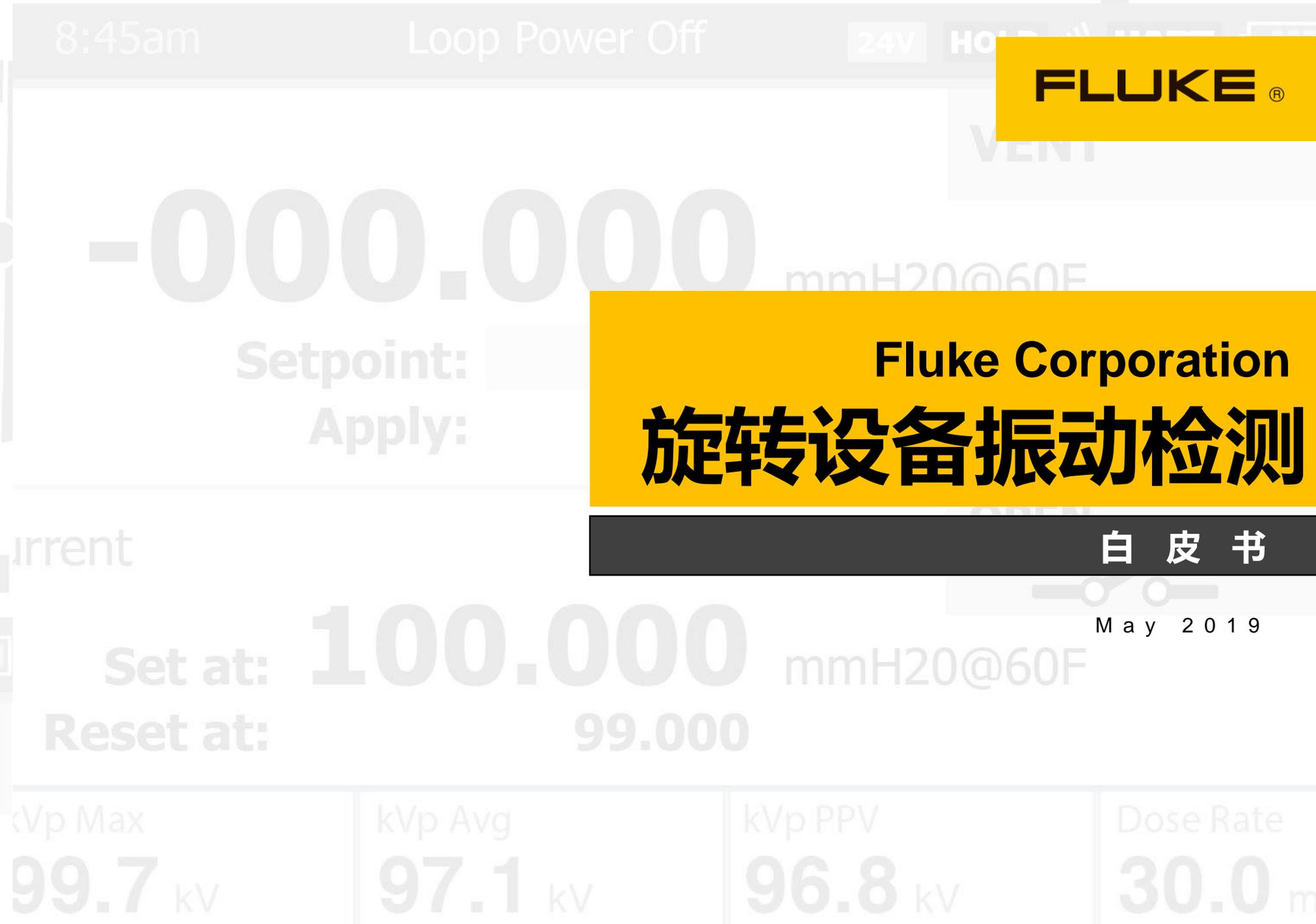


FLUKE®

Fluke Corporation
旋转设备振动检测

白皮书

May 2019



- 维护概念的进阶：大数据转变为高效的企业决策



- 预防性维护 Preventive Maintenance
 - 为了消除设备失效和非计划性生产中断的原因而策划的定期活动（基于时间的周期性检验和检修），它是制造过程设计的一项输出
- 预防性维护 Predictive Maintenance (PdM)
 - 通过运用各种手段进行数据和信号的间断或连续采集，分析和判断设备的劣化趋势、故障部位、原因并预测变化发展、提出防范措施，防止和控制可能的故障出现

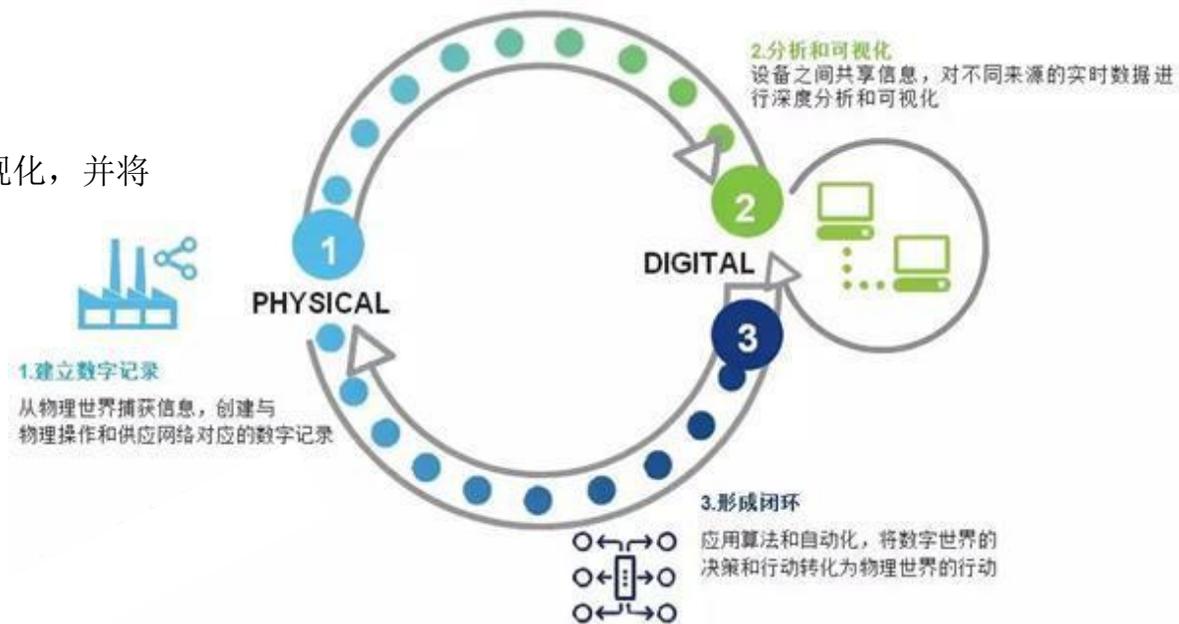
要义：

1. 形成闭环

能够完成机器到机器（M2M）机器到人（M2H）的交互

2. 数据记录和分析可视化

在对信号和数据进行处理、分析和可视化，并将分析结果转换为行为



预测性维护策略的核心要素

- 构建资产模块
- 技术投资
- 关注操作流程
- • 我们的资产需要多高的可靠度？我们的可用性目标是什么？
- • 我们的技术人员是否具备完成工作的技能？
- • 我们是否在正确的时间、正确的地点提供合适的备件？
- • 我们的流程是否有详细记录，是否可访问且有用？
- • 我们是否有适合工作的工具？
- • 我们如何确定何时更换设备而不是维修？
- • 我们已经拥有哪些未被有效使用的数据？
- • 我们是否在生产系统中确定了关键资产？
- • 是否有一些关键资产可以从预测性维护试点中受益？
- • 整个企业的预测性维护价值是多少？



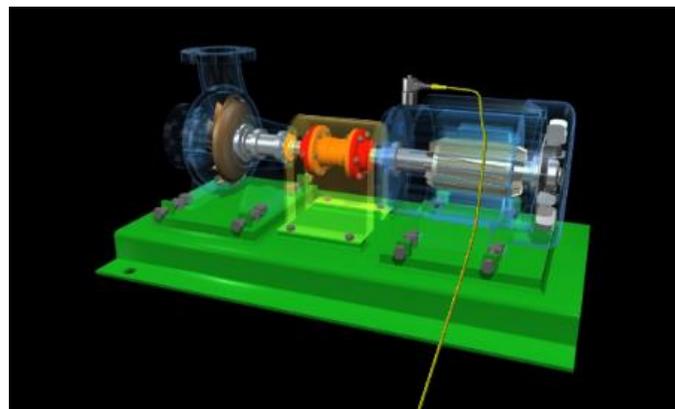
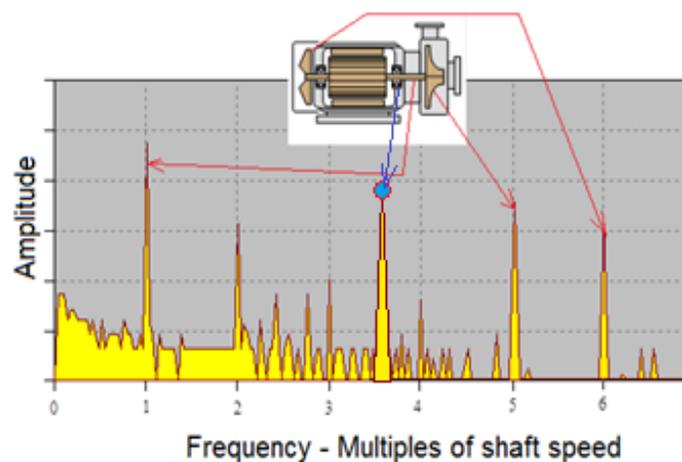
预测性维护利益

- 预测性维护最大的价值是基于剩余使用寿命（RUL）的预测，结合数据和运营，把不确定的信息确定化，节约成本、提高效率
- 美国联邦能源管理计划 (FEMP) 所进行的研究估计，一个正常发挥作用的预测性维护计划与预防性维护相比，可提供 30 % 到 40 % 的节约。
 - • 降低材料成本（5%-10%的运营和MRO材料支出）
 - • 降低库存运输成本
 - • 提高设备正常运行时间和可用性（10%-20%）
 - • 减少维护计划时间（20%-50%）
 - • 降低总体维护成本（5%-10%）
 - • 改善健康安全和环境三位一体的管理体系
 - • 减少用于无用信息的提取和验证的时间
 - • 花费更多时间在数据驱动的问题解决上
 - • 明确计划、绩效和问责制的联系
 - • 对决定决策所有权的数据和信息更有信心



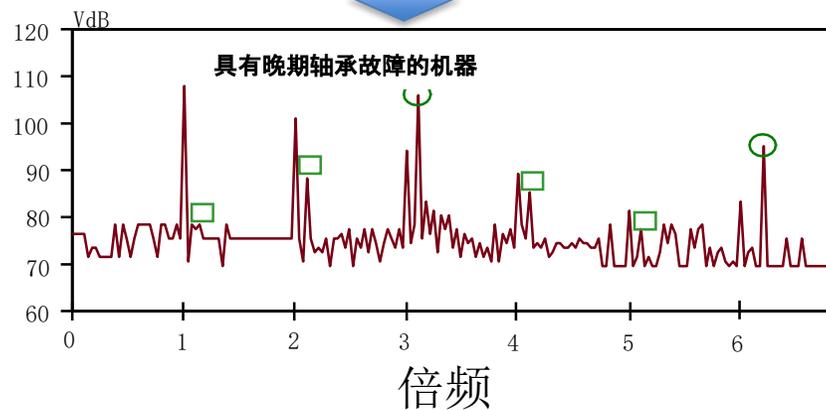
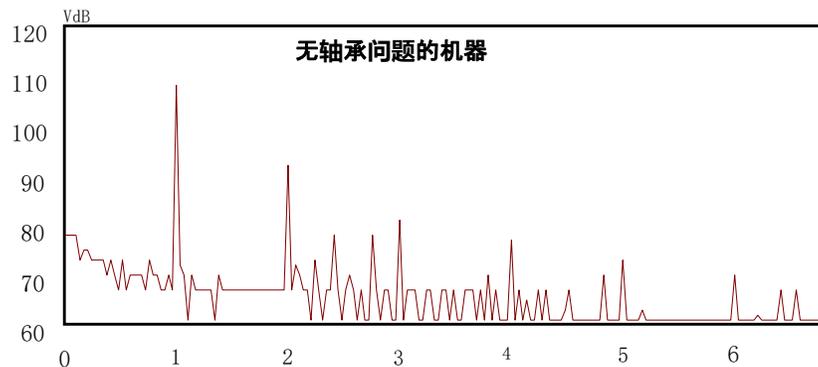
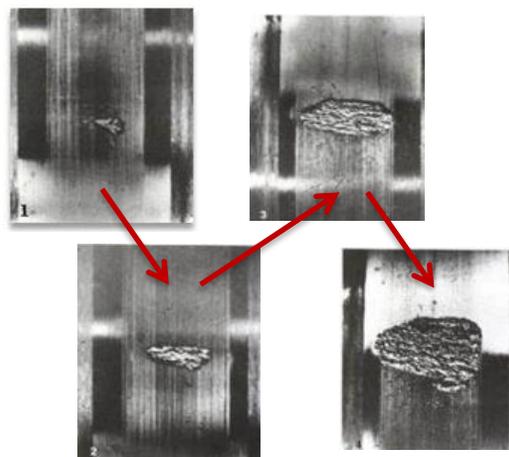
什么是机械振动?

- 振动是某点、物体或物体的一部分围绕固定参考或支撑物、位置所发生的振荡
- 有些类型的振动是设计使然，而大多数则是其他故障的征兆，例如轴承状态、轴不对中、松动或不平衡状态。



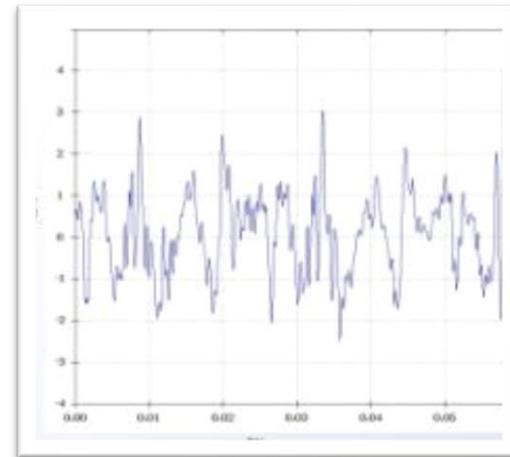
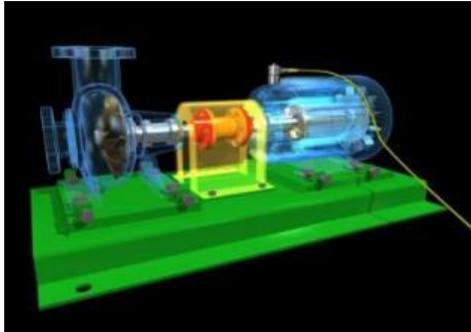
振动会引起哪些问题？

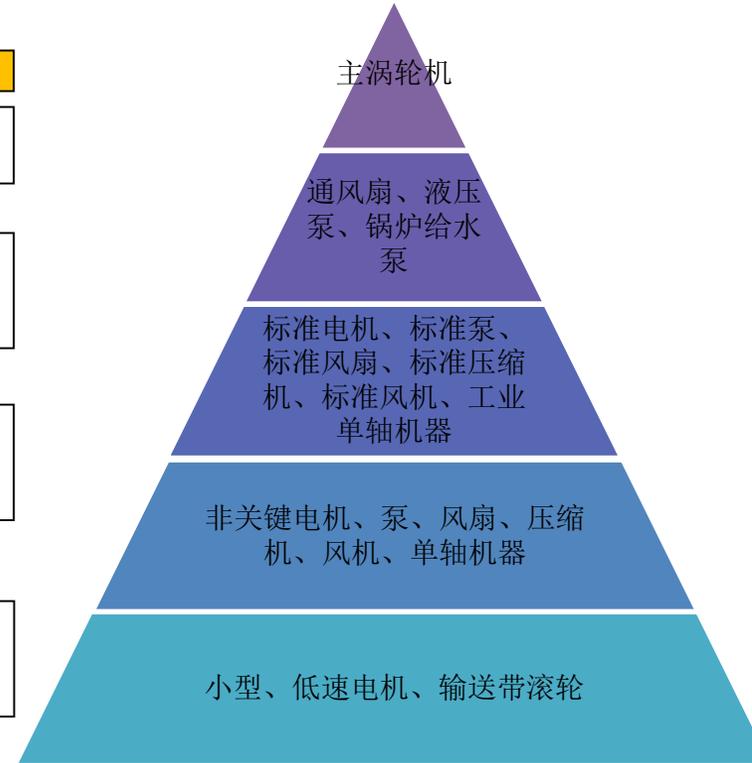
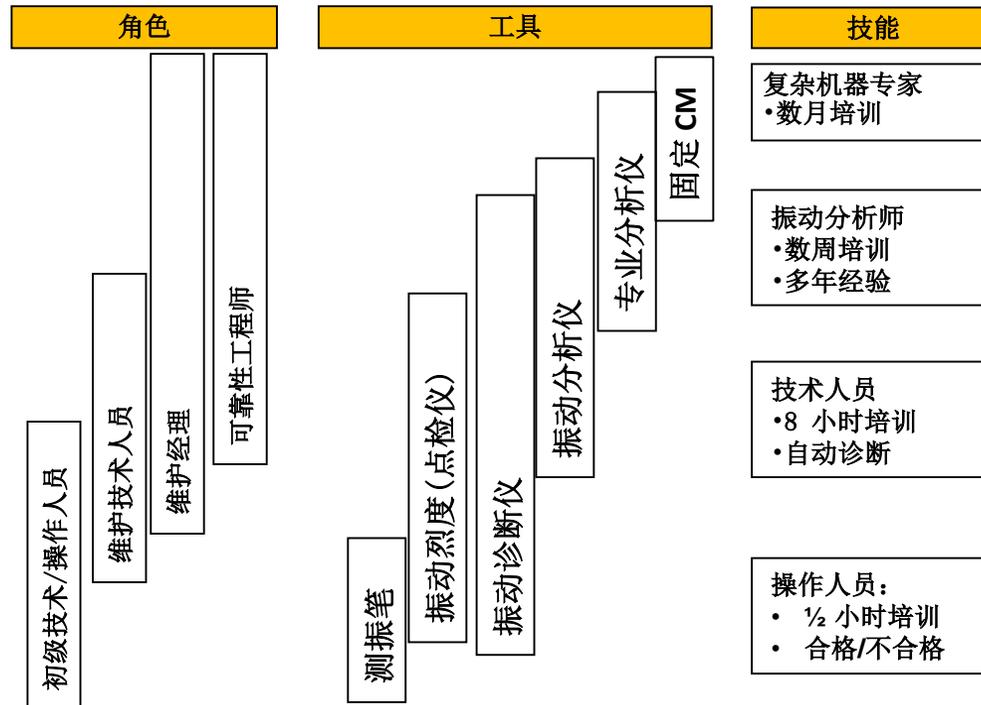
- 设备故障
- 计划外停工
- 安全问题
- 经济损失



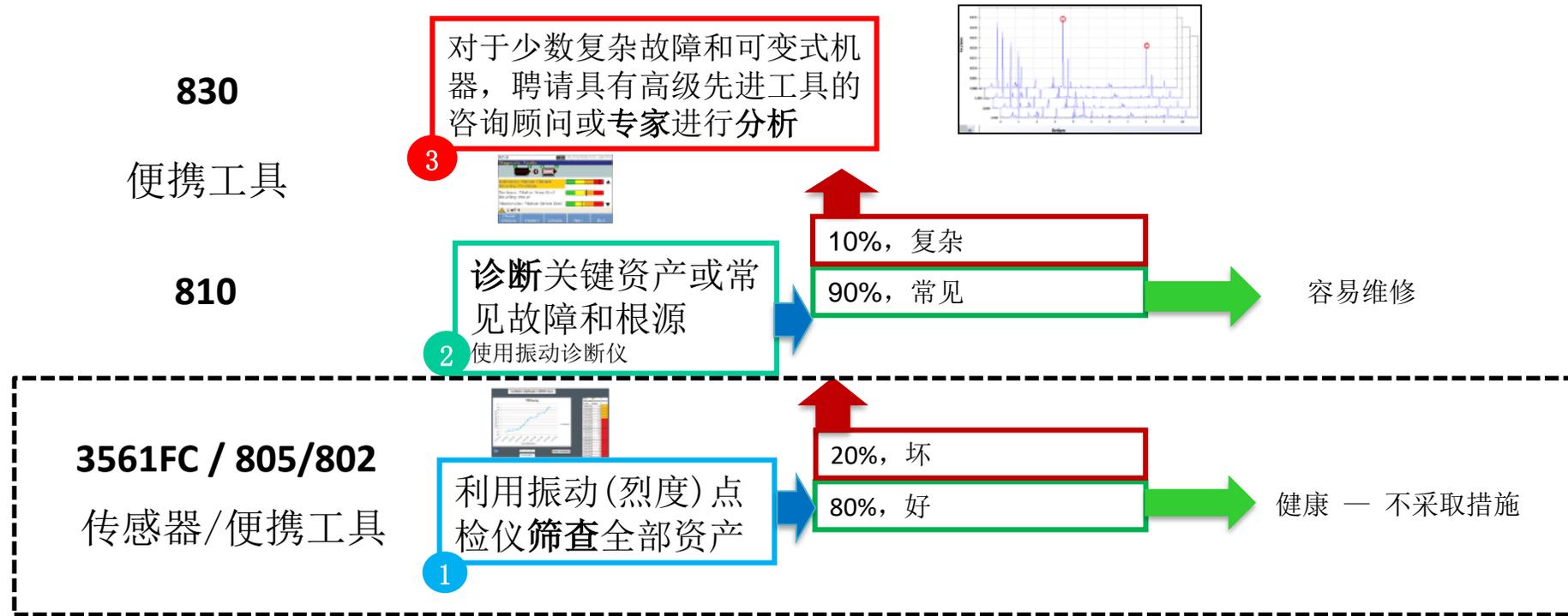
振动测试的工作原理

- 所有的旋转设备都产生一种独特的振动信号或“特征”。
- 通常可利用变送器捕获这些独特的信号，描绘信号幅值(y轴)随时间(x轴)的变化。这种曲线被称为**时间波形**。
- 时间波形被变换为频率波形或阶次波形进行分析。
- **正确理解波形可诊断故障。**





分层式维护 workflow



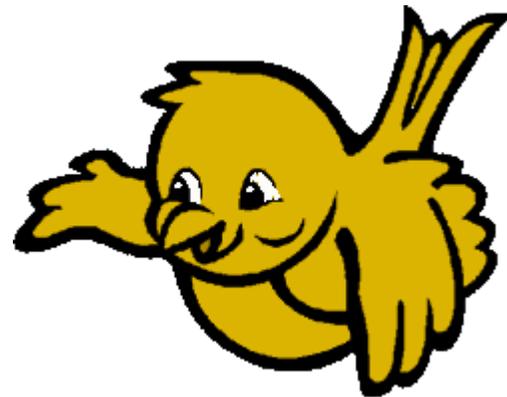
筛查 — 诊断 — 分析是对资产问题进行归类的分层式方法。3561FC 正好适合筛查资产的潜在问题。

振动基础知识

什么是振动?

