

设备诊断实施技术丛书



振动监测与诊断

佟德纯 李华彪 编著

上海科学技术文献出版社

设备诊断实施技术丛书

振动监测与诊断

佟德纯

江苏工业学院图书馆
藏书章

上海科学技术文献出版社

责任编辑：方 虹

封面设计：石亦义

设备诊断实施技术丛书

振 动 监 测 与 诊 断

佟德纯 李华彪 编著

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号 邮政编码 200031)

全国新华书店经销

上海科技文献出版社昆山联营厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 6 字数 145 000

1997年1月第1版 1997年1月第1次印刷

印数：1—1 100

ISBN 7-5439-0969-3/T·435

定 价：6.50 元

《设备诊断实施技术丛书》编委会

主任委员：朱林生

副主任委员：沈一飞

主 编：佟德纯

委 员：(姓氏笔划为序)

王大义 叶万水 石来德

华占秀 孙雪麟 李柱国

陈兆能 何维亨 吴震球

单怀俊 杨建珍 萨本佶

葛修鑫 蔡 正

前 言

高速发展的现代科技和社会消费,要求工业产品的性能和质量都要达到前所未有的高标准,这首先要依赖于工业生产设备的高精密度、高完善度和高可靠度。因此,现代工业中,对各种生产设备的管理显得尤为重要,越来越引起企业家和工程技术界的重视。这不仅因为生产设备的失效或精度的下降都要付出昂贵的代价,而且单靠人的经验去分析判断十分困难。现代的服务于设备终生的设备管理中,包括设备运行、状态监测、故障诊断、趋势预报、决策维修等,所采用的技术手段及分析方法有几十种之多,并向着智能化、综合化和网络化发展,全面更新了原有的管理概念。高级精密的设备监测、诊断、分析仪器及高水准的管理技术人员,已成为现代化企业不可缺少的重要成员。

我国政府的有关部门将设备状态监测和故障诊断工作的要求纳入了《国营工业交通设备管理条例》之中,明确规定:“要根据生产需要,逐步采用现代故障诊断和状态监测技术、发展以状态监测为基础的预防维修体制”。把设备诊断技术列入了企业管理法规,并指出了设备诊断技术要为维修体制改革和设备现代化管理服务。

设备状态监测与故障诊断是设备诊断中的两个过程,两者既有密切联系又有区别。设备状态监测是指对设备某些参数(如振动、噪声、温度等)进行测取,将测定值与规定的正常值(门限值)进行比较,以判别设备的工作状态是否正常。若对设备进行定期或连续监测便可获得设备状态变化的趋势性规律,进而对

设备剩余的寿命作出估计,于是便可对设备状态进行预测、预报。状态监测又称为简易诊断,只要恰当选择监测参数、测点以及监测周期等,一般都能取得良好的效果,这种初级诊断适于现场作业人员实施。对设备产生故障的原因、部位和严重程度作出判断,为设备优化管理决策提供依据,称为精密诊断,由专门技术人员实施。

设备诊断技术属于信息论范畴,因此它包括信号的采集、信号的分析处理(数据处理)和状态识别(包括判断和预报)三个基本环节。然而,信息技术不等于诊断技术。从事设备诊断的技术人员必须具备有关设备及零部件工作机理方面的知识,以及用于诊断和仪器设备或分析系统的有关知识。由于诊断方法及手段越来越发展,有关知识面也越来越广阔。现在以设备物理参数分类的常用设备状态诊断方法大致有以下几种:

(1) 振动诊断:以机械振动、冲击、机械导纳以及模态参数为检测目标。

(2) 声学诊断:以噪声(声压和声强)、声阻、超声、声发射为检测目标。

(3) 温度诊断:以温度、温差、温度场、热象为检测目标。

(4) 污染诊断:以泄漏、残留物、气体、液体、固体磨粒成分变化为检测目标。

(5) 光学诊断:以亮度、光谱和各种射线效应为检测目标。

(6) 性能趋向诊断:以机械设备各种主要性能指标为检测目标。

(7) 强度诊断:以力、应力、扭矩力为检测目标。

(8) 压力诊断:以压力、压差以及压力脉动为检测目标。

(9) 电参数诊断:以电流、电压、电阻、功率等电信号及磁性为检测目标(包括对钢丝绳以电磁特性为检测目标)。

(10) 表面形貌诊断:以变形、裂纹、斑点、凹坑、色泽等为检测目标。

由上海市设备管理协会主持,邀请了多年来从事设备诊断技术工作及研究工作的专家,编写一套《设备诊断实施技术丛书》。丛书分批推出,各分册以设备状态中不同物理参数和设备类别为专题,介绍诊断信号的获取、分析、计算等的方法及原理,以及它们的检测标准,并辅以使用的各种诊断仪器方面的基本知识和实际操作步骤,供企业设备诊断技术人员和管理人员在工作中作技术指导用书。对处于工作状态的设备进行诊断,不仅是与看不见的东西打交道,而且因为自身因素及环境因素的复杂,有极大的可变动性,人们必须依赖科学的方法和数学推理作出判断。技术人员只有熟知推导过程,才能准确、合理地使用诊断仪器显示系统提供的结论,最终达到对设备进行准确诊断的目的,并能不断适应更新的科学仪器为他们提供的诊断方法。为此,丛书将各种数学推导也作基本介绍,但不多也不深,如要作进一步深入研究,可以求助于许多已经出版的相应科目的理论专著。

设备诊断是一门新兴的边缘学科,同时也是发展迅速的学科。丛书将根据该领域内新技术新方法应用的出现,不断推出新的分册。希望这套书能成为技术人员和管理人员的得力助手,不负全体编写人员的初衷和他们的辛勤笔耕。

目 录

第 1 章 振动诊断技术基础	(1)
§ 1.1 机械振动	(1)
一、简谐振动	(1)
二、振动要素的关系	(3)
三、实测的机械振动	(6)
四、复杂周期振动的分解	(8)
五、近似周期振动	(15)
§ 1.2 振动监测方式	(17)
一、周期监测与永久监测	(17)
二、运行监测与人工试验	(17)
三、直接监测与间接监测	(18)
四、系统功能监测	(18)
§ 1.3 机械振动量级与标准	(19)
一、绝对单位制与相对单位制	(19)
二、机械设备振动标准	(20)
第 2 章 振动测试	(24)
§ 2.1 测振传感器	(24)
一、电涡流式位移传感器	(25)
二、电动式速度传感器	(28)
三、压电式加速度传感器	(31)

§ 2.2 放大器与记录器	(40)
一、微积分放大器	(40)
二、电压放大器与电荷放大器	(43)
三、磁带记录仪	(47)
§ 2.3 振动监测系统	(52)
一、振动监测的基本系统	(52)
二、周期巡回检测系统	(55)
三、计算机辅助诊断的监测系统	(57)
第 3 章 相关分析与故障定位	(59)
§ 3.1 振动信号的相关描述	(60)
一、相关系数	(60)
二、相关函数	(61)
三、应用示例	(66)
§ 3.2 相关分析与故障定位	(67)
一、理论依据	(67)
二、相关直线定位	(68)
三、相关平面定位	(69)
第 4 章 振动频谱与特征分量	(71)
§ 4.1 振动波形的变换	(71)
一、振动波形的特征量	(71)
二、复杂周期振动的分解	(73)
三、振动波形的积分变换与频谱分析	(75)
§ 4.2 轴和轴系的振动特征	(76)
一、不平衡	(77)
二、轴弯曲	(77)

