

【动设备智能预警平台】

专业术语名词解释

上海宾瑞自动化科技有限公司

2025 年 4 月

目 录

一、 转子对中状态.....	1
二、 转子平衡状态.....	2
三、 配合状态	4
四、 滚动轴承润滑状态	6
五、 部件碰摩状态	8
六、 电磁状态	10
七、 速度均方根.....	13
八、 平稳冲击烈度.....	15
九、 优化峭度	17
十、 1K~10K Hz 均方根	20
十一、 10K~25.6K Hz 均方根	23

一、转子对中状态

1.1 定义

转子对中状态（Rotor Alignment）是指旋转机械（如电机、泵、风机、涡轮机等）中连接的转子轴之间的几何位置关系是否处于理想的对中状态。对中的目的是确保各转子轴的中心线在旋转时保持连续、共线，避免因偏差导致振动、磨损或能量损失。

理想对中：

各转子轴的中心线完全重合（静态和动态条件下均对齐）。

传递扭矩时不会产生附加的弯曲应力或交变载荷。

不对中：

当轴的中心线存在偏差时，称为轴不对中（Misalignment），是旋转机械振动的常见根源之一。

不对中会导致附加的周期性力，引发振动、轴承磨损、密封失效等问题。

1.2 不对中的类型

类型	说明	振动特征
平行不对中 (Offset Misalignment)	两轴的轴线平行但存在水平或垂直方向的偏移	径向振动为主，频谱中可能呈现 1 倍频（1×RPM）及 2 倍频（2×RPM）成分
角度不对中 (Angular Misalignment)	两轴的轴线形成夹角	轴向振动显著，频谱中以 1 倍频为主，伴随高次谐波
复合不对中 (Combined Misalignment)	实际工况中多为平行与角度不对中的组合形式	

1.3 对中不良对振动的影响：

振动幅值增大：不对中会产生交变力，导致轴承、联轴器等部件振动加剧。

1.4 检测手段：

振动分析：通过频谱、相位、轴心轨迹等判断不对中类型。

频谱特征：1 倍频（与转速相关）及 2 倍频分量突出。轴向振动异常升高（尤其在角度不对中时）。

相位分析：联轴器两侧的振动相位差接近 180°（平行不对中）或非对称变化（角度不对中）。

1.5 调整措施：

重新调整联轴器或底座，确保冷态和热态对中（考虑热膨胀影响）。

使用柔性联轴器补偿轻微不对中。

定期监测和维护，避免基础沉降或部件变形引发偏差。

1.6 总结

转子对中状态是旋转机械健康运行的关键因素。不对中会显著增加振动能量，加速部件疲劳失效。通过振动分析识别不对中特征，结合精密调整技术，可有效降低故障率并延长设备寿命。

二、转子平衡状态

2.1 定义

转子平衡状态（Rotor Balance）是指旋转机械的转子质量分布是否均匀的状态。若转子质量分布对称于旋转轴线，旋转时不会产生离心力不平衡，称为**平衡状态**；反之则称为**不平衡状态**，会导致振动加剧、部件疲劳甚至设备损坏。

理想平衡

转子的质量中心（质心）与几何中心（旋转轴线）完全重合。

旋转时离心力相互抵消，不会产生额外的周期性激振力。

不平衡

质心偏离旋转轴线，产生离心力（不平衡力），导致振动能量集中在与转速相关的频率上（1 倍频，即 $1 \times \text{RPM}$ ）。

是旋转机械最常见的振动故障源之一（占比约 80% 的振动问题）。

2.2 不平衡的类型

☆ 静不平衡（Static Unbalance）

转子的质心偏离轴线，但无偏转力矩（质量偏差在单一平面内）。

特征：静止时转子重心自然转向最低位置（类似车轮配重缺失）。

校正方法：在单一平面内添加或去除配重。

☆ 动不平衡（Dynamic Unbalance）

质心偏离轴线，且存在偏转力矩（质量偏差分布在多个平面）。

常见于长径比较大的转子（如多级风机、汽轮机转子）。

校正方法：需在两个或多个平面调整配重。

☆ 偶不平衡（Couple Unbalance）

两个大小相等、方向相反的不平衡力分布在不同的轴向平面，形成力偶。

振动特征：轴向振动显著，相位差接近 180° 。

2.3 不平衡对振动的影响

振动频率：以 1 倍频（与转速同步）为主导，可能伴随谐波（ $2 \times$ 、 $3 \times \text{RPM}$ ）。

振动方向：径向振动为主（静不平衡），或伴随轴向振动（动不平衡）。

振幅变化：振幅随转速平方增大（离心力与转速平方成正比）。

相位特性：同一轴承座的水平与垂直方向振动相位差接近 90° （典型不平衡特征）。

2.4 检测手段

频谱分析：振动频谱中 1 倍频幅值显著升高，相位稳定。

2.5 不平衡的常见原因

制造缺陷（铸件气孔、加工误差）

部件脱落或腐蚀（如风机叶片积灰、叶轮磨损）

装配误差（键槽偏移、联轴器安装偏差）

热变形（转子受热不均导致质量分布变化）。

2.6 平衡与对中的区别

特征	平衡状态	对中状态
核心问题	转子自身质量分布均匀性	多转子间的轴线几何对齐
振动频率	1×RPM主导	1×RPM、2×RPM
振动方向	径向为主	径向或轴向（角度不对中时）
校正方法	配重调整	调整联轴器或底座位置

2.7 总结

转子平衡状态是旋转机械稳定运行的基础。不平衡会直接导致振动超标、轴承寿命缩短和能量损耗。通过振动频谱锁定 1 倍频特征，结合动平衡校正技术（如试重法或影响系数法），可快速恢复转子平衡，保障设备安全高效运行。

三、配合状态

3.1 定义

配合状态 (Fit Condition) 是指机械部件之间 (如轴与轴承、齿轮与轴、联轴器与轴等) 的装配配合是否符合设计要求, 包括配合公差、间隙或过盈量等参数。配合状态的优劣直接影响部件间的接触刚度、摩擦特性以及动态响应, 是引发振动异常的重要因素之一。

理想配合:

部件间的尺寸公差符合设计标准 (如间隙配合、过渡配合或过盈配合)。

在静态和动态条件下, 接触面受力均匀, 无局部应力集中或松动。

不良配合:

过松 (间隙过大): 导致部件相对运动 (如轴与轴承内圈滑动), 引发冲击、摩擦和随机性振动。

过紧 (过盈量过大): 增加装配应力, 可能引起部件变形、发热或刚度突变, 导致振动能量集中在高频段。

3.2 配合状态的类型及振动特征

☆ **间隙配合 (Clearance Fit)**

典型场景: 滑动轴承、齿轮啮合间隙。

振动问题:

间隙过大会引发非线性振动 (如分频、高频噪声)。

频谱中可能出现亚同步频率 (如 $0.5 \times \text{RPM}$) 或宽频带能量。

松动部件 (如螺栓未紧固) 会产生随机冲击信号, 时域波形呈现“毛刺”特征。

☆ **过盈配合 (Interference Fit)**

典型场景: 轴承内圈与轴的冷压装配、联轴器与轴的紧配合。

振动问题:

过盈量过大会导致局部应力集中, 引发疲劳裂纹或高频共振。

频谱中可能出现转子的固有频率成分 (因刚度变化被激发)。

☆ **磨损导致的配合劣化**

典型场景: 长期运行后, 轴承、齿轮齿面或键槽磨损。

振动特征:

振动幅值逐渐上升, 伴随谐波增多 (如齿轮磨损时的边频带展宽)。

可能触发调制现象 (如轴承外圈磨损时的载荷调制效应)。

3.3 配合不良对振动的影响

☆ **振动频率:**

间隙松动: 亚同步频率、高频噪声。

过盈配合: 高频共振或刚度相关的倍频成分。

☆ **振动方向:**

径向振动为主 (如轴与轴承配合问题)。

轴向振动可能因部件倾斜或受力不均而升高 (如联轴器过紧)。

☆ **相位特性:**

松动时相位不稳定，随机波动。

过盈配合可能导致相位突变（因刚度非线性）。

3.4 检测与诊断方法

☆ 振动频谱分析：

识别亚同步频率、高频共振或调制边频（如齿轮啮合频率 \pm 轴频）。

使用包络解调技术提取冲击信号特征（适用于松动或磨损诊断）。

☆ 时域分析：

观察波形是否包含随机冲击或周期性脉冲（如螺栓松动的瞬时撞击）。

峰度（Kurtosis）指标升高常提示存在冲击性振动。

☆ 相位与相干分析：

配合不良时，振动相位在不同测点间的相关性降低。

松动部件可能导致振动信号的非平稳性。

☆ 温度与噪声监测：

过盈配合过紧时，局部摩擦发热显著。

间隙过大会伴随异常机械噪声（如“咔嗒”声）。

3.5 调整与维护措施

☆ 装配控制：

按设计要求选择配合公差（如 H7/g6 间隙配合、H7/s6 过盈配合）。

使用液压装配或加热法避免过盈配合中的应力集中。

☆ 磨损修复：

定期检查轴承、齿轮齿面磨损量，及时更换或修复。

对磨损的轴颈可采用喷涂、镀层等工艺恢复尺寸。

☆ 动态补偿：

对热膨胀敏感的部件（如汽轮机转子），设计时预留热态配合间隙。

使用弹性联轴器或柔性支撑补偿轻微配合偏差。

3.6 配合状态与其他故障的关联

☆ 与不平衡的交互：配合松动可能放大不平衡引起的振动（因支撑刚度下降）。

☆ 与对中不良的叠加：联轴器过盈配合不当会加剧对中误差的影响。

☆ 与共振的关系：过盈配合改变部件刚度，可能使系统固有频率偏移至工作转速附近。

3.7 总结

配合状态是振动分析中不可忽视的隐性因素，其异常会通过改变接触刚度、摩擦特性或引发冲击，显著影响设备的振动特性。通过频谱中的亚同步成分、调制边频或高频共振特征，结合时域冲击信号和温度变化，可有效诊断配合问题。维护中需严格把控装配工艺，并针对运行环境（如温度、载荷）动态调整配合参数，以保障设备稳定运行。

四、滚动轴承润滑状态

4.1 定义

滚动轴承润滑状态是指轴承内部润滑油（脂）的分布、油膜厚度、污染程度及润滑有效性等综合状态。润滑状态直接影响轴承的摩擦、磨损、温升和振动特性，是轴承健康运行的核心因素之一。润滑不良会显著改变轴承的动力学行为，并引发高频振动、噪声或早期失效。