FLUKE®





FLUKE®



什么是设备振动?

FLUKE®

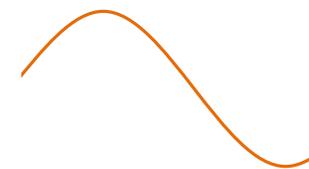
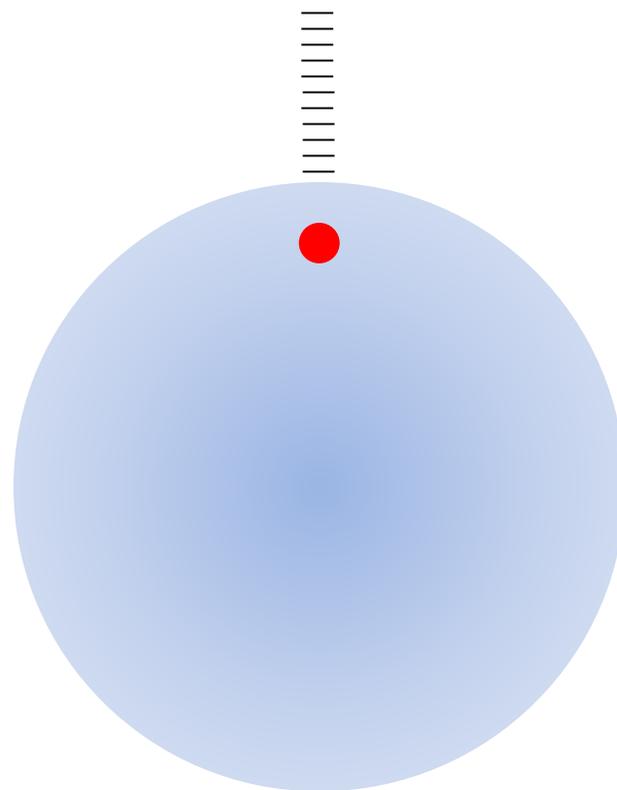


