

设备振动 诊断技术基础

航天工程学院科技开发中心

袁宏义 牛明忠
叶慧秀 王保华 编著

国防工业出版社

设备振动诊断技术基础

袁宏义 牛明忠
叶慧秀 王保华 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍旋转机械的故障诊断技术,包括故障类型、产生原因、诊断方法和治理措施。为了突出工程实用性,在简要介绍有关诊断的基本概念、振动力学、测量仪器和分析仪器的基础上,着重介绍了转子系统、滑动和滚动轴承、齿轮箱和交流感应电动机的实用诊断技术。

本书主要适用于石油、化工、冶金、机械和纺织等系统中从事设备管理、检测和维修以及具有高中以上、相当于大学文化程度工程技术人员使用,有关专业的师生及科技人员也可作为参考。

设备振动诊断技术基础

航天工程学院科技开发中心

袁宏义 牛明忠 编著
吐露秀 王保华

责任编辑 刘海燕

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经营

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 7⁹/₁₆ 160千字

1991年7月第一版 1991年7月北京第一次印刷 印数: 0001—5000册

ISBN 7-118-00842-7/TB·36 定价: 5.45元

前 言

设备故障诊断技术是《设备综合工程学》的技术基础。由于它的实用性以及为社会和企业带来效益，故日益受到企业和政府主管部门的重视。

《设备综合工程学》70年代初源于英国，它以设备的一生为研究对象，以设备的管理、技术和经济分析为内容，以故障诊断为基础，以建立新的维修体制为目标而形成综合工程学科。这一工程应用学科在欧美、日本以不同的形式获得了推广，成为国际上一大热门课题。

80年代以来，故障诊断技术受到了我国政府的重视，专门颁布“条例”在国营工业、交通企业中推广执行，并作为企业设备管理上台阶、企业上等级的重大技术措施。

一般工厂中的设备大体可分为两类：一类是压力容器、管网和高炉等；另一类则是旋转和往复机械。本书不涉及前一类的诊断技术，对后一类设备的诊断技术，方法也是多种多样的，但目前公认行之有效的是三种方法：振动、油液分析和表面温度测量。由于振动诊断技术具有多参性、多维性、可传递性和可实现性等优点而得到了迅速发展，因而成为设备诊断中最主要的方法。

国内外诊断专家认为，一种诊断技术最好包含下述三方面的内容：

1. 应能准确说明运行设备现在的状态；好、允许、可允许和不允许等；

2. 若有故障，应能说明故障的部位和原因；
3. 根据故障信息，或者根据信息处理结果，能预测故障的可能发展等。

上述三项内容实质上就是目前振动诊断中的简易诊断技术、精密诊断技术和专家系统。

所谓简易诊断技术，应包含手段、判据和趋势分析三个方面。精密诊断技术一般是指能够确定故障部位的仪器和方法。所谓专家系统，一般是指专家们所具有的特定领域的知识和经验而形成的一种计算机程序系统。

为了掌握上述三方面的诊断技术，必需熟悉并掌握机械、振动力学、电子测量和数据处理等方面的知识，如同人体医学一样，还需要有大量“临床”经验。因此，它必然是理论研究、仪器设计制造和“临床”大夫等多方面人员通力合作的技术。

本书共分九章，前两章主要涉及诊断中的基本概念和动力学基础；第三章主要讲述振动的电子测量和简易诊断技术；第四章介绍近年来国外研制出的精密诊断仪器及其工作原理；第五、六章为通用旋转机械的一般故障类型和故障诊断方法；第七章则介绍了企业中最大量使用的动力装置，即交流感应电动机的振动诊断法和国外80年代中期研制成的专家诊断系统；第八和第九两章讲解静、动平衡技术和机械轴的对中技术。全书所介绍的技术、概念是最基本的，而所推荐的测试仪器则是近年来国际上的高技术产品，这样，使读者在得到振动诊断类（型）、（原）因、（诊）断、治（理）完整概念的同时，又能了解到先进诊断手段方面的信息。

本书的大部份章节曾在石油、化工、冶金和机械行业以及设备管理协会举办的学习班上进行了讲授，得到了生产第

一线工程技术人员的鼓励和肯定。他们迫切希望我们将讲稿编印成册，在编写过程中又得到了大庆石油管理局领导的大力支持，在此，我们向对本书编写中给予支持、帮助的同志和单位表示谢意。

