

高等职业教育机械系列精品教材

# 机电设备故障 诊断技术及应用

主 编 韩 瞧 崔 巍  
副主编 牟作云 袁家君 孟照君  
主 审 殷 宏 曹洪利



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com

## 内 容 简 介

本书共分为4个项目,15个工作任务。项目1为设备故障诊断技术基础;项目2为旋转机械故障诊断技术,包括刚性转子的不平衡故障诊断及现场动不平衡调试与校正、转子不对中故障诊断及激光对中技术、机械松动的故障诊断等;项目3为典型零部件故障诊断技术,包括滚动轴承、齿轮等故障诊断技术;项目4为设备故障诊断的其他方法,包括声学监测技术、温度监测技术等。

本书既可作为高等职业学校和技工院校机械设备维修专业及相关专业的教学用书,也可作为企业数控人员的培训教材或自学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

机电设备故障诊断技术及应用 / 韩瞧, 崔巍主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2024. 3  
ISBN 978-7-5635-7193-2

I. ①机… II. ①韩… ②崔… III. ①机电设备—故障诊断 IV. ①TM07

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2024) 第 068312 号

策划编辑: 刘子嘉 责任编辑: 高 宇 封面设计: 黄燕美

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 三河市骏杰印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 12.75 插页 1

字 数: 264 千字

版 次: 2024 年 3 月第 1 版

印 次: 2024 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-7193-2

定 价: 43.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

服务电话: 400-615-1233



我国各个行业企业都在向着智能化、数字化、精益化、绿色化等方向发展，而设备故障诊断技术在物联网、云技术、人工智能等新兴技术的推动下，已然焕然一新，成为保障日益复杂的机电设备安全运行的基本措施，它既能对设备运行状态的变化及故障发展做出早期预报并提供可靠数据依据，又能对设备有无故障、故障程度、故障部位及故障原因做出判断，从而达到避免或减少事故发生的目的，为企业带来巨大的经济效益和社会效益。正因如此，其受到各国政府、研究机构及企业的广泛重视。

当前，我国从事设备故障诊断技术研究、产品开发的队伍越来越壮大，在企业中从事设备状态检（监）测及故障诊断的人员迅速膨胀，国内陆续出版了一批较高质量的设备故障诊断方面的著作及译著。然而，这些书籍大部分面向从事该领域的理论研究或技术开发、产品研制人员，而直接面向学生或从事故障诊断现场人员的书籍却少之又少。基于此，我们编写了本书。

本书的编写力求体现如下特点。

（1）本书以项目任务式的模式呈现，注重实际操作应用，避免枯燥、实用性不强的理论灌输。

（2）原理阐述以应用需要为原则，力求通俗易懂，以讲清概念及物理意义为目的，不过分追求严谨性，尽量避免冗长的理论推导，以降低对读者文化程度和知识结构的要求为原则。

（3）充分体现以学生为中心，通过构建具体的任务使学生自主学习、自主探究，把能力的培养放在首位。

（4）适当增加诊断实例，以增强学生对诊断方法的理解和掌握。

（5）检测手段以振动法为主，其他方法为辅；检测、诊断对象以旋转机械为主，其他设备兼顾；诊断方法以最成熟并广泛普及的一般技术为主。

本书共分为4个项目，15个工作任务。项目1为设备故障诊断技术基础；项目2为旋转机械故障诊断技术，包括刚性转子的不平衡故障诊断及现场动不平衡调试与校正、转子不对中故障诊断及激光对中技术、机械松动的故障诊断等；项目3为典型零部件故障诊断技术，包括滚动轴承、齿轮等故障诊断技术；项目4为设备故障诊断的其他方法，包括声学监测技术、温度监测技术等。

本书由辽宁冶金职业技术学院韩瞧、崔巍担任主编，辽宁冶金职业技术学院牟作云、袁家君、孟照君担任副主编，辽宁冶金职业技术学院徐长庆、张志宏、姬振宇、李冰、刘世龙参与编写，辽宁冶金职业技术学院殷宏、曹洪利担任主审。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。



项目 1 设备故障诊断技术基础	1
任务 1 设备故障诊断技术概述	1
任务 2 机械振动信号测试	18
任务 3 故障诊断常用传感器认知	29
任务 4 设备振动诊断的分析方法	50
项目 2 旋转机械故障诊断技术	72
任务 1 刚性转子的不平衡故障诊断及现场动不平衡调试与校正	73
任务 2 转子不对中故障诊断及激光对中技术	84
任务 3 机械松动的故障诊断	95
任务 4 转子与静止件摩擦的故障诊断	103
项目 3 典型零部件故障诊断技术	113
任务 1 滚动轴承故障诊断技术	113
任务 2 齿轮故障诊断技术	132
任务 3 滑动轴承故障诊断技术	153
任务 4 电机故障诊断技术	160
项目 4 设备故障诊断的其他方法	169
任务 1 声学监测技术	170
任务 2 温度监测技术	181
任务 3 油样分析技术	188
参考文献	197



# 项目 1

## 设备故障诊断技术基础

### 素质目标

通过学习本项目，培养学生具有丰富的科学文化知识，坚定的政治信念与信仰，良好的职业道德修养、纪律观念与敬业精神，并逐步激发出学生的社会责任感与职业认同感，使学生在在学习、工作、生活等方面逐渐成熟，对政治观、人生观、价值观等有更加正确的理解。

### 课程思政

(1) 通过观看行业发展前景视频，了解故障诊断的基本方法和发展方向，使学生在潜移默化中认可本课程，从而助推学生学好本课程。

(2) 通过观看视频，了解我国高科技产品的研发如何突破其他国家的技术封锁并实现弯道超车。体现国家力量，激发学生的爱国情怀及学习热情。

(3) 通过视频，了解什么是工匠精神，了解我国正在向工业强国迈进，我们现在学习的仪器就是智能制造的工业结晶。

(4) 通过观看视频，了解故障诊断的工作过程，使学生对故障诊断产生浓厚的学习兴趣，使专业技术成为学生的奋斗目标，从而努力学习。



视频：故障诊断  
行业发展前景



视频：量子  
芯片



视频：工匠精  
神综述



视频：港口故  
障诊断的应用

## 任务 1 设备故障诊断技术概述

### 任务目标

知识目标：了解设备故障诊断的意义、定义及分类；掌握设备故障诊断的目的、任务及基本方法；掌握设备故障诊断技术的具体内容；重点掌握设备诊断仪器的功能及作用。

能力目标：能简单操作设备诊断仪器。



### 任务引入

先进的智能运维体系已经越来越多地应用在企业生产活动之中，而高级的设备故障诊断分析技术在设备智能运维体系中已经处于核心地位。本项目从多个角度分析了设备故障诊断的重要性，重点叙述了设备故障诊断技术的具体内容和分类方法，使学生对学习设备故障诊断技术产生浓厚的兴趣。