基本振动描述

波形

FLUKE®

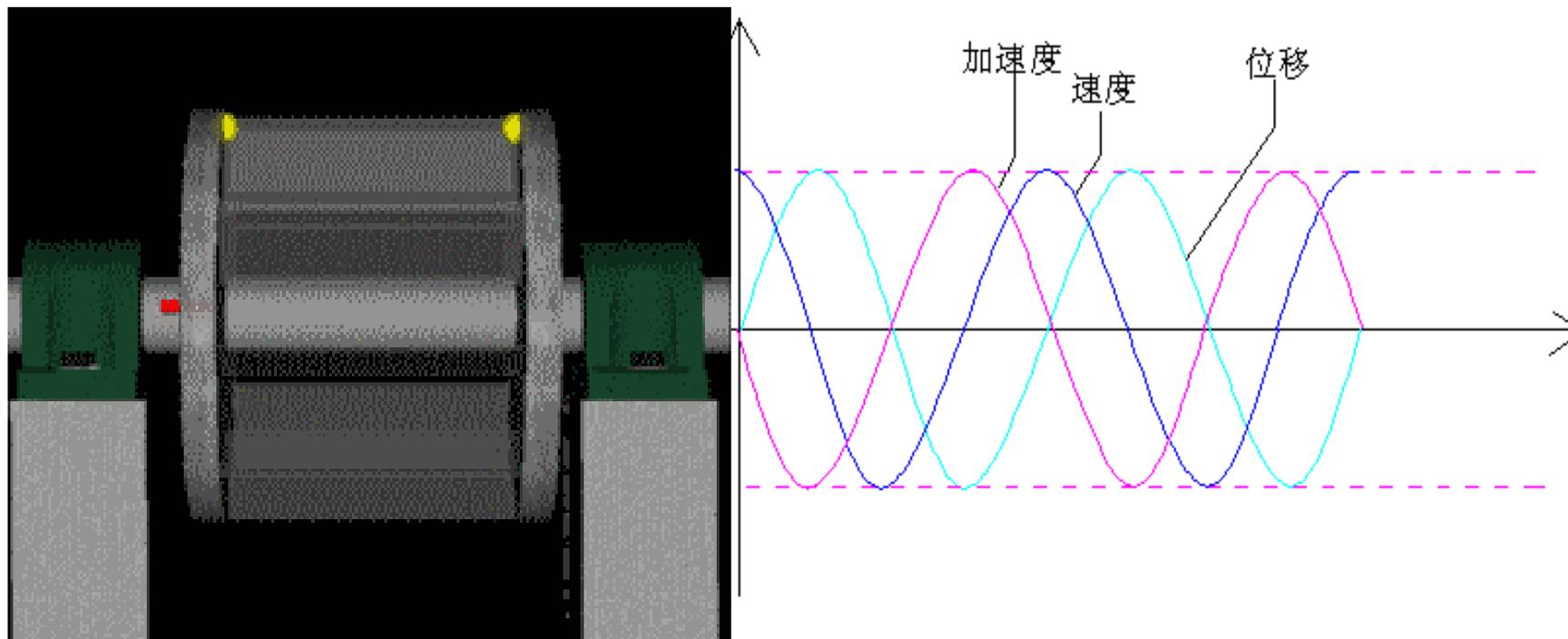


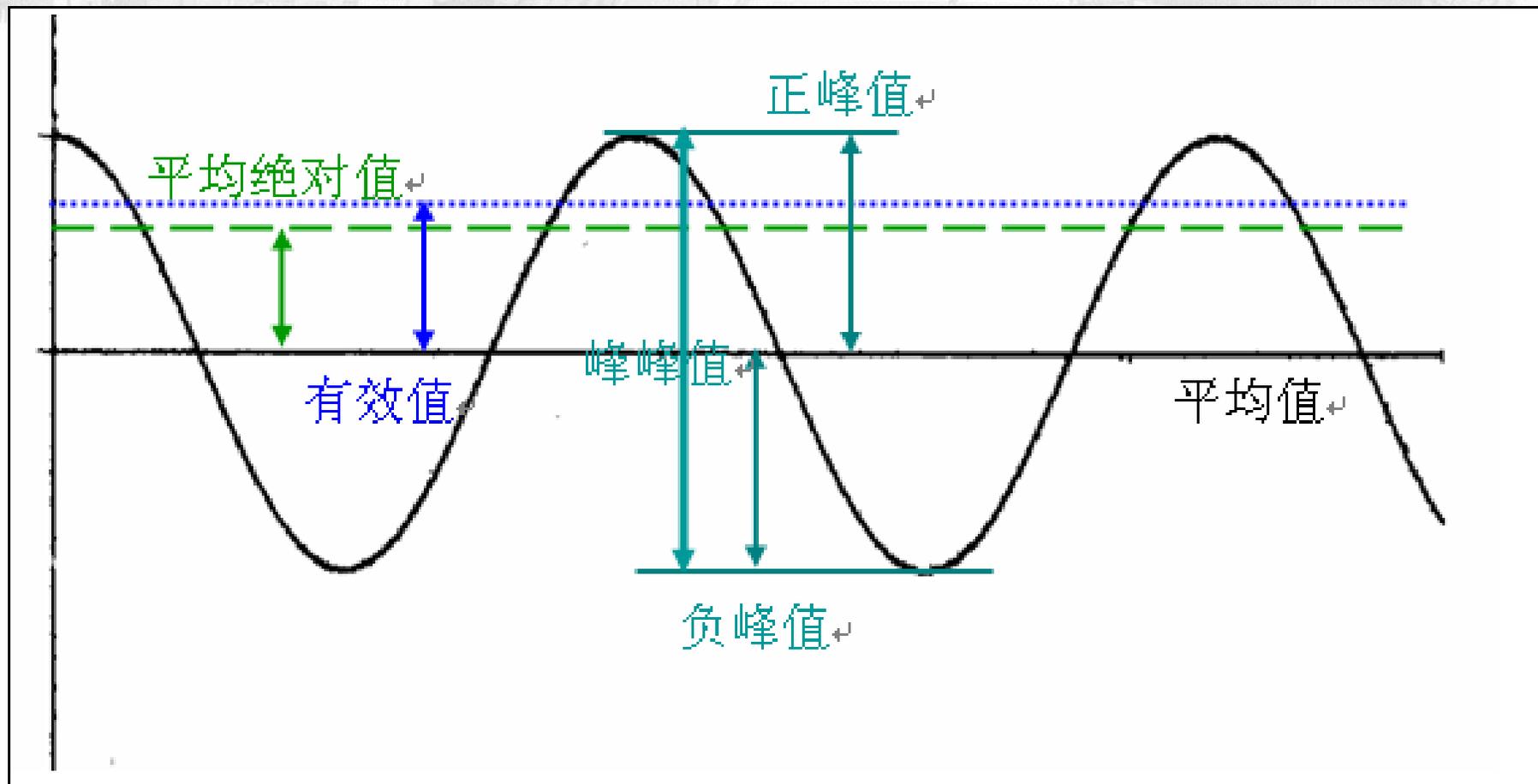


各个时刻振动单位的数值记录

振动波形

FLUKE®

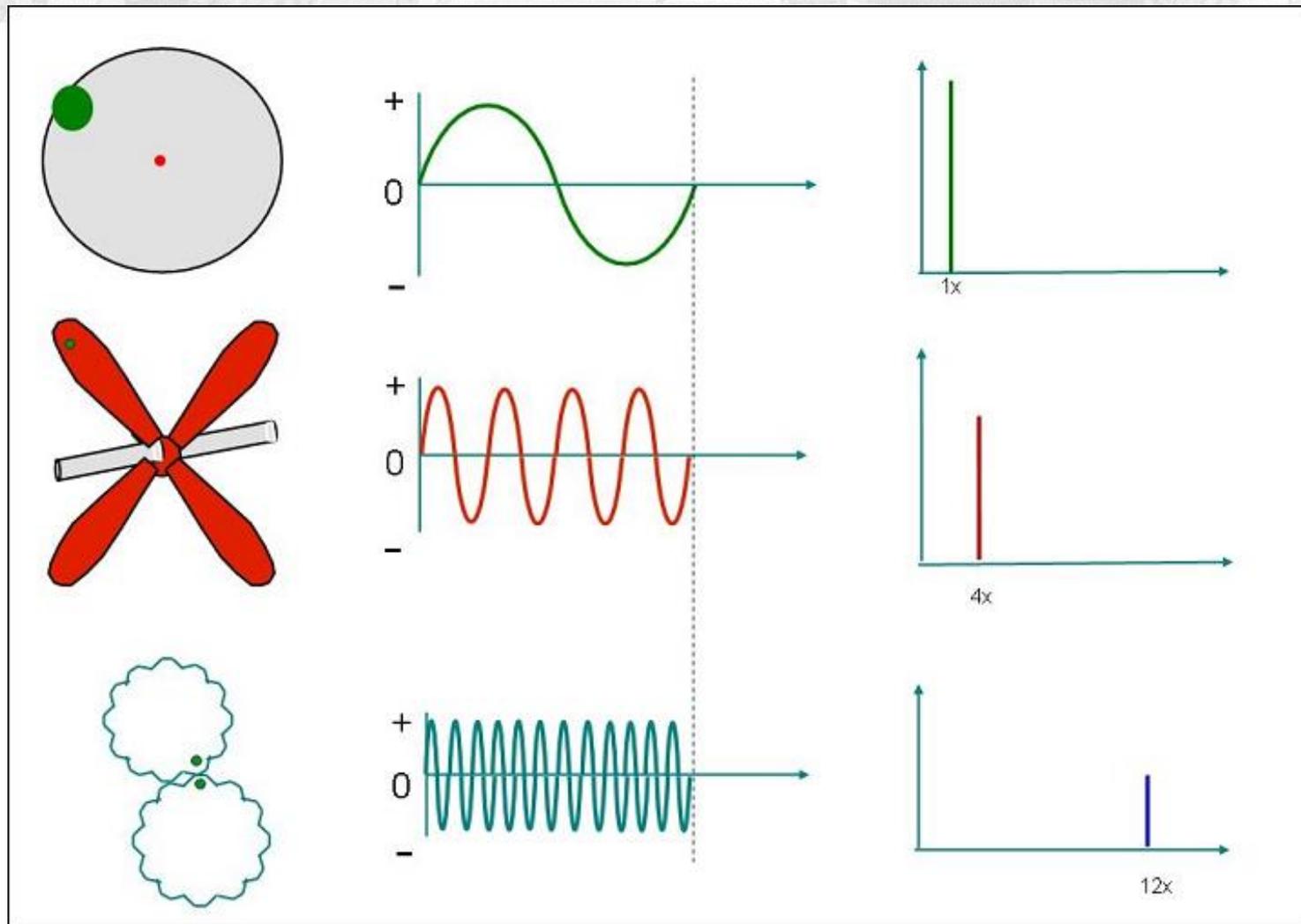




振动波形的大小

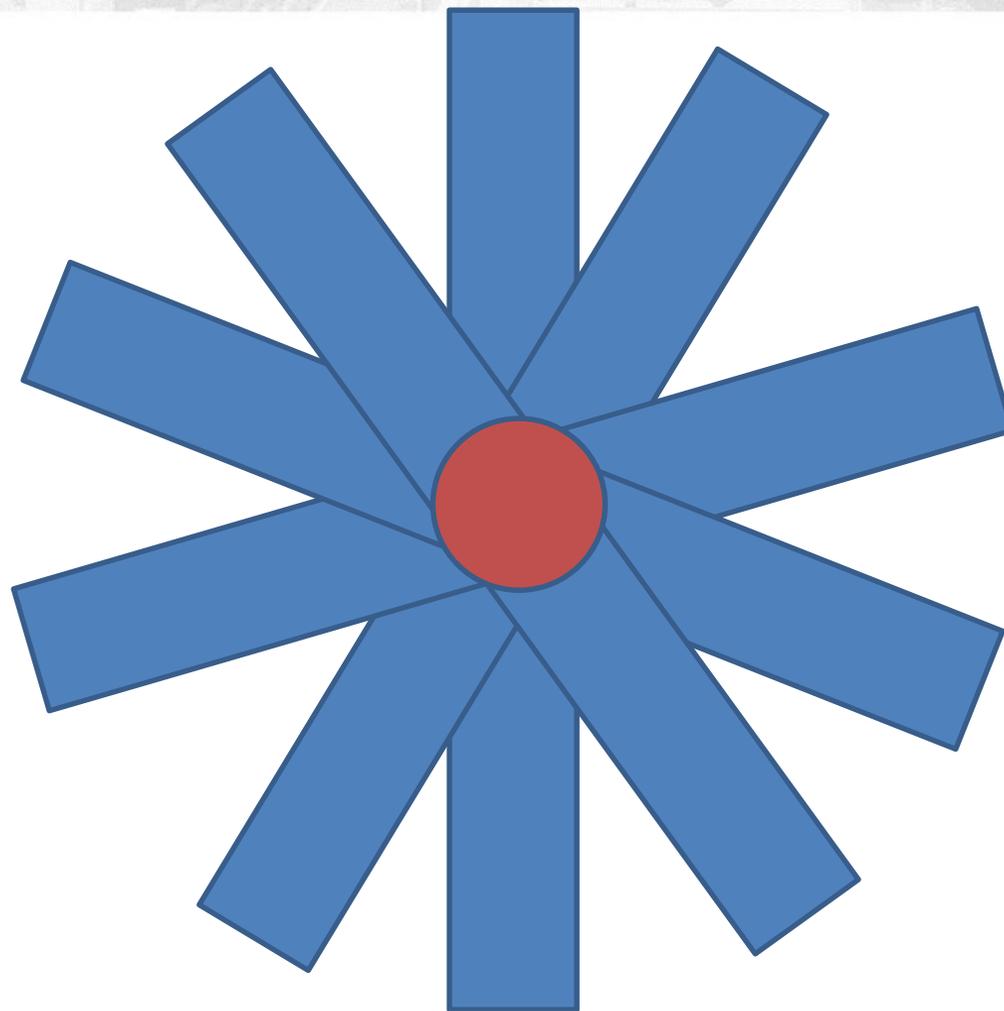
振动频率

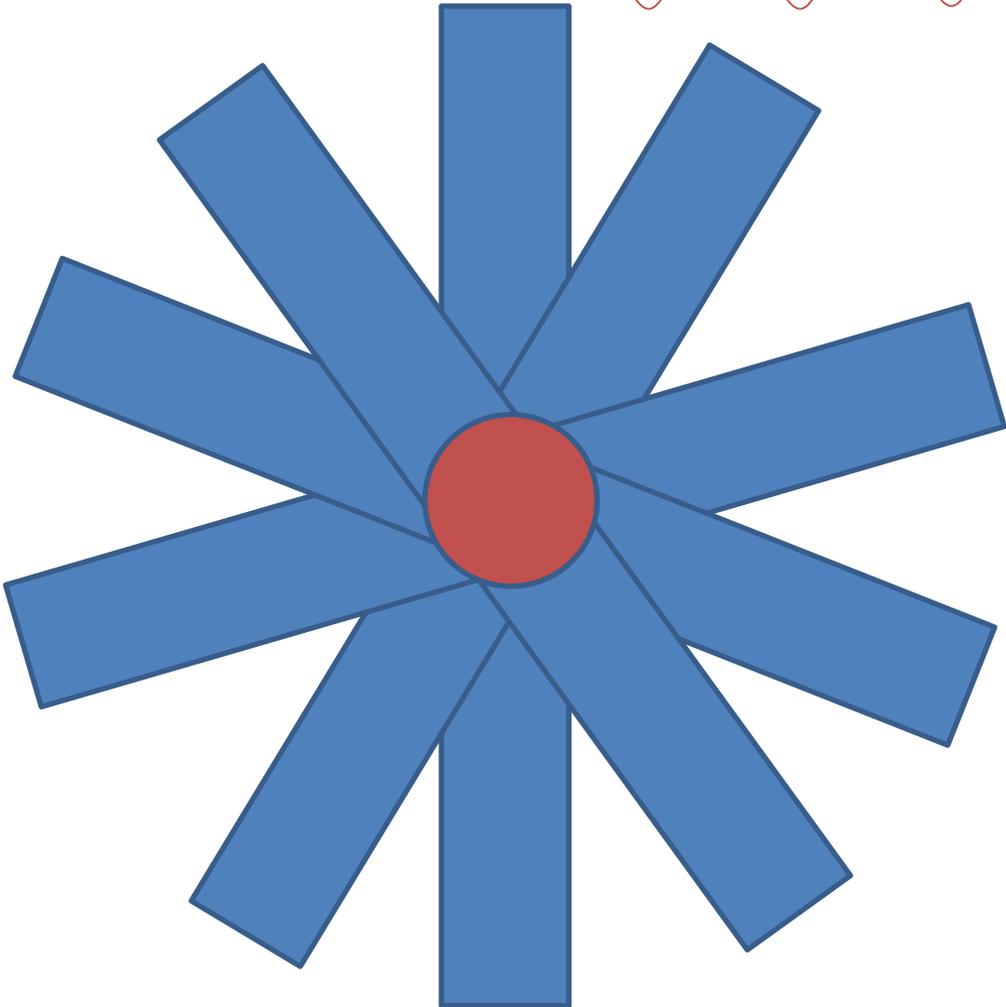
振动的
快慢

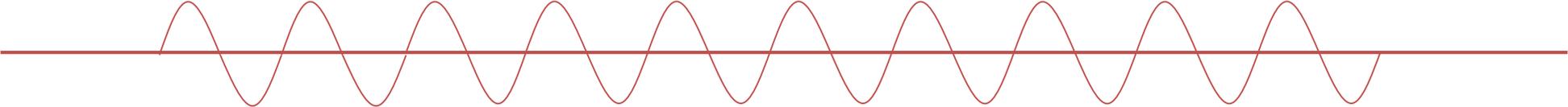


振动波形和频率

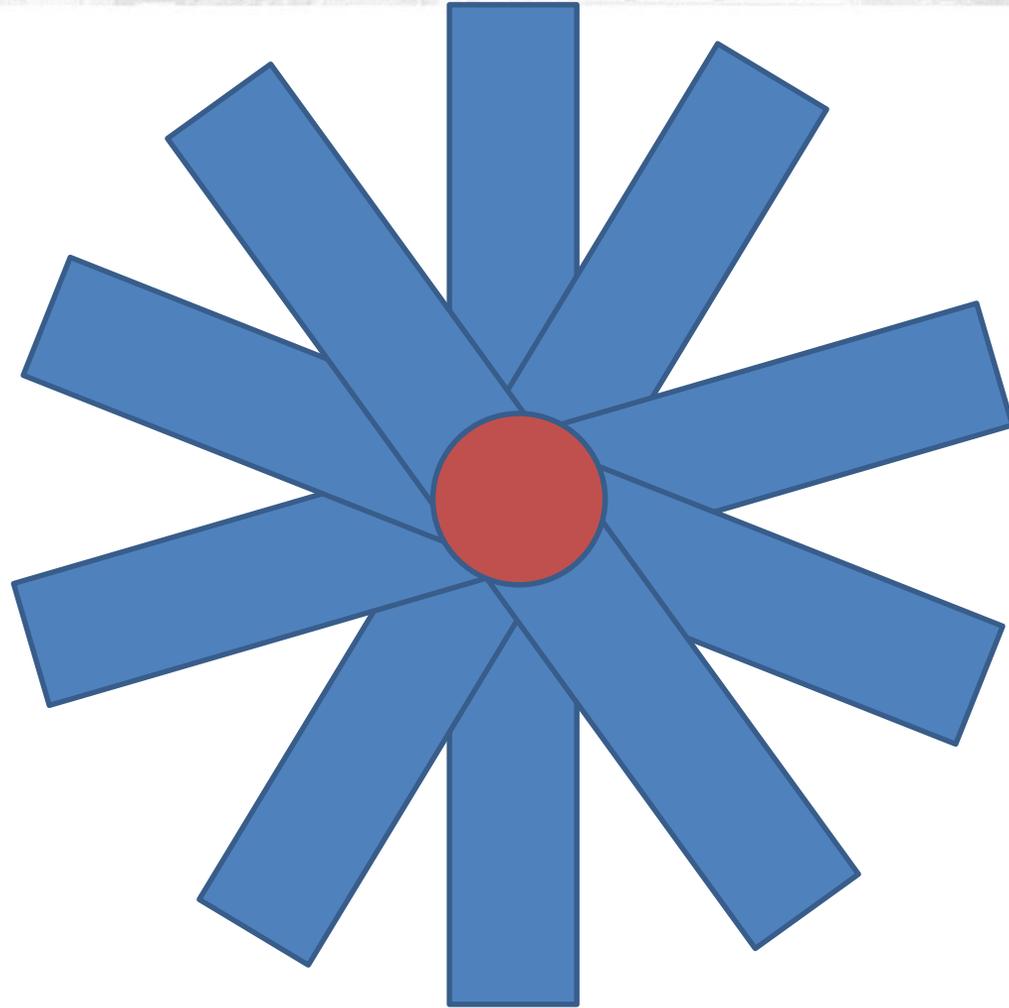
FLUKE®

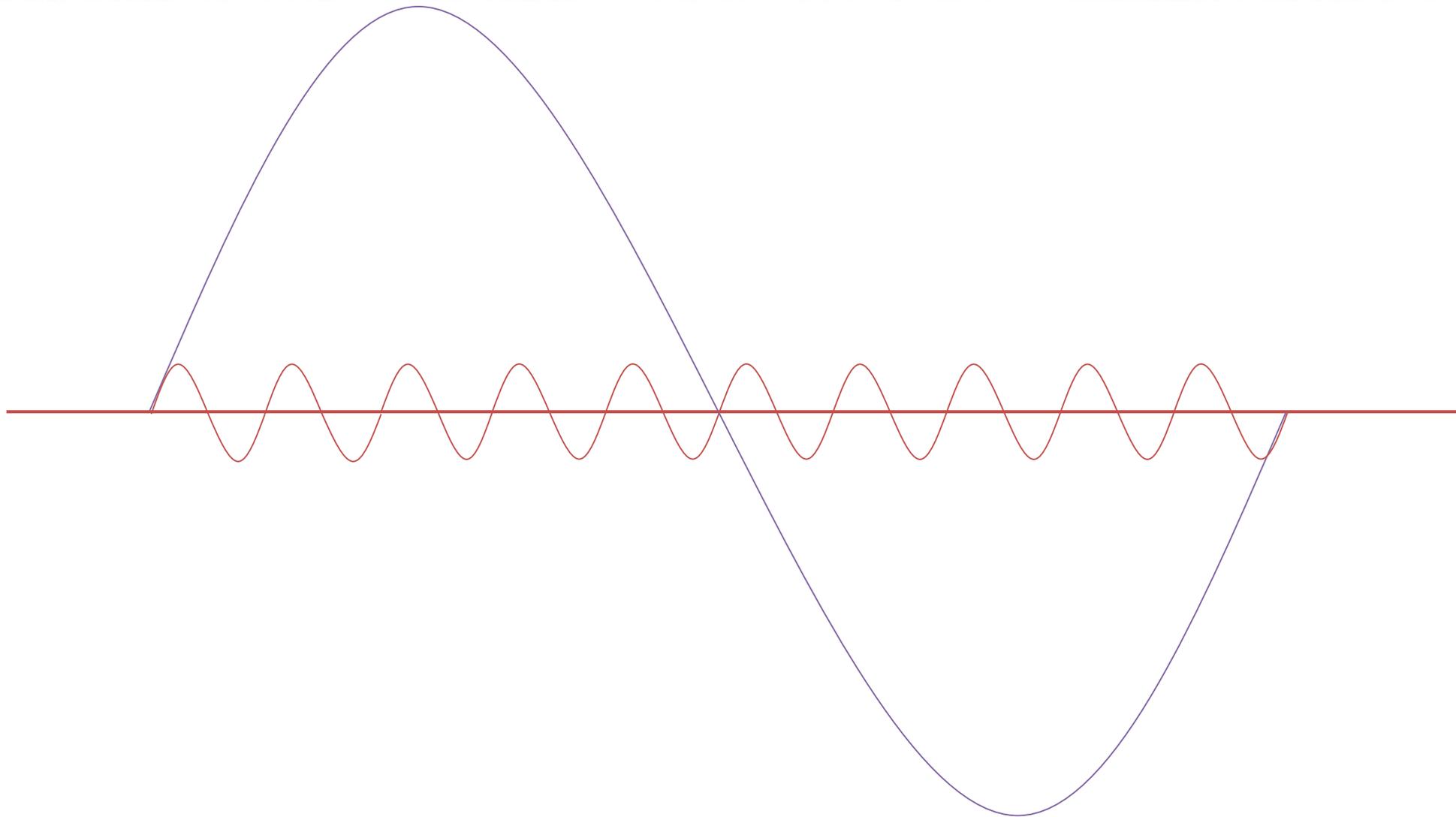


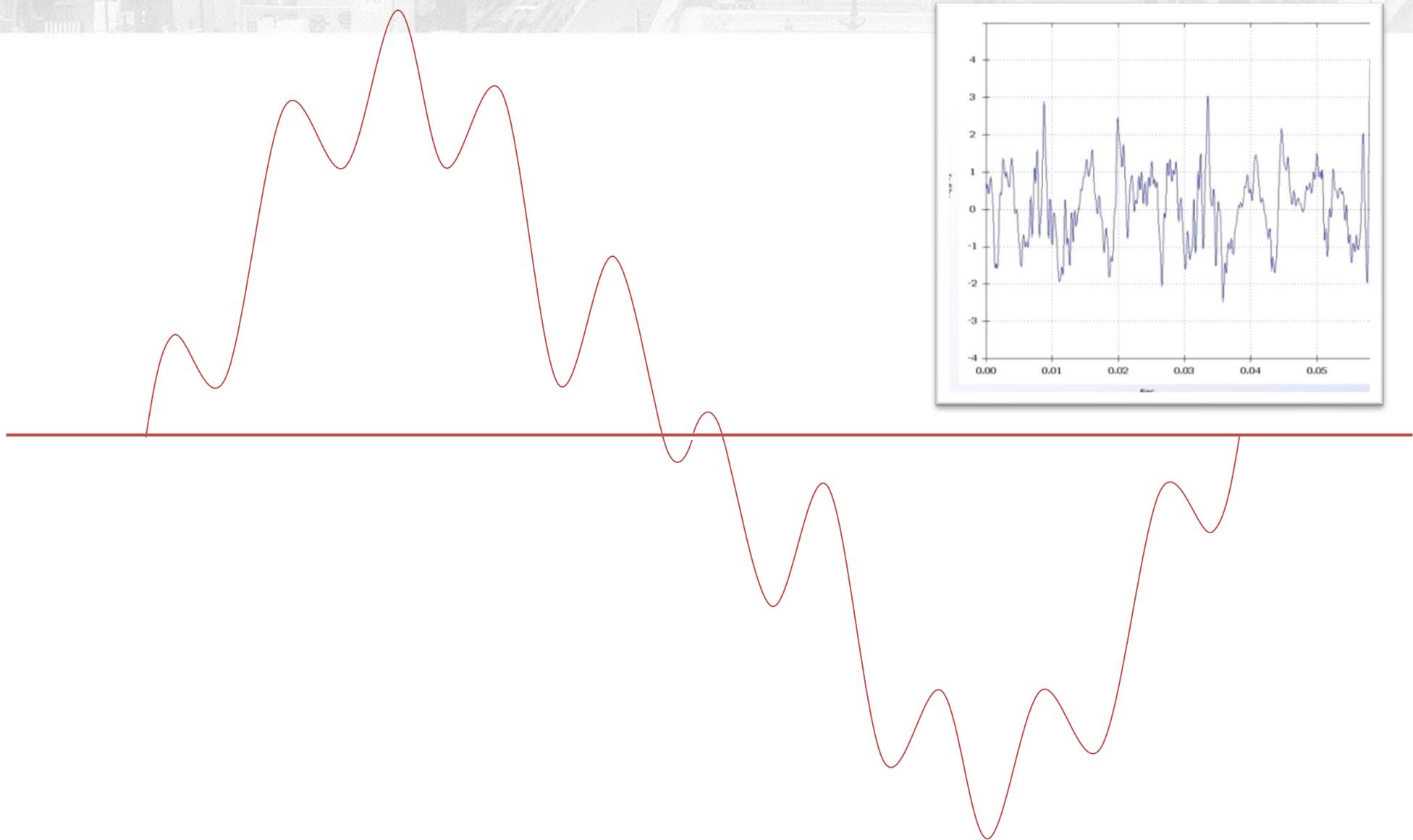




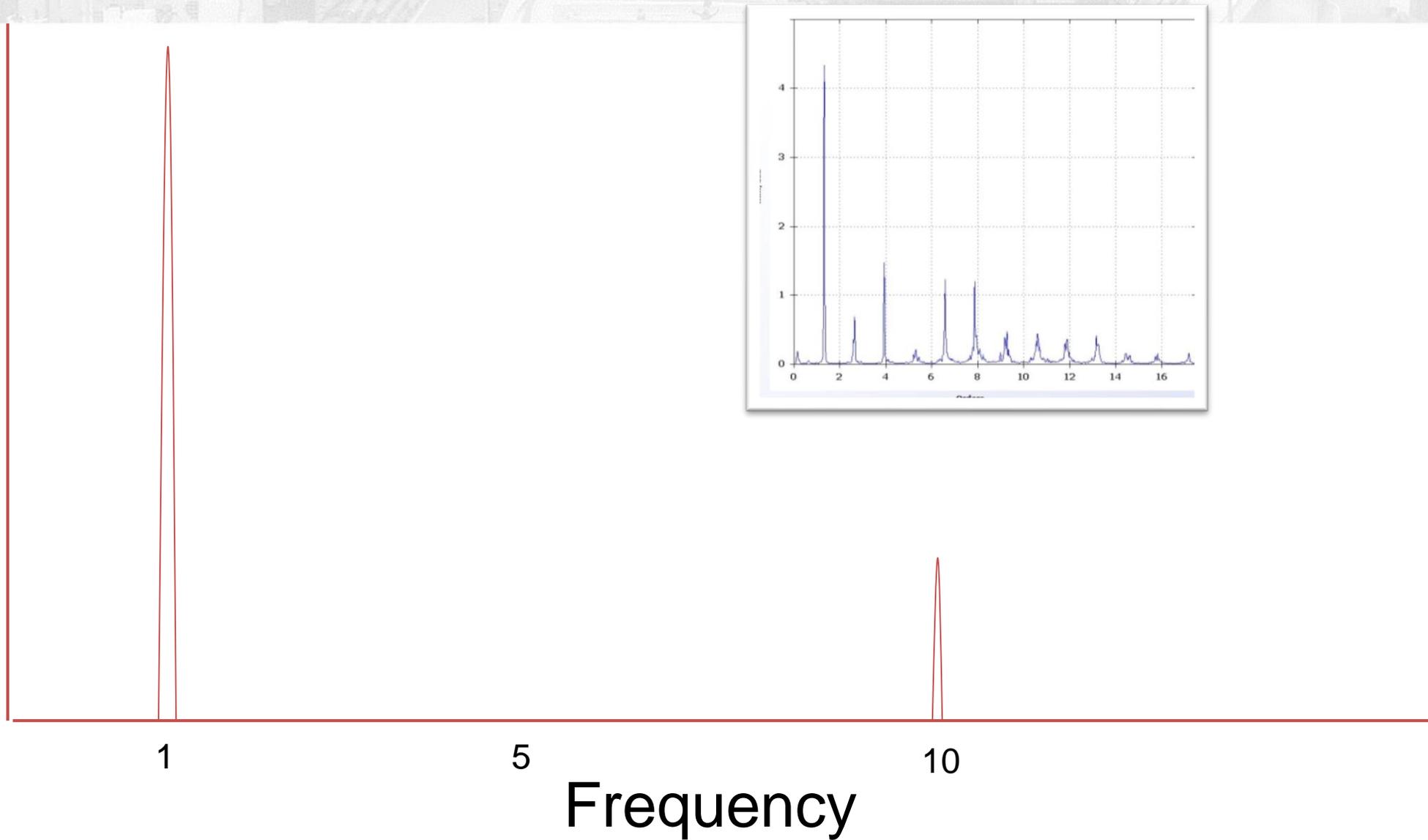
振动的合成分解



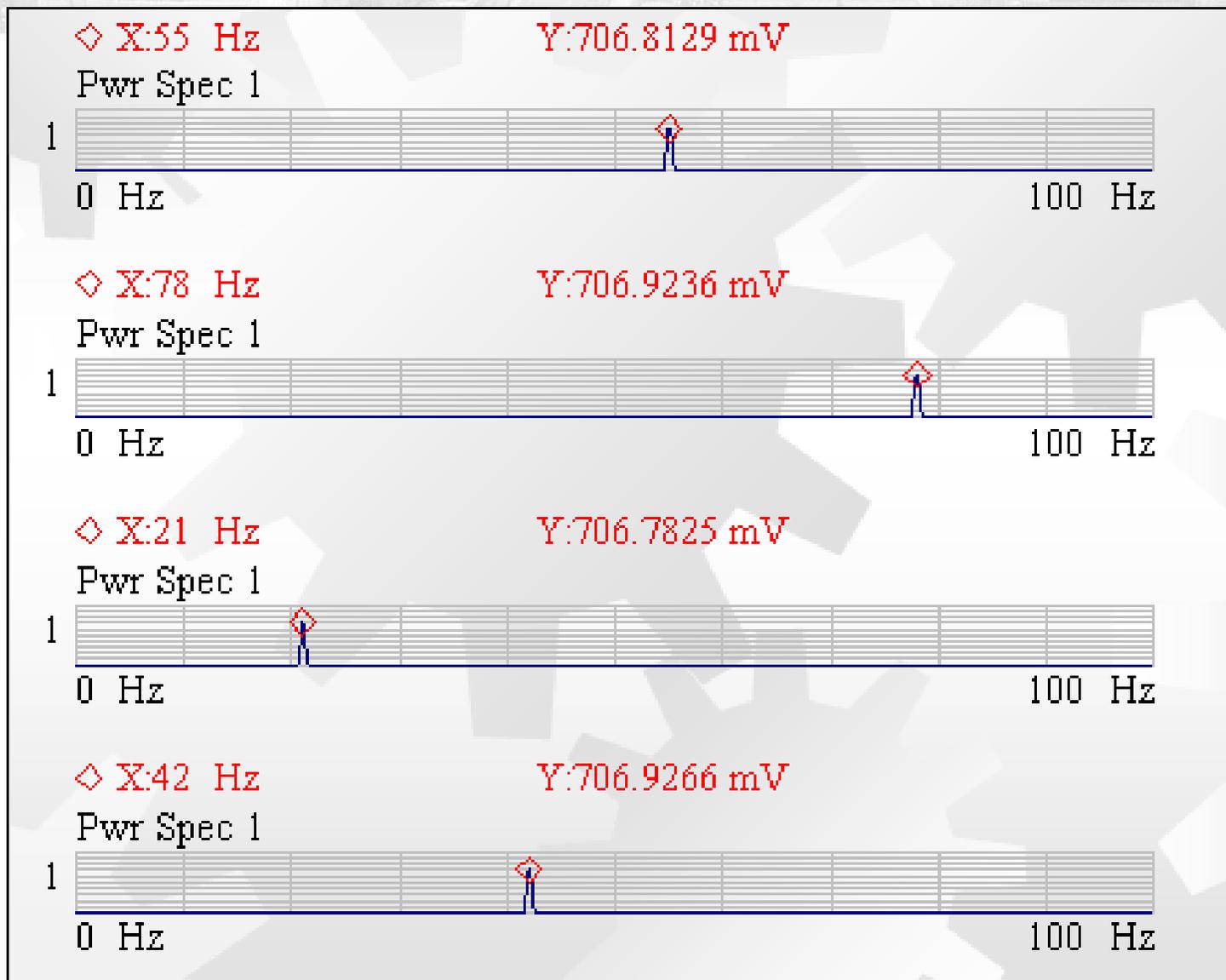




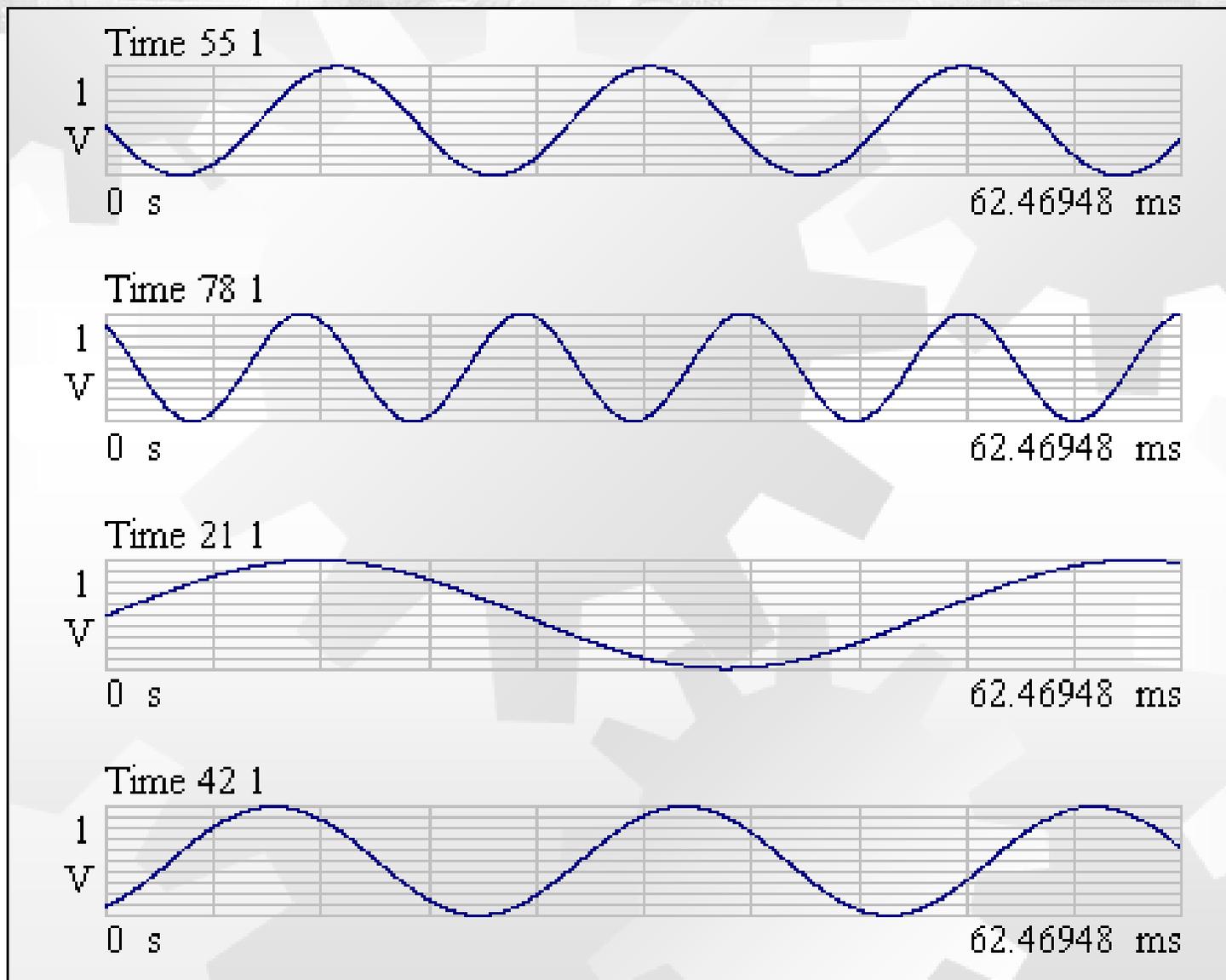
Amplitude



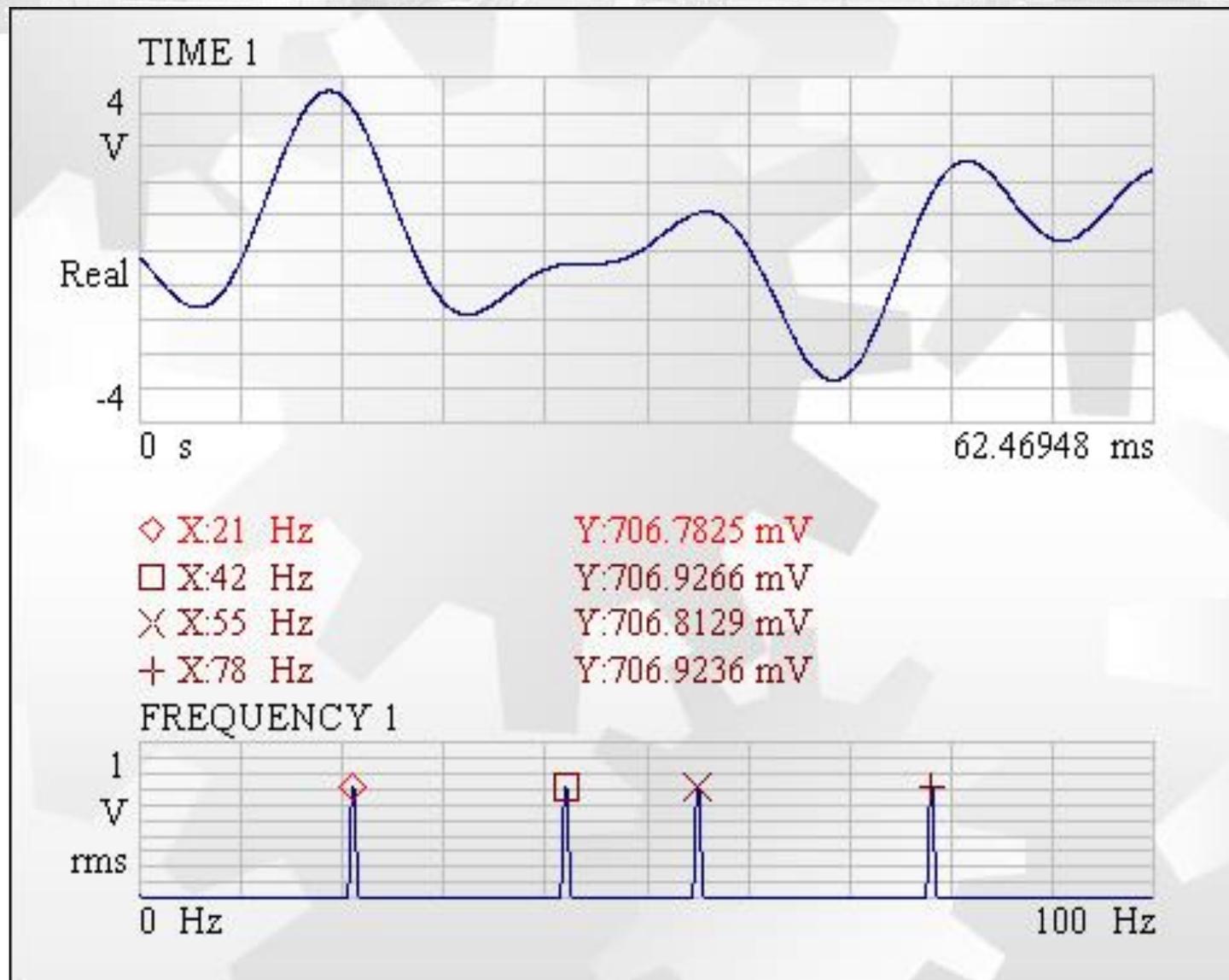
时频转换

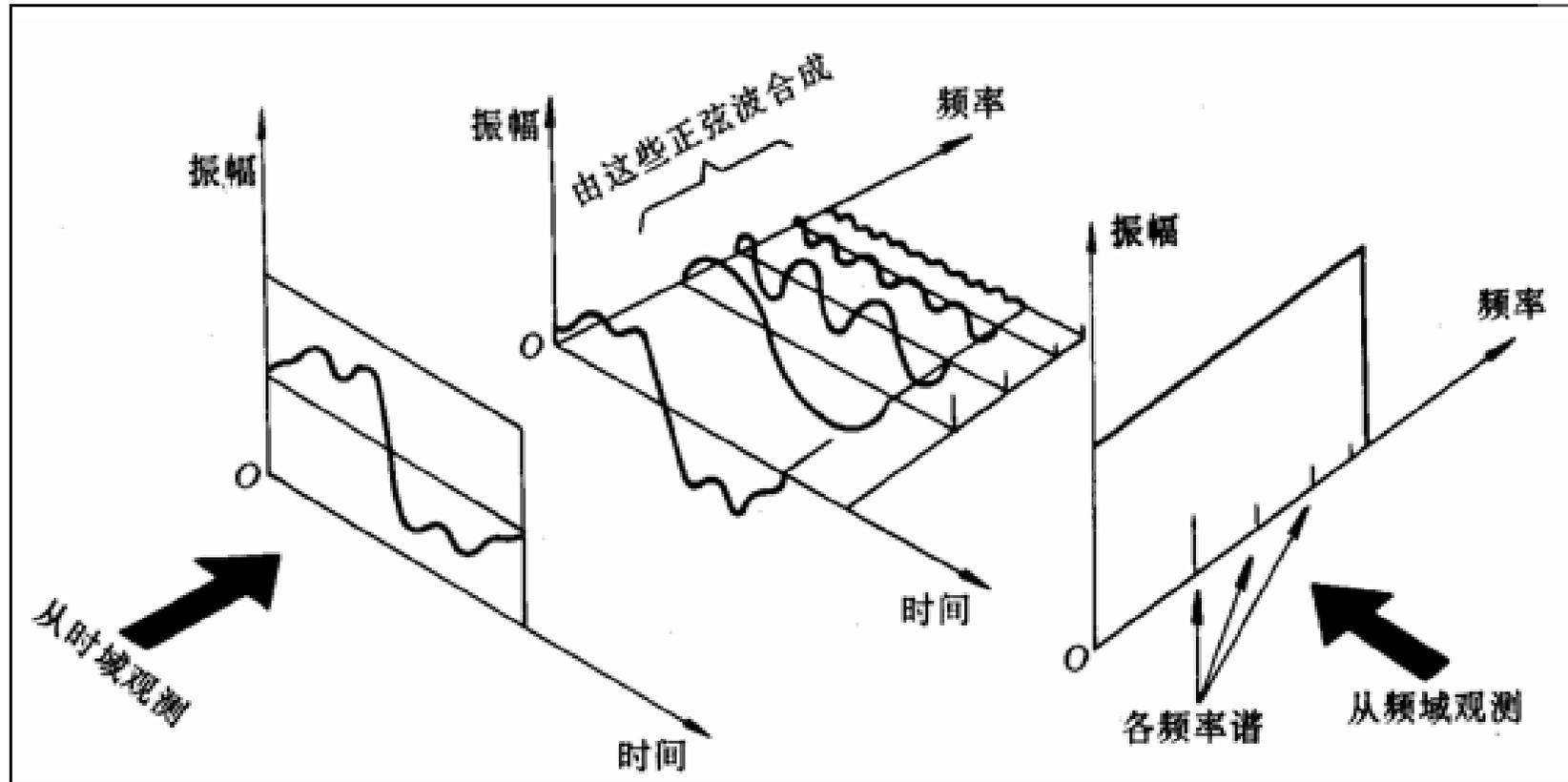


时频转换



时频转换

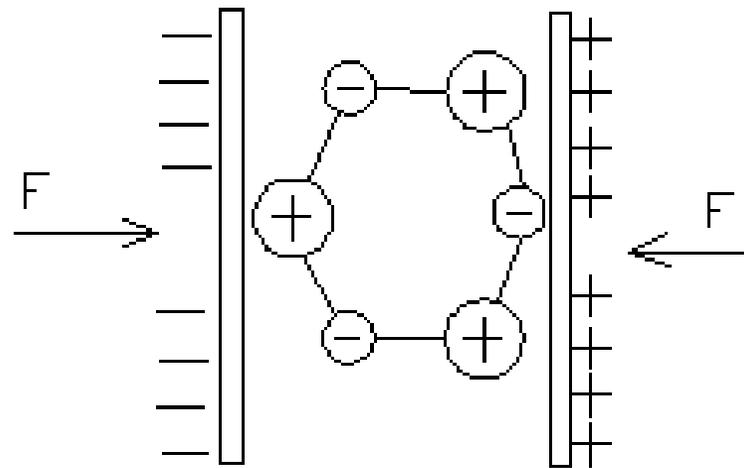