全书由北京航天工程学院研究员朱桂芳先生审阅。由于作者水平和经验所限，难免有谬误，敬请读者指正。

作者

1990年于航天工程学院

目 录

第一章 振动状态监测与诊断的基本概念	1
§ 1-1 什么叫振动	1
§ 1-2 振动的分类	1
§ 1-3 简谐振动表示法的重要性	2
1. 简谐振动的矢量(向量)表示法	3
2. 振动的峰值、有效值和平均值	5
3. 峰值、有效值和平均值的关系	7
§ 1-4 简谐振动的合成及其在诊断中的应用	8
1. 相互垂直的两个简谐振动的合成	8
2. “拍频”振动现象	10
§ 1-5 简谐振动的调制与分析	12
1. 幅度调制	12
2. 频率调制	13
§ 1-6 振动系统中的机械能	15
§ 1-7 故障诊断中有关频谱分析的概念和技术	17
1. 周期信号的谱分析	18
2. 随机信号的谱分析	19
3. 自相关函数和谱密度函数的说明	22
4. 倒频谱分析与周期信号的识别	25
5. 细化(ZOOM)技术	26
6. 包络分析	27
7. 阶比分析	29
参考文献	30
第二章 旋转机械中的振动类型	31
§ 2-1 概述	31
§ 2-2 振动问题的简化模型	31

§ 2-3 不平衡、不对中与受迫振动	35
1.不平衡转子激起的受迫振动	35
2.受迫振动与转子的临界转速	39
3.关于临界转速的几点讨论	41
§ 2-4 什么叫自激振动	43
§ 2-5 涡动和油膜振动是自激振动	46
1.抖动	46
2.油膜振动	47
§ 2-6 流体机械中的“喘振”	50
§ 2-7 “爬行”、“摇晃”与“颤振”也是自激振动	50
§ 2-8 参变振动	51
参考文献	53
第三章 简易诊断技术	54
§ 3-1 关于振动测量的若干概念	54
1.测量或采集系统的组成	54
2.相对测量和绝对测量	54
3.振动测量仪器的主要性能指标	55
§ 3-2 常用振动传感器及其系统特点	56
1.电涡流传感器及其系统	56
2.磁电式传感器及其系统	58
3.压电式加速度传感器	59
§ 3-3 简易诊断参考标准与使用中的若干问题	65
1.振幅或位移标准	65
2.速度标准	65
3.测量位置的选择与机械阻抗概念	67
4.关于企业建立相对标准的讨论	71
5.关于频率分析诊断的标准	72
§ 3-4 状态趋势分析与诊断实例	73
1.轴承磨损的状态趋势分析	73
2.状态趋势分析实例	73
参考文献	77
第四章 精密诊断仪器	78

VI

§ 4-1 概述	78
§ 4-2 数字式分析仪器的基本知识	78
1. 卷积和采样定理	78
2. 离散的傅里叶变换 (DFT)	87
3. 谱窗和泄漏	89
§ 4-3 以微机为中心的诊断系统	92
1. 系统构成	92
2. 系统功能	93
§ 4-4 便携式数据采集/分析器	94
1. SA-77信号分析仪	95
2. IRD-890数据采集/分析仪	97
参考文献	102
第五章 转子系统与轴承故障诊断	103
§ 5-1 概述	103
§ 5-2 转子系统的基本概念	104
1. 转子的进动	104
2. 转子的受迫振动、临界转速和自动对心	106
3. 圆盘相对于转动坐标系的运动	109
§ 5-3 高速轴承-转子失稳故障的原因	110
1. 什么叫失稳	110
2. 轴承油膜力引起的失稳	111
3. 转轴内摩擦力引起的失稳	114
4. 转轴与圆盘配合面的干摩擦引起的失稳	116
§ 5-4 转子系统失稳的监测与诊断	117
§ 5-5 低速轴承的故障及其诊断方法	120
1. 磨损故障与诊断	120
2. 异物磨损、刮伤、撕脱、疲劳等故障的监测	121
3. 轴线偏斜和负荷偏心故障的诊断	121
§ 5-6 滚动轴承的故障及其识别	122
1. 滚动轴承故障的特征频率	122
2. 轴承制造与装配故障	125
参考文献	131

