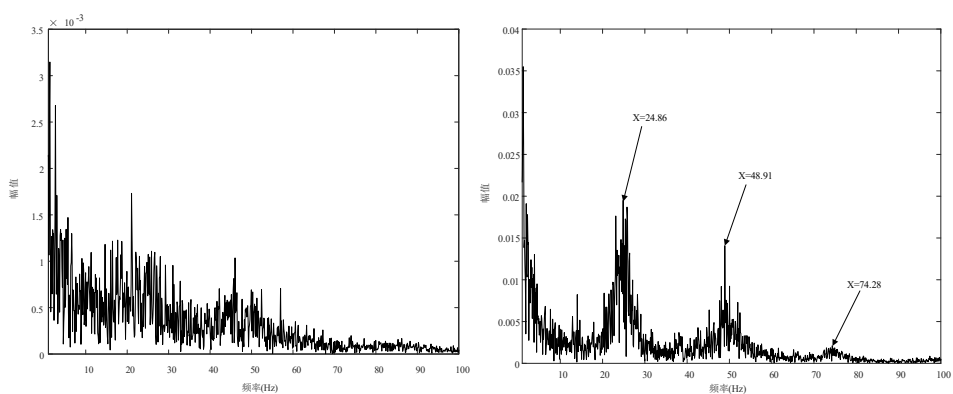


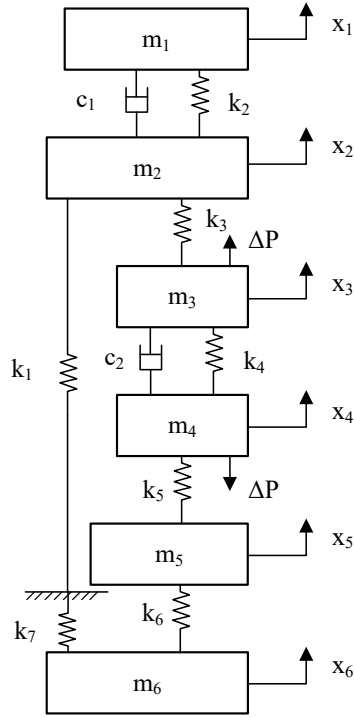
图 4 信号时频分析效果示例

6.2 轧机固有特征计算

轧机固有特征计算主要是指对轧机系统的固有频率、振型等特性参数的计算。这些参数是轧机系统动态分析的基础，可与介绍的信号分析方法结合判断振动产生的原因和振动特性的不同。对采集到的数据进行分析，如果发现振动频率与外部干扰力的频率一致，且振幅随外部干扰力的变化而变化，则可能是受迫振动；如果振动频率接近系统的固有频率，且振幅不随外部干扰力的消失而立即停止，则可能是自激振动。

以下是轧机固有特征计算的步骤：

1) 建立力学模型：根据轧机结构的实际情况，建立适当的力学模型。常见的力学模型有单自由度系统、多自由度系统和连续体模型。图 5 是一个四辊轧机垂直振动系统六自由度振动模型示例，实际计算中可按照示例进行动力学建模，并以此建立运动方程



说明：

m_i ——上横梁及机架立柱的等效质量，上支承辊和轴承、轴承座的等效质量，上工作辊的等效质量，下工作辊的等效质量，下支承辊和轴承、轴承座的等效质量，机架下横梁的等效质量；
 K_i ——上横梁机及架立柱的等效刚度，上支承辊和上横梁间的等效刚度，上工作辊与上支承辊间的弹性接触刚度，上下工作辊和轧件间的等效刚度，下工作辊与下支承辊间的弹性接触刚度，下支承辊和下横梁间的等效刚度，下横梁的弯曲等效刚度；
 c_i ——上横梁与上支承辊间压下油缸的阻尼系数，两工作辊间轧件造成的阻尼系数。

图 5 四辊轧机垂直振动系统六自由度振动模型示例

2) 求解固有频率：轧机系统的动力学方程可按照以下方程表示：

$$[K]\{\phi\} = \omega^2[M]\{\phi\}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_i \end{bmatrix}_{i \times i}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_i + k_{i+1} \end{bmatrix}_{i \times i}$$