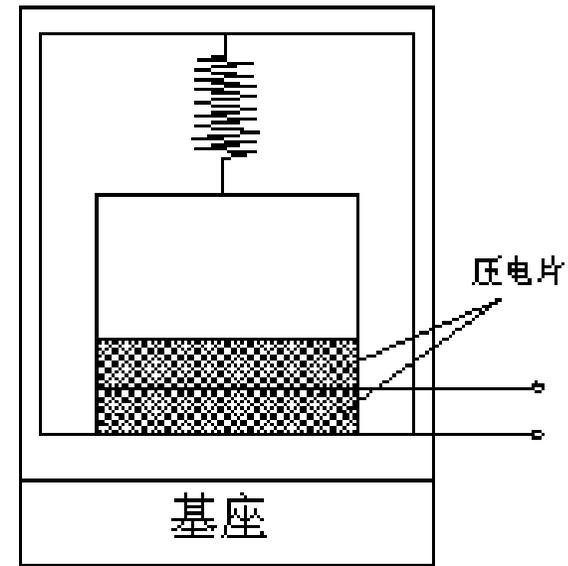
通频值、分频值、基频、倍频

振动的测量-传感器

压电加速度传感器



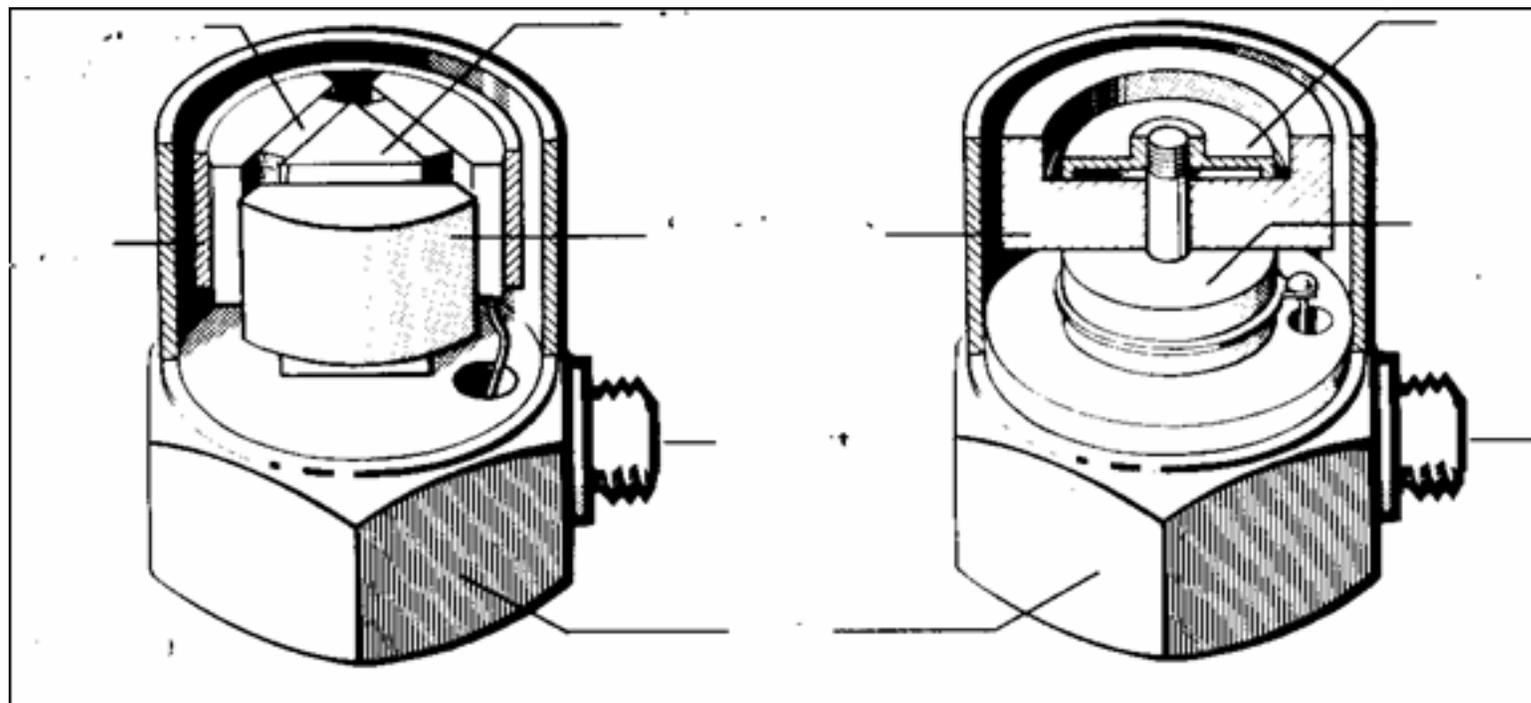
压电原理图



加速度传感器的结构模型

压电加速度传感器

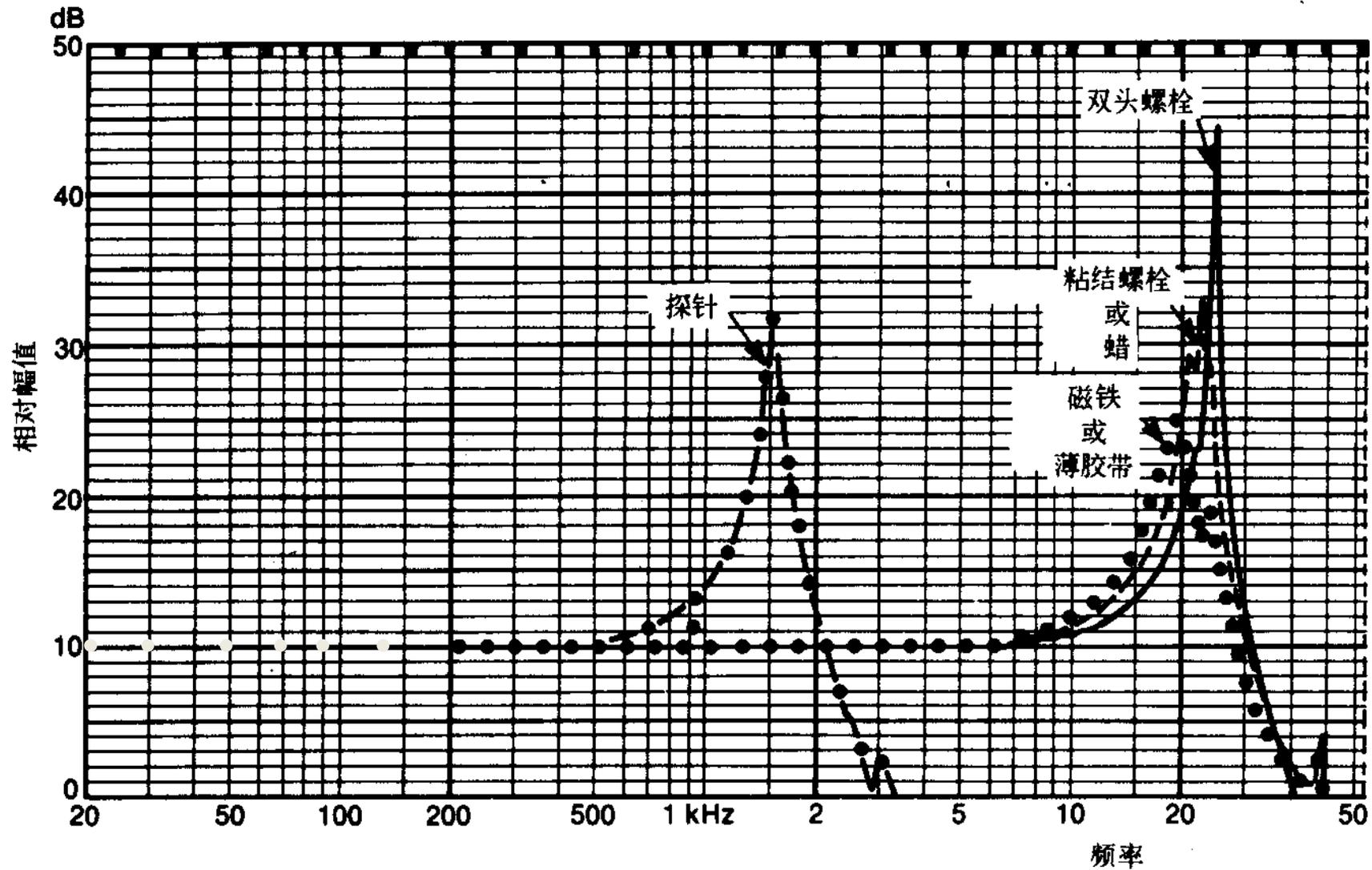
FLUKE®



三角剪切型

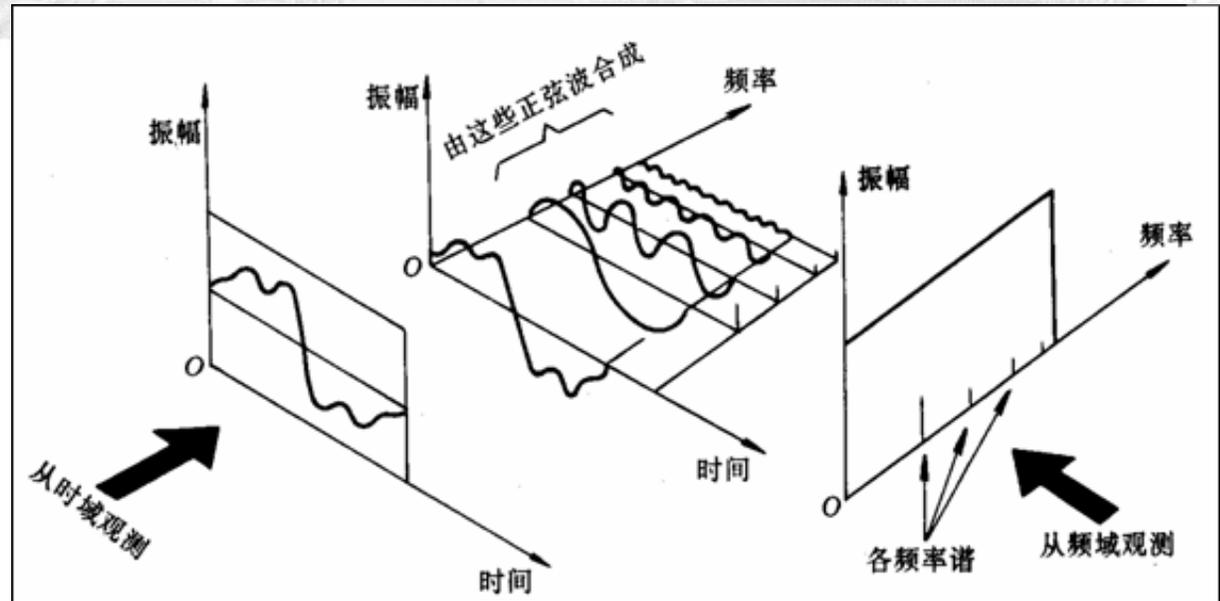
中心压缩型

压电加速度传感器的频响



振动大小

传感器类型
固定方式
安放质量
安放位置



位移, μm , 峰峰值, 波形中测量

速度, mm/s , 有效值, 波形或频谱中测量

加速度, m/s^2 , 峰值, 波形中测量

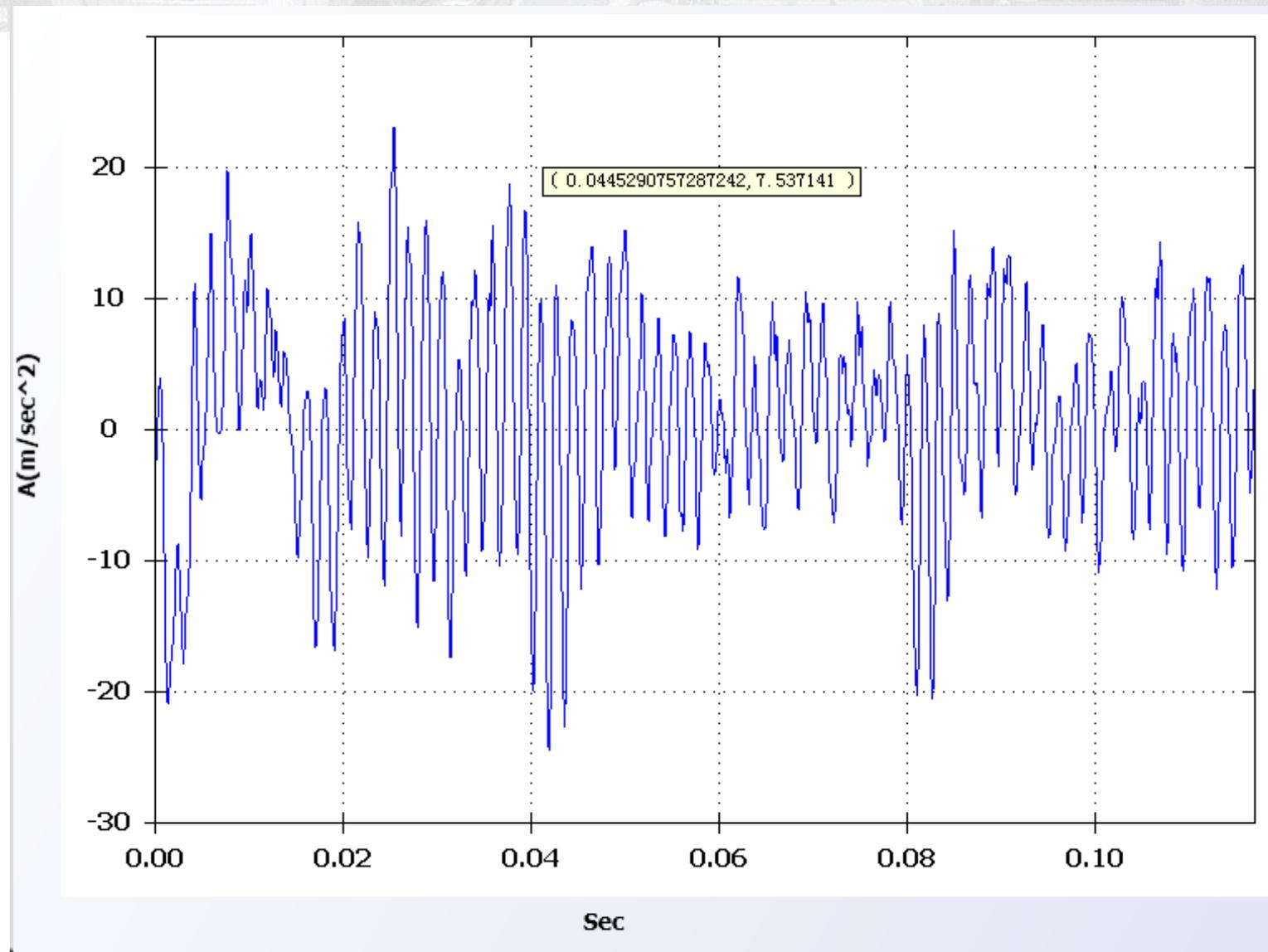
总有效值 $V^2 = V_1^2 + V_2^2 + \dots$

总值大小和频率范围有关

常用图谱

波形图

FLUKE®

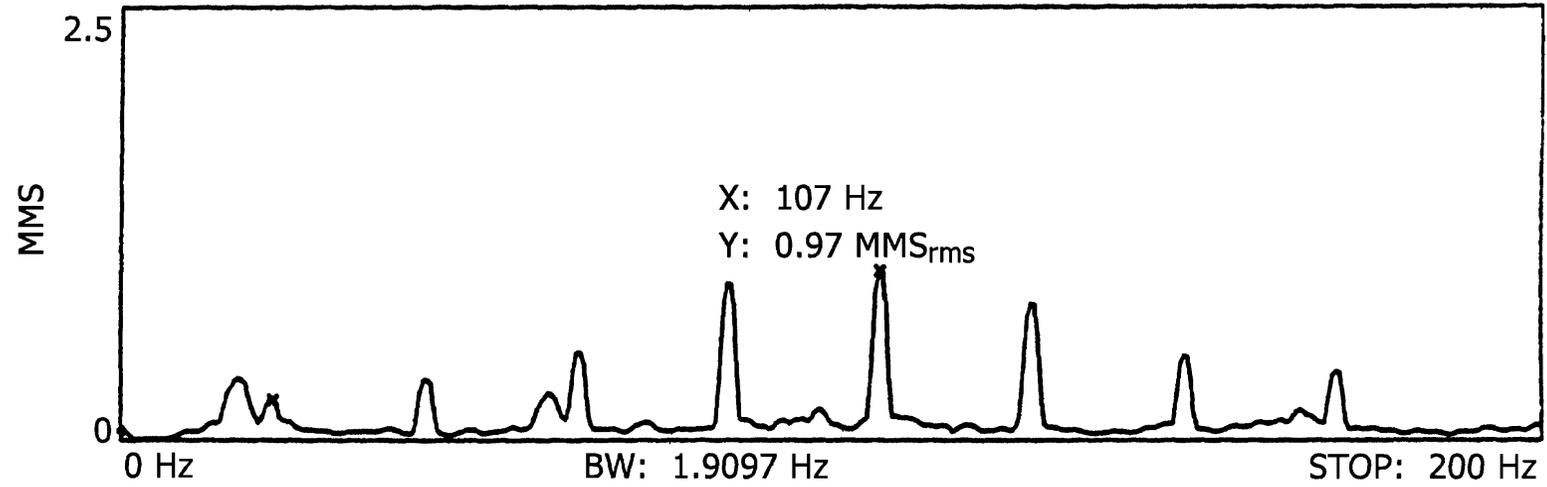


下午4时45分26秒

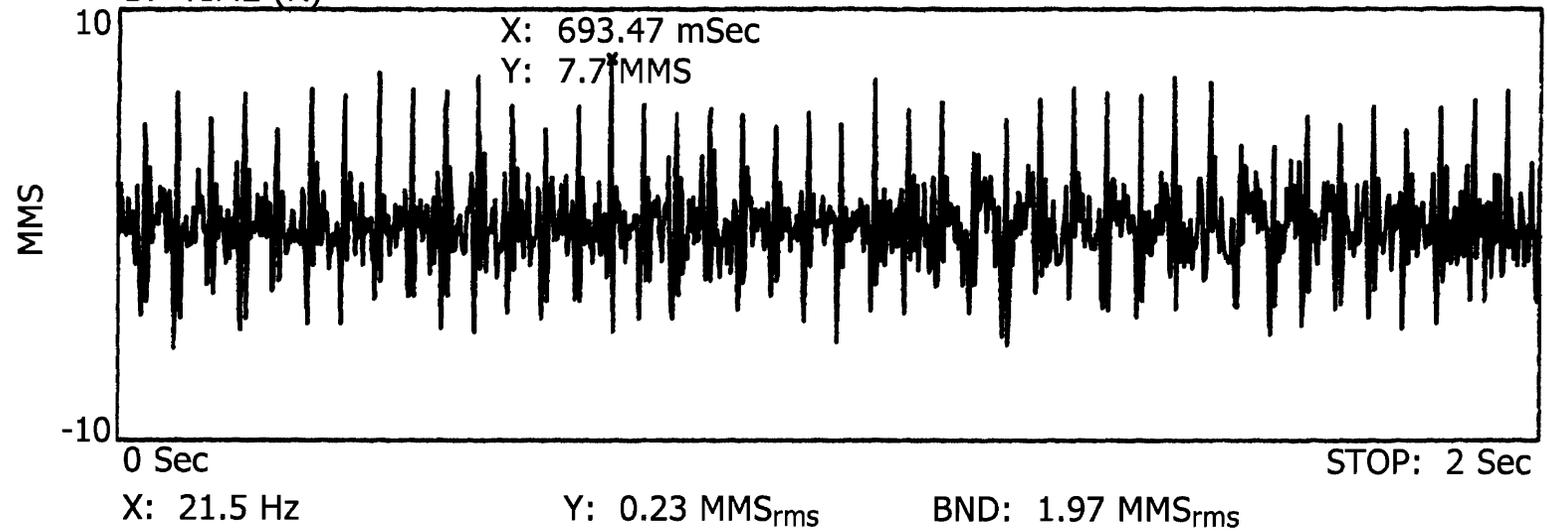
A: MAG

DRYER 22+10

RMS: 10

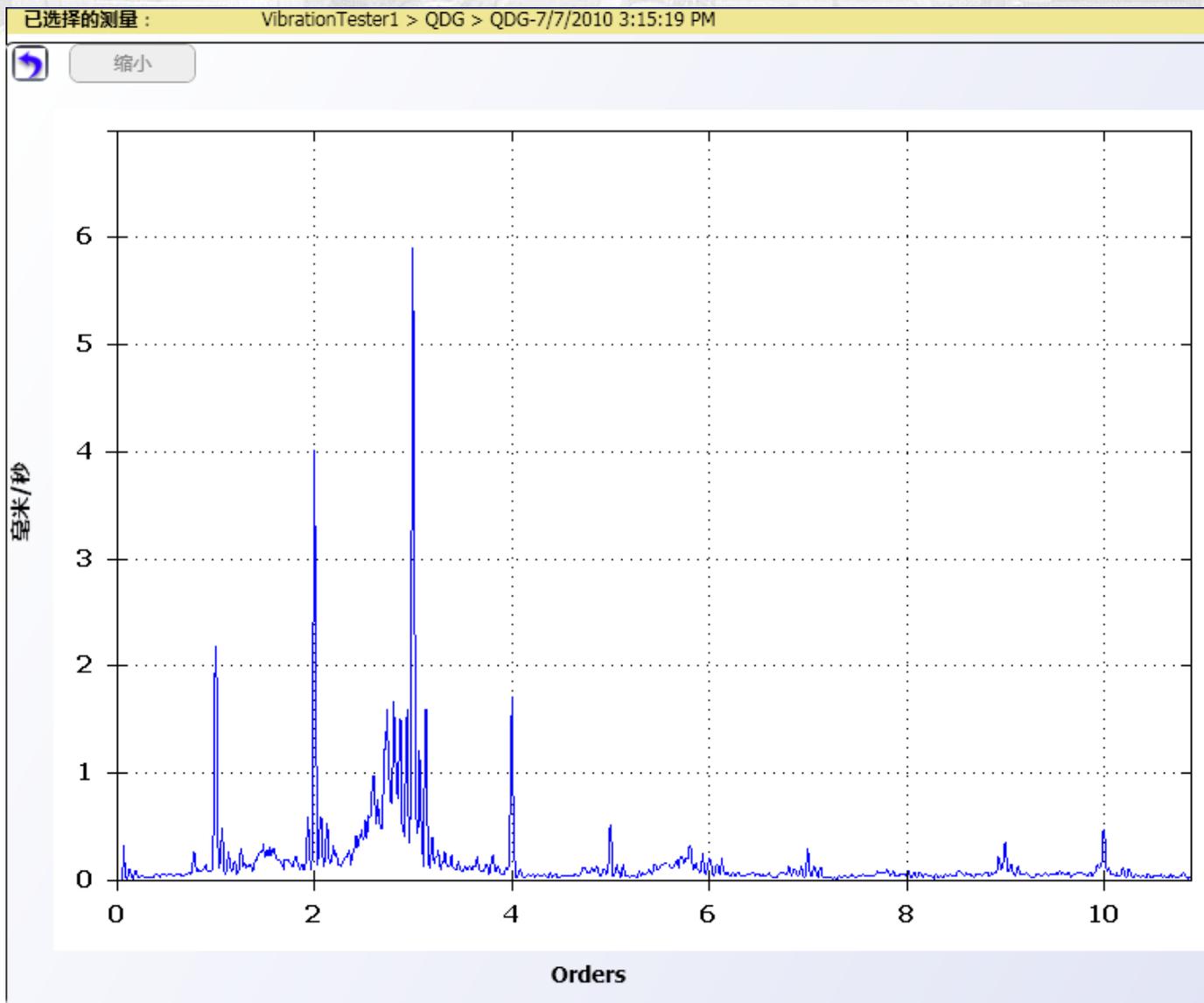


B: TIME (R)



频谱图

FLUKE®



下午4时45分26秒

常见故障的振动特征

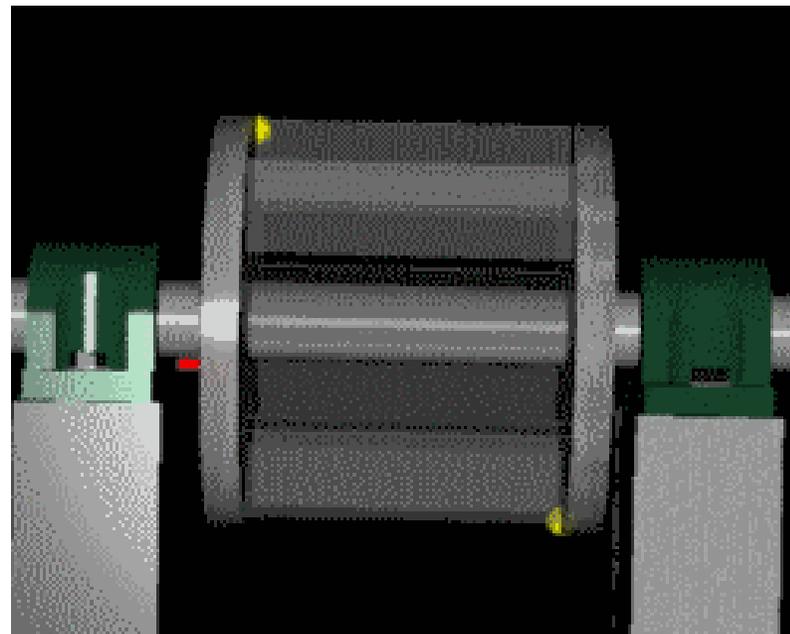