☆ 理想润滑：

润滑油膜完整覆盖滚动体与滚道接触区，形成弹性流体动压润滑（EHL）。

摩擦极小，振动能量低且频谱平稳，无异常冲击或高频噪声。

☆ 润滑不良：

润滑不足：油膜破裂导致金属间直接接触，引发干摩擦、局部高温和磨损。

润滑污染：颗粒物（如灰尘、金属屑）混入润滑剂，加剧滚动体表面划伤。

过度润滑：过量油脂导致搅拌阻力增大，温升异常。

4.2 润滑状态对振动的影响

☆ 高频噪声与宽频能量：

润滑不足时，金属间微凸体碰撞产生宽频随机振动（频率范围通常在数 kHz 至数十 kHz）。

频谱中表现为“毛刺”状高频能量，可能伴随共振峰（如轴承外圈固有频率被激发）。

☆ 冲击信号：

润滑失效后，滚动体与滚道接触瞬间产生瞬态冲击，时域波形出现短吋尖峰脉冲。

使用包络解调分析可提取调制后的冲击特征频率（如轴承故障频率）。

☆ 振动幅值波动：

润滑状态不稳定时，振动幅值随时间呈现非周期性波动，尤其在变速或变载工况下更明显。

☆ 温度关联性：

润滑不良常伴随轴承温度升高，振动能量（特别是高频段）与温度呈正相关。

4.3 润滑不良的分类与诊断

☆ 润滑不足

诊断标志：

频谱中高频段（2~10 kHz）能量显著升高，可能伴随轴承固有频率成分。

时域信号峰度（Kurtosis）值增大，反映冲击性振动增强。

声发射（AE）信号敏感捕捉微观摩擦事件。

☆ 润滑污染

诊断标志：

振动信号中出现与污染物尺寸相关的宽频随机冲击。

油液分析可检测金属磨损颗粒或异物（如铁谱分析、PQ 指数）。

☆ 油脂老化或变质

诊断标志：

润滑剂黏度下降导致油膜承载能力减弱，振动能量向低频偏移。

伴随轴承外圈或保持架的异常振动（如保持架故障频率成分）。

4.4 检测与分析方法

☆ 高频振动分析：

使用加速度传感器（频响范围 ≥ 10 kHz）捕捉润滑不良的高频特征。

频谱分析：观察 2~20 kHz 频段的能量分布，润滑不足时能量显著升高。

☆ 包络解调技术：

提取高频冲击信号的调制频率，识别轴承故障频率（如 BPFO、BPFI、FTF）。

示例：润滑不足导致滚动体与滚道干摩擦，包络谱中可能显现轴承外圈故障频率（BPFO）。

☆ 时域指标监测：

RMS（有效值）：反映振动总体能量，但对高频润滑问题不敏感。

峰值、峰度：更有效识别瞬态冲击（润滑不良时峰度 >5 ）。

☆ 多传感器融合：

结合振动、温度、声发射信号综合判断润滑状态。

温度突升+高频振动能量增加→强烈提示润滑失效。

4.5 润滑状态优化措施

☆ 润滑剂选择与管理：

根据工况（转速、载荷、温度）选择黏度合适的润滑油或脂（如 ISO VG 32 或 NLGI 2 级脂）。

定期检测润滑剂污染度（如 ISO 4406 标准），及时更换或过滤。

☆ 润滑方式改进：

高速轴承采用油雾润滑或油气润滑，确保油膜均匀分布。

脂润滑时控制注脂量（一般填充轴承腔的 $1/3 \sim 1/2$ ）。

☆ 状态监测与维护：

建立振动基线，监测高频段能量趋势变化。

对频繁出现润滑问题的轴承，检查密封性能（防止污染物侵入）。

4.6 润滑不良与其他故障的关联

润滑不足→磨损→剥落：长期润滑不良会加速轴承表面疲劳，最终导致点蚀或剥落（振动频谱中出现清晰的故障频率）。

污染→微动磨损→松动：颗粒污染引发微动磨损，可能导致配合间隙扩大，振动中叠加松动特征（如亚谐波）。

油脂老化→保持架磨损：变质油脂增加保持架与滚动体的摩擦，可能激发保持架故障频率（FTF）。

4.7 总结

滚动轴承润滑状态是振动分析中不可忽视的“隐形健康指标”。润滑不良虽不直接表现为经典故障频率，但会通过高频噪声、随机冲击及温度异常暴露问题。通过高频振动分析、包络解调及多参数融合诊断，可提前预警润滑失效风险。维护中需结合润滑剂性能监测与振动趋势分析，实现“精准润滑”，从而延长轴承寿命并避免突发故障。

五、部件碰摩状态

5.1 定义

部件碰摩（Rubbing Contact）是指旋转机械中运动的转子（或叶轮、叶片等）与静止的壳体、密封件、隔板等固定部件之间发生非预期的接触或摩擦现象。这种接触会引发瞬态冲击、非线性振动和能量耗散，是设备异常振动和故障的常见原因之一。

☆ **理想状态：**

旋转部件与静止部件之间保持设计间隙（如气封间隙、迷宫密封间隙），无任何接触。转子动态位移始终在安全范围内，避免摩擦干扰。

☆ **碰摩发生：**

当间隙因振动、变形或装配误差被突破时，转子与静子接触，产生摩擦力、局部高温和磨损。

碰摩可能是**瞬时**（如启动/停机过程）或**持续**（如严重不对中或热变形导致间隙消失）。

5.2 碰摩的类型与振动特征

☆ **径向碰摩**

原因：转子径向位移过大（如不平衡、不对中、轴弯曲）。

振动特征：

高频振动：接触瞬间产生宽频冲击，频谱中高频段（1~10 kHz）能量显著升高。

分频与倍频：可能出现 $1/2 \times \text{RPM}$ 、 $1/3 \times \text{RPM}$ 等分频成分，或 $2 \times \text{RPM}$ 、 $3 \times \text{RPM}$ 等倍频成分（因非线性摩擦激励）。

相位突变：振动相位随摩擦位置变化而跳变，呈现不稳定性。

☆ **轴向碰摩**

原因：轴向推力异常（如推力轴承失效、热膨胀不均）。

振动特征：

轴向振动突增：频谱中轴向 $1 \times \text{RPM}$ 幅值显著升高。

冲击调制：时域波形呈现周期性冲击（与转子旋转周期相关）。

☆ **局部碰摩**

原因：转子偏心或静子局部变形（如密封圈安装倾斜）。

振动特征：

次同步振动：可能激发转子系统固有频率（如 $0.4 \times \text{RPM} \sim 0.8 \times \text{RPM}$ ）。

混沌特性：振动信号呈现非周期性波动（Lyapunov 指数分析可识别）。

5.3 碰摩的典型触发因素

☆ **间隙设计不当：**

安装间隙过小或热态膨胀未补偿。

☆ **转子动力学异常：**

不平衡、不对中、轴弯曲导致转子轨迹超出安全范围。

临界转速附近共振放大位移。

☆ **外部干扰：**

流体激振（如喘振、涡动）、基础松动或外部冲击载荷。

☆ **热变形：**

启停机过程中转子与静子的热膨胀率差异导致间隙消失。

5.4 碰摩的振动诊断方法

☆ 频谱分析

高频能量突增：2~10 kHz 频段能量显著升高（接触冲击）。

分频与谐波：频谱中出现 $1/2 \times \text{RPM}$ 、 $2 \times \text{RPM}$ 等成分（非线性摩擦激励）。

边频调制：若碰摩周期性发生，基频（如 $1 \times \text{RPM}$ ）两侧可能出现边频（如 $1 \times \text{RPM} \pm$ 固有频率）。