### 知识链接

#### 1.1.1 设备故障诊断的意义、目的和任务

##### 1. 设备故障诊断的意义

随着现代化大生产的发展和科学技术的进步，设备的结构越来越复杂，功能越来越完善，自动化程度也越来越高。由于许许多多无法避免的因素的影响，有时设备会出现各种各样的故障，以致降低或失去预定的功能，造成严重的甚至灾难性的事故。国内外曾经发生的各种空难、海难、爆炸、断裂、倒塌、毁坏、泄漏等恶性事故，造成了人员伤亡，产生了严重的社会影响。即使是生产中的常见事故，也因生产过程不能正常运行或机器设备损坏而造成巨大的经济损失。

严重的灾难性事故触目惊心，不但造成巨大的经济损失，而且造成很大的人员伤亡和环境污染，在社会上引起了强烈的反思。例如，美国三里岛核电站和苏联切尔诺贝利核反应堆的泄漏曾引起对核电站安全性的争议，对核能的发展产生了影响；美国“挑战者”号航天飞机失事使美国航天事业的发展一度陷于停顿。这些都是对整整一个产业的打击。还有其他许多事故也是严重的，例如，1972年日本关西电力公司南海电厂3号机组——600 MW 汽轮发电机组因振动引起严重的断轴毁机事故，我国1985年大同电厂和1988年秦岭电厂的200 MW 汽轮发电机组的严重断轴毁机事故，都造成了巨大的经济损失。因此保证设备的安全运行，消除事故，是十分迫切的问题。

现代设备运行的安全性与可靠性取决于两个方面：一是设备设计与制造的各项技术指标的实现，为此设计中要采用可靠性设计方法，要有提高安全性的措施；二是设备安装、运行、管理、维修和诊断措施。现在，诊断技术、修复技术和润滑技术已被列为我国设备管理和维修工作的三项基础技术，成为推进设备管理现代化、保证设备安全可靠运行的重要手段。

##### 2. 设备故障诊断的目的

(1) 能及时地、准确地对各种异常状态或故障状态做出诊断、预防或消除故障，对设



备的运行进行必要的指导，提高设备运行的可靠性、安全性和有效性，以期把故障损失降低到最低水平。

(2) 保证设备发挥最大的设计能力，制订合理的检测维修制度，以便在允许的条件下充分挖掘设备潜力，延长服役期限和使用寿命，降低设备全寿命周期费用。

(3) 通过检测监视、故障分析、性能评估等，为设备结构修改、优化设计、合理制造及生产过程提供数据和信息。

总体来说，设备故障诊断既要保证设备的可靠运行，又要获取更大的经济效益和社会效益。故障诊断可以带来重大的经济效益，这方面国内外都有许多报道，部分例子如下。

(1) 对生产单位，配置故障诊断系统能减少事故停机率，具有很高的收益投资比。

如假设：诊断效益为  $B$ ，诊断成本为  $A$ ，经济效益系数为  $C$ ，事故停机日损失为  $D$  (万元/天)，年均事故停机次数为  $n$  (次)，平均事故检出率为  $\eta_1$ ，在检出事故中凭检测仪器的故障检出率为  $\eta_2$ ，检测仪器的虚报警率为  $\eta_3$ ，平均修复时间为  $T$ ；诊断系统（检测仪器）投入为  $E$ ，诊断系统折旧年限为  $T_0$  (年)，年诊断费用为  $F$ ，则可表示为：

$$B=n \times D \times T \times \eta_1 \times \eta_2 (1-\eta_3)$$

$$A=E/T_0+F$$

$$C=B/A$$

IMEKO 第三届国际会议上曾报道美国 Perkrul 发电厂实施故障诊断的经济效益情况分析，见表 1-1，从表中可见，故障诊断系统的收益甚至可达到投入的 36 倍。

表 1-1 美国 Perkrul 发电厂实施故障诊断经济效益分析

电厂情况	装机容量：1 000 NW，电费：0.015 美元/千瓦时，产值：约 1 亿美元/年
事故损失	按可靠性分析，事故平均停机 14 次/年，停产损失 15 万美元/天
诊断效果	能查出 50% 事故，其中 50% 由诊断系统查出，内含虚报警 20%
修复时间	3d/每次事故
诊断效益(节约费用)	$B=14 \times 0.5 \times 0.5 \times 3 \times 15 \times (1-0.2) = 126$ 万美元/年
投入经费	投资：20 万美元，监测费：1.5 万美元/年
诊断成本	$A=(20 \text{ 万美元}/10 \text{ 年折旧})+1.5 \text{ 万美元/年} = 3.5$ 万美元/年
诊断经济效益系数	$C=B/A=36$

日本资料报道，实施故障诊断后，事故率可减少 75%，维修费用可降低 25%~50%；英国报道，对 2 000 个大型工厂的调查表明，采用诊断技术后每年节省维修费用 3 亿英镑，而用于故障诊断的成本为 0.5 亿英镑，收益为投入的 6 倍，净获益达 2.5 亿英镑/年。

(2) 对生产单位，配置故障诊断系统将能延长设备检修周期，缩短维修时间，为制订



合理的检测维修计划提供基础，极大地提高经济效益。

例如，石化系统的 30 t 合成氨厂，过去每年需大修一次，需时 45 d，检修费用占年产值的 15%。采用故障诊断后改为三年修两次，一次不到 30 d，检修费用降为年产值的 10%，经济效益十分可观。

(3) 宏观上从全社会生产的角度看，花费的设备维修费用是一笔巨大的数目，而实施故障诊断带来的经济效益是巨大的。

例如，美国 1980 年税收总额为 7 500 亿美元，而花费在工业设备维修上的费用达到 2 460 亿美元。根据专家分析，在这 2 460 亿美元中，有将近三分之一，即 750 亿美元是由于不恰当的维修方法，包括缺乏正确的状态监测和故障诊断所造成的浪费资金。

我国的情况是，1987 年我国国营工业企业有 40 万家以上，总固定资产约 7 000 亿元，每年用于设备大修、小修及处理故障的费用一般占固定资产原值的 3%~5%，采用诊断技术改善维修方式和方法后，一年取得的经济效益可达数百亿元。