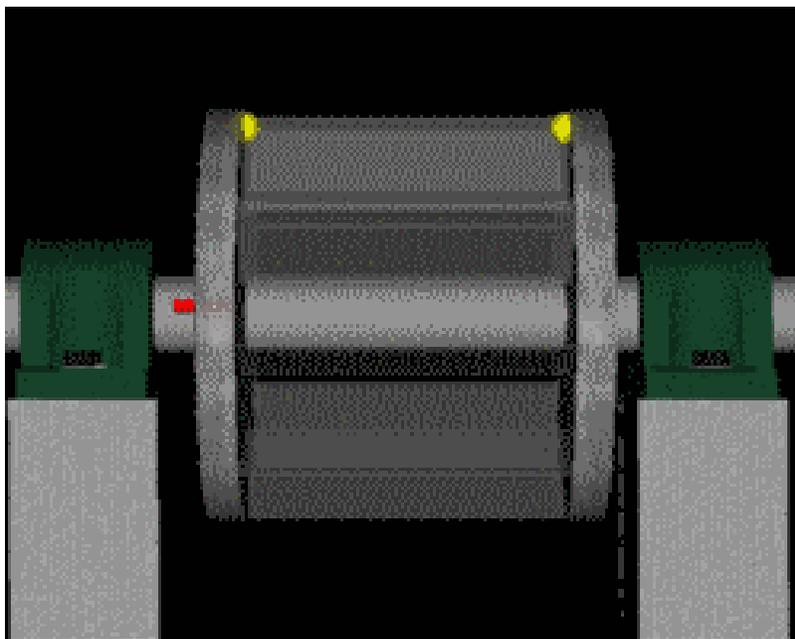
常见故障的振动特征

FLUKE®

旋转设备最常见的故障类型是质量不平衡、不对中、松动和轴承问题。

质量不平衡

FLUKE®

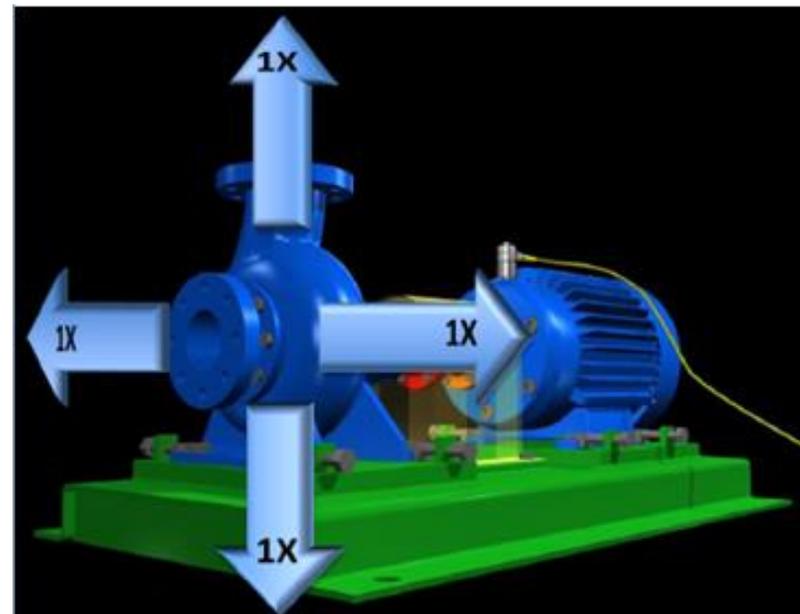


转子不平衡-来源

污物积累或平衡配重的缺失

- 材料不均匀，尤其是在铸件中（如多孔部分、砂眼）
- 配合件（如轴、孔…）的尺寸存在差别
- 辊子偏转（如造纸机辊）或存在机加工误差
- 电气绕组的质量分布不均匀
- 不均匀的腐蚀、偏心转子或转子腐蚀

不平衡通常会在 1 倍转速下在任一方向上表现出来



转子不平衡-振动特征

波形为简谐波，少毛刺；

1X频率为主；

水平和垂直振动相位差90°；

一般水平振动大于垂直方向振动；

轴向振动不大；

振幅随转速升高而增大；

过临界转速有共振峰；

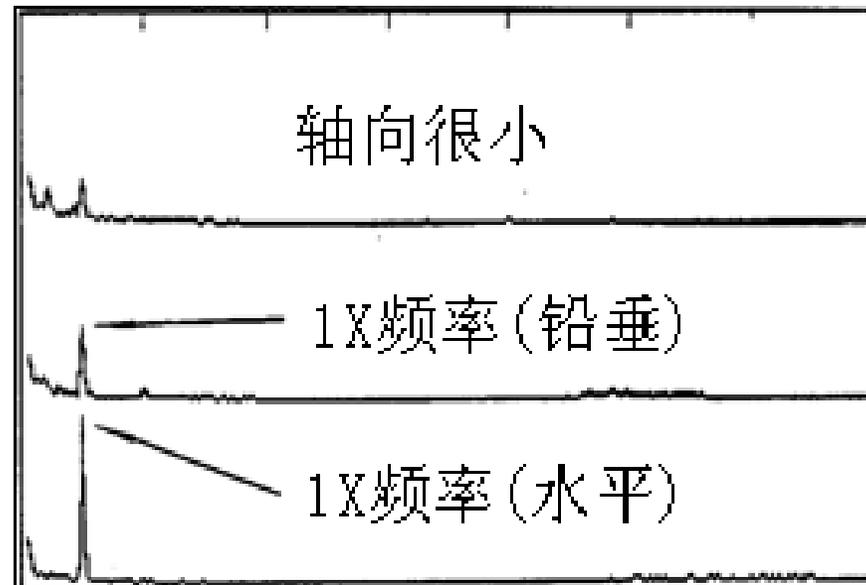
原始质量不平衡——轴向振动小

初始弯曲 ——轴向1X振动

部件位移或脱落——振动突变后稳定

叶轮结垢 ——振动缓慢增加

联轴器不平衡 ——相邻轴承振动大



某电机

机器设置: DE
测量日期/时间: 11/22/2010 14:51:21

传动系统

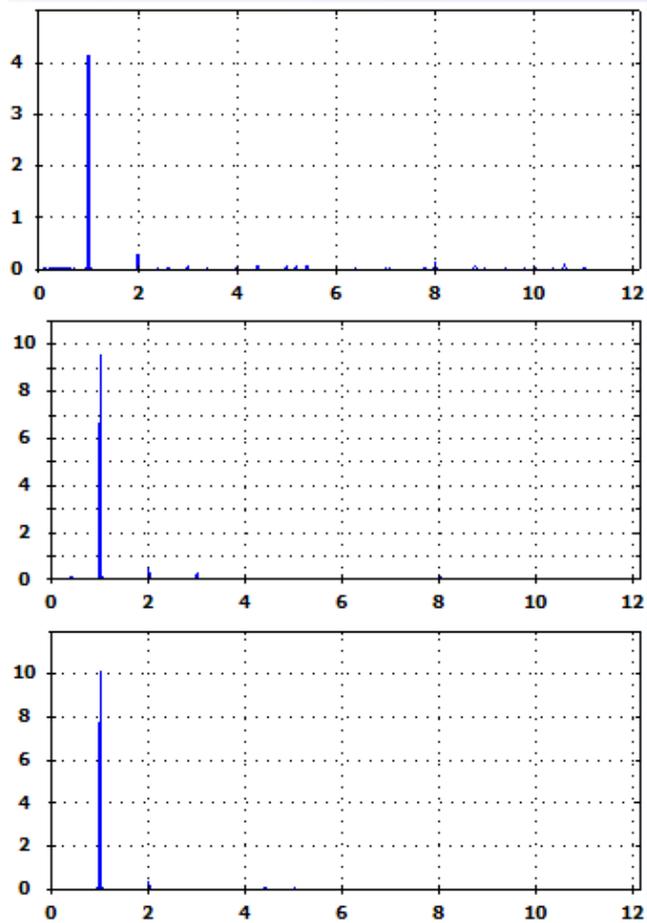


设置字段	输入
电机类型	交流
变频交流电机	是
转速单位 RPM	2640
额定功率 (kw)	0.05
电机安装方式	水平
电机配有	滚子轴承
电机从传动系统脱离	否
紧耦合电机	否
电机与下一组件间的耦合	是
下一组件	心轴