☆ 时域波形分析

波形削波：因摩擦阻力限制位移幅值，波形顶部或底部被“截断”（图 1）。

冲击脉冲：时域信号中周期性或随机性尖峰（对应接触瞬间）。

☆ 相位与轨迹分析

相位不稳定：振动相位随摩擦位置变化而随机波动。

轴心轨迹畸变：正常椭圆轨迹变为“8”字形或多边形（摩擦干扰导致非线性运动）。

☆ 包络解调技术

提取高频冲击信号的调制频率，识别与碰摩周期相关的特征频率（如转子旋转频率或固有频率）。

5.5 碰摩的伴随现象

☆ 温度升高：摩擦局部发热，红外热成像可定位热点。

☆ 噪声异常：高频摩擦声或周期性“刮擦”声。

☆ 磨损痕迹：目视检查可见转子或静子表面划痕、变色（需停机验证）。

5.6 碰摩的处理与预防措施

☆ 调整间隙：

按热态工况重新设计动静部件间隙（如汽轮机启停过程的热膨胀补偿）。

使用可调式密封（如蜂窝密封、刷式密封）吸收位移波动。

☆ 消除激励源：

校正转子动平衡、对中状态，避免振动幅值超标。

优化操作流程，避免在临界转速区间长时间运行。

☆ 增强监测：

安装涡流传感器实时监测转子位移，设定报警阈值。

结合振动、温度、声发射多参数综合诊断。

☆ 材料与涂层：

在易碰摩区域使用耐磨涂层（如碳化钨、陶瓷涂层）减少损伤。

静子部件采用柔性材料（如石墨密封）缓冲冲击。

5.7 碰摩的演化与后果

☆ 初期阶段：瞬时轻微碰摩，振动幅值波动，高频能量短暂升高。

☆ 持续阶段：摩擦导致局部高温→热弯曲→振动加剧→更大范围碰摩（恶性循环）。

☆ 最终失效：严重磨损、转子裂纹或静子结构损坏，引发停机事故。

5.8 总结

部件碰摩是旋转机械中典型的非线性故障，其振动特征复杂（高频冲击、分频成分、相位不稳定），需结合频谱、时域、相位及多物理场数据综合诊断。早期碰摩可通过间隙调整和振动控制修复，而持续碰摩可能导致灾难性后果。维护中需重点关注启停机过程、热态间隙变化及转子动力学稳定性，避免“以振促摩，以摩增振”的耦合失效模式。

六、电磁状态

6.1 定义

电磁状态（Electromagnetic Condition）是指与电磁力相关的设备（如电机、发电机、变压器等）中，由电磁场不均匀、电流异常或磁场失衡引起的机械振动现象。电磁状态异常会导致周期性或非周期性的电磁力波动，并通过机械结构传递为振动能量，其频率特征通常与电源频率、极数或电磁谐波直接相关。

☆ 理想电磁状态：

磁场分布均匀，三相电流平衡，气隙对称（电机类设备）。

电磁力幅值恒定且方向对称，不会产生交变的机械激振力。

☆ 电磁异常状态：

磁场不对称（如转子偏心、定子绕组短路）。

电流不平衡（如电源电压波动、缺相运行）。

谐波干扰（如变频器输出的高频谐波电流）。

这些异常会生成周期性变化的电磁力，引发与电磁参数相关的特征振动。

6.2 电磁振动的主要类型与特征

☆ 电源频率相关振动

典型频率：

2×电源频率（2×f）：如 50 Hz 电网供电的电机，振动主频为 100 Hz（因电磁力脉动频率为 2 倍电源频率）。

极通过频率（Pole Pass Frequency）： $f_{pp} = N_{poles} \times \text{转差率} \times f$ $f_{pp} = 2N_{poles} \times \text{转差率} \times f$ ，常见于感应电机转子偏心故障。

振动方向：径向振动为主（电磁力垂直于转子轴线）。

频谱特征：频谱中 2×f 成分突出，可能伴随边频带（如±转频）。

☆ 气隙偏心振动

静态偏心：定子与转子轴线固定偏移（如装配误差）。

动态偏心：转子轴线随旋转周期性偏移（如轴弯曲、轴承磨损）。

振动特征：

振动频率为电源频率（ff）及其谐波（如 2f, 3f, 2f, 3f）。

动态偏心可能激发转频（RPM）与电源频率的组合频率（如 $f \pm \text{RPM}$ $f \pm \text{RPM}$ ）。

☆ 转子断条或绕组故障

感应电机转子断条：

振动频谱中，电源频率两侧出现边频（ $f \pm 2sff \pm 2sf$ ，ss 为转差率）。

伴随电流频谱中 $(1 \pm 2s)f(1 \pm 2s)f$ 成分（可通过振动与电流分析联合诊断）。

定子绕组短路：

振动能量集中在奇数倍电源频率（如 3f、5f），并可能伴随局部过热。

☆ 变频驱动（VFD）引起的振动

高频谐波振动：变频器输出的高频开关频率（如 2~20 kHz）通过电磁力传递至机械结构。

低频拍振：载波频率与机械固有频率接近时，可能引发共振。

6.3 电磁振动的诊断方法

☆ 频谱分析：

识别电源频率倍频（ $2f$ 、 $3f$ ）、极通过频率或组合频率（如 $f \pm \text{RPM}$ 、 $f \pm \text{RPM}$ ）。
对比空载与负载工况的频谱差异（电磁振动幅值常随负载增加而升高）。

☆ 电流与振动关联分析：

同步采集电流和振动信号，分析频率成分的相关性（如定子绕组故障时，电流谐波与振动谐波同步出现）。

☆ 相位分析：

电磁振动相位在不同测点间可能呈现特定规律（如定子偏心时，振动相位与转子位置相关）。

☆ 气隙检测：

使用塞尺或电涡流传感器测量定转子气隙均匀性，辅助判断静态/动态偏心。

6.4 电磁振动的典型故障源

故障类型	振动频率特征	伴随现象
转子断条	$f \pm 2sf$ (边频)	电流波动、效率下降
定子绕组短路	$3f, 5f$ (奇次谐波)	局部过热、三相电流不平衡
气隙偏心	$f, 2f, f \pm \text{RPM}$	电磁噪声、转矩脉动
电压不平衡	$2f$ 幅值升高	温升异常、振动幅值随负载变化
变频器谐波	高频开关频率及其边带	高频噪声、轴承电流导致电蚀

6.5 电磁振动与机械振动的区分

特征	电磁振动	机械振动
频率来源	电源频率、极数、谐波	转速、部件固有频率、故障频率
负载相关性	幅值随负载增加显著升高	可能受负载影响较小
相位稳定性	相位与电源同步，相对稳定	相位可能随机波动（如碰摩）
消除方法	调整电气参数（如平衡电压）	机械校正（平衡、对中）