从上面的分析可以看出，设备故障诊断技术在保证设备的安全可靠运行，以及获取更大的经济效益和社会效益上，其意义是十分明显的。

### 3. 设备故障诊断的任务

设备故障诊断的任务是监测设备的状态，判断其是否正常；预测和诊断设备的故障并消除故障；指导设备的管理和维修。

#### 1) 状态监测

通常设备的状态可分为正常状态、异常状态和故障状态三种情况。正常状态指设备的整体或其局部没有缺陷，或虽有缺陷但其性能仍在允许的限度以内。异常状态指缺陷已有一定程度的扩展，使设备状态信号发生一定程度的变化，设备性能已劣化，但仍能维持工作，此时应注意设备性能的发展趋势，即设备应在监护下运行。故障状态则是指设备性能指标已有大的下降，设备已不能维持正常工作。设备的故障状态尚有严重程度之分，包括已有故障萌生并有进一步发展趋势的早期故障；程度尚不很重，设备尚可勉强“带病”运行的一般功能性故障；由于某种原因瞬间发生的突发性紧急故障等。

状态监测的任务是了解和掌握设备的运行状态，包括采用各种检测、测量、监视、分析和判别方法，结合系统的历史和现状，考虑环境因素，对设备运行状态进行评估，判断其处于正常或非正常状态，并对状态进行显示和记录。对异常状态做出报警，以便运行人员及时加以处理，并为设备的故障分析、性能评估、合理使用和安全生产工作提供信息和基础数据。



## 2) 故障诊断

故障诊断的任务是根据状态监测所获得的信息,结合已知的结构特性和参数以及环境条件,结合该设备的运行历史(包括运行记录和曾发生过的故障及维修记录等),对设备可能要发生的故障进行预报和分析、判断,确定故障的性质、类别、程度、原因、部位,指出故障发生和发展的趋势及其后果,提出控制故障继续发展和消除故障的调整、维修、治理的对策措施,并加以实施,最终使设备恢复到正常状态。

设备上不同部位、不同类型的故障,引起设备功能的不同变化,导致设备整件及各部位状态和运行参数的不同变化。故障诊断的任务就是当设备某一部位出现某种故障时,要从这些状态及其参数的变化推断出导致这些变化的故障及其所在部位。由于状态参数的数据繁多,必须找出其中的特征信息,提取特征量,才便于对故障进行诊断。由某一故障引起的设备状态的变化称为故障的征兆。故障诊断的过程就是从已知征兆判定设备上存在故障的类型及其所在部位的过程,因此故障诊断的方法实质上是一种状态识别方法。

故障诊断的困难在于:一种故障可能对应多种征兆,而一种征兆也可能对应多种故障。例如,旋转机械转子的不平衡故障引起振动增大,其中相应于转速的工频分量占主要成分,其是主要征兆,同时还存在一系列其他征兆。反过来,工频成分占主要成分这一征兆不只是不平衡的独特征兆,还有许多其他故障也都对应这一征兆。这就为故障诊断增加了难度。

因此,通常故障诊断有一个反复试验的过程:先按已知信息提取征兆,进行诊断,得出初步结论,提出处理对策,对设备进行调整和试验,甚至停机维修;再启动机器进行验证,检查设备是否已恢复正常,如尚未恢复,则需补充新的信息,进行新一轮的诊断和提出处理对策,直至状态恢复正常。

## 3) 指导设备的管理维修

设备的管理与维修方式的发展经历了三个阶段,即早期的事后维修方式,发展到定期预防维修方式,现在正向状态预知维修方式发展。定期维修制度可以预防事故的发生,但可能出现过剩维修或不足维修的弊病。状态维修是一种更科学、更合理的维修方式,但要做到状态预知维修,有赖于完善的状态监测和故障诊断技术的发展和实施。这也是国内外近年来对故障诊断技术如此重视的一个原因。随着我国故障诊断技术的进一步发展和实施,我国的设备管理、维修工作将提升到一个新的水平。我国工业生产的设备完好率将会进一步提高,恶性事故将会进一步得到控制,我国的经济建设将会得到更健康的发展。

### 1.1.2 设备故障诊断基本方法

由于设备故障的复杂性和设备故障与征兆之间关系的复杂性,形成了设备故障诊断是





一种探索性的过程这一特点。就设备故障诊断技术这一学科来说，重点不只在研究故障本身，而更在于研究故障诊断的方法。故障诊断过程由于其复杂性，不可能只采用单一的方法，而要采用多种方法。可以说，凡是对故障诊断能起作用的方法就要利用。必须从各种学科中广泛探求有利于故障诊断的原理、方法和手段，这就使得故障诊断技术呈现多学科交叉这一特点。

### 1. 传统的故障诊断方法

首先，利用各种物理和化学原理手段，通过伴随故障出现的各种物理和化学现象，直接检测故障。例如，可以利用振动、声、光、热、电、磁、射线、化学等多种手段，观测其变化规律和特征，用以直接检测和诊断故障。这种方法形象、快速，十分有效，但只能检测部分故障。

其次，利用故障所对应的征兆来诊断故障，这是最常用、最成熟的方法。以旋转机械为例，振动及其频谱特性的征兆是最能反映故障特点、最有利于进行故障诊断的手段。为此，要深入研究各种故障的机理，研究各种故障所对应的征兆。在诊断过程中，首先分析设备运转中所获取的各种信号，提取信号中的各种特征信息，从中获取与故障相关的征兆，利用征兆进行故障诊断。由于故障与各种征兆间并不存在简单的一一对应关系，因此利用征兆进行故障诊断往往是一个反复探索和求解的过程。

### 2. 故障的智能诊断方法

在上述传统的诊断方法的基础上，将人工智能的理论和方法用于故障诊断。发展智能化的诊断方法，是故障诊断的一条全新的途径，目前已广泛应用，成为设备故障诊断的主要方向。

人工智能的目的是使计算机去做原来只有人才能做的智能任务，包括推理、理解、规划、决策、抽象、学习等功能。专家系统是实现人工智能的重要形式，目前已广泛用于诊断、解释、设计、规划、决策等各个领域。现在国内外已发展了一系列用于设备故障诊断的专家系统，获得了很好的效果。

专家系统由知识库、推理机以及工作存储空间（包括数据库）组成。实际的专家系统还应有知识获取模块。知识库管理维护模块、解释模块、显示模块以及人机界面等。

专家系统的核心问题是知识的获取和知识的表示。知识获取是专家系统的“瓶颈”，合理的知识表示方法能合理地组织知识，提高专家系统的能力。为了使诊断专家系统拥有丰富的知识，必须进行大量的工作。要对设备的各种故障进行机理分析，其中有的可建立数学模型，进行理论分析；需要进行现场测试和模型试验；特别需要总结领域专家的诊断经验，整理成计算机所能接受的形式化知识描述；还需要研究计算机的知识自动获取的理论