某电机

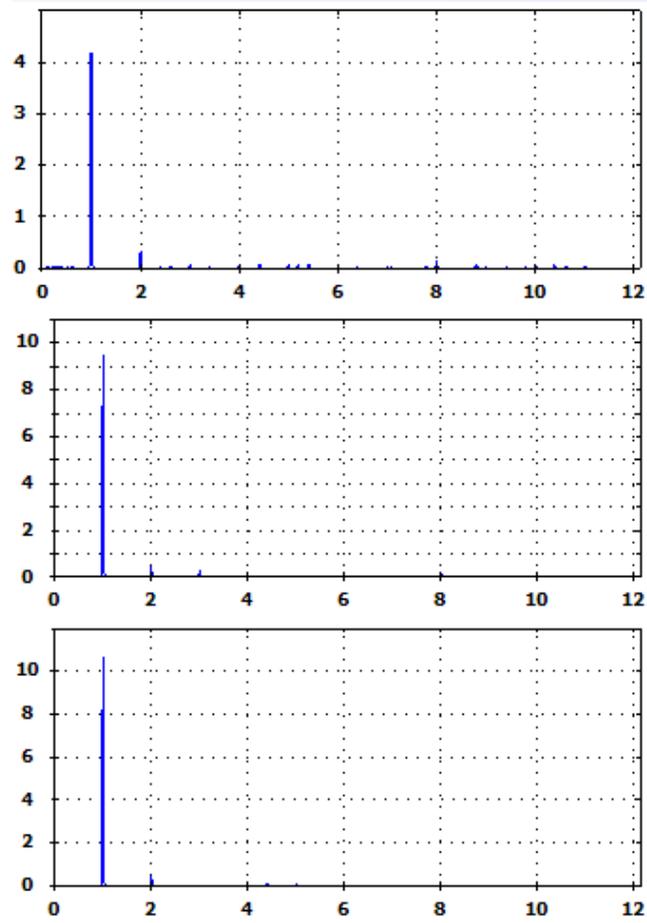
活动端

低范围



主动端

低范围



轴向

切向

径向

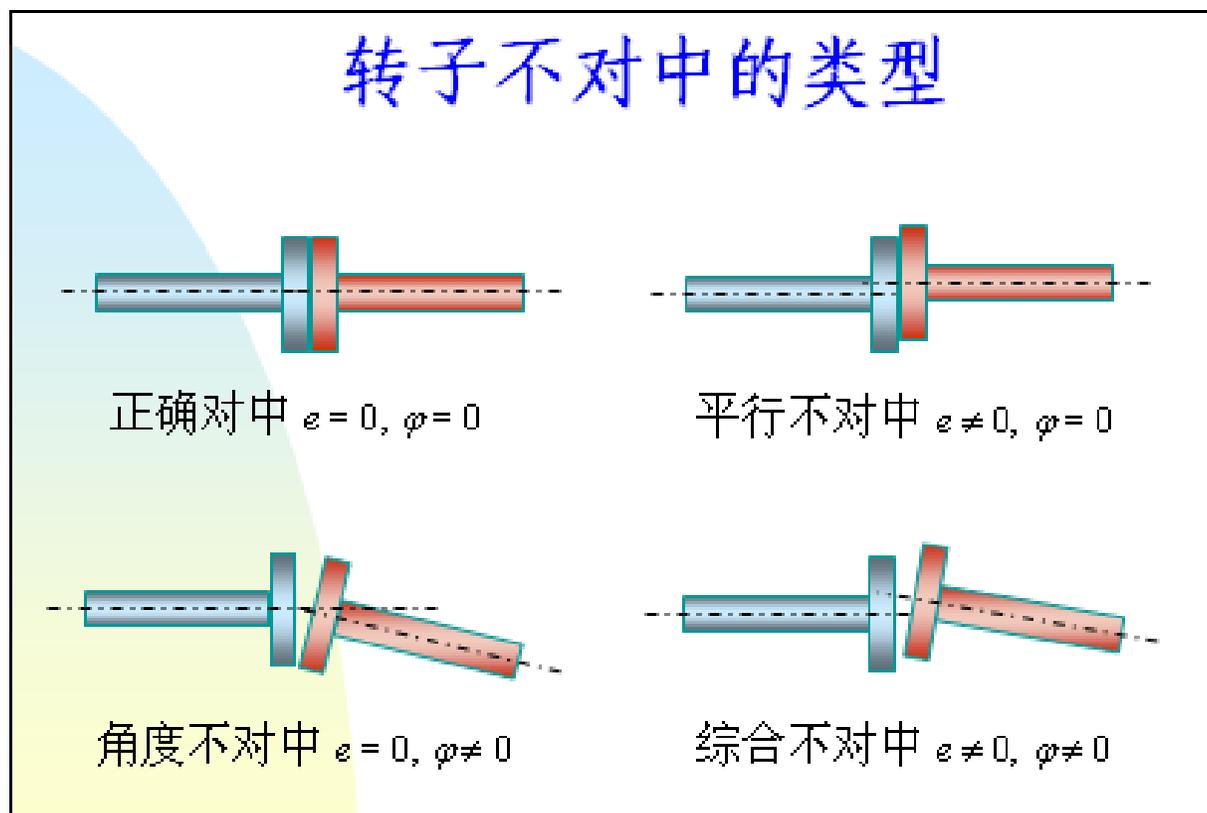
故障说明：电机失衡

故障严重度：严重 (66)

引用峰值数	轴承	轴	振幅	顺序	范围
引用峰值1	位置2	径向	10.68 mm/sec	1	低
引用峰值2	位置1	径向	10.17 mm/sec	1	低
引用峰值3	位置1	切向	9.54 mm/sec	1	低
引用峰值4	位置2	切向	9.52 mm/sec	1	低
引用峰值5	位置2	轴向	4.19 mm/sec	1	低
引用峰值6	位置1	轴向	4.14 mm/sec	1	低

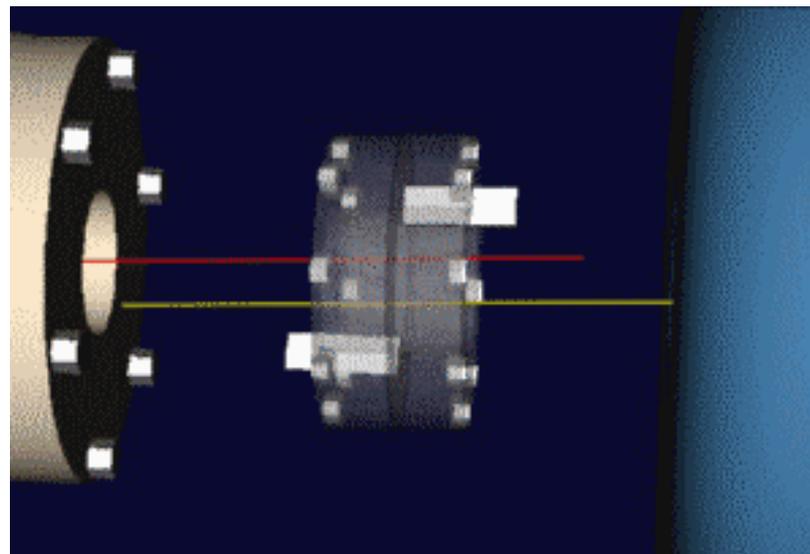
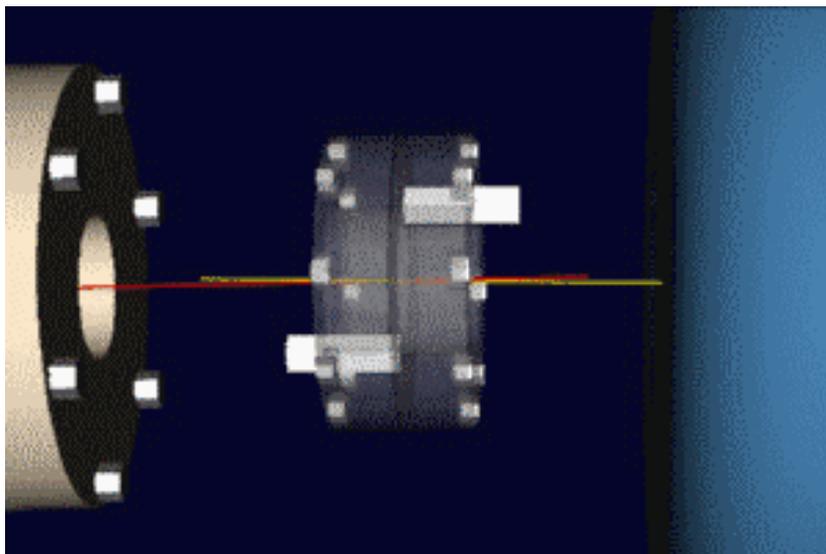
不对中

在机器设备上，当两个耦合轴的中心线重合时，就是理想对中的情况。当它们不重合时，就存在不对中

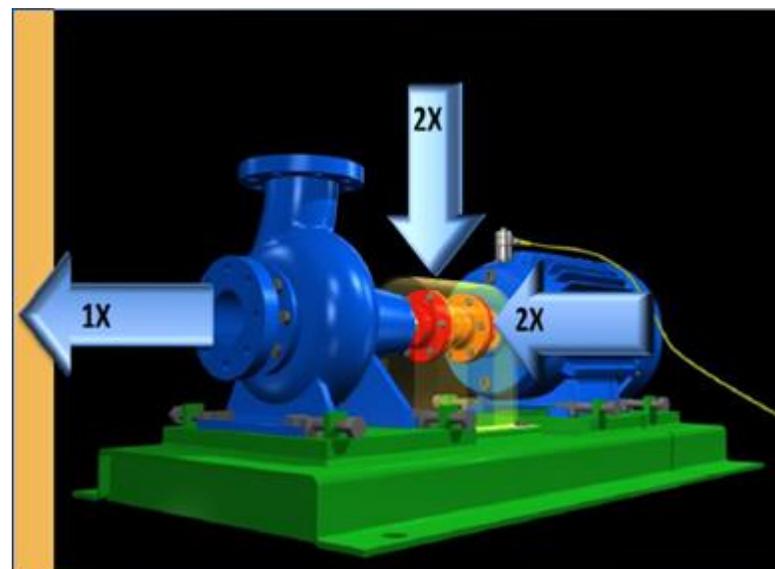


不对中

FLUKE®



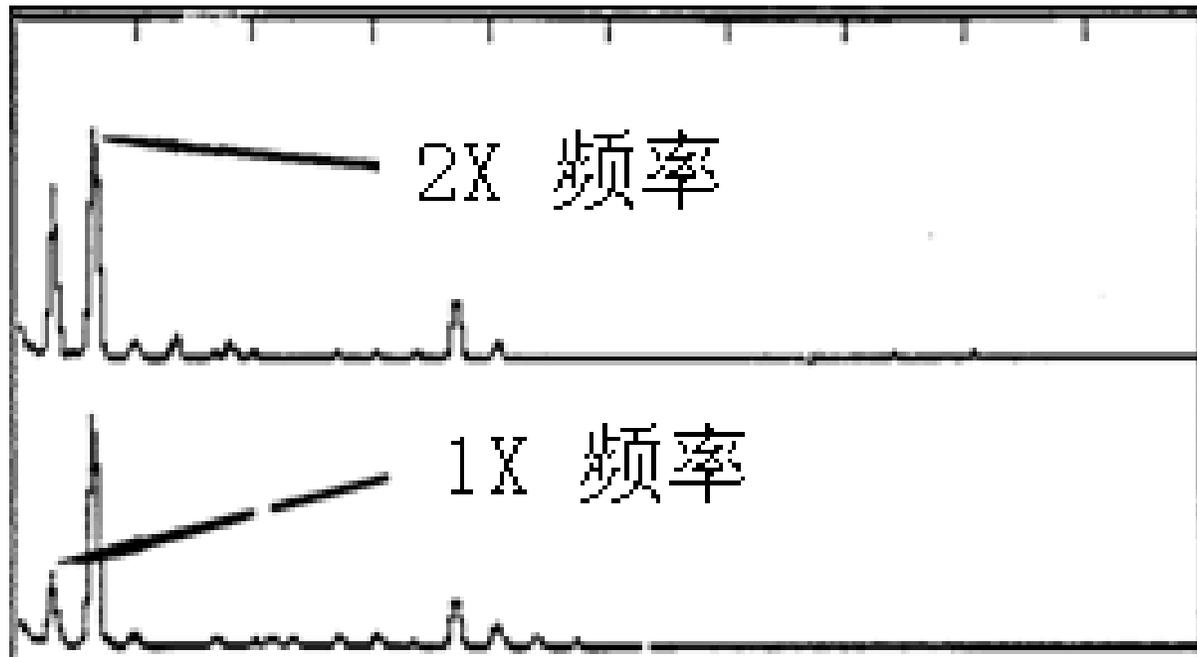
- 不对中的原因可能有以下几种：
 - 组装不佳，或组装后发生移动
 - 管道张力造成变形
 - 柔性支撑件的扭矩引起变形
 - 温度引起机器结构发生变化
 - 联轴器加工不良
 - 联轴器润滑不够充分
- 未对准会以两种方式表现出来：
 - 径向和切向方向上（平行）的2 倍频振动
 - 轴向方向上（成角度）的1倍频振动



不对中

FLUKE®

- 波形呈畸变的正弦波；
- 轴向振动较大；
- 联轴器两侧的轴向振动相差 180° ；
- 振动随负荷的变化明显；



某水泵

机器设置: BTNLSB
测量日期/时间: 11/23/2010 15:13:58

传动系统

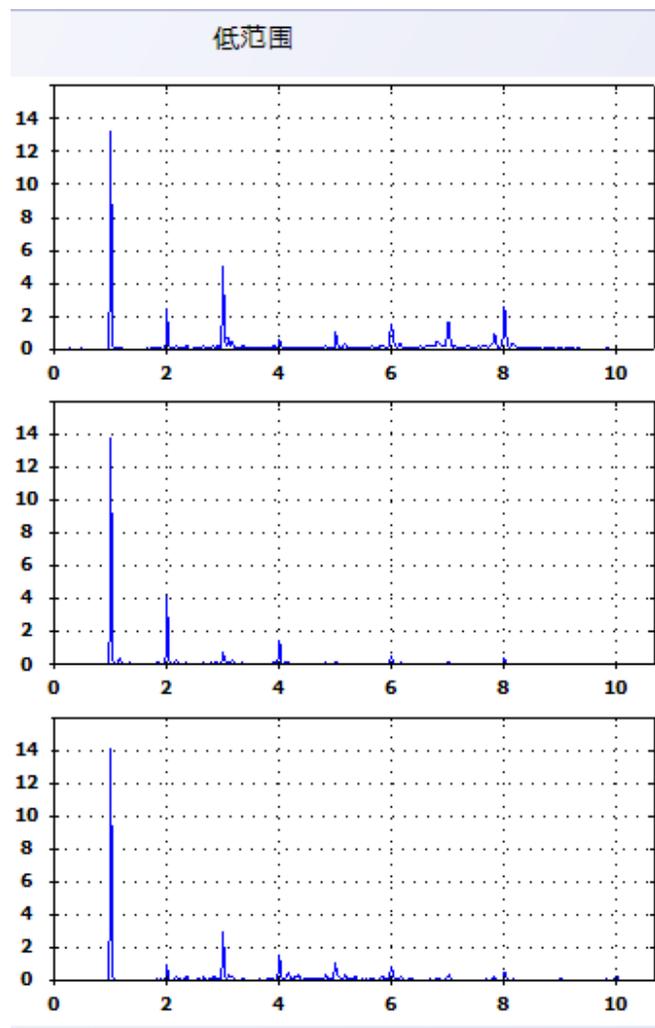


机器设置: BTNLSB

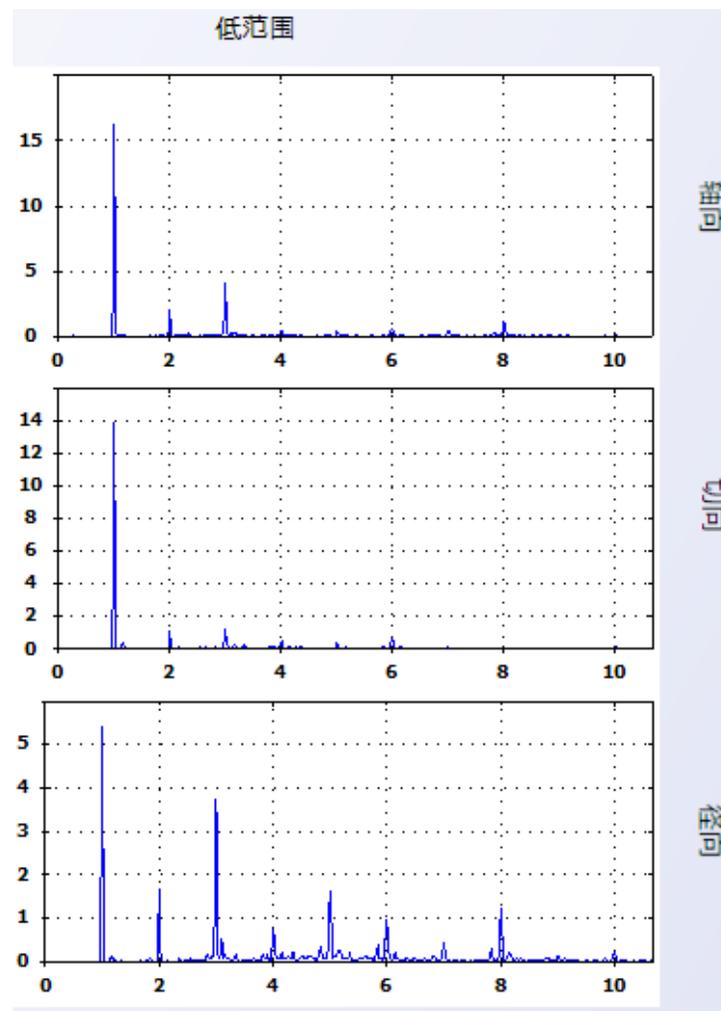
设置字段	输入
电机类型	交流
变频交流电机	否
转速单位 RPM	2940
额定功率 (kw)	22
电机安装方式	水平
电机配有	滚子轴承
电机从传动系统脱离	否
紧耦合电机	否
电机与下一组件间的耦合	是
下一组件	泵
从动组件轴承类型	滚子轴承
泵类型	离心
叶轮固定方式	双轴承
泵叶轮或叶片数 [可选]	

某水泵

活动端



主动端



下午4时45分26秒

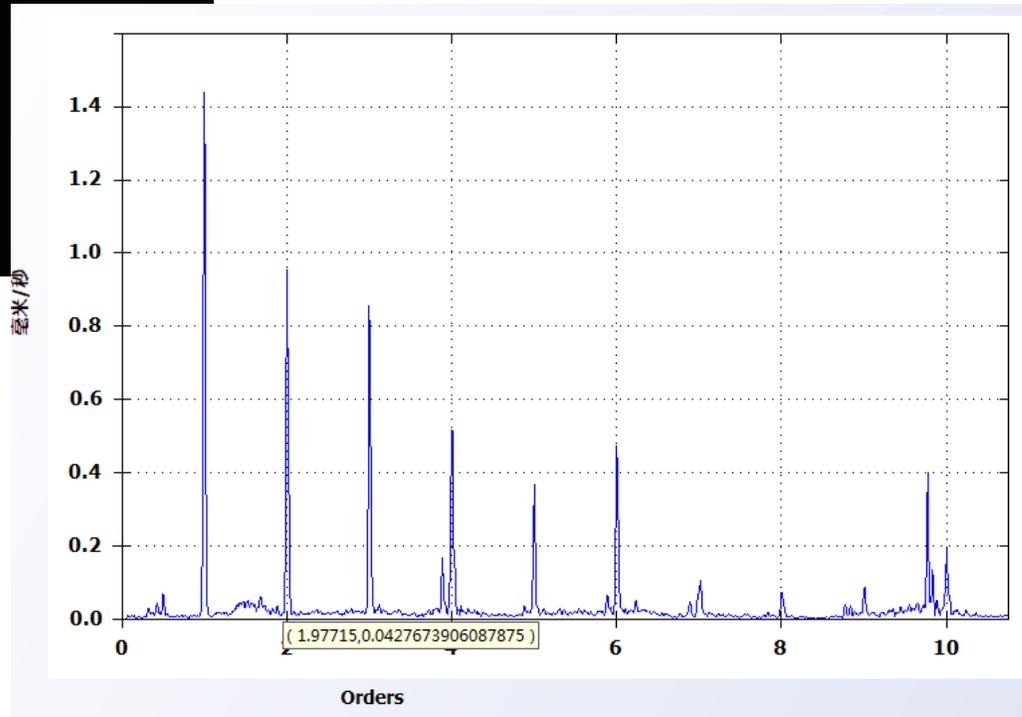
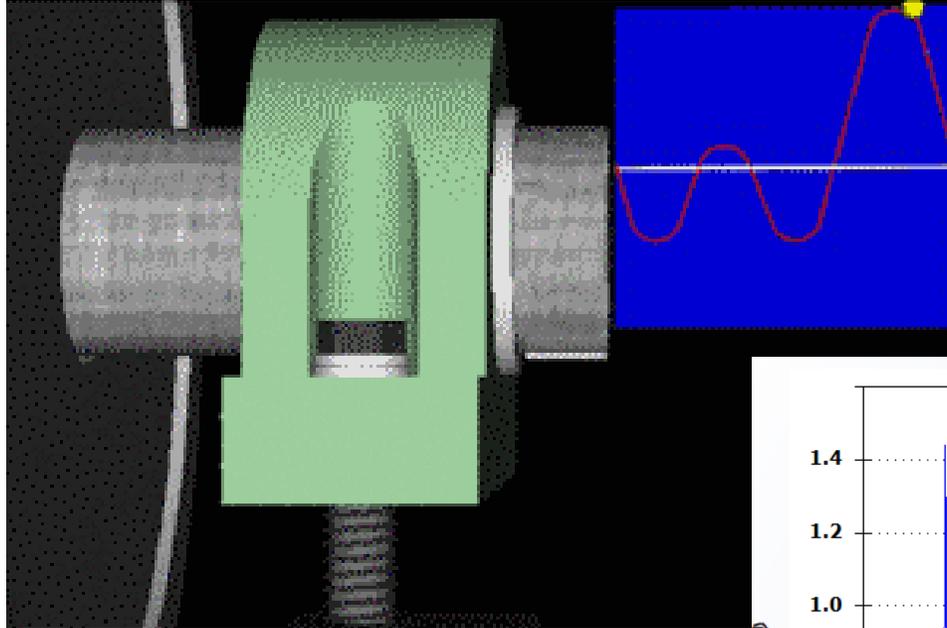
某水泵

故障说明：平行性偏差

故障严重度：中等 (40)

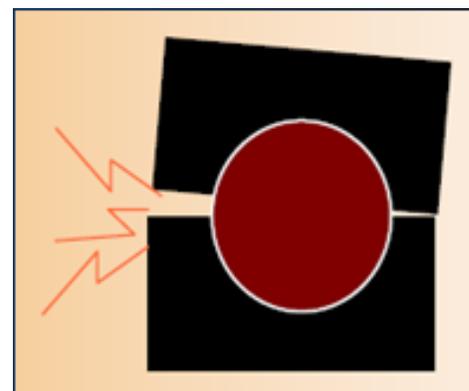
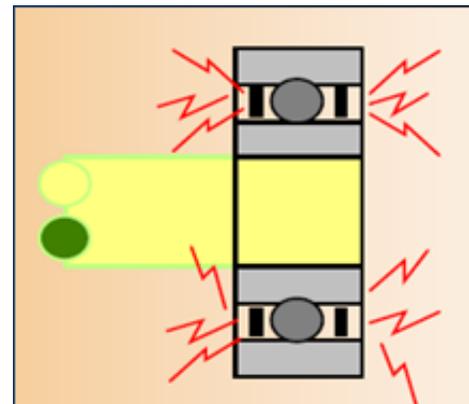
引用峰值数	轴承	轴	振幅	顺序	范围
引用峰值1	位置3	切向	4.49 mm/sec	2	低
引用峰值2	位置3	轴向	2.05 mm/sec	2	低
引用峰值3	位置2	切向	1.73 mm/sec	2	低
引用峰值4	位置3	径向	1.42 mm/sec	2	低