第六章 齿轮箱的故障诊断	132
§ 6-1 齿轮常见的故障类型	132
1. 齿轮常见的故障类型和失效比例	132
2. 故障原因和特点	132
§ 6-2 齿轮传动中的振动信息特征	134
1. 载频信号-啮合频率及其各次谐波	135
2. 磨损故障信息的特征	136
3. 调制信号	136
4. 寄生成份	141
§ 6-3 齿轮故障诊断方法	142
1. 细化谱分析法	142
2. 倒频谱分析法	144
§ 6-4 齿轮箱诊断实例	145
1. 卡车齿轮箱的故障诊断	145
2. 齿轮箱故障诊断中运用频谱、细化谱 (ZOOM) 和倒频谱分析的实例	146
参考文献	148
第七章 交流感应电动机的故障诊断	150
§ 7-1 交流感应电动机的故障类型和诊断的必要性	150
1. 转子故障	150
2. 偏心故障	150
§ 7-2 交流感应电动机的基本概念	151
1. 三相异步电动机的同步转速 n_1 和极对数 p	151
2. 转子转速 n 和转差率 s	152
§ 7-3 故障诊断方法概述	153
1. 线圈测量法	153
2. 定子铁芯监测法	153
3. 振动诊断法	153
4. 电流诊断法	153
§ 7-4 振动诊断法	154
1. “磁”振动的原理和故障谱图	154
2. 转轴的机械振动故障	159

X

§ 7-5 电流诊断法及专家系统	160
1. 电流诊断法的基本原理和方框图	160
2. 电流诊断法的基本数学模型	161
3. 电流诊断法专家系统的功能	162
§ 7-6 诊断实例	164
参考文献	172
第八章 刚性转子的平衡	173
§ 8-1 基本概念	173
1. 不平衡	173
2. 静不平衡	173
3. 偶不平衡	175
4. 动不平衡	176
5. 刚性转子和挠性转子	177
§ 8-2 在平衡机上平衡转子	177
1. 静平衡的要求	177
2. 静平衡机	179
3. 动平衡机	181
§ 8-3 现场平衡	185
1. 现场平衡的特点	185
2. 现场平衡原理	185
3. 一般平衡步骤	187
4. 现场平衡的仪器设备	194
§ 8-4 平衡计算方法	196
1. 静平衡计算	196
2. 动平衡计算	198
§ 8-5 特殊情况下的平衡	203
1. 悬臂转子的平衡	203
2. 校正质量与试探质量安置半径不同的平衡	204
3. 在小于工作转速下平衡	205
§ 8-6 实例	205
参考文献	209
第九章 机械轴对中	210
§ 9-1 概述	210

§ 9-2 双表法	213
1. 选取测量点	213
2. 测量跳动量	213
3. 辅助测量	214
4. 确定两轴相对位置	214
5. 计算校正量	214
6. 确定调整方向	216
§ 9-3 单表法	217
1. 选取测量点	217
2. 测量跳动量	217
3. 辅助测量	218
4. 确定两轴相对位置	218
5. 计算校正量	218
6. 确定调整方向	219
§ 9-4 激光对中仪	220
1. 工作原理	220
2. 应用	226
参考文献	227

第一章 振动状态监测 与诊断的基本概念

§ 1-1 什么叫振动

人类生活在振动世界里。汽车、火车、飞机及各种运输机械；工厂中各种运动的机器，例如电机、电动机、压缩机、泵、汽轮机、机床；家用电器中电冰箱、空调机和洗衣机等，这些机器都在旋转运动或往复运动，它们运动着，也振动着，而这种振动，往往对机器是有害的。

就人自身而言，心脏的跳动、肺部的呼吸运动，也类似泵在工作，经过频率分析后，也是振动过程；人的大脑在思维时，所谓的 α 和 β 两种脑波，前者是一种简谐振动（8~14Hz），后者为随机振动。