和方法。

### 3. 故障诊断的数学方法

设备故障诊断技术作为一门学科，尚处在形成和发展之中，必须广泛利用各学科的最新科技成就，特别是要借助各种有效的数学工具。包括基于模式识别的诊断方法，基于概率统计的诊断方法，基于模糊数学的诊断方法，基于可靠性分析和故障树分析的诊断方法，以及神经网络、小波变换、分形几何等新发展的数学分支在故障诊断中的应用等。

## 1.1.3 设备故障的定义和分类

### 1. 设备故障的定义

机器设备是工业生产的物质手段，是生产力的重要组成部分。机器设备能否安全、正常运行直接关系到一个企业乃至部门、国家的经济发展。

对于机器设备故障的定义目前尚未有统一的说法，各种文献上的定义也都不尽相同。

按国标《电工术语 可信性》(GB/T 2900.99—2016)规定，给定层次级上的子分系统的故障是指该子分系统“丧失规定的功能”，或者说，给定层次级上的子分系统的输出与所预期的输出不相容。

在一般情况下，故障是指：

- (1) 设备（系统）在规定条件下，不能完成规定的功能；
- (2) 设备（系统）在规定条件下，一个或几个性能参数不能保持在规定的上下限值之间；
- (3) 设备（系统）在规定的应力范围内工作时，导致设备（系统）不能完成其功能的机械零件、结构件或元器件的破裂、断裂、卡死等损坏状态。

除上述对故障一词的定义外，国内外一些学者也提出了各自的看法。一种是从设备维修的角度出发，定义设备的故障为设备运行的功能失常，其功能偏离可以通过参数调节得到恢复，或者认为故障还包括系统的或局部的功能失效，此时，除了更换产生故障原因的零部件外，无法使系统的功能恢复正常。

另一种是从诊断对象出发，定义一个系统的故障为它的输入与所预期的输出不相容，或系统的观察值与由系统的行为模型所得的预测值之间存在矛盾。

再一种是从状态识别的角度出发，定义设备的故障为它的不正常状态。

美国政府《工程项目管理人员测试性与诊断性指南》(AD-A208917)把故障定义为“造成装置、组件或元件不能按规定方式工作的一种物理状态”。

以上几种对设备故障的定义是从不同角度出发的，但也有其共同观点，即当设备出现故障时，其性能达不到规定要求，因而不能进行正常工作。



要对设备故障下一个能包含全部含义和内容的定义并非易事，我们仅根据本书编写的旨意进行定义。由于本书内容是紧密结合工程实际，诊断对象以旋转机械为主兼顾其他设备，因而定义设备的故障为：设备在运行过程中出现异常，不能达到预定的性能要求，或者表征其工作性能的参数超过某一规定界限，有可能使设备部分或全部丧失功能的现象。

有时也应用特定词“失效”，如设备因腐蚀而失效，也属故障范畴。在一般情况下两者是同义词。但严格地说，失效与故障是有区别的，一般地，所有失效都属故障，但不是所有的故障都是失效。

### 2. 设备故障的分类

由于机器设备多种多样，因而故障的形式也有所不同，必须对其进行分类研究，以确定采用何种诊断方法。故障分类的形式主要有以下几种。

#### 1) 按故障存在的程度分类

(1) 暂时性故障。这类故障带有间断性，是在一定条件下，系统所产生的功能上的故障，通过调整系统参数或运行参数，不需更换零部件又可恢复系统的正常功能。

(2) 永久性故障。这类故障是由某些零部件损坏而引起的，必须经过更换或修复后才能消除故障。这类故障还可分为完全丧失所应有功能的完全性故障及导致某些局部功能丧失的局部性故障。

#### 2) 按故障发生、发展的进程分类

(1) 突发性故障。出现故障前无明显征兆，难以靠早期试验或测试来预测。这类故障发生时间很短暂，一般带有破坏性，如转子的断裂、人员误操作引起设备的损毁等属于这一类故障。

(2) 渐发性故障。设备在使用过程中某些零部件因疲劳、腐蚀、磨损等使性能逐渐下降，最终超出允许值而发生的故障。这类故障占有相当大的比重，具有一定规律性，能通过早期状态监测和故障预报来预防。

以上两种类别的故障虽有区别，但彼此之间也可转化，如零部件磨损到一定程度也会导致突然断裂而引起突发性故障，这一点在设备运行中应予注意。

#### 3) 按故障严重的程度分类

(1) 破坏性故障。它既是突发性的又是永久性的，故障发生后往往危及设备和人身安全。

(2) 非破坏性故障。一般它是渐发性的又是局部性的，故障发生后暂时不会危及设备和人身的安全。

#### 4) 按故障发生的原因分类

(1) 外因故障，因操作人员操作不当或环境条件恶化而造成的故障，如调节系统的误



动作、设备的超速运行等。

(2) 内因故障, 设备在运行过程中, 因设计或生产方面存在的隐患而造成的故障。如设计上的薄弱环节、制造上残余的局部应力和变形、材料的缺陷等都是潜在的故障因素。

#### 5) 按故障的相关性分类

(1) 相关故障, 也可称间接故障。这种故障是由设备其他部件引起的, 如滑动轴承因断油而烧瓦的故障是因油路系统故障而引起的, 这一点在故障诊断中应予注意。

(2) 非相关故障, 也称直接故障。这是因零部件的本身直接因素引起的, 对设备进行故障诊断首先应诊断这类故障。

#### 6) 按故障发生的时期分类

(1) 早期故障(磨合期), 这种故障的产生可能是设计加工或材料上的缺陷, 在设备投入运行初期暴露出来。或者是有些零部件如齿轮箱中的齿轮对及其他摩擦副需经过一段时期的“跑合”, 使工作情况逐渐改善。这种早期故障经过暴露、处理、完善后, 故障率开始下降。

(2) 使用期故障, 这是产品有效寿命期内发生的故障, 这种故障是载荷(外因, 运行条件等)和系统特性(内因, 零部件故障、结构损伤等)无法预知的偶然因素引起的。设备大部分时间处于这种工作状态。这时的故障率基本上是恒定的。对这个时期的故障进行监视与诊断具有重要意义。