松动



机械松动有两种类型：

- 旋转松动：旋转松动是由机器的旋转部件与固定部件之间的过大间隙引起的（例如在轴承中）。
- 非旋转松动：非旋转松动是两个正常的固定部件之间的松动，例如，支脚和基础之间或轴承外壳和机器之间。



- 轴承座套和滚动体之间间隙过大（轴承松动）会产生1倍频的各次谐波，有时可能会延伸到10倍频率以上
- 过大的轴颈轴承间隙会产生0.5倍谐波，如图所示。它们称为“半频谐波分量”或“分谐波”。它们可由摩擦和严重的撞击而产生。
- 大多数类型的非旋转松动也会产生转速的谐波，通常不会太多，不会产生分谐波。
- 非旋转松动还可产生随机噪声，这会产生一种连续频谱，而不是确定的峰形。
- 垂直方向振动常大于水平方向；
- 松动结合面两边，振幅有明显差别；

电厂一次风机

FLUKE®

测量 日期/时间: 03/11/2011 12:54:31

传动系统



机器设置: HNYCFJ

设置字段	输入
电机类型	交流
变频交流电机	否
转速单位 RPM	1490
额定功率 (kw)	560
电机安装方式	水平
电机配有	滚子轴承
电机从传动系统脱离	否
紧耦合电机	否
电机与下一组件间的耦合	是
下一组件	吹风机
从动组件轴承类型	滚子轴承

下午4时45分26秒

电厂一次风机

FLUKE®

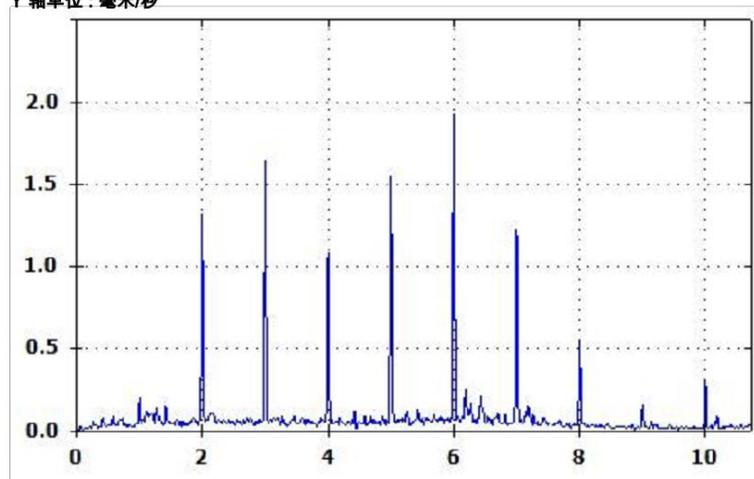


下午4时45分26秒

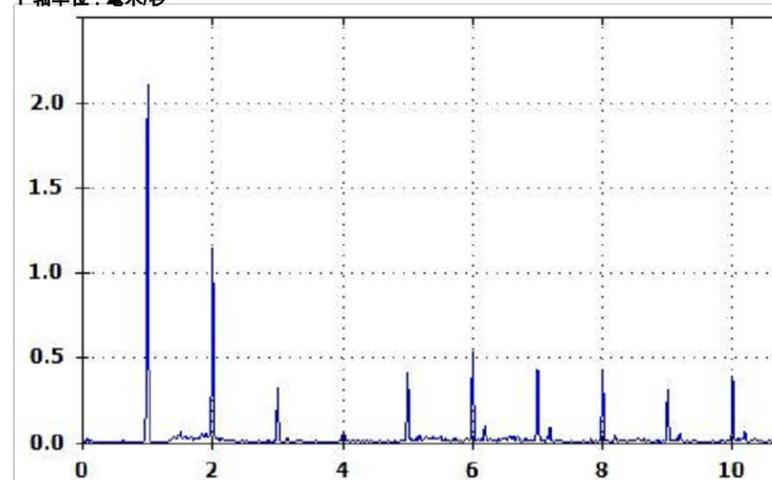
电厂一次风机

FLUKE®

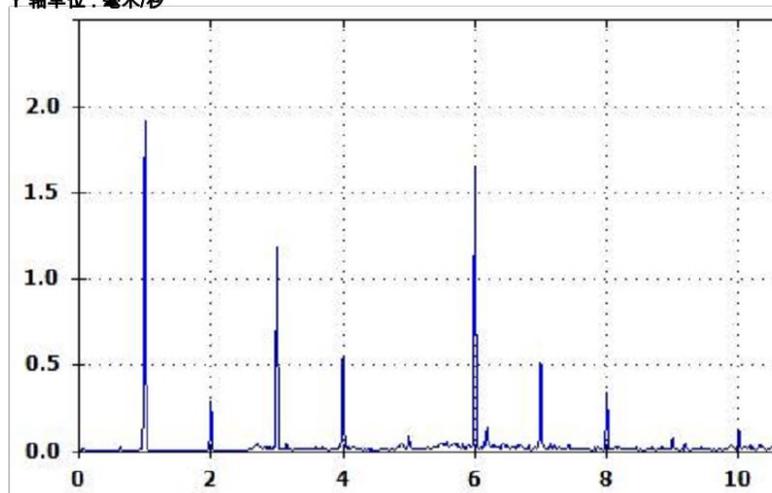
位置：位置 2
范围：低范围
轴：轴向
X 轴单位：Orders
Y 轴单位：毫米/秒



轴：切向
X 轴单位：Orders
Y 轴单位：毫米/秒



轴：径向
X 轴单位：Orders
Y 轴单位：毫米/秒



下午4时45分26秒

电厂一次风机

FLUKE®

故障说明：电机主动端轴承松动

故障严重度：极严重 (81)

引用峰值数	轴承	轴	振幅	顺序	范围
引用峰值1	位置2	轴向	1.64 mm/sec	3	低
引用峰值2	位置2	轴向	1.55 mm/sec	5	低
引用峰值3	位置2	轴向	1.23 mm/sec	7	低
引用峰值4	位置2	径向	1.18 mm/sec	3	低
引用峰值5	位置2	轴向	1.08 mm/sec	4	低
引用峰值6	位置2	轴向	0.56 mm/sec	8	低
引用峰值7	位置2	径向	0.55 mm/sec	4	低
引用峰值8	位置2	径向	0.52 mm/sec	7	低
引用峰值9	位置2	切向	0.44 mm/sec	7	低
引用峰值10	位置2	切向	0.43 mm/sec	8	低
引用峰值11	位置2	切向	0.41 mm/sec	5	低
引用峰值12	位置2	径向	0.34 mm/sec	8	低
引用峰值13	位置2	轴向	0.33 mm/sec	13	高
引用峰值14	位置2	切向	0.32 mm/sec	3	低
引用峰值15	位置2	径向	0.23 mm/sec	14	高
引用峰值16	位置2	切向	0.18 mm/sec	13	高

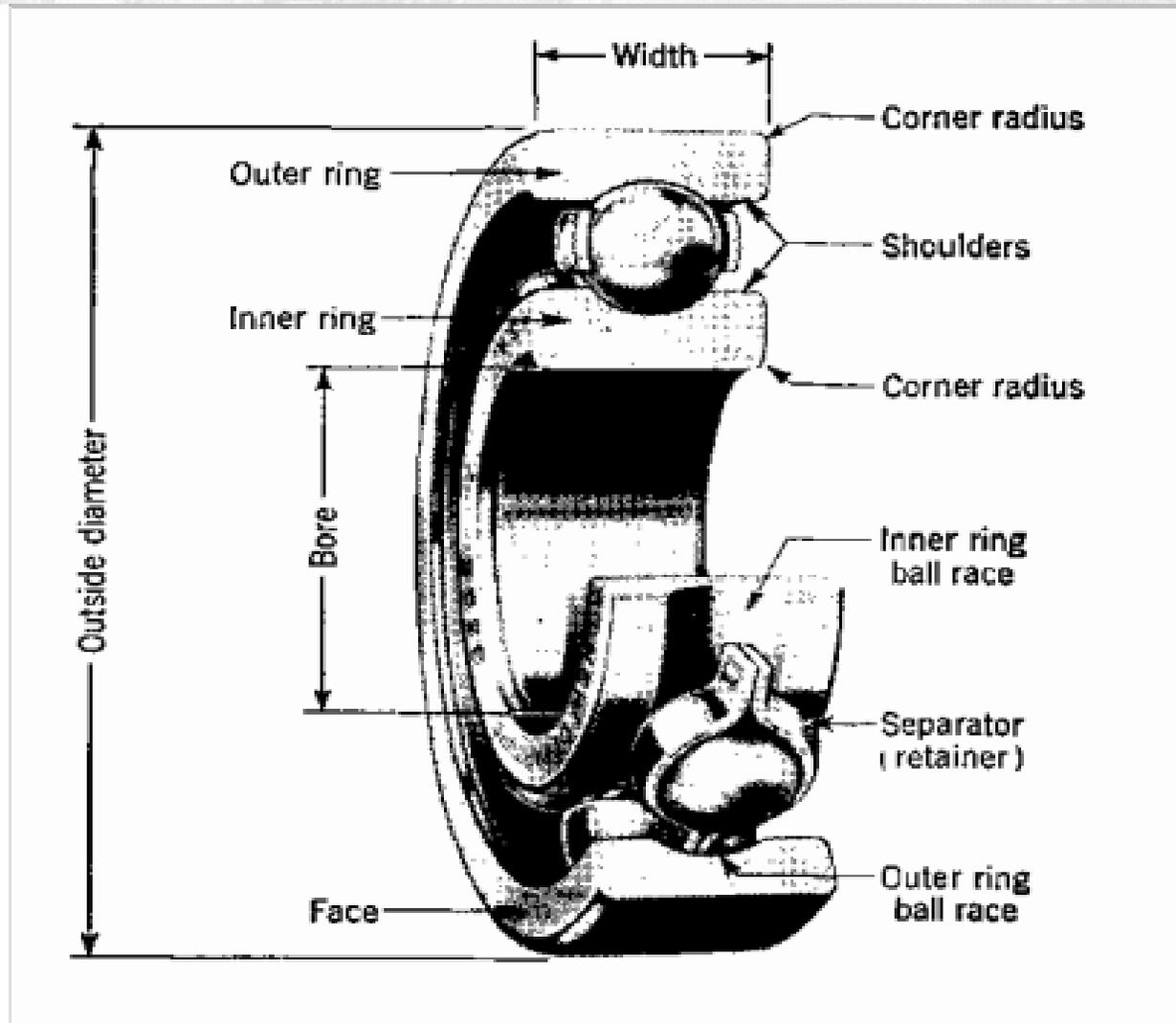
下午4时45分26秒

滚动轴承有特殊的轴承失效形式，可以从波形和频谱数据中观察到

轴承特征频率是真实的缺陷频率

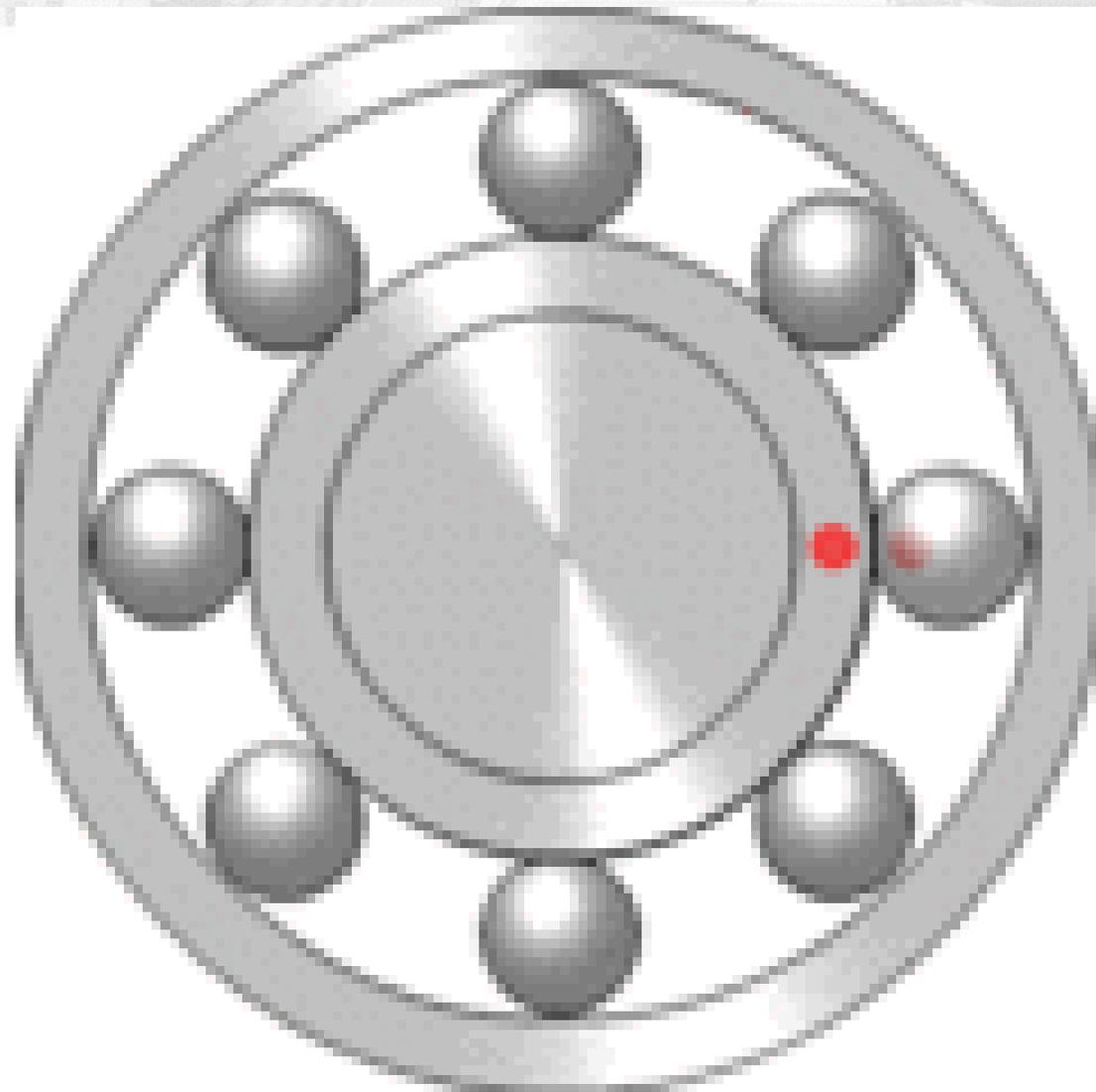
这些频率只在轴承确实有缺陷时出现

滚动轴承的结构



故障有振动特征

FLUKE®



滚动轴承的失效频率

$$\begin{aligned} \text{FTF} &= \left(\frac{\Omega}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{B}{P}\right) \cos CA\right] \\ \text{BPFI} &= \left(\frac{N}{2}\right) \Omega \left[1 + \left(\frac{B}{P}\right) \cos CA\right] \\ \text{BPFO} &= \frac{N}{2} \Omega \left[1 - \frac{B}{P} \cos CA\right] \\ \text{BSF} &= \left(\frac{P}{2B}\right) \Omega \left[1 - \left(\frac{B}{P}\right)^2 \cos^2 CA\right] \end{aligned}$$

CA= 接触角

Ω= 设备转速

N=滚动体个数

P=节园直径

B=滚珠或滚动体直径

FTF=保持架通过频率

fundamental train frequency

BPFI=内环通过频率

ball pass frequency inner race

BPFO=外环通过频率

ball pass frequency outer race

BSF=滚珠旋转频率

ball spin frequency

轴承失效频率和设备转速的单位相同

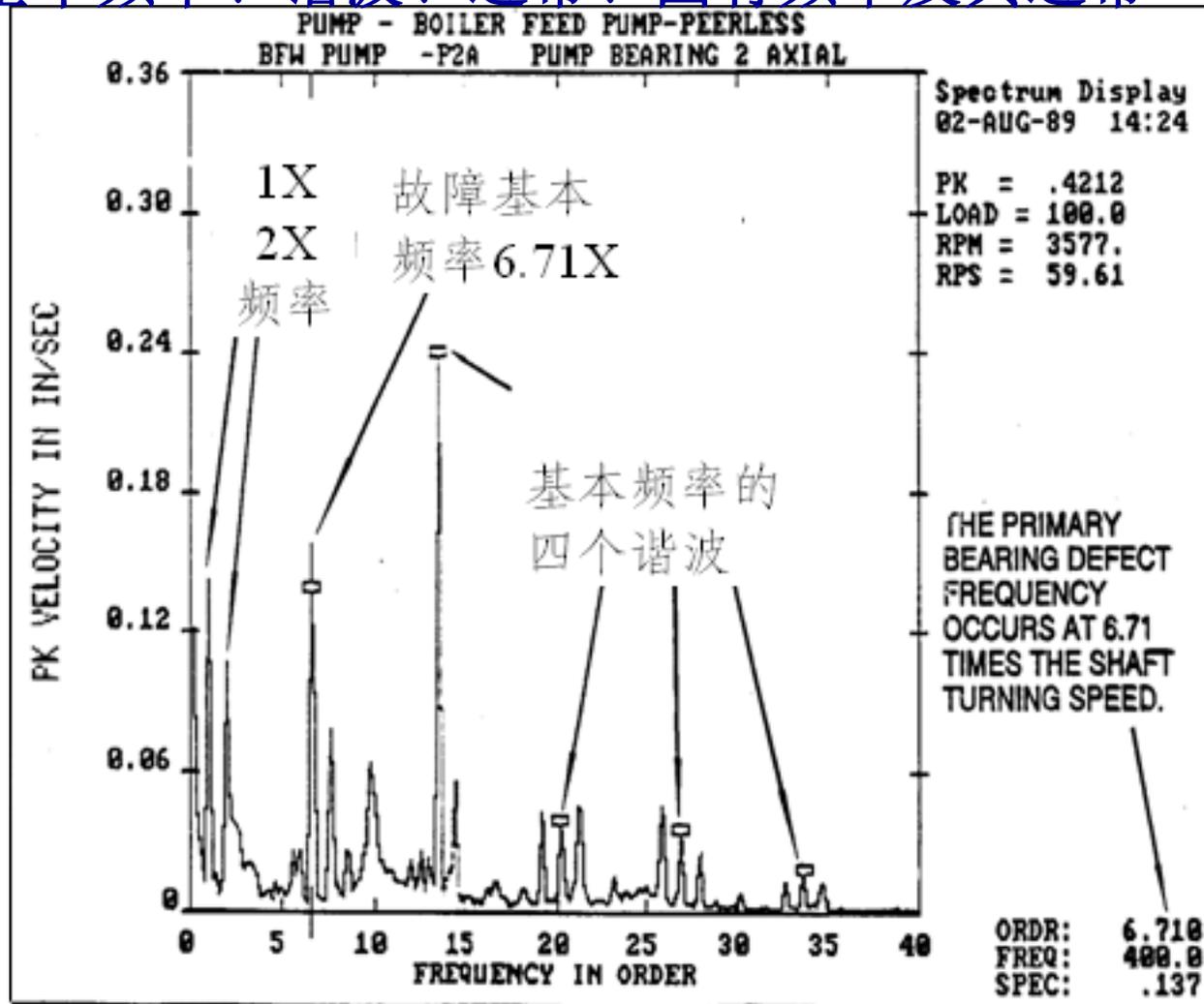
滚动轴承的失效频率

不要忙着计算故障频率，首先寻找故障征兆
不同厂家—不同型号—不同滚珠数

BEARING TYPE	#B/R	FTE	BSF	BPFO	BPFI
FAG 22322EAS	15	.409	2.591	6.131	8.869
FAG 22322ESA KM	15	.410	2.593	6.150	8.850
FAG 22322S	14	.401	2.356	5.615	8.385
KOY 22322R	14	.404	2.446	5.662	8.338
KOY 22322RH	14	.407	2.527	5.696	8.304
LBT 22322	15	.406	2.499	6.092	8.908
NSK 22322CAM	15	.413	2.724	6.180	8.820
NSK 22322EA	16	.413	2.730	6.600	9.360
NSK 22322H	15	.409	2.577	6.120	8.880
NSK 22322M	14	.404	2.426	5.651	8.349
NTN 22322B	14	.404	2.443	5.655	8.345
RHP 22322	15	.410	2.603	6.143	8.857
SKF 22322	15	.410	2.603	6.143	8.858
SKF 22322 E	16	.411	2.645	6.571	9.429
SKF 22322 EJA/VA	16	.411	2.645	6.571	9.429
SKF 22322 EJA/VA	16	.411	2.645	6.571	9.429
SKF 22322 EK	16	.411	2.645	6.571	9.429
SKF 22322 EKJA/V	16	.411	2.645	6.571	9.429
SKF 22322C	15	.412	2.672	6.174	8.826