总之，振动是世界上的物质或物体的一种运动形式。那么，什么叫振动？广义来说，振动就是物体（质点）或某种状态随着时间往复变化的现象。

§ 1-2 振动的分类

工程中有大量的振动问题需要研究、分析和处理，因此有必要简单介绍振动力学中的振动分类方法，以便在振动故障类型、原因、分析和故障排除方面提供讨论的基础。

机械振动的研究和使用方面有多种分类方法，目前，大

致有如下几种分类：

① 按振动的规律分

简谐振动、非简谐振动和随机振动。有时又将前两者称为周期振动，后者称为非周期振动；

② 按产生振动的原因分

自由振动、受迫振动、自激振动和参变振动等；

③ 按自由度分

单自由度系统振动、多自由度系统振动和弹性振动；

④ 按振动位移特征分

角振动和直线振动；

⑤ 按系统结构参数分

线性振动和非线性振动。

在机器的故障诊断中，从应用角度看，应着重掌握按振动规律和产生原因这两种分类。

§ 1-3 简谐振动表示法的重要性

简谐振动又称“正弦振动”，它是振动故障诊断中最基本的概念之一。了解它的表示方法，特别是它的物理意义和几何意义，对于掌握故障诊断技术十分重要。

简谐振动的数学表达式是

$$y(t) = A \sin \omega t \quad (1-1)$$

式中 A ——振幅；

ω ——角频率（圆频率）。

正弦函数的振动图线如图 1-1 所示。

因为函数 $\sin \omega t$ 具有下列特性：

$$\sin \omega (t + T) = \sin (\omega t + \omega T) = \sin \omega t$$

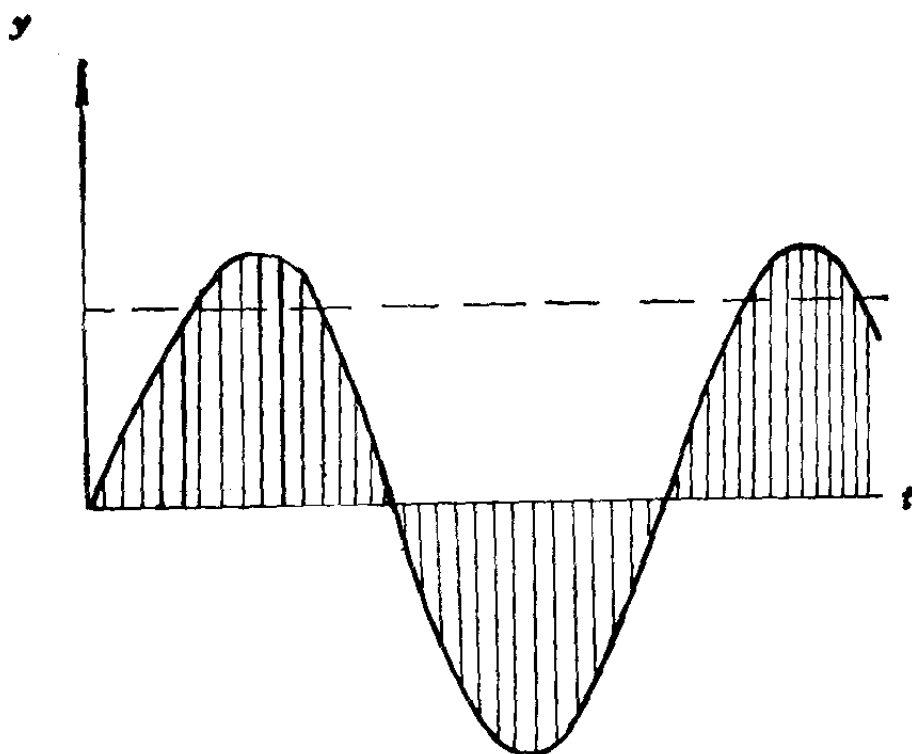


图1-1 正弦函数的振动图线

则

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1-2)$$

为简谐振动的周期。 $f = 1/T$ 称为简谐振动的频率， $\omega = 2\pi f$ 表示每秒转过的弧度，亦是在 2π 秒内振动的次数，称为“圆频率”。

必须指出，简谐振动一定是周期振动，但是，周期振动不一定是简谐振动。

1. 简谐振动的矢量（向量）表示法

在物理上用旋转矢量表示简谐振动，有助于了解简谐振动更多的物理意义和几何意义。

设用矢量 A 以等角速度 ω 作反时针方向旋转的圆周运动，如图1-2所示。位移矢量的模就是振幅 A ，速度矢量的模就是 ωA ，加速度矢量的模就是 $\omega^2 A$ 。这三种矢量的几何