6.6 解决电磁振动的措施

☆ 电气参数优化：

平衡三相电压/电流，减少谐波（如加装滤波器）。

调整变频器载波频率，避开机械共振点。

☆ 机械校正：

修复转子偏心（动平衡、调整轴承间隙）。

检查定子绕组绝缘，更换损坏线圈。

☆ 气隙调整：

重新对中定转子，确保气隙均匀（静态偏心）。

更换磨损轴承，消除动态偏心。

☆ 状态监测升级：

采用振动+电流+温度多参数融合监测系统。

定期进行电机电流特征分析（MCSA）。

6.7 总结

电磁状态是振动分析中连接电气与机械系统的关键桥梁。其振动特征（如 $2\times$ 电源频率、边频调制）具有明确的电气属性，需结合电流分析和机械诊断综合判断。通过频谱锁定电磁相关频率，可快速定位转子断条、绕组短路或气隙偏心等故障。维护中需注重电气与机械的协同优化，避免“以电激振，以振损电”的恶性循环，保障设备高效可靠运行。

七、速度均方根

7.1 定义

速度均方根（Velocity RMS, Root Mean Square） 是衡量振动能量强度的关键参数，表示振动速度信号的有效值（即统计意义上的平均能量）。它是设备状态监测和故障诊断中最常用的振动评价指标之一，尤其在旋转机械的中频段（如轴承、齿轮故障）分析中具有重要价值。

7.2 速度均方根（VRMS）的定义与计算

☆ **数学表达式：**

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

$v(t)$: 瞬时振动速度信号（单位：mm/s 或 in/s）；

T : 采样时间窗口（需覆盖多个振动周期）。

☆ **物理意义：**

反映振动能量的时间平均强度，与设备疲劳损伤直接相关（振动能量越大，部件寿命损耗越快）。

相比峰值（Peak）或峰峰值（Peak-to-Peak），RMS 值更稳定，受瞬态冲击干扰较小。

7.3 速度 RMS 的应用场景

☆ **状态监测基线：**

通过长期监测 VRMS 的趋势变化，判断设备健康状态（如轴承磨损、不平衡加剧）。

ISO 10816 等标准以速度 RMS 为基准，划分振动等级（如 $\leq 1.8 \text{ mm/s}$ 为“良好”， $\geq 4.5 \text{ mm/s}$ 为“危险”）。

☆ **故障严重度评估：**

低频故障（如不对中、不平衡）：VRMS 值随转速升高显著增大。

中高频故障（如轴承早期损伤）：VRMS 可能变化较小，需结合加速度或包络分析。

☆ **振动标准合规性：**

工业设备验收或维护中，VRMS 常作为是否符合振动限值的直接判据（例如风机、泵的振动验收标准）。

7.4 速度 RMS 的优缺点

优点	局限性
反映长期振动能量，稳定性高	无法区分振动频率成分
与设备疲劳寿命相关性好	对瞬态冲击（如松动）不敏感
国际标准广泛采用（如ISO 10816）	需结合频谱分析定位故障类型

7.5 与其他振动参数的关系

☆ 与加速度 RMS 对比：

速度 RMS：主攻中频段（10~1000 Hz），适合监测轴承、齿轮等中速部件。

加速度 RMS：主攻高频段（>1 kHz），适合捕捉冲击性故障（如早期点蚀）。

☆ 与位移峰峰值对比：

位移峰峰值：反映低频振动幅值（如轴弯曲、临界转速共振）。

速度 RMS：更关注能量累积效应，适用于长期趋势分析。

7.6 典型应用示例

☆ 电机振动评价（ISO 10816-3 标准）：

功率≤15 kW：VRMS ≤1.8 mm/s（A 级，优秀）

功率>15 kW：VRMS ≤2.8 mm/s（A 级）

VRMS >7.1 mm/s（D 级，需立即停机检修）。

☆ 轴承寿命预测：

经验公式：轴承寿命 $\propto (C/VRMS)^3$ （C 为设计常数）。

VRMS 值翻倍→理论寿命缩短至 1/8。

7.7 如何解读速度 RMS 值？

☆ 绝对值判断：

参考设备制造商标准或 ISO 10816/API 610 等行业规范。

示例：某离心泵的振动限值为 4.5 mm/s（ISO 10816-3 Class II）。

☆ 相对值趋势：

平缓上升：可能为磨损、润滑劣化等渐进性故障。

突变升高：提示突发故障（如部件脱落、严重不对中）。

☆ 频段关联性：

若总 VRMS 正常，但某频段（如轴承故障频率）振动能量突增，仍需进一步诊断。

7.8 总结

速度均方根（VRMS）是振动分析中的“能量标尺”，通过量化振动的平均能量，为设备健康状态提供直观判断依据。其核心价值在于：

标准化评价：依托国际标准，实现跨设备、跨行业的振动水平对比；

趋势预警：通过长期监测，捕捉早期故障的渐进性劣化信号；

维护决策：结合阈值设定，指导停机检修或更换部件。

实际应用中，需将速度 RMS 与频谱分析、时域波形、相位诊断等手段结合，形成多维故障诊断体系，避免单一参数的误判。

八、平稳冲击烈度

8.1 定义

平稳冲击烈度（Steady-State Shock Severity）是指设备在持续运行（稳态）过程中，因周期性或重复性冲击事件（如齿轮啮合、轴承滚动体撞击缺陷等）引起的冲击能量的量化评估参数。它用于衡量在稳定工况下，冲击事件对机械系统的累积损伤风险或故障严重程度。

☆ 平稳（Steady-State）：

指设备处于稳定运行状态（转速、负载恒定），冲击事件的发生频率和强度在统计上保持相对稳定，而非瞬态（如启动、停机）或随机突发冲击。

例如：齿轮箱中因齿面点蚀导致的周期性冲击。

☆ 冲击烈度（Shock Severity）：

表征单次或多次冲击事件对机械系统的破坏能力，通常基于冲击加速度、能量或持续时间等参数综合计算。

平稳冲击烈度强调在稳态运行中，重复冲击的长期累积效应（如疲劳裂纹扩展、轴承剥落）。

8.2 测量与计算方法

☆ 时域参数：

峰值加速度（Peak g）：单次冲击的最大加速度值，反映瞬时冲击强度。

冲击能量（Shock Energy）：通过加速度信号积分计算，反映单次冲击的总能量。

☆ 频域分析：

冲击响应谱（Shock Response Spectrum, SRS）：分析冲击信号在不同频率下对结构的最大响应，用于评估系统共振风险。

☆ 统计指标：

冲击烈度指数（Shock Severity Index, SSI）：

$$SSI = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N (A_i^2 \cdot D_i)$$