式中：

$[M]$ —— 系统质量矩阵；

$[K]$ —— 系统的刚度矩阵；

$\{\phi\}$ —— 系统的振型矩阵；

固有频率对应的振型可以通过求解上述特征值问题的特征向量得到。每个固有频率对应一个振型，表示系统在该频率下的振动形态。图6是一个四辊轧机的其中一阶振型波形图示例。

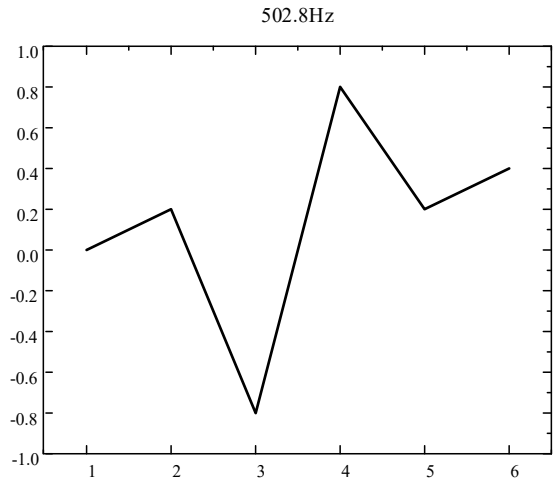


图 6 轧机振动振型示例

3) 对比验证：将计算结果与采集振动信号的优势频率进行对比，验证振动类型与该优势频率下轧机系统振动振型。

6.3 轧机常见故障振动特征

6.3.1 轧机齿轮故障检测

本部分根据轧机齿轮振动信号特点总结了齿轮在以下常见状态时其振动信号时频域特点，可按照以下特点结合时频域分析法分析齿轮状态。

1) 正常齿轮的振动信号特征

正常齿轮由于刚度的影响，其波形显现为周期性的衰减波形。在频谱特点上，正常齿轮的啮合过程产生的振动信号其频域往往伴随着低能量水平的啮合频率以及其高次谐波，随着高次谐波的阶数增加，其频谱幅值逐渐减小。其频谱特点如图 7 所示。

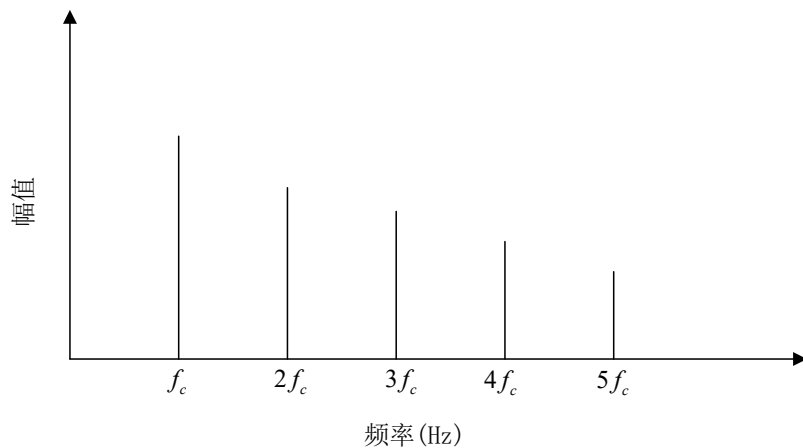


图 7 轧机正常齿轮振动信号频谱特点

2) 轻微磨损齿轮的振动信号特征

齿轮均匀磨损时由于无冲击振动信号产生，一般不会出现特别明显的调制现象。发生均匀磨损的齿轮在啮合过程中其振动信号的频谱在其各高阶协波的形状规律与正常齿轮啮合时产生的振动信号相似，随着谐波阶次的增大其频谱幅值逐渐减小，但是在总体能量上确显著高于正常齿轮啮合时产生的振动信号的能量，其频谱特点如图 8 所示。