(3) 后期故障(损坏期故障), 它往往发生在设备使用的最后阶段, 由于设备长期使用, 甚至超过设备的使用寿命后, 因设备的零部件逐渐磨损、疲劳、老化等原因使系统功能退化, 最后可能导致系统发生突发性的、危险性的、全局性的故障。这期间设备故障率是上升趋势, 通过监测、诊断, 发现失效零部件后应及时更换, 以避免发生事故。

上述按使用时期对故障进行分类, 其故障率变化关系可以用图 1-1 来表示, 图中所示的曲线又称“浴盆”曲线。这种分类方法对设备的维修工作具有一定意义。

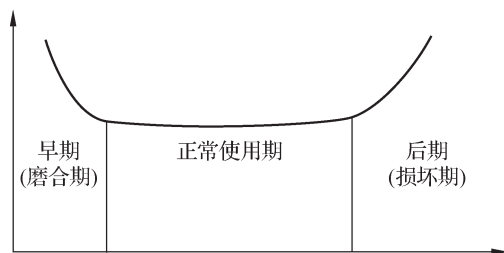


图 1-1 设备故障率曲线

上述对故障的各种分类方法在工程中应用较普遍, 尚有其他不同分类方法。如按故障模式分为结构型故障和参数型故障等。对故障进行分类的目的是弄清不同的故障性质, 从而采取相应的诊断方法。当然, 人们特别关心的是破坏性的、危险性的或突发性的全局性

的故障，以便在这种故障发生时及早采取措施，防止灾难性事故的发生。

### 1.1.4 设备故障诊断技术的内容和分类及设备维修方式

#### 1. 设备故障诊断技术的内容

设备故障诊断技术的内容包括状态监测、分析诊断和故障预测三个方面。其具体实施过程可以归纳为以下四个方面。

##### 1) 信号采集

设备在运行过程中必然会有力、热、振动及能量等各种量的变化，由此会产生各种不同的信息。根据不同的诊断需要，选择能表征设备工作状态的不同信号，如振动、压力、温度等是十分必要的。这些信号一般是用不同的传感器来拾取的。

##### 2) 信号处理

信号处理是将采集到的信号进行分类处理、加工，获得能表征机器特征的过程，也称特征提取过程，如对振动信号从时域变换到频域进行频谱分析即这个过程。

##### 3) 状态识别

将经过信号处理后获得的设备特征参数与规定的允许参数或判别参数进行比较、对比以确定设备所处的状态，是否存在故障及故障的类型和性质等。为此应正确制定相应的判别准则和诊断策略。

##### 4) 诊断决策

根据对设备状态的判断，决定应采取的对策和措施，同时应根据当前信号预测设备状态可能发展的趋势，即进行趋势分析。

上述诊断内容可用图 1-2 来表示。

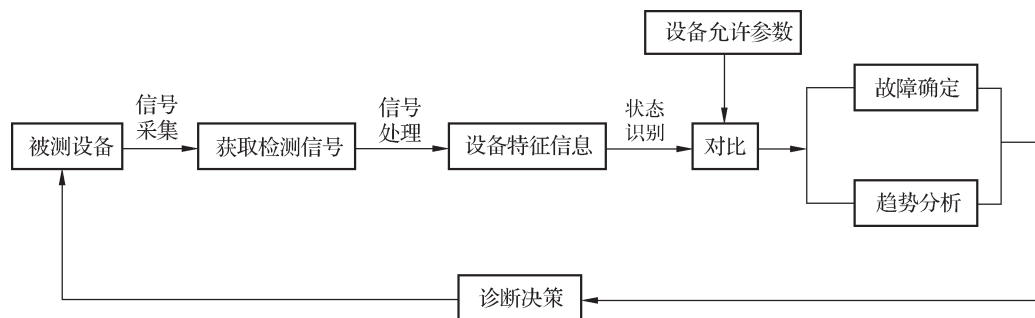


图 1-2 设备故障诊断过程框图

#### 2. 设备故障诊断技术的分类

设备故障诊断技术根据诊断对象、目的和要求等不同可以有各种分类方法。



### 1) 按诊断的对象分类

(1) 旋转机械诊断技术, 如汽轮发电机组、燃气轮机组、压缩机组、水轮机组、风机及泵等。

(2) 往复机械诊断技术, 包括内燃机、往复式压缩机及泵等。

(3) 工程结构诊断技术, 如海洋平台、金属结构、框架、桥梁、容器等。

(4) 运载器和装置诊断技术, 如飞机、火箭、航天器、舰艇、火车、汽车、坦克、火炮、装甲车等。

(5) 通信系统诊断技术, 如雷达、电子工程等。

(6) 工艺流程诊断技术, 主要是生产流程、传送装置及冶金压延等设备。

### 2) 按诊断的目的和要求分类

(1) 功能诊断与运行诊断。功能诊断是对新安装的机器设备或刚维修的设备检查其功能是否正常, 并根据检查结果对机组进行调整, 使设备处于最佳状态。运行诊断是对正在运行的设备进行状态诊断, 了解其故障的情况, 其中也包括对设备的寿命进行评估。

(2) 定期诊断和连续诊断。定期诊断是指每隔一定时间对监测的设备进行测试和分析。连续诊断是利用现代测试手段对设备连续进行监控和诊断。究竟采用何种方式, 取决于设备的重要程度及事故影响程度等。

(3) 直接诊断和间接诊断。直接诊断是直接根据主要零部件的信息确定设备的状态, 如主轴的裂纹、管道的壁厚等; 当受到条件限制无法进行直接诊断时, 就采用间接诊断。间接诊断是利用二次诊断信息来判断主要零部件的故障, 多数二次诊断信息属于综合信息, 如利用轴承的支承油压来判断两根转子对中状况等。

(4) 常规工况与特殊工况诊断。大多数情况是在机器设备常规运行工况下进行监测和诊断的。有时为了分析机组故障, 需要收集机组在启停时的信号, 这时就需要在启动或待机的特殊工况下进行监测和诊断。

(5) 在线诊断和离线诊断。在线诊断是指对于大型、重要的设备, 为了保证其安全和可靠运行需要对所监测的信号自动、连续、定时地进行采集与分析, 对出现的故障及时做出诊断。离线诊断是通过磁带记录仪或数据采集器将现场的信号记录并储存起来, 然后在实验室进行回放分析, 对于一般中小型设备往往采用离线诊断方式。

### 3) 按诊断方法的完善程度分类

(1) 简易诊断。简易诊断是利用一般简易测量仪器对设备进行监测, 根据测得的数据, 分析设备的工作状态。如利用测振仪对机组轴承座进行测量, 根据测得的振动值对机组故障进行判别, 或者应用便携式数据采集器将振动信号采集下来后再进行频谱分析, 用以诊