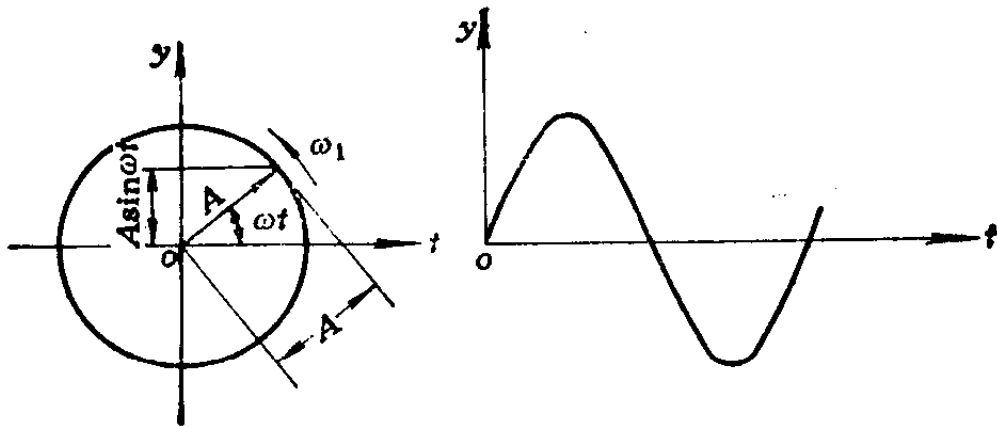


图1-2 用旋转矢量 A 表示振动

图形如图 1-3 所示，它们的表达式是

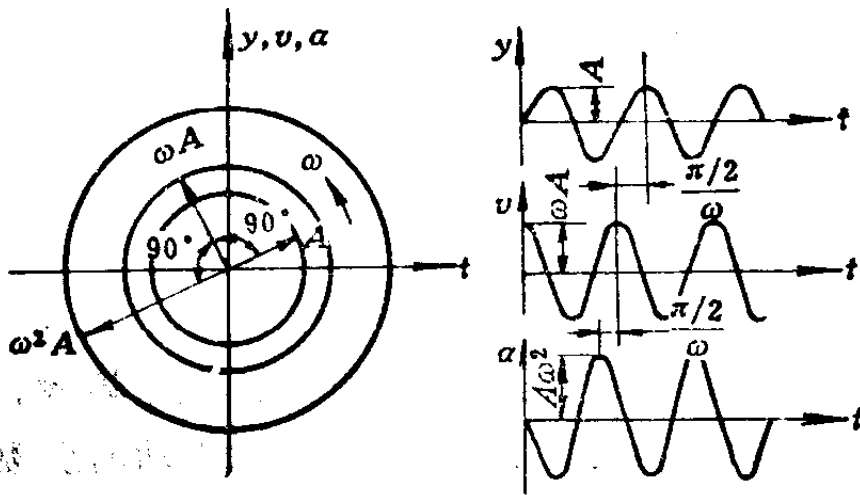


图1-3 矢量表示法，位移、速度和加速度的振动图

位移矢量在纵轴上投影大小为

$$y = A \sin \omega t \quad (1-3)$$

速度矢量在纵轴上投影大小为

$$v = \omega A \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \omega A \cos \omega t \quad (1-4)$$

加速度矢量投影为

$$a = \omega^2 A \sin(\omega t + \pi) \quad (1-5)$$

由式 (1-3)、(1-4)、(1-5) 比较可见, 速度的最大值要比位移的最大值提前 90° 到达, 加速度的最大值要比位移的最大值提前 180° 到达。

2. 振动的峰值、有效值和平均值

上面仅仅讨论了振动时间历程, 即波形随时间变化过程, 各量之间的数学关系。但是, 人们对同一个量 (例如加速度) 用不同的值来表示, 在振动测量中, 一般用峰值、有效值或平均值给出振动的量级。下面, 分别叙述它们各自的定义。

(1) 峰值

峰值是指波形上与零线的最大偏离值, 用符号 y_p 表示。

对于正弦振动, $y_p = A_p$, 振幅 A_p 就是它的峰值, 在稳态周期振动中, 峰值可能相同, 但波形却相差很大, 如图 1-4 所示。

测量峰值大小的物理意义是: 当考核一台机器的结构强度时, 尤其在低频段, 结构的破坏直接与峰值有关。这就是在低转速机械中, 人们往往关心测量位移 (峰值幅值) 的理由。

(2) 有效值

有效值在振动测量中, 是人们用得最多的物理量, 应该引起特别注意。

一个任意函数 $y(t)$, 它的有效值定义为

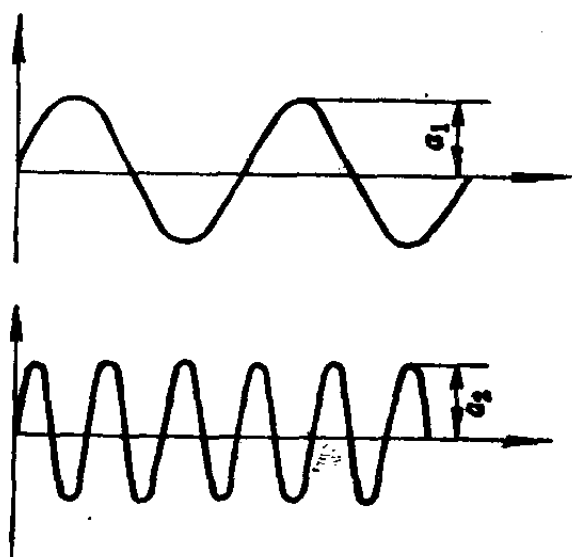


图1-4 波形不同、
峰值相等的振动