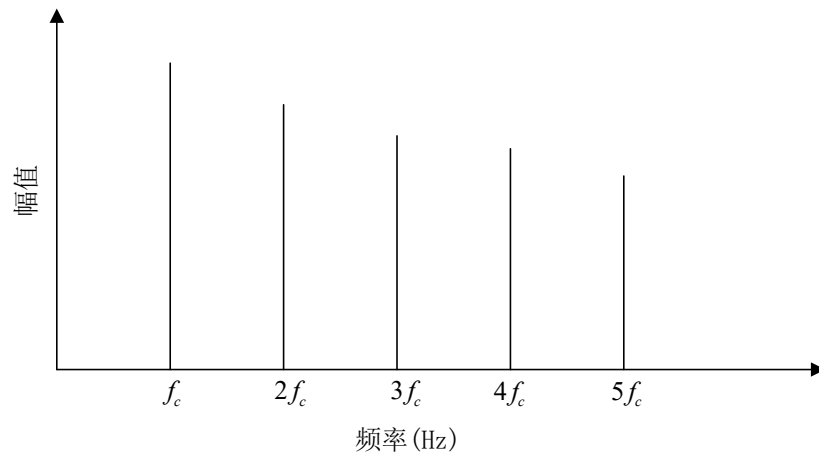


图 8 轧机轻微磨损齿轮振动信号频谱特点

3) 局部失效齿轮的振动信号特征

随着齿轮局部失效的产生，齿轮啮合过程中往往会产生一定的冲击，整个频谱能量水平都随之增加，此时采集的振动信号的基频并不一定是幅值最高的频率成分，其高次协波往往会超过基波，此外，当齿轮局部失效加剧后，其振动能量急剧上升，其总体能量远大于正常振动信号的能量。局部失效的频谱特点如图 9 所示。

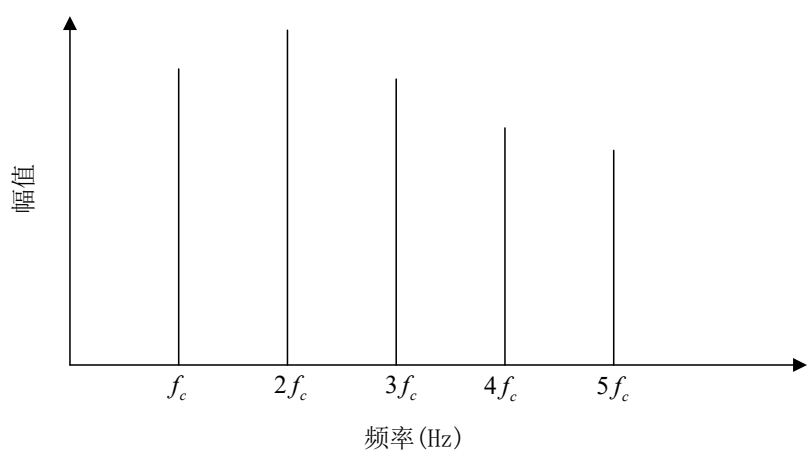


图 9 轧机局部失效齿轮振动信号频谱特点

图 10 为采集的齿轮局部点蚀失效严重的齿轮箱振动信号进行分析的示例，当齿面局部失效后，齿廓形状变坏，首先可以观察到其频谱能量急剧上升，197Hz 的基频幅值小于其第二、四次谐波。值得注意的是，由于严重的局部失效产生了明显的冲击效果，导致振动信号伴随着强烈的调制现象。