断故障。

(2) 精密诊断。精密诊断是利用较完善的分析仪器或诊断装置,对设备故障进行诊断。这种装置配有较完善的分析、诊断软件。精密诊断一般用于大型、复杂的设备,如电站的大型汽轮发电机组、石油化工系统的关键压缩机组等。

### 3. 诊断技术与维修方式

设备故障诊断技术的发展,一方面使设备在运行过程中的安全性得到了一定的保证,有可能在设备发生故障前即能得到预报,及时采取措施,防止事故进一步发展,使故障可以及时得到处理;另一方面,设备故障诊断技术的发展有可能完善设备的维修制度,这具有十分重大的经济意义。设备的维修方式归纳起来大致经历了三个阶段。

#### 1) 事后维修方式

在工业化开始的 18、19 世纪,当时工业生产规模小,机器设备比较简单,本身的技术水平很低,对设备的故障也缺乏认识,只能采取不坏不修、坏了再修的事后维修方式。

#### 2) 定期预防维修方式

随着大生产的出现,生产方式有了很大变化,机器设备本身复杂程度及技术水平也提高了,机器故障对生产影响也明显增加。在这种情况下,出现了定期预防维修方式,可使设备在停机事故前进行检修。这种维修方式较前一种事后维修有很大进步,使机器寿命延长,提高了生产率。但这种方式也有不少缺点,有的设备可能不到检修期就有故障,理应提前检修,造成不足维修现象;而有的设备虽到检修期但并无任何故障仍能继续正常运行,造成过剩维修现象。

#### 3) 状态维修(或视情维修、预知维修)方式

为了解定期预防维修方式的不足,近年来随着科学技术的发展,出现了更合理的状态维修方式。设备检修周期长短根据设备状况来定,有预知地做好合理备件的储备,这样可以做到根据实际情况进行维修,充分发挥了设备的潜力,可缩短维修时间和节省维修费用。显然,状态维修是一种更科学、更合理的维修方式,既可避免过剩维修又可防止不足维修。

状态维修方式的出现,受到各国有有关部门的重视,目前都在大力推广这一维修方式。但要做到这一点,必须大力开展设备的状态监测与故障诊断技术,这也是近十多年来国内外对设备故障诊断技术如此重视的原因。我国《国营工业交通设备管理试行条例》中明确提出“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”,明确提出了设备故障诊断技术应为维修体制改革服务的方向。





## 实践操作

(1) 故障诊断仪器的认知。故障诊断仪器包含精密点检仪、频谱分析仪、设备故障诊断分析系统、加速度传感器、转速传感器等,见表1-2。





视频: 设备故障  
诊断仪器的认知

表 1-2 仪器及设备表

序号	名称	部分图示	说明
1	精密点检仪		<p>精密点检仪由主机和附件组成。主机正面为显示屏和键盘,仪器的顶部和底部为仪器的接口。仪器主要功能如下。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 可进行振动波形、频谱检测和温度检测。</li> <li>(2) 高速数据采集:可快速完成数据采集工作,大大提高监测效率。</li> <li>(3) 强大的临时数据采集功能,可以方便地将临时数据导入数据库。</li> <li>(4) 可在现场迅速浏览数据,利于现场诊断</li> </ol>
2	频谱分析仪		<p>频谱分析仪由主附件组成。仪器正面为显示屏和键盘,仪器的顶部为仪器的接口,背面为电子纽扣。仪器主要功能如下。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 可测量单双通道时域波形、频谱、总值、长时域波形。</li> <li>(2) 可测量交叉相位,可同时看到互功率谱和相位差谱,直接测量出两测点之间的相位差。</li> <li>(3) 可进行锤击响应测试,用于测量部件的固有频率。</li> <li>(4) 能采集长时间的时域波形数据,抓取设备的瞬态过程数据。</li> <li>(5) 启停车分析,用于测量机器启停车过程中振动的变化。</li> <li>(6) 单、双面现场动平衡,可完成全部平衡过程,保存所有平衡数据,并可进行多次残余校正</li> </ol>
3	设备故障诊断分析系统		<p>设备故障诊断分析系统由故障诊断分析仪、平板电脑及附件组成。仪器主要功能:可分析诊断不平衡、轴弯曲、转子破损、结垢等动不平衡类故障;不对中故障;油膜涡动故障;轴承松动、基础松动故障;齿轮啮合类故障;滚动轴承故障;滑动轴承类故障;动静摩擦类故障;周期性或非周期性故障;电场干扰、设备漏电等电气方面的故障</p>

续表

序号	名称	部分图示	说明
4	加速度传感器		加速度传感器主要应用的是压电式加速度传感器，其由磁座、传感器和连接线组成，可直接与频谱分析仪进行配套连接，具有结构简单、安装方便、寿命较长、稳定性强、测量精准度高等优点
5	转速传感器		转速传感器主要应用的是光电式转速传感器，其由固定支架、传感器、反光条（安装在转子上）和连接线组成，可直接与频谱分析仪进行配套连接，具有非接触、高精度、高分辨率、高可靠性和响应快等优点

(2) 完成仪器认知的学习后，请完成表 1-3。

表 1-3 仪器使用方法总结表

序号	仪器名称	主要功能	使用注意事项
1			
2			
3			

## 考核标准

仪器使用认知评分标准见表 1-4。

表 1-4 仪器使用认知评分标准

班级：\_\_\_\_\_ 姓名：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 成绩：\_\_\_\_\_

序号	要 求	配分	评分标准	自评得分	教师评分
1	实习纪律	10	被批评一次扣 5 分		
2	安全文明生产	10	违者扣 10 分		
3	理解各种故障分析仪器的主要功能	30	错误一个扣 10 分		
4	理解各种故障分析仪器的使用注意事项	30	错误一个扣 10 分		
5	能够对各种故障分析仪器的优缺点进行区分	20	错误扣 20 分		

## 思考题

1. 状态监测的任务是什么？
2. 故障诊断的任务是什么？
3. 故障主要有几种分类形式？
4. 简述设备诊断技术的分类形式。

## 知识拓展

### 1. 专家系统概述

将人工智能的理论和应用于故障诊断，发展智能化的故障诊断技术，是设备故障诊断的一条新的途径，智能化的故障诊断专家系统现已得到广泛的应用，成为设备故障诊断技术的一个主要方向之一。