滚动轴承的频谱

基本频率、谐波、边带、固有频率及其边带



螺杆压缩机

机器设置: KSF9
测量 日期/时间: 10/12/2010 04:37:00

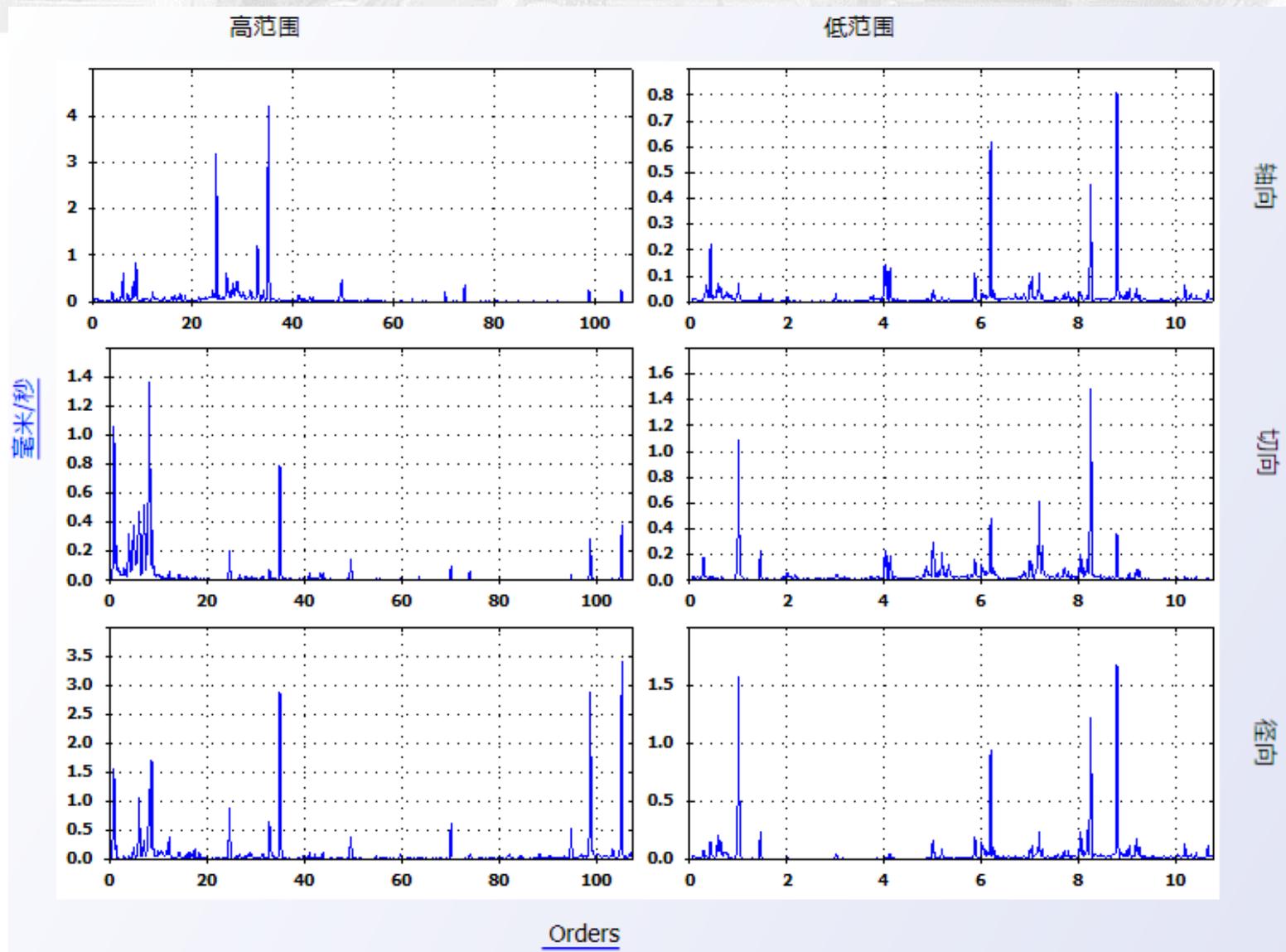
传动系统



设置字段	输入
电机类型	交流
变频交流电机	否
转速单位 RPM	1485
额定功率 (kw)	244
电机安装方式	水平
电机配有	滚子轴承
电机从传动系统脱离	否
紧耦合电机	否
电机与下一组件间的耦合	是
下一组件	压缩机
从动组件轴承类型	滚子轴承
压缩机类型	螺杆压缩机
螺牙/螺纹数 [可选]	

螺杆压缩机

位置4



螺杆压缩机

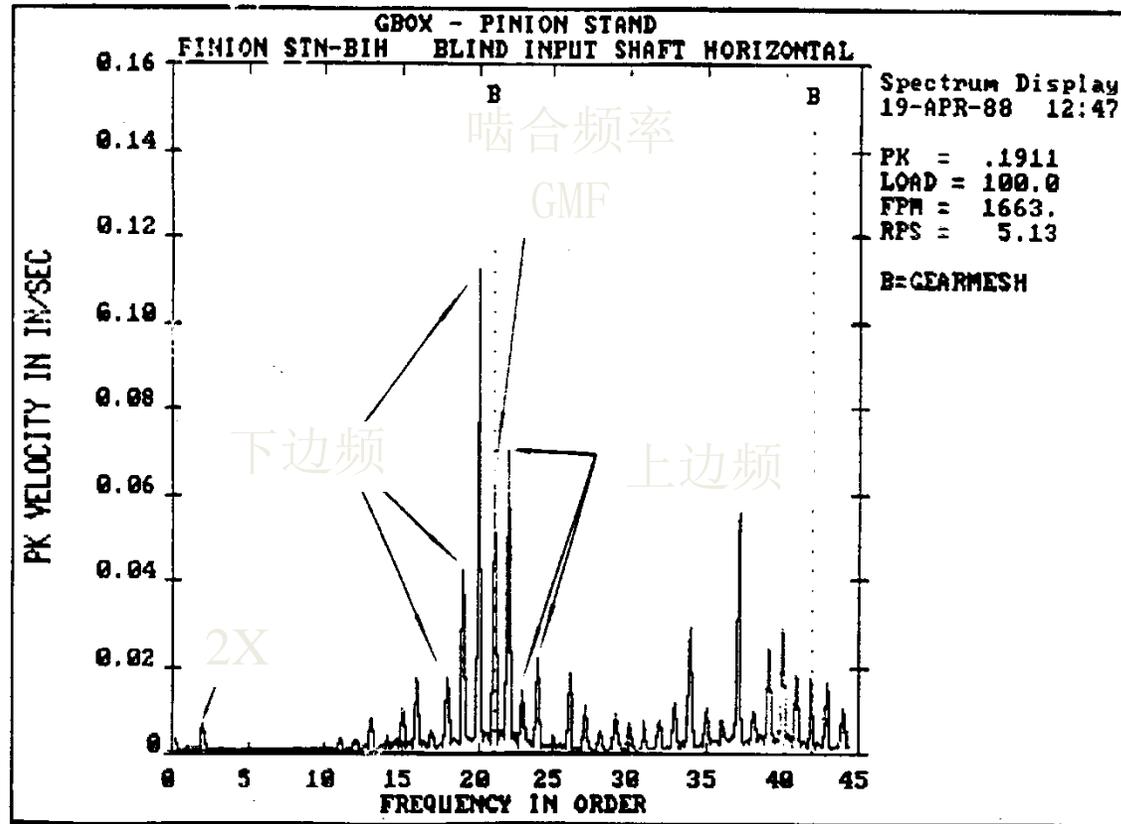
故障说明：压缩机活动端轴承磨损

故障严重度：严重 (61)

引用峰值数	轴承	轴	振幅	顺序	范围
引用峰值1	位置4	轴向	4.21 mm/sec	35.1	高
引用峰值2	位置4	轴向	3.18 mm/sec	24.7	高
引用峰值3	位置4	径向	2.89 mm/sec	98.6	高
引用峰值4	位置4	径向	1.68 mm/sec	8.79	低
引用峰值5	位置4	切向	1.48 mm/sec	8.24	低
引用峰值6	位置4	径向	1.22 mm/sec	8.24	低
引用峰值7	位置4	轴向	0.81 mm/sec	8.79	低

齿轮箱的故障分析

啮合频率及其谐波、固有频率、边频
滚动轴承频率



纸厂辊子

FLUKE®

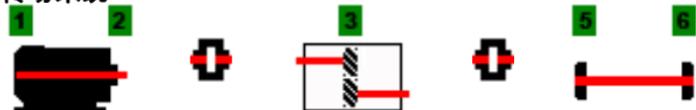
机器设置：

JHYYXG

测量日期/时间：

02/24/2011 10:56:32

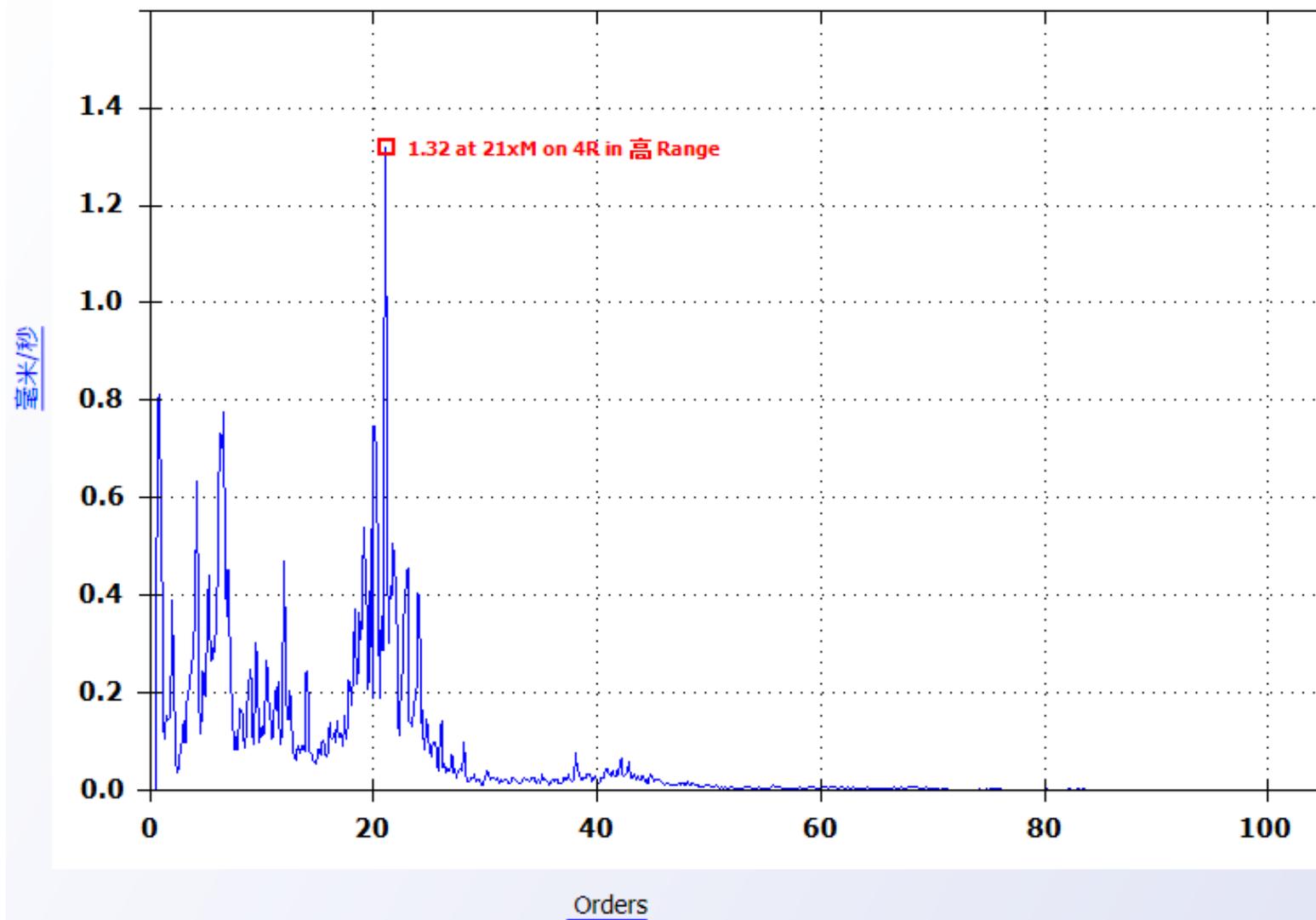
传动系统



设置字段	输入
电机类型	交流
变频交流电机	是
转速单位 RPM	750
额定功率 (kw)	250
电机安装方式	水平
电机配有	滚子轴承
电机从传动系统脱离	否
紧耦合电机	否
电机与下一组件间的耦合	是
下一组件	变速箱
变速箱轴承类型	滚子轴承
变速箱内部变速器数量	1
已知哪些数据？	齿轮比
A 比率	1
A 比率到	2.71
变速箱与下一组件间是否存在活动耦合	是
变速箱所连接到的下一组件	心轴

下午4时45分26秒

纸厂辊子



纸厂辊子

故障说明：变速箱输入轴松动或可能为小齿轮损坏

故障严重度：严重 (57)

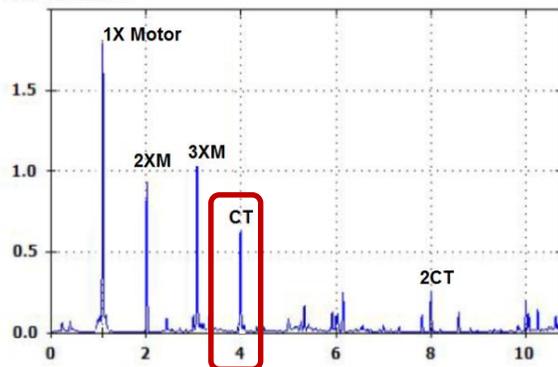
引用峰值数	轴承	轴	振幅	顺序	范围
引用峰值1	位置4	径向	1.32 mm/sec	21	高
引用峰值2	位置4	轴向	0.84 mm/sec	7	低
引用峰值3	位置4	轴向	0.81 mm/sec	2	低
引用峰值4	位置4	径向	0.75 mm/sec	20	高
引用峰值5	位置4	轴向	0.58 mm/sec	3	低
引用峰值6	位置4	轴向	0.56 mm/sec	5	低
引用峰值7	位置4	轴向	0.49 mm/sec	12	高
引用峰值8	位置3	径向	0.42 mm/sec	21	高
引用峰值9	位置3	轴向	0.34 mm/sec	7	低
引用峰值10	位置3	轴向	0.33 mm/sec	22	高
引用峰值11	位置3	切向	0.33 mm/sec	12	高
引用峰值12	位置4	切向	0.29 mm/sec	3	低
引用峰值13	位置4	切向	0.28 mm/sec	5	低
引用峰值14	位置3	轴向	0.26 mm/sec	23	高
引用峰值15	位置4	径向	0.24 mm/sec	4	低
引用峰值16	位置3	轴向	0.22 mm/sec	3	低
引用峰值17	位置3	切向	0.22 mm/sec	3	低
引用峰值18	位置3	轴向	0.20 mm/sec	5	低

诊断中的问题

注意设备部件的频率

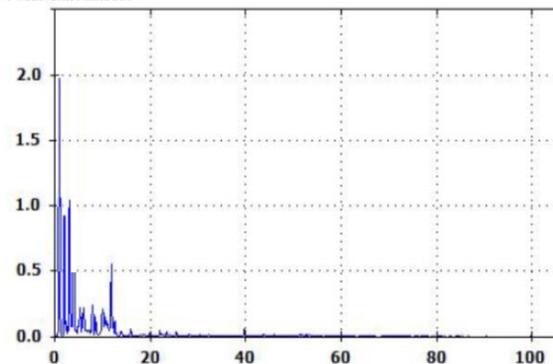
电机数据-低频范围

Location : Location 1
Range : Low range
Axis : Tangential
X Axis Unit : Orders
Y Axis Unit : mm/sec



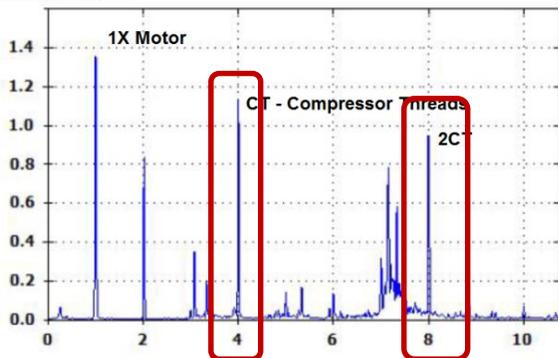
电机数据-高频范围

Location : Location 1
Range : High range
Axis : Tangential
X Axis Unit : Orders
Y Axis Unit : mm/sec



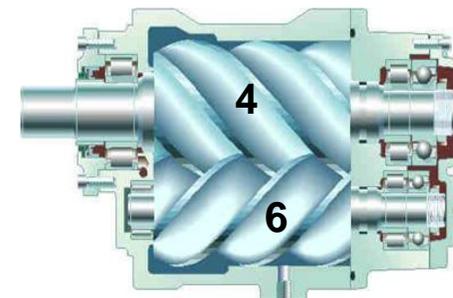
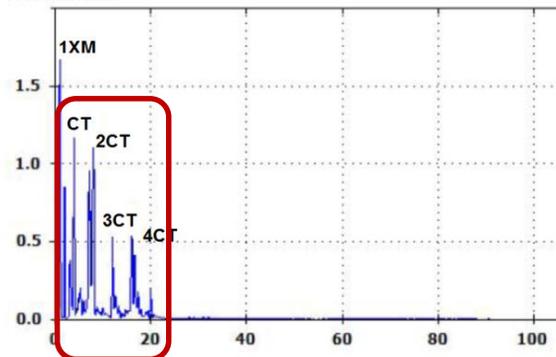
压缩机数据-低频范围

Location : Location 3
Range : Low range
Axis : Tangential
X Axis Unit : Orders
Y Axis Unit : mm/sec

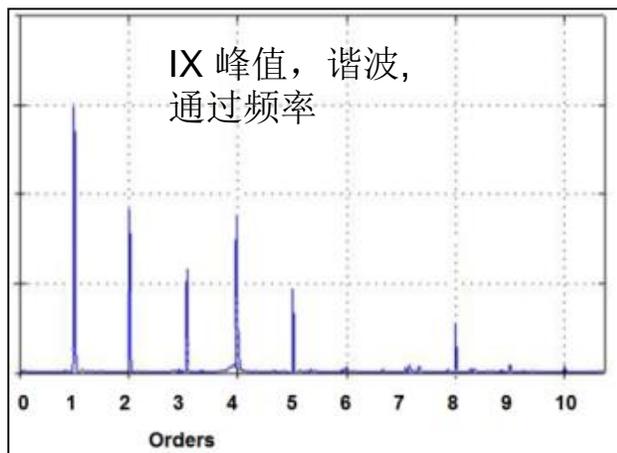


压缩机数据-高频范围

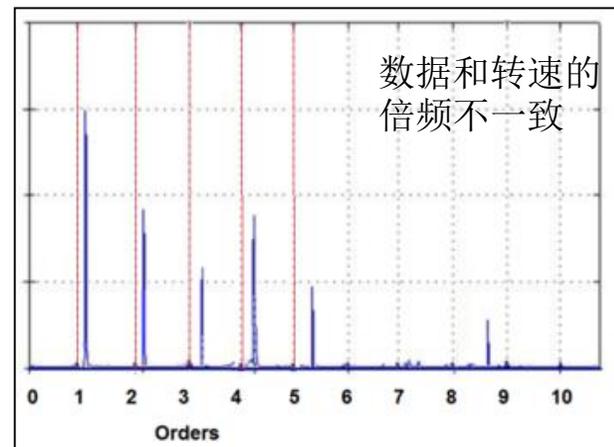
Location : Location 3
Range : High range
Axis : Tangential
X Axis Unit : Orders
Y Axis Unit : mm/sec



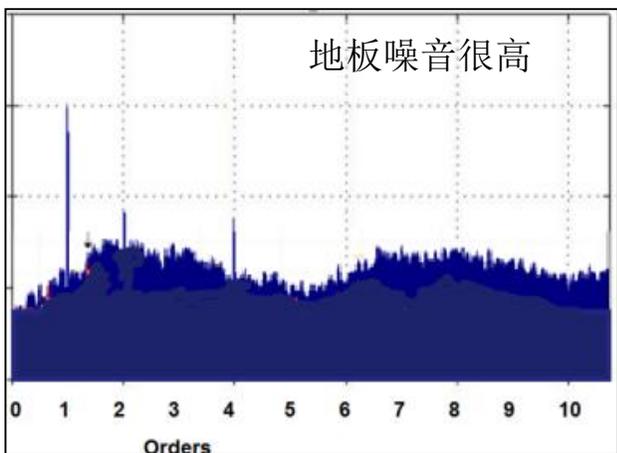
哪些是错误数据



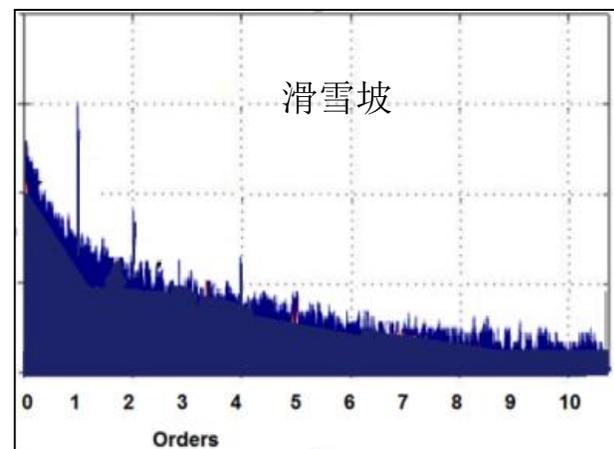
正确数据



转速错误



传感器松动



传感器过热或过载

诊断出的四类常见故障之外的故障

原因：

- 设置和实际情况不符
- 数据采集不准确或数据不足
- 存在四类故障之外的故障

解决办法：

- 检查机器设置
- 重新采集数据
- 深入分析

电气问题:

变频驱动产生的电气转换问题

电机部件（定子，通风，电刷，转换器）故障

电机内部松动

气隙不均

三相不平衡

轴承外的波及磨损或缺陷

泵部件（流道，叶片，活塞，轴，转子）磨损或间隙问题

电机冷却风扇损坏

齿轮箱输入轴齿轮问题

一级齿轮啮合或磨损

风扇轮摇动

风扇内部积灰或扇叶间隙问题

壳体问题

驱动皮带不规则

联轴器磨损

压缩机部件（转子螺纹，活塞，扇叶，螺杆）磨损

非标准故障

FLUKE®

流体相关:

- 泵气穴或空气摄入
- 风扇气流紊乱
- 压缩机气体脉动

结构:

- 结构振动或共振
- 电机或泵弹性连接
- 电机基础弹性或共振
- 基础刚性差或共振
- 基础振动
- 风机连接横向刚性低

气体:

- 加速度传感器过载
- 油膜涡动
- 油膜震荡