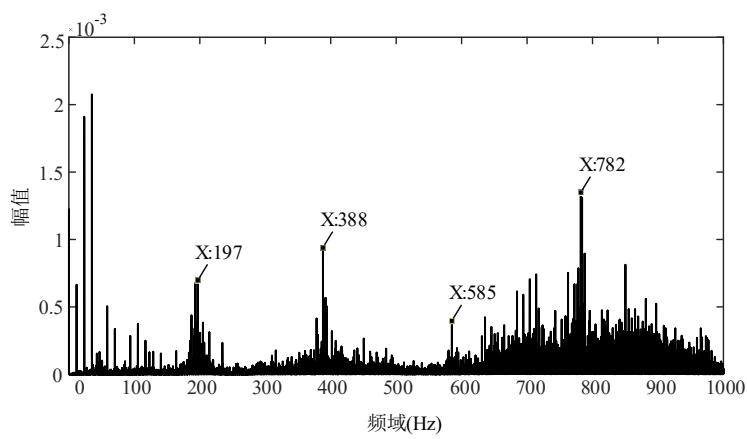


图 10 严重局部失效齿轮箱振动信号频谱图示例

6.3.2 轧机轴承故障检测

1) 轧机轴承外圈点蚀的振动信号特征

轧机轴承外圈有点蚀时，在解调频谱上可见轴承外圈缺陷频率 BPFO 及其高次谐波，其频谱特点如图 11 所示。

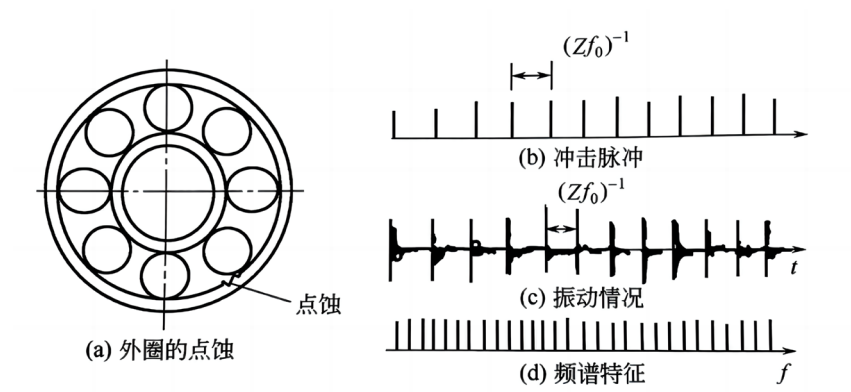


图 11 轧机轴承外圈点蚀的振动信号频谱特点

2) 轧机轴承内圈点蚀的振动信号特征

当内圈出现点蚀时，如果它位于加载区域时，产生的冲击会更加剧烈，从而产生更高的振幅。当内圈故障位置移出加载区后，其振幅又会降低，并在轴承顶部达到最小值。在这种情况下内圈的故障频率被（内圈的）旋转频率所调制，可以在频谱中看到 1X 边频带出现，其频谱特点如图 12 所示。

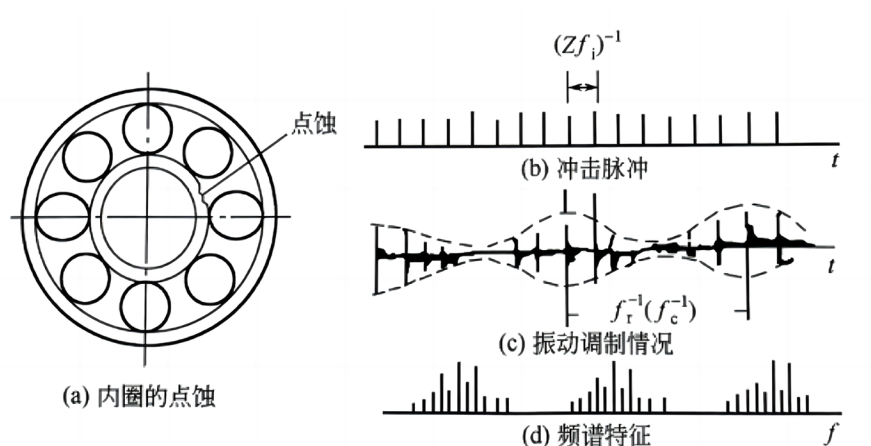


图 12 轧机轴承内圈点蚀的振动信号频谱特点

3) 轧机轴承滚动体故障的振动信号特征

轴承滚动体有缺陷时，在解调频谱上可见轴承滚动体缺陷频率 BSF 及其高次谐波，以及出现转速频率的边频；此外，由于滚动体对外圈的碰撞强于对内圈的碰撞，在解调谱上还会存在 BSF 的半谐波，其频谱特点如图 13 所示。