故障诊断领域的问题非常复杂，往往需要人类专家的经验知识才能解决，而表达和处理这种启发性的经验知识正是专家系统的特长。所以，专家系统在故障诊断领域得到了广泛应用，出现了许多设备故障诊断专家系统。例如，EGGZdaha 公司研制的用于诊断和处理核反应堆事故的诊断专家系统，通用电器公司研制的用于内燃电力机车的诊断专家系统 DEI-AT，用于航天飞机主发动机异常信息处理的专家系统 SCOTTY，以及美国 Westinghouse 公司研制的汽轮发电机组故障诊断专家系统（包括汽轮机、发电机和水化学处理三个人工智能在线诊断系统，即 TurbinAID、GenAID 和 ChemAID）等。这些系统的

应用取得了巨大的经济效益。

### 2. 专家系统的分类

专家系统的分类方法有多种。Haves-Roth 等人把专家系统按其所解决的问题性质分为以下十类：

(1) 解释型：通过对采集到的数据进行分析，解释这些数据的真实含义。例如，由质谱函数解释化合物分子结构的 DENDRAL 系统等。

(2) 预测型：在给定的情况下，推测未来可能发生或出现的情况。例如，各种天气预报专家系统、农业灾情预测系统及军事预测系统等。

(3) 监测型：将监测对象的行为同期望的行为进行比较，实时监测系统的工作。监测系统可用于核反应堆、航空、发电厂、化工流程及医疗等方面。

(4) 诊断型：根据得到的事实推断出诊断对象，例如，一台机械设备中可能存在的故障。这类系统主要用于医疗机械、电子等领域的诊断。例如，用于诊断和治疗感染性疾病的专家系统 MYCiN，计算机硬件故障诊断系统 DART，核反应堆故障诊断系统 REACTOR，旋转机械故障诊断专家系统 DIVA 等。

(5) 设计型：根据给定的要求，设计出所需要的方案或模型。这类系统主要用于集成电路的设计、建筑设计和预算编制等。例如，DEC 公司的计算机配置系统 XCON（即 RI）就是一个典型的例子。

(6) 规划型：根据给定的目标来制定行动步骤。这类系统可用于机器人行动、实验步骤、军事行动等规划问题。

(7) 调试型：给出已确认故障的排除方法。

(8) 维修型：根据纠错方法的特点，制定合理的行动规划并实施纠错计划。

(9) 控制型：能自动控制系统的全部行为，通常用于生产过程的实时控制。

(10) 教学型：能诊断和纠正学生的行为，主要用于教学和培训。

除了按任务性质分类外，还可按专家系统的应用领域来分类：如化学专家系统、地质专家系统、医学专家系统、航天专家系统、旋转机械故障诊断专家系统等。也可按它们采用的人工智能技术分类，如按知识表示方法分类：有基于规则的专家系统、基于框架的专家系统、基于模型的专家系统、面向对象的专家系统等。

### 案例分析

某公司是世界较早采用设备状态监测与故障诊断技术并取得良好业绩的公司之一，该公司根据多年实际应用经验总结出的“建立预知维修程序的十二个基本步骤”被许多



国家的企业采纳，用于指导开展设备状态监测与故障诊断工作。其各个步骤的具体工作如下。

### 1. 设备勘查

主要是确定预知维修程序（即开展设备状态监测工作）的可行性。应从各个方面对设备的利用率、停机时间进行分析得出结论，实际应用中也可以根据设备的数量和类型，再加上专家的经验做出判断。

### 2. 监测对象选择

这一步的目的是要选择一定数量的设备作为监测对象，选择监测对象时要同时考虑到人力的需要、生产计划和停机时间费用等。

### 3. 选择最佳的状态监测方法

这一步骤需要解决的问题主要有以下几个。

- (1) 监测什么？确定状态和故障发展的参数。
- (2) 如何监测？确定所需的仪器及手段，并能够监测上述参数。
- (3) 何时监测？确定监测周期，该周期应小于从发现故障至设备损坏这一段的时间。
- (4) 何处监测？确定获取设备早期缺陷的监测部位。

### 4. 建立预知维修系统

在建立了每台设备的最佳状态监测方法之后，需要将它们归并在一起，以得到一个合理的监测程序，该程序应包括以下内容。

- (1) 建立监测计划。
- (2) 确定一套简单的数据处理系统，包括数据采集、数据记录、数据分析及提出报告等四部分内容。
- (3) 人员培训及教育计划。

### 5. 确定允许的状态数据和极限值

这一步主要是建立设备状态监测参数的“正常”值和允许值，通常应根据经验、规范、标准和历史数据予以确定。在没有上述条件的情况下，也可利用制造厂所提供的数据作为参考。

### 6. 设备状态的初次测量

由于初始的设备状态并不确知，所以需要利用已确定的状态监测方法进行一次实地测试，并把所获得的测量结果与预先建立的允许值进行对比。一般情况下，经初次测试证实设备处于允许状态时，即可进入正常的监测程序；而如果设备已达到不允许的状态，就



需要做进一步的分析，以便找出和排除这个可能存在的故障，或者检查已确定的允许值是否合适。实际应用中，如果初次测量值比允许值小很多，也应考虑确定的允许值是否科学。

### 7. 定期检测

包括数据的采集、记录和趋势分析等4个步骤，这些步骤要涉及步骤3和4中建立的常规监测程序。这一程序的目的是通过对测量数据的趋势分析，及时发现设备状态的劣化。

### 8. 状态分析

这一步是对机器的状态作深入的分析，通常包括一些分析方法的综合应用。其目的在于确认是否存在故障，如果存在故障，应进一步开展故障诊断，预测故障类型、所在部位、严重程度和所需的对策、检修措施。

### 9. 故障治理

在诊断出故障之后，维修部门的任务就是要制订检修工作计划，在此阶段必不可少的是证实故障状态的原因，并予以治理。

## 任务2 机械振动信号测试



### 任务目标

**知识目标：**了解振动的概念及分类；了解自由振动、强迫振动及自激振动的定义及振动形成过程；掌握固有频率、共振的基本概念及形成过程；掌握自由振动、强迫振动及自激振动的振动特点；重点掌握振动三要素的基本概念及描述方法。

**能力目标：**掌握精密点检仪的操作方法，能够运用精密点检仪进行参数的选择；能够针对不同类型的设备，布置振动测点的位置。



### 任务引入

利用设备的振动信号来对设备进行故障分析的方法，是企业设备经常采用的故障诊断分析方法。本项目重点叙述了机械振动的基础知识及振动信号的描述方法，为学生后续学习故障诊断技术提供了有力的机械振动基础知识支撑。