三、轴系不对中与联轴节的故障	(78)
四、碰磨	(80)
五、松动	(80)
§ 4.3 轴承的振动特征	(81)
一、滚动轴承的振动特征	(81)
二、滚动轴承故障特征频率	(82)
三、滑动轴承的半速涡动与油膜振荡	(85)
§ 4.4 齿轮的振动特征与调制边带	(87)
一、齿轮啮合振动的基本成分	(88)
二、齿轮啮合振动的调制边带	(89)
三、齿轮振动的频谱	(90)
§ 4.5 旋转机械的振动特征	(92)
一、离心式旋转机械	(92)
二、叶片类旋转机械	(95)
§ 4.6 J. Sohve 振动原因分析表	(97)
第 5 章 状态监测与预测分析	(102)
§ 5.1 状态监测准则	(102)
§ 5.2 机械常规振动监测	(103)
一、振平值监测	(103)
二、转速振平图监测	(108)
三、响应频谱监测	(109)
四、转速谱图监测	(113)
§ 5.3 特定设备的监测	(114)
一、离心泵的监测	(114)
二、鼓风机的监测	(116)
三、压缩机的监测	(117)

四、齿轮传动装置的监测	(119)
五、电动机与发电机的监测	(121)
§ 5.4 振幅的定期测定	(122)
§ 5.5 预测频谱特征分析	(124)
第 6 章 故障诊断实例选	(129)
§ 6.1 大型回转支承装置的故障诊断	(129)
一、诊断目的及对象	(129)
二、诊断方法及分析	(130)
三、诊断结论	(132)
§ 6.2 齿轮箱监测与诊断	(132)
一、诊断目的及对象	(132)
二、诊断方法及分析	(132)
三、诊断结论	(135)
§ 6.3 大电机的故障诊断	(136)
一、诊断目的及对象	(136)
二、诊断方法及分析	(136)
三、诊断结论	(138)
§ 6.4 阿依-24 航空发动机监测与论断	(138)
一、诊断目的及对象	(138)
二、诊断方法及分析	(139)
三、诊断结论	(143)
§ 6.5 工艺系统误差诊断	(145)
一、诊断目的及对象	(145)
二、诊断方法及分析	(145)
三、诊断结论	(148)
§ 6.6 大型钢架振动裂纹诊断	(149)

一、诊断目的及对象	(149)
二、分析手段及方法	(149)
三、诊断结论	(152)
§ 6.7 4E135 柴油机头诊断	(153)
一、诊断目的及对象	(153)
二、诊断方法及分析	(154)
三、诊断结论	(158)
第 7 章 振动监测诊断的仪器及系统	(159)
§ 7.1 简易诊断仪器	(160)
一、振动计	(160)
二、振动测量仪	(162)
三、便携式振动分析仪	(162)
四、冲击振动测量仪	(166)
§ 7.2 精密诊断仪器	(167)
一、离线监测与巡检系统	(167)
二、在线监测与诊断系统	(171)
§ 7.3 计算机辅助监测诊断系统	(174)

第 1 章 振动诊断技术基础

§ 1.1 机械振动

在机械设备的状态监测和故障诊断技术中,振动诊断是普遍采用的基本方法。当机械内部发生异常时,随之会出现振动加大,因此,根据对机械振动信号的测量和分析,可不用停机和不用解体的方式对其劣化程度和故障性质有所了解。另外,也因为振动的理论和测量方法都比较成熟,且简单易行,促使了振动诊断方法的普及。

机械振动的内含为机械系统运动的位移、速度、加加速度量值大小与其平均值相比,其比值随时间而交替重复变化的过程。机械振动可分为确定性振动和随机振动两大类,确定性振动的振动位移可用简单的数学解析式表示为 $d=D(t)$ 。它是时间 t 的函数。而随机振动则因其振动波形呈不规则变化,只能用概率统计的方法来描述。

机械设备状态监测中常遇到的振动有:周期振动、近似周期振动、窄带随机振动和宽带随机振动,以及以上几种振动的组合。其中周期振动和近似周期振动属确定性振动范围,由简谐振动及简谐振动的叠加构成。