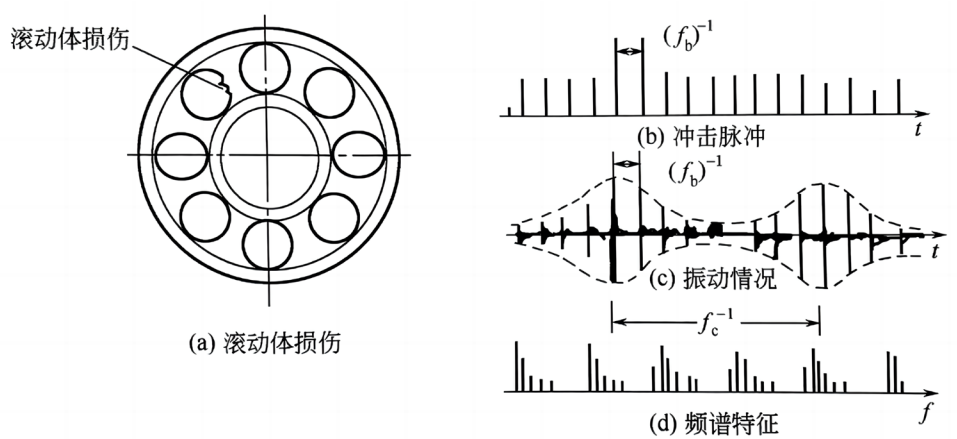


图 13 轧机轴承滚动体故障的振动信号频谱特点

轧机轴承的故障特征频率可按照以下公式计算，与振动信号时频分析结果对比可初步判断故障类型。

$$\text{内圈故障: } \frac{z}{2} \times \frac{R_i}{60} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$\text{外圈故障: } \frac{z}{2} \times \frac{R_i}{60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \delta \right)$$

$$\text{滚动体故障: } -\frac{1}{2} \times \frac{R_o}{60} \times \frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right)$$

6.3.3 轧机其他故障检测

除轴承和齿轮外，轧机其他无明显振动特征的轧机部件可根据 6.2 根据固有频率分析故障部位或使用神经网络进行轧机工作过程中常见故障的自动识别，现阶段可按照以下步骤部署轧机常见故障模式分类模型：

- 1) 构建训练数据集：根据提取的特征和已知的故障标签，构建训练数据集。确保数据集中包含多种故障类型，以便训练的分类器能够学习到不同故障的特征。
- 2) 选择分类算法：根据数据特点以及轧机故障类型选择合适的分类算法，如支持向量机、神经网络等。建议现场环境复杂，振动数据含噪声较多时优先选择鲁棒性更高的神经网络算法。
- 3) 模型训练与优化：划分训练集与数据集，使用选定的分类算法训练故障分类模型，采用交叉熵等技术调整模型参数。
- 4) 模型评估：使用测试数据集评估模型的性能，如准确率、召回率、F1 分数等。绘制分析模型的混淆矩阵，了解模型对不同故障类型的识别能力。
- 5) 模型部署：将训练好的模型部署到实际应用中，进行在线故障检测和分类。根据模型输出的故

障类型，采取相应的维护或修复措施。

6) 模型更新：使用增量学习或迁移学习等技术，利用新数据提高模型的鲁棒性和准确性。

模式分类模型须根据分类结果做出相应的故障诊断、维修或预测建议。同时，要将分类结果及时反馈到维护团队，以支持设备的维护管理工作。图 14 是一个轧机轴承常见状态：正常、滚滚动体故障、内圈故障、保持架故障的智能模式分类模型的聚类图例子，反映了模式分类模型对 6 类振动信号的分类效果。图 15 是该模型的混淆矩阵结果，该图反映了模型对 4 类状态识别的准确率。