## 知识链接

## 1.2.1 振动的概念及分类

各种机器设备在运行过程中，都不同程度地存在振动，这是运行机械的共性。然而，不同的机器或同一台机器的不同部位，以及机器在不同的时刻或不同的状态下，其产生的振动形式又往往是有差别的，这就体现了设备振动的特殊性，所以应当从不同的角度来考察振动问题。机械振动一般有以下几种分类方法。

## 1. 按振动规律分类

按振动的规律，一般将机械振动分为图 1-3 所示的几种类型。

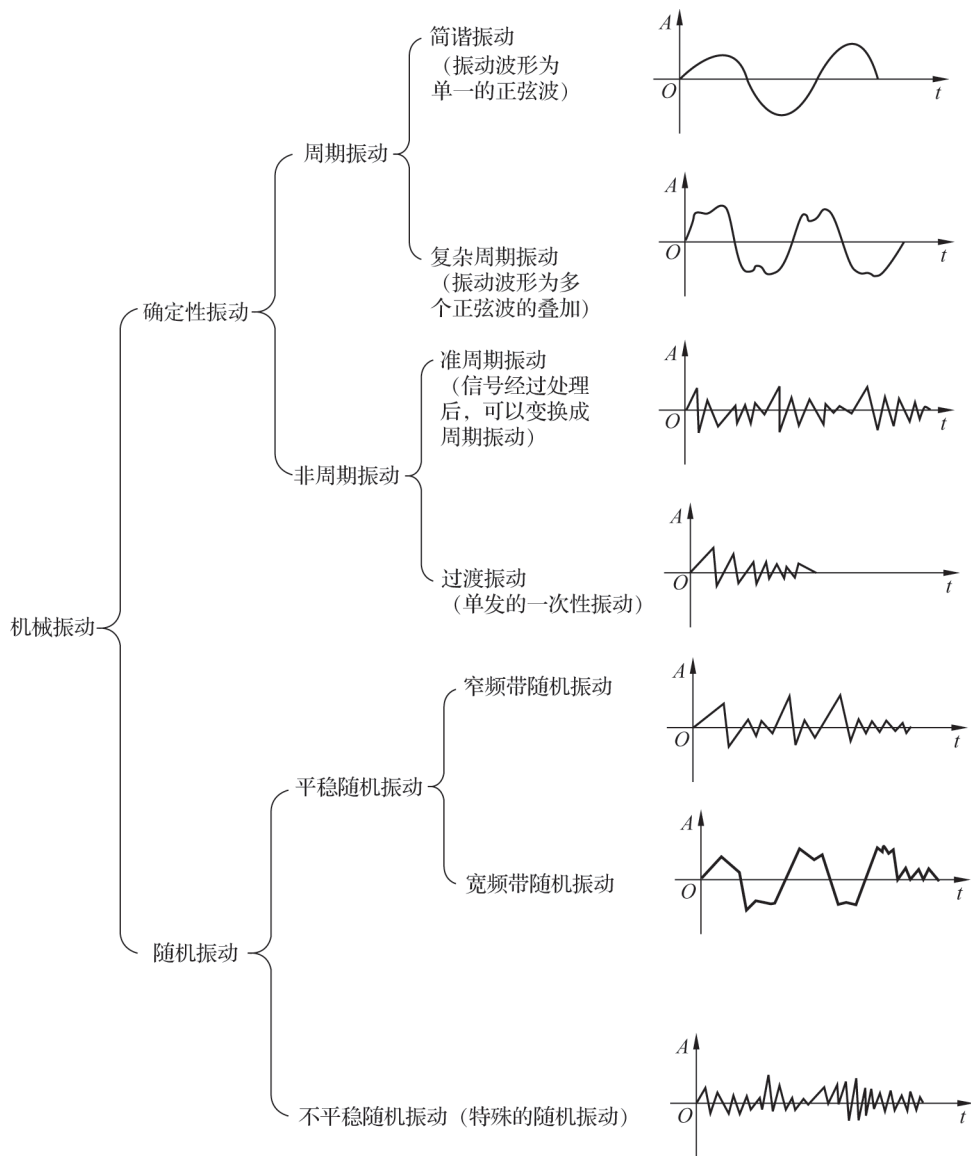


图 1-3 振动规律分类图



这种分类，主要是根据振动在时间历程内的变化特征来划分的。大多数机械设备的振动是周期振动、准周期振动、窄频带随机振动和宽频带随机振动中的一种，或是某几种振动的组合。一般在启动或停机过程中的振动信号是非平稳的。设备在实际运行中，其表现的周期信号往往淹没在随机振动信号之中。若设备故障程度加剧，则随机振动中的周期成分加强，从而整台设备振动增大。因此，从某种意义上讲，设备振动诊断的过程，就是从随机信号中提取周期成分的过程。

### 2. 按振动的动力学特征分类

机器产生振动的根本原因，在于存在一个或几个力的激励。不同性质的力激起不同类型的振动。了解机械振动的动力学特征不仅有助于对振动的力学性质做出分析，还有助于说明设备故障的机理。因此，掌握振动动力学知识对设备故障诊断具有重要的意义。据此，可将机械振动分为三种类型。

#### 1) 自由振动与固有频率

自由振动是物体受到初始激励（通常是一个脉冲力）所引发的一种振动。这种振动靠初始激励一次性获得振动能量，历程有限，一般不会对设备造成破坏，不是现场设备诊断所必须考虑的因素。自由振动给系统产生能量后，系统会产生振动。若系统无阻尼，则系统维持等幅振动；若系统有阻尼，则系统为衰减振动。描述单自由度线性系统的运动方程式为：

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + kx(t) = 0 \quad (1-1)$$

式中， $x$  表示振动位移量。

通过对自由振动方程的求解，导出了一个很有用的关系式。无阻尼自由振动的振动角频率  $\omega_n$  为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-2)$$

式中， $m$  表示物体的质量， $k$  表示物体的刚度。

这个振动频率与物体的初始情况无关，完全由物体的力学性质决定，是物体自身固有的频率，称为固有频率。这个结论对复杂振动体系同样成立，它揭示了振动体的一个非常重要的特性。许多设备强振问题，如强迫共振、失稳自激、非线性谐波共振等均与此有关。

但是要注意，物体并不是一受到激励都可发生振动，这是在做激振试验时应该了解的。

实际的振动体在运动过程中总是会受到某种阻尼作用，如空气阻尼、材料内摩擦损耗等，只有当阻尼小于临界值时才可激发起振动。临界阻尼是振动体的一种固有属性，用  $c_c$ 。