一、简谐振动

简谐振动是机械振动中最基本、最简单的振动形式。图 1-1 所示为弹簧系数为 K 和质量为 M 的重锤所组成的弹簧质量系

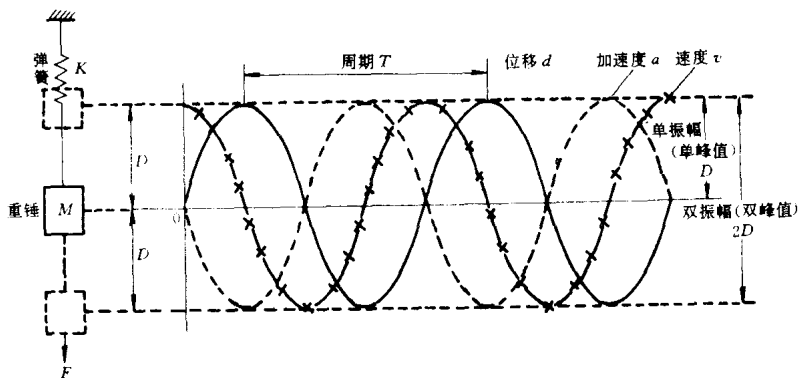


图 1-1 简谐振动的基本性质

统及振动波形。若拉下重锤，当弹簧自然长度达到 D 后放开，则重锤作周期性的上下振动，此时如取时间 t 为横轴，则重锤在任何时间的位置，即重锤的位移便可用图中实线表示的正弦波来描述。这种位移 d 对时间 t 形成的可以用正弦曲线表示的周期性振动称为简谐振动，其振幅的数学表达式为

$$X = D \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi \right) \quad (1-1)$$

式中 D ——最大振幅，又称峰值， $2D$ 称为双峰值，其单位是 mm 或 μm ($1\mu\text{m} = 1/1000\text{mm}$)；

T ——振动的周期，即再现相同振动状态的最小时间间隔，单位为 s；

φ ——初相位；

ω ——角速度 (rad/s)。

振动周期的倒数称为振动频率，单位为 Hz，即

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)}$$

频率 f 又可用角频率来表示，其角频率为：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ (rad/s)}$$

ω 和 f 的关系为: $\omega = 2\pi f \text{ (rad/s)}$ 及 $f = \omega/2\pi$ 。因此式(1-1)可改写为:

$$X = D \sin(\omega t + \varphi)$$

此处令 $\varphi = \omega t + \varphi$ 。 φ 称为简谐振动的相位, 是时间 t 的函数, 单位为 rad。其中 φ 为初始相位, 单位仍是 rad。

描述机械振动的三个基本要素即是上述的振幅、频率和相位。

均值 X_{av} , 均方值 X_{rms}^2 , 有效值 X_{rms} 、波形因数 F_f 和波峰因数 F_c 也是表示一般振动性质的指标, 在机械设备状态监测和诊断中常常要用到。

$$\text{均值: } X_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |D| dt = \frac{2}{\pi} D = 0.637D$$

$$\text{有效值: } X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T D^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} D = 0.707D$$

$$\text{波形因数: } F_f = \text{有效值/均值} = 1.11$$

$$\text{波峰因数: } F_c = \text{振幅/有效值} = \sqrt{2}$$

二、振动要素的关系

当图 1-1 中, 弹簧使重锤的位移作简谐振动之同时, 重锤的运动速度和加速度也在变化, 它们的运动轨迹也可以用简谐振动曲线来描述。

速度 $v \text{ (mm/s)}$ 和加速度 $a \text{ (mm/s}^2\text{)}$ 的简谐振动式可由式(1-1), 经过一次和二次微分求得:

$$\begin{aligned} v &= \frac{dd}{dt} = D\omega \cos(\omega t + \varphi) = V \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi) \\ &= V \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1-2)$$