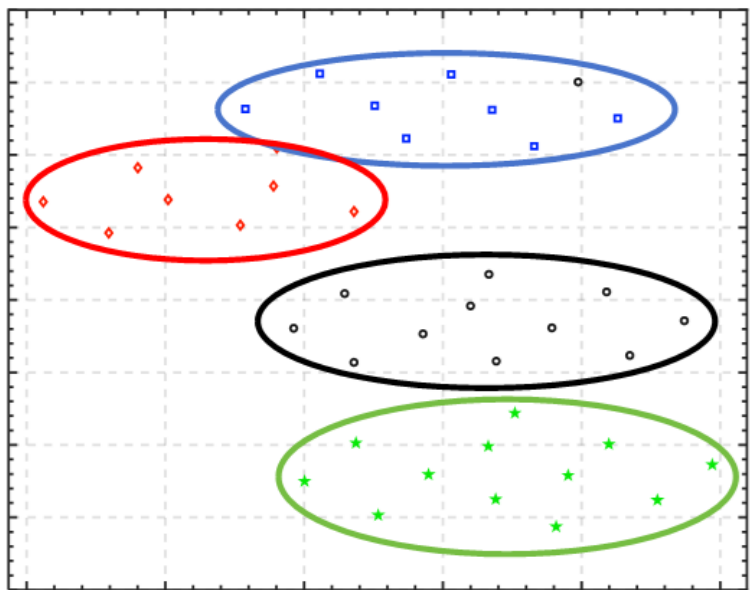


图 14 轧机轴承分类模型聚类图示例

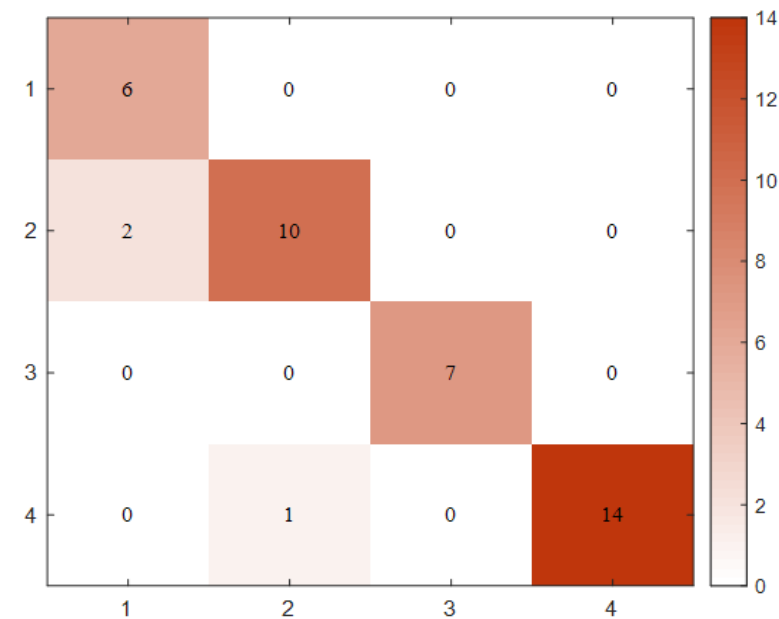


图 15 轧机轴承分类模型混淆矩阵示例

轧机故障对应深度模型可参照下表：

表1 轧机典型故障—机理—征兆—传感—深度模型 对照表

故障部位/模式	物理机理	推荐深度模型/输入形式
滚动轴承外圈/内圈/滚动体/保持架缺陷；润滑劣化	点蚀/裂纹致周期冲击；油膜破裂	1D-CNN/TCN 端到端（原始/包络信号）；CWT/STFT scalogram + 2D-CNN；少样本ProtoNet/RelationNet；无监督 CAE/VAE/DeepSVDD
齿轮箱：点蚀/磨损/胶合/齿根裂纹	传动误差增大、啮合刚度时变	多分支CNN（时域+谱）；CNN-Transformer 捕获边带；循环一致域自适应（DANN/AdaBN） 跨工况
联轴器/万向节不对中、键/花键间隙磨损	角/平行不对中；周期性间隙撞击	TCN/SE-TCN（序列长时依赖）；Order-tracked STFT + 2D-CNN
主电机电磁不平衡/转子偏心	电磁力脉动与机械转子耦合	多模态早期融合 CNN（电流+振动+扭振）；变分融合(VAE-fusion)
工作辊/支撑辊偏心	几何偏心或磨削误差	多模态 Transformer（振动×测厚对齐）；协同训练(Co-Training) 弱标签
颤振	结构模态耦合	STFT/梅尔谱 + 2D-CNN 快速检测；Transformer/Conformer（长时依赖）；自监督（SimCLR/BYOL） 预训练
窜辊/弯辊执行回路异常	反馈滞后/导轨磨损/泄漏	多变量TCN（低频趋势+周期）；KalmanNet 物理先验融合
机架裂纹/预紧不足/基础共振	刚度退化/连接松动	频响曲线(FRF) + 2D-CNN；GNN