A_i ：第 i 次冲击的峰值加速度；

D_i ：冲击持续时间；

T ：总监测时间。

8.3 应用场景

☆ 齿轮故障诊断：

齿面剥落或断齿引发周期性冲击，平稳冲击烈度升高提示故障恶化。

频谱中齿轮啮合频率及其边频带幅值增大，结合时域冲击烈度指标可量化损伤程度。

☆ 轴承健康监测：

滚动体经过缺陷（如剥落坑）时产生重复冲击，平稳冲击烈度与缺陷尺寸正相关。

包络解调技术提取冲击特征频率（如 BPFO、BPFI），烈度值用于评估剩余寿命。

☆ 往复机械评估：

内燃机活塞敲击、压缩机阀片撞击等稳态冲击，烈度指标反映机械磨损或间隙异常。

8.4 与其他振动参数的关系

参数	描述	与平稳冲击烈度的关联
加速度峰值	单次冲击的最大瞬时强度	直接影响冲击烈度的瞬时破坏力评估
速度RMS	振动能量平均水平	平稳冲击烈度侧重冲击事件，RMS侧重整体
峭度 (Kurtosis)	信号峰度的统计量，反映冲击信号的尖锐程度	峭度高通常伴随冲击烈度升高
包络能量	高频冲击信号的调制能量	用于计算冲击烈度的频域分量

8.5 诊断与维护策略

☆ 阈值设定：

根据历史数据或行业标准（如 ISO 13373-3）设定冲击烈度报警阈值，例如：

正常： $SSI \leq 5$

预警： $5 < SSI \leq 10$

危险： $SSI > 10$

☆ 趋势分析：

监测冲击烈度的长期趋势，若持续上升（如每月增长 20%），提示故障进展需干预。

☆ 根因定位：

结合频谱分析确定冲击来源（如轴承外圈缺陷频率），指导针对性维修。

8.6 案例分析：风机齿轮箱冲击烈度升高

现象：稳态运行时齿轮箱振动加速度信号中，啮合频率（1 kHz）处出现周期性冲击，SSI 从 3 升至 8。

诊断：

包络谱显示边频间隔为轴频（30 Hz），提示齿轮偏心或齿面损伤。

拆检发现主动齿轮齿根裂纹，与冲击烈度升高吻合。

措施：

更换齿轮，调整啮合间隙后 SSI 恢复至 2.5。

8.7 总结

平稳冲击烈度是评估稳态运行中重复冲击事件对机械系统损伤风险的关键指标。通过量化冲击强度、频率及能量，它能够：

早期预警：在故障萌芽期捕捉冲击能量变化；

损伤量化：结合历史数据预测部件剩余寿命；

维护优化：指导精准维修（如更换特定轴承或齿轮）。

实际应用中需综合时域冲击参数、频域特征及工况信息，避免单一指标误判，同时关注冲击烈度与温度、噪声的多维关联。

九、优化峭度

9.1 定义

在振动分析中，**优化峭度**（Kurtosis Optimization）是指通过调整信号处理参数（如滤波频带、时间窗长度或包络解调方法），使峭度（Kurtosis）这一统计指标能够更敏感地捕捉机械故障（尤其是早期冲击性损伤）的特征，从而提高故障检测的准确性和可靠性。峭度反映信号分布的“尖峰厚尾”特性，优化其计算方式可显著增强对瞬态冲击的识别能力。