即速度 v 为相位超前位移 $d \frac{\pi}{2}$ 的正弦波。

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} = -\omega^2 D \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(\omega t + \pi + \varphi) \\ &= A \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1-3)$$

加速度 a 为相位超前位移 $d\pi$ 的正弦波。在图 1-1 上以虚线波形表示出了三者的关系,并由(1-1)、(1-2)、(1-3)式和频率 f 可求得:

$$V = \omega D = 2\pi f D$$

$$A = \omega^2 D = (2\pi f)^2 D$$

为计算上和工程使用上的方便,加速度 A 以重力加速度值 980cm/s^2 为单位,即以它的倍数表示:

$$G = \frac{A(\text{cm/s}^2)}{980(\text{cm/s}^2)} = \frac{A}{980}$$

所以,加速度为重力加速度 $g = 980\text{cm/s}^2$ 的倍数,并用 G 作单位数。因此,位移 $D(\mu\text{m} = 1/1000\text{mm})$ 、速度 (cm/s) 和加速度 A (G)可表示为:

$$V = 2\pi f D \times 10^{-4} = 6.28 f D \times 10^{-4} \quad (1-4)$$

$$A = (2\pi f)^2 D \times 10^{-4} (\text{cm/s}^2)$$

或

$$A = \frac{(2\pi f)^2 D}{980} \times 10^{-4} = 4.02 f^2 D \times 10^{-4} (G) \quad (1-5)$$

式(1-4)和式(1-5)在工程应用上十分重要,因为根据位移 D 和频率 f 可计算出速度 V 和加速度 A ,反之亦然。另外,在实际应用上为了节省时间,可作成如图 1-2 所示的振动各要素换算表。使用此表换算时,应注意以下两点:

1. 用振动计读取位移,多数振动计读取的是双峰值 $2D$,因此使用时必须除 2 换成单峰值才可使用。

2. 此图表的换算关系是对简谐振动而言,因此,不是简谐

振动不能使用。

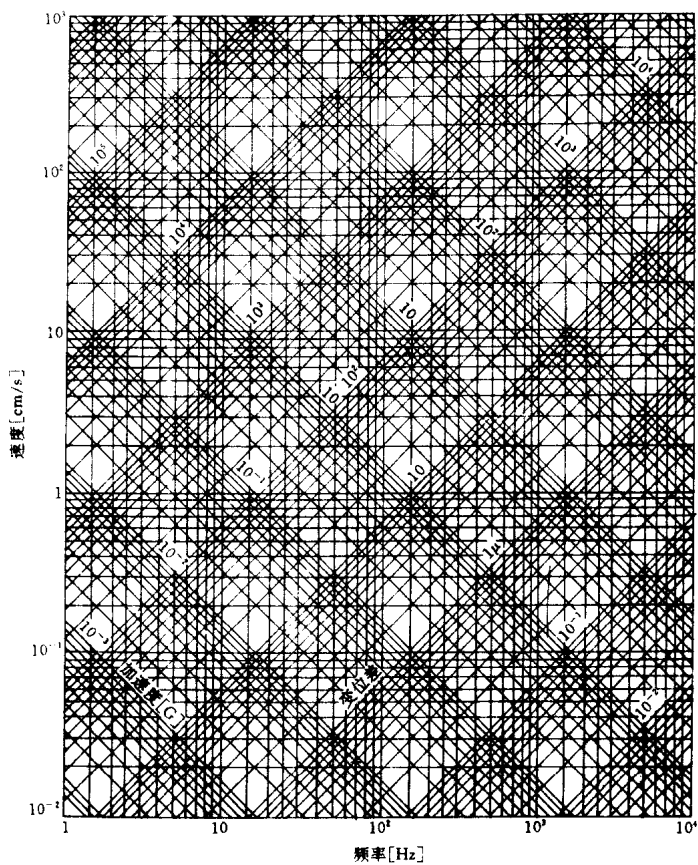


图 1-2 振动各要素换算图表