9.2 峭度的定义与意义

☆ 数学公式：

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$$

x_i ：振动信号样本；

\bar{x} ：信号均值；

σ ：标准差；

正态分布的峭度： $K=3$ ； $K>3$ 表示信号中存在显著冲击成分。

☆ 物理意义：

高峭度（如 $K>5$ ）：振动信号中存在瞬态冲击（如轴承剥落、齿轮断齿）。

低峭度（如 $K\approx 3$ ）：信号接近高斯分布，无明显冲击特征。

9.3 为何需要优化峭度？

☆ 原始峭度的局限性：

噪声干扰：背景噪声会降低峭度对真实冲击的敏感性。

频带无关性：全频段计算可能掩盖特定频段的故障特征。

工况依赖性：负载或转速变化可能导致峭度值波动，需动态调整。

☆ 优化的目标：

增强峭度对早期故障的灵敏性（如微弱冲击识别）；

提高峭度对噪声的鲁棒性（减少误报）；

针对不同故障类型自适应调整频带（如轴承故障高频段优化）。

9.4 优化峭度的常用方法

☆ 频带选择优化

原理：冲击信号能量集中在特定频段（如轴承故障的高频共振区），通过带通滤波提取目标频段信号，再计算峭度。

步骤：

分析振动信号的频谱，确定故障可能激发的共振频带（如 5~20 kHz）；

设计带通滤波器，保留目标频段；

计算滤波后信号的峭度（称为**谱峭度**，Spectral Kurtosis）。

优势：抑制无关频段噪声，突出故障冲击特征。

工具：快速谱峭度（Fast Kurtogram）算法可自动选择最优频带。

☆ 包络解调优化

原理：对高频冲击信号进行包络解调，提取低频调制成分（如轴承故障特征频率），再计算包络信号的峭度。

步骤：

对原始信号进行希尔伯特变换，提取包络；

对包络信号计算峭度（称为**包络峭度**）；

结合包络谱分析，验证故障频率。

优势：分离冲击事件的周期性特征，提升峭度与故障的关联性。

☆ 时窗分割优化

原理：根据冲击事件的周期性调整时间窗口长度，避免信号平均化导致峭度值降低。

步骤：

确定冲击周期（如轴承故障间隔时间）；

将信号分割为多个包含完整冲击周期的子段；

对各子段计算峭度，取最大值或均值作为优化指标。

优势：避免非冲击段信号稀释峭度值。

☆ 多指标融合优化

原理：结合峭度与其他指标（如峰值、脉冲因子、RMS），构建综合评估模型。

示例：

$$\text{优化指标} = K \times \text{Peak} \times \frac{1}{\text{RMS}}$$

优势：综合冲击强度、能量分布与噪声水平，减少单一指标误判。

9.5 优化峭度的实际应用

☆ 案例 1：轴承早期点蚀检测

问题：某风机轴承振动信号的原始峭度 $K=4.2$ ，未超阈值，但存在间歇性异响。

优化步骤：

使用快速谱峭度确定最优频带（12~18 kHz）；

计算该频带滤波后的峭度 $K=8.5$ ；

包络谱显示外圈故障频率（BPFO），确认早期点蚀。

结果：优化后峭度灵敏度提升，提前 2 周预警故障。

☆ 案例 2：齿轮箱断齿诊断

问题：齿轮箱振动信号噪声大，原始峭度 $K=3.8$ ，难以判断故障。

优化步骤：

分割信号为啮合周期长度的子段；

计算各子段峭度，最大值 $K=7.1$ ；

时域波形显示周期性冲击，对应断齿位置。

结果：通过时窗优化，有效抑制噪声干扰，精准定位断齿。

9.6 优化峭度的工程意义

早期故障预警：优化后的峭度可检测到传统 RMS 或峰值难以识别的微弱冲击（如轴承剥落初期）。

减少误报率：通过频带/时窗选择，避免环境噪声或正常机械冲击的干扰。

自适应诊断：针对不同设备类型（电机、齿轮箱、泵）动态调整优化策略，提升泛用性。

9.7 总结

优化峭度是通过信号处理技术增强峭度指标的故障敏感性，其核心在于**聚焦冲击特征所在的频带、时段或调制形式**。实际应用中需结合设备特性与故障机理，灵活选择频带滤波、包络解调或多指标融合方法，使峭度从“统计学参数”升级为“工程诊断利器”。维护人员可通过以下步骤实践：

数据采集：高采样率获取振动原始信号（建议 ≥ 50 kHz）；

频带探索：利用谱峭度工具定位故障共振频段；

算法优化：根据故障类型选择包络、时窗分割或多指标融合；

阈值设定：基于历史数据或行业标准制定优化峭度报警规则。

通过优化峭度，可在故障萌芽期捕捉“隐性冲击信号”，为预测性维护争取关键时间窗口。

十、1K~10K Hz 均方根

10.1 定义

在振动分析中，**1K~10K Hz 均方根（RMS）**是指对振动信号在 **1,000 Hz 至 10,000 Hz 频段内**的有效值（Root Mean Square）进行计算和评估。这一参数主要用于量化设备在**高频振动能量**的强度，特别适用于检测与冲击性、高频振动相关的机械故障（如轴承早期损伤、齿轮点蚀、润滑不良等）。以下是其核心意义与应用解析：

10.2. 高频振动能量的意义

☆ 故障特征关联：

1K~10K Hz 频段常包含以下故障的特征频率或共振频带：

滚动轴承：早期剥落、裂纹等缺陷引发的冲击高频共振（如轴承外圈或滚动体的固有频率）。

齿轮箱：齿面点蚀、断齿等局部损伤导致的啮合高频谐波或边频带。

润滑不良：金属间干摩擦产生的高频随机噪声（宽频能量）。

☆ 早期故障敏感：

高频振动能量往往在故障初期（如微小剥落）即显著升高，比低频振动参数（如速度 RMS）更早预警。

10.3 1K~10K Hz 均方根的计算方法

☆ 信号预处理：

对原始振动信号（通常为加速度信号）进行**带通滤波**（1K~10K Hz），滤除低频噪声与超高频干扰。

滤波后信号保留目标频段的振动成分。

☆ RMS 计算公式：

$$RMS_{1K-10K} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

x_i ：滤波后信号的第 i 个采样点；

N ：采样点数。

单位：通常为加速度单位（如 m/s^2 或 g ）

10.4. 应用场景与诊断价值

☆ 轴承早期损伤检测

现象：轴承微小剥落或裂纹引发周期性冲击，激发轴承元件固有频率（如 **2~8 kHz**）。

诊断：

1K~10K Hz 的 RMS 值突增，可能早于传统速度 RMS（低频段）的异常。

结合包络解调技术，可提取轴承故障特征频率（如 **BPFO、BPF1**）。

☆ 齿轮局部缺陷识别

现象：齿轮齿面点蚀或断齿导致啮合高频谐波（如啮合频率的倍频进入 1K~10K Hz）。

诊断：高频 RMS 值随负载增加而显著升高，频谱中可见边频带（啮合频率±轴频）。

☆ **润滑状态监测**

现象：润滑不良时，滚动体与滚道直接接触产生宽频随机振动（1K~10K Hz 能量扩散）。

诊断：高频 RMS 持续升高，同时伴随温度上升，频谱呈现“毛刺”状高频噪声。

10.5 高频 RMS 的优缺点

优点	局限性
对早期冲击性故障敏感	易受环境噪声干扰（需滤波优化）
可量化高频能量累积趋势	无法直接定位故障类型（需频谱分析辅助）
适用于滚动轴承、齿轮等高频故障	需高采样率传感器（≥20 kHz）

10.6 高频 RMS 与其他参数的对比

参数	频段	适用场景
速度RMS（整体）	10~1,000 Hz	不平衡、不对中、轴弯曲等低频故障
加速度RMS（高频）	1K~10K Hz	轴承损伤、齿轮点蚀、润滑不良
包络解调能量	调制低频	提取冲击周期性特征（如轴承故障频率）

10.7. 实际应用示例

☆ **案例：某风机轴承振动监测**

背景：常规速度 RMS（10~1,000 Hz）为 2.1 mm/s（正常），但设备有异响。

分析：

计算 1K~10K Hz 加速度 RMS，发现值从 0.5 g 升至 3.2 g（超标）。

包络谱显示轴承外圈故障频率（BPFO），确认早期剥落。

处理：更换轴承后，高频 RMS 恢复至 0.6 g，异响消失。

10.8 工程建议

传感器选择：

使用宽频加速度传感器（频响范围≥10 kHz），确保高频信号保真。

信号处理优化：

结合带通滤波与抗混叠处理，减少噪声干扰。

采用时域同步平均（针对齿轮）或峰值保持算法（针对随机冲击）提升信噪比。

报警阈值设定：

基于历史数据或行业标准（如 ISO 13373-3）设定动态阈值。

示例：某设备 1K~10K Hz 加速度 RMS 基线为 0.8 g，设定报警阈值为基线值的 2 倍（1.6 g）。

多参数融合诊断：

结合高频 RMS、峭度（Kurtosis）、包络谱等指标，提高诊断可靠性。

10.9 总结

1K~10K Hz 均方根是振动分析中聚焦高频故障能量的核心参数，通过量化冲击性振动的有效值，为轴承、齿轮等部件的早期损伤提供敏感预警。其价值在于：

早期性：在传统低频参数异常前捕捉故障信号；

针对性：直击高频机械缺陷（如剥落、点蚀）；

量化性：为维护决策提供可追踪的能量趋势数据。

实际应用中需结合频谱分析、包络解调等技术，避免单一参数误判，同时关注传感器性能与信号处理方法的优化，确保高频振动信息的准确提取。

十一、 10K~25.6K Hz 均方根

11.1 定义

在振动分析中，**10K~25.6K Hz 均方根（RMS）**是指对振动信号在 **10,000 Hz 至 25,600 Hz（25.6 kHz）频段内**的有效值（Root Mean Square）进行计算，用于量化设备在**超高频段**的振动能量强度。这一参数通常针对**极早期故障检测**或**特殊高频现象**（如电蚀、微动磨损、超声波噪声）的分析，具有以下核心意义与应用场景：

11.2 10K~25.6K Hz 频段的物理意义

☆ 超高频振动来源：

微观冲击：轴承或齿轮的微米级缺陷（如早期剥落、微裂纹）引发的瞬态高频共振。

电蚀现象：电机或变频驱动设备中轴承电流放电导致的电火花冲击（常见于高频开关设备）。

摩擦噪声：润滑失效时金属间高频摩擦或气蚀现象（如液压泵空化）。

超声波信号：结构共振或高频电磁干扰（如变压器铁芯松动）。

☆ 频段特殊性：

远超常规机械故障频率：普通轴承故障频率、齿轮啮合频率通常低于 10 kHz，此频段更多反映高频共振或非机械源噪声。

传感器与采样要求：需高频响传感器（≥50 kHz）及高采样率（≥100 kHz）确保信号保真。

11.3 10K~25.6K Hz 均方根的计算方法

☆ 信号采集：

使用高频加速度传感器（如压电式，频响范围 10 Hz~30 kHz）。

采样率≥51.2 kHz（满足 Nyquist 定理，覆盖 25.6 kHz 上限）。

☆ 信号处理：

带通滤波：保留 10K~25.6K Hz 成分，滤除低频与超高频噪声。

RMS 计算：

$$\text{RMS}_{10K-25.6K} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

x_i ：滤波后信号的第 i 个采样点；

N ：采样点数（需覆盖多个冲击周期）。

单位：通常为加速度单位（m/s² 或 g）。

11.4 典型应用场景

☆ 轴承电蚀（Electrical Erosion）检测

现象：变频电机中高频轴电流通过轴承放电，造成滚道表面“搓板状”电蚀纹。

振动特征：

10K~25.6K Hz 的 RMS 值显著升高，伴随随机宽频冲击。

电流分析可同步发现轴电流异常。

☆ 齿轮微点蚀（Micropitting）监测

现象：齿面微观疲劳裂纹产生的超高频振动能量。

诊断：

高频 RMS 值随负载增加呈指数增长，频谱中可见扩散的宽频噪声。

☆ 润滑膜破裂检测

现象：极薄油膜破裂时金属接触瞬间的高频摩擦噪声。

特征：

10K~25.6K Hz 的 RMS 值突增，与温度骤升同步。

☆ 超声波泄漏或空化

现象：管道泄漏或液压泵空化产生的超声波振动（20K~25K Hz）。

诊断：

高频 RMS 结合声发射（AE）信号可精确定位泄漏点。

11.5 高频 RMS 的优缺点

优点	局限性
对极早期故障敏感（微米级缺陷）	需专用高频传感器与高采样设备
可捕捉非机械源故障（如电蚀）	易受电磁干扰或环境噪声影响
适用于特殊工况（如高频变频器）	数据量大，分析复杂度高

11.6 与其他参数的对比

参数	频段	适用场景
速度RMS（整体）	10~1,000 Hz	常规机械故障（不平衡、不对中）
1K~10K Hz RMS	1K~10K Hz	轴承/齿轮早期损伤、润滑不良
10K~25.6K Hz RMS	10K~25.6K Hz	电蚀、微点蚀、超声波现象

11.7 工程实践建议

☆ 传感器选型：

选择频响范围覆盖 25.6 kHz 的加速度传感器（如 PCB 352C33）。

确保安装刚度（如磁座或粘接剂）避免共振干扰。

☆ 抗干扰措施：

屏蔽电缆减少电磁干扰（尤其变频器附近）。

接地优化，避免共模噪声影响高频信号。

☆ 信号处理优化：

小波分析：分解高频信号，提取瞬态冲击特征。

概率密度函数（PDF）：区分随机噪声与故障冲击。

☆ 阈值设定：

建立基线：正常工况下 10K~25.6K Hz RMS 值（如 0.2~0.5 g）。

报警规则：连续 3 次测量值超基线 3 倍→触发预警。

11.8 实际案例

案例：某变频电机轴承电蚀诊断

背景：电机振动速度 RMS 正常（1.5 mm/s），但轴承异响。

分析：

10K~25.6K Hz 加速度 RMS 值达 4.8 g（基线 0.3 g）。

电流检测发现轴电流超限，包络谱无轴承故障频率。

拆检轴承发现滚道电蚀纹。

措施：加装绝缘轴承与轴接地装置，高频 RMS 恢复至 0.4 g。

11.9 总结

10K~25.6K Hz 均方根是振动分析中针对超高频能量监测的“精密探针”，其核心价值在于：

超前预警：在微观缺陷尚未引发低频振动异常时捕捉故障信号；

特殊故障覆盖：诊断电蚀、微点蚀等传统方法难以察觉的问题；

多学科交叉：连接机械振动与电气、超声波领域的故障特征。

实际应用中需权衡成本与收益，对高频振动监测的必要设备（传感器、采集系统）进行投资，并配合信号处理算法（如小波、包络分析）与多参数融合（电流、温度），方能在复杂工况中精准锁定